



도시·건축 계획 단계에서의 미세먼지 저감 기법의 저감량 산정 방법 재고찰 - 원단위법을 중심으로 -

Rethinking the Method of Calculating the Amount of Reduction of Particulate Matter Reduction Techniques in the Urban and Architectural Planning Stage

- Focused on the Unit Method Estimating -

이건원*

Gunwon Lee*

* Associate Professor, Dept. of Architecture, Korea Univ., South Korea (unpd.cla@gmail.com)

ABSTRACT

Purpose: This study aimed to review the accuracy of the unit method estimating used to reduce particulate matter when planning city and architecture, and then to present improvement directions. **Method:** In order to achieve the purpose, particulate matter reduction techniques were listed through literature review. In addition, input and initial data for CFD(Computational Fluid Dynamics) simulation were obtained through (Korea Meteorological Administration's) AWS(Automation Weather Station) data and field measurement. And the amount of particulate matter reduction by the particulate matter reduction techniques was calculated using the unit method estimating on the 500m × 500m area of the 1st Phase project area in Godeok International District. Next, CFD simulation was conducted to analyze the path through which particulate matter spreads and reduction amount through three types particulate matter reduction techniques. The unit method estimating and CFD simulation results were compared. Finally, assuming that the difference was caused by the wind, the CFD simulation was conducted by increasing the wind speed to 2m/s, 5m/s, and 10m/s. **Result:** It was found that the amount of particulate matter reduction by CFD simulation was less than the result of calculation by the unit method estimating. As a result of CFD simulation performed to explain this, it was found that the higher the wind speed, the lower the amount of particulate matter reduction. Through this, it was judged that the difference was observed because the unit method estimating did not calculate considering the wind. Through this result, it is thought that the speed of the wind and the direction of the wind should be considered in order to upgrade the unit method estimating in the future. The results of this study contributed to setting the direction of the unit method estimating advancement for use for particulate matter free urban and architectural design.

KEYWORD

미세먼지
CFD 시뮬레이션
미세먼지 저감기법
원단위법

Particulate Matter
CFD Simulation
PM Reduction Technique
Unit Method Estimating

ACCEPTANCE INFO

Received Aug. 9, 2023
Final revision received Aug. 18, 2023
Accepted Aug. 22, 2023

© 2023. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

미세먼지가 사회적 관심으로 자리잡은 2015년 이후, 이를 관리하기 위해 2017년 미세먼지 관리대책 시행, 2018년 『미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법』 제정, 2019년 『재난 및 안전관리 기본법』 개정 등이 이루어졌다. 그만큼 미세먼지는 국민적 관심과 우려의 대상이었다. 이를 해결하기 위해서 미세먼지 관리 기준을 강화하고, 미세먼지 계절관리제를 시행하는 한편, 노후 경유차의 도심 진입을 제한하는 등 다양한 노력이 이루어져 왔다. 이를 통해, 상당한 개선이 이루어졌다고 평가받고 있다.

최근에는 이러한 개선에서 한 발 더 나아가 보다 취약한 지역에 대한 관리를 위해 미세먼지 집중관리구역 지정, 지하철 역사 관리 등 공간 단위의 세밀한 저감 관리가 이루어지고 있다. 이전에는 미처 다

루지 못했던 곳들에 대해서 보다 상세하고 근본적인 대응이 실시되고 있는 상황이다.

이러한 차원에서 도시·건축 계획의 초기 단계에서도 미세먼지 저감을 위한 노력이 이루어지고 있다. 이중 가장 쉽게 사용하고 있는 방법은 미세먼지 저감 기법을 적용함에 따라 미세먼지 저감량을 산정하는 원단위 방법이다. 이러한 원단위 방법은 실험실 데이터를 통해서 미세먼지 저감 시설의 단위 면적 또는 개소 당 저감량을 산정한 후, 계획시 이를 도입하는 물량에 따라 미세먼지 저감량을 추정하는 방식이다. 적용이 용이하고 계획 수립 단계에서도 검토가 가능하며, 특히 공공기관들을 대상으로 시행하고 있는 미세먼지 저감 총량제 등을 시행하며 성과를 관리하기 적합하다는 장점이 있어 널리 사용되고 있다. 하지만 주지하듯, 미세먼지 저감기법들은 실험실 내부와는 달리, 실제 설치될 외부에서는 다양한 외기 환경에 노출된다. 특히, 바람에 의해서 큰 영향을 받는 미세먼지의 특성을 고려할 때, 과연 이러한 저감기법들의 원단위 계산 결과가 얼마나 정확도가 높은지에 대한 검토가 필요함에도 이에 대해서는 면밀하게 이루어지지

는 못하는 상황이다.

이를 위해서 본 연구는 실제 택지개발사업 대상지의 일부 지역을 중심으로 미세먼지 저감 기법을 적용하고, 이를 원단위 계산법으로 계산한 결과와 유동을 고려한 시물레이션 결과와의 비교를 통해서 그 정확도를 검토해보고자 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 다음의 방법을 채택했다. 먼저, 미세먼지의 확산 및 저감과 관련된 위한 기술들에 대해 문헌고찰을 수행하였다. 특히, 미세먼지 저감을 위해 적용이 계획된 기법 세 가지에 대해서 문헌 및 실험데이터 결과를 인용하여 검토하였다. 다음으로, 미세먼지의 확산 상황과 그 안에서의 미세먼지 저감기법에 의한 저감량을 시물레이션하기 위해서 기상 데이터를 취득했고, 현장에서 데이터를 측정하였다. 세 번째로, 평택고덕 택지개발지구 내 일부 지역에 대해서 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD) 분석을 수행하여 원단위 방법으로 계산한 미세먼지 저감량과 시물레이션을 통해 계산한 미세먼지 저감량 결과를 비교·분석하였다. 또한, 추가적으로 원단위 방법과 시물레이션 간의 오차의 원인을 바탕으로 추정하고 바람의 속도를 변화한 시물레이션을 통해 미세먼지 저감량을 산정하여 그 차이를 비교·분석하였다. 이를 통해 해당 결과의 차이를 분석하고, 이와 관련하여 향후 연구가 필요한 이유 등을 도출하였다.

본 연구의 공간적 범위는 택지개발사업에 의해 개발사업이 진행되고 있는 경기도 평택시 내 고덕국제화지구를 연구대상지로 선정하였다. 이 중 실제 설계 및 시공 작업이 구체화되었고 주거와 상업이 혼합되어 있는 500m×500m의 공간을 구체적인 공간범위로 한정하였다.

시간적 범위로써 지형 및 건축물의 형태와 높이, 도로의 형태 등 도시 및 건축 형태 데이터를 구득한 2020년을 기준으로 하였다. CFD 시물레이션 수행 및 분석을 위한 기상 관측 데이터 또한 동일하게 2020년 5월을 기준으로 설정하였다. 5월은 2020년 한 해 중, 일평균 미세먼지 농도가 2번째로 높은 기록을 보였다. 가장 높은 기록을 보인 것은 12월이었으나 12월의 미세먼지 측정 데이터 중 10~11일 기간에 데이터의 결측이 발생해 이를 신뢰하기 어렵다고 판단하여 2번째로 높은 기록을 보유한 5월로 연구 시점을 선정하였다. 아울러, 이 기간은 도시민의 외부활동이 가장 활발한 시기이기도 하여 이를 바탕으로 연구를 진행하는 것이 적절하다고 판단하였다.

내용적 범위는 먼저, 이론고찰을 통해, 국내외 다양한 미세먼지 저감 기술에 대해 검토하여 미세먼지 저감 기술 목록을 검토한 후, 그 중 택지개발사업지구에 적용이 결정된 미세먼지 저감 기술 3가지에 대해서 실험실 결과를 얻어 이를 정리하였다. 다음으로 현장 데이터 취득을 통해 CFD 시물레이션 입력 수치를 결정하였다. 그리고 미세먼지 저감기법의 실험 결과로부터 얻어진 원단위에 의한 저감량 계산과 해당 결과를 적용한 CFD 시물레이션을 통한 미세먼지 저감량 계산 결과를 비교분석하였다. 이를 통해 결과 검토는 물론, 향후 관련 분야의 연구 이슈에 대해 제안하였다.

2. 이론고찰

2.1. 미세먼지

미세먼지(fine dusts, fine particles)는 부유분진(Suspended particles), 입자상물질(Particulate matter) 등 다양하게 불린다. 실제로, 미세먼지의 발생원과 2차 생성에 따라서 먼지, 흙, 그을음, 연기 및 액체 방울, 아황산가스(SO₂), 황산화물(SO_x), 오존(O₃), 일산화탄소(CO), 질소산화물(NO_x), 암모니아(NH₃), 휘발성 유기화합물(VOCs), 납 등을 포함한다. 미세먼지는 그 지름의 크기에 따라 분류한다. 상대적으로 그 크기가 커서 그을음, 연기 등으로 인식될 만큼 큰 입자는 TSP(Total Suspended Particulate matter)라고 부르며, 이 경우 입자의 지름은 60 μm 이하이다. 이것 보다 크기가 작아서 그 지름이 약 10 μm 전후인 입자는 PM10(Particulate Matter 10)이라고 하며, 그 보다 더 작아서 2.5 μm 전후인 경우 PM2.5라고하며, 초미세먼지(Fine Particulate Matter) 또는 극미세먼지로 구분한다.

이 미세먼지가 전세계적 관심의 대상이 된 이유는 이것들이 우리의 건강에 치명적인 피해를 끼치기 때문이다. 실제로, 이 미세먼지가 우리 몸 속으로 들어오면 면역 담당 세포가 이것을 제거하는 과정에서 염증반응이 유발될 수 있고, 이로 인해 천식, 호흡기 및 심혈관계 질환이 발생할 수 있다. 또한, 기관지에 걸리지않고 폐포까지 침투하여 심혈관 질환이나 폐암 등을 일으킬 수 있다. 이러한 이유로 2013년 WHO는 대기오염의 주요 구성요소인 미세먼지를 1군(Group 1) 발암물질로 지정하였다[1]. 따라서 미세먼지 농도의 관련되는 도시민들의 건강과 직간접적으로 연관이 깊으므로 관련 연구는 중요한 의미를 갖는다.

2.2. 선행연구 검토

본 연구에 앞서 관련 선행연구를 다음의 두 가지로 구분하여 검토하였다. 먼저, 도시공간과 미세먼지의 관계성에 대한 분석을 진행한 연구는 크게 회귀분석, 공간보간기법 등의 통계분석을 수행한 연구, CFD 시물레이션을 통해 도시형태에 따른 미세먼지 분포를 분석한 연구로 나뉜다.

먼저, 정종철·이상훈(2018)은 서울시 전역을 공간범위로 삼고, 거리 반비례기법(IDW, Inverse Distance Weighting)을 활용하여 PM10, PM2.5의 지점 데이터를 공간 보간하여 공간분포도를 작성한 후, 토지이용 및 교통량과 미세먼지 분포 간의 상관관계를 분석하였다[2]. 다음으로, 구민아(2019)는 대구광역시 수성구 내 7개 평지형 근린공원을 대상으로 공원 중앙부, 공원의 입구, 기상청 측정치 간의 관계를 회귀분석을 통해 분석한 후, 공원 내 공간차폐율과 미세먼지 농도와의 관계를 분석하였다[3]. 그리고 허유경·강민규(2022)는 수도권(서울특별시, 인천광역시, 경기도)을 대상으로 미세먼지 농도, 미세먼지 나쁨 일수에 토지이용을 포함한 도시공간구조 요인과 기상요인이 미치는 영향을 다중회귀분석과 포아송 및 음이항 회귀분석을 통해 분석하였다. 이에 따라, 기상요인 및 도시공간구조 요인을 종합적으로 고려한 도시계획 수립의 필요성을 주장한 바 있다[4].

Table 1. Summary of literature review

Author (year)	Location	Independent Variables	Method
J.C.Jeong S.H.Lee (2018)	Seoul	Land-use, Traffic volume	IDW krigging, Spatial factor Analysis, Correlation Analysis
M.A.Koo (2019)	Urban Neighborhood Park in Daegu	Space Shielding Rate	Regression Analysis
Y.G.Hur M.G.Kang (2022)	Metropolitan area(Seoul, Incheon, Gyeonggi Province)	Urban Spatial Structure, Meteorological Factors	OLS, Poisson and Negative Binomial Regression Analysis
S.C.Han et al. (2022)	Urban Areas	Trees Planted	CFD
S.H.Hong W.Tian R.Ahn (2020)	Near Miryang Cityhall in Miryang City	Presence of Street Tree, Building Height	
B.Hong B.Lin H.Q.Qin (2017)	He Qingyuan district near Tsinghua University in Beijing	Housing Block Layout, Trees Arrangement	
H.Q.Qin et al. (2020)	Streets in Xi'an city	Street Tree's Biometric and Age, Urban H/W ratio	
J.W.Shin T.Y.Kim K.H.Lee (2004)	Ideal Apartment Complex	Housing Block Layout, Wind Direction	
J.W.Baek et al. (2022)	Housing Renewal Site in Seoul	Micro-climate, Building Height	
W.K.Bae J.C.Park (2022)	Urban Regeneration Project Site in Seoul	Land Use, Width of Road, Presence of Buildings, Land Cover	
Y.N.Jeong (2023)	500m×500m Blocks in Peongtaek	Urban and Architectural Characteristics	
S.W.Nam S.Y.Sung J.S.Park (2020)	6-3 Block in Sejong-si	Building Form, Housing Block Layout	

다음으로 CFD 시뮬레이션을 활용하여 공간 유형에 따른 미세먼지 농도를 분석한 연구는 다음과 같다. 먼저, 한상철 외3인(2022)은 부산 감만동 지역을 대상으로 수목이 초미세먼지 저감에 미치는 효과에 대해서 CFD 시뮬레이션을 통해서 검증했다[5]. 홍석환 외 2인(2020)은 도로 발생 미세먼지가 도시의 형태 및 패턴에 따라 인접 생활권으로 확산되는 양상에 대해서 ENVI-met을 활용한 CFD 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 특히, 가로녹지 유무, 도로변 건축물의 높이의 변화에 주목했다[6].

Bo Hong 외 2인(2017)은 베이징 칭화대학교 인근의 주거블록을 대상으로, 건축물의 배치, 수목의 배치의 변화가 미세먼지 농도에

미치는 영향에 주목하여 두 변수의 조합에 따라 12가지의 다양한 배치 유형을 작성하여 그 차이를 CFD 시뮬레이션을 통해 비교·분석하였다[7]. Hongqiao Qin 외 4인(2020)은 중국 시안시 내 가로를 대상으로 가로수의 종류에 따른 형태, 높이, CBH(Crown Base Height), CD(Crown Diameter), LAI(Leaf Area Index), CV(Crown Volume)과 같은 생육변수(Biometric parameters)와 임령, 가로의 H/W비가 미세먼지 농도에 미치는 영향을 Phoenix 코드의 CFD 시뮬레이션을 이용해서 분석하였다[8]. 신지웅 외 2인(2004)은 아파트의 주동 배치 유형 4가지 및 각 유형별 8개 방위에서의 풍향에 따라 달라지는 공기연령의 변화를 CFD를 통해 분석했다. 이에 따라 고층 아파트의 주동배치 유형에 따른 풍압 차이, 실내의 자연환기 성능, 오염물질의 유동에 대해 고찰하였다[9]. 백지원 외 6인(2022)은 주택재개발사업지의 층수변화가 기온에 미치는 영향을 분석하고, 다시 기온이 미세먼지, 초미세먼지 거동 및 농도에 미치는 영향을 ENVI-met을 활용한 CFD 시뮬레이션을 통해 분석하였다[10]. 다음으로 배웅규·박진철(2022)는 Fluent를 활용한 CFD 시뮬레이션을 통해, 도시재생뉴딜의 마중물사업이 진행된 골목에서의 토지이용의 변화, 녹지 생성을 중심으로 한 토지피복의 변화, 도로 폭원의 변경, 건축물 신축 등의 변화에 의한 국지온도 및 미세먼지 변화를 검토하였다[11]. 그리고 정윤남(2023)은 본 연구의 선행연구의 성격으로, 본 연구와 유사하게 평택 고덕택지개발사업 지구 내 500m×500m 블록 5가지를 대상으로, 건축물의 형태 및 배치, 간격과 배치, 오픈 스페이스와 가로수 등의 도시건축 특성이 미세먼지 농도에 미치는 영향을 Star-CCM+를 활용한 CFD 시뮬레이션을 활용하여 분석하였다[12]. 이와 같이 건축물의 형태, 층수 등 다양한 도시·건축적 요소가 미세먼지 저감에 영향을 미치고 있음을 선행연구를 통해 확인하였다. 남성우 외 2인(2020)은 세종시를 대상으로, 세종시 전역, 세종시 내 첫마을, 세종시 내 6-3생활권을 대상으로 CFD 시뮬레이션을 통해 건축물의 형태, 건축물의 배치 특성에 따라 바람의 유동 및 미세먼지 흐름 특성을 분석하였다[13].

이에 따라 도시·건축 공간의 미세먼지 분포 및 농도를 분석하기 위해서 사용되는 다양한 방법론을 검토했다. 특히, CFD를 기반으로 한 연구가 상당히 많음을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 본 연구의 방법을 설정하였으며, 시뮬레이션 수행시의 착안점을 도출할 수 있었다.

3. 연구 체계 설정

3.1. 연구대상지 설정

본 연구에서는 현재 경기도 평택시 내 건설 중인 고덕택지개발지구 내 서정리 역세권 중심 1단계 구간을 대상 구역으로 설정하여 실측 및 실험데이터를 획득했다. 이러한 실제 데이터를 바탕으로 실제 실험데이터를 1곳의 대표적인 도시공간을 선정하여 연구를 진행했다. 시뮬레이션을 위해 투입된 모델링 데이터, 기상데이터 등의 시점은 2021년을 기준으로 설정했다(Fig. 1).

내용적 범위로 먼저, 이론 고찰 및 선행연구 분석을 통해 도시공간 내 미세먼지의 분포 특성과 관련된 요인들, 그리고 미세먼지 저감을 위해 적용 가능한 기법들을 살펴봤다. 특히, 중점적으로 고덕신

도시에 적용을 예정하는 미세먼지 저감 기법들의 감축효과를 문헌 고찰을 통해서 검토하고, 다음으로 1곳의 시뮬레이션 대상지를 선별하였다. 다음으로 이를 바탕으로 CFD(Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션을 수행했다. 이 결과를 통해서 미세먼지 저감 기법별 저감 효과가 실제로 모사한 유동공간에서의 저감효과가 어떻게 구현될 수 있는 지에 대해서 검토하였다.

본 연구는 경기도 평택시 서정동, 장당동, 고덕면 일대에서 진행되는 평택 고덕국제화계획지구 택지개발 사업지역 중 일부인 1단계 구역을 연구의 공간적 범위로 설정하였다. 해당 구역은 약 2,732천m² (약 83만평)이며, 12,577세대, 28,995명의 인구를 계획하고 있다.

이러한 1단계 개발계획구역 중 본 연구의 CFD 시뮬레이션을 수행할 대상지로 토지이용계획을 기준으로 500m×500m 규모의 공간을 선정하였다(Fig. 2).

선정된 대상지는 1단계 개발계획구역 중 가장 북쪽에 위치하고 있다. 대부분 고층 주거지역으로 구성되고 있고, 동측의 아주 일부

의 저층 주거지역이 포함되어 있다. 또한, 집·분산도로와 국지도로로 둘러싸여 있다. 집·분산도로와 고층 주거지역 사이에는 완충녹지가 있다. 이 유형은 건축물의 높이가 높고, 건폐면적은 낮은 편이다. 남측의 블록은 ‘-자 배치’에 가까우나 북측의 블록은 엷배치와 사선 배치를 이루고 있다. 다른 유형들과 달리 완충녹지가 다양하게 배치되어 있는 것이 특징이다(Fig. 3).

3.2. 적용구간의 기상 현황

1) 기후 및 미세먼지 현황

해당 지역 근처의 기상청 자동기상관측(AWS, Automatic Weather System)소는 평택시 합정동 산 28번지에 해당하는 소사별레포타운 단지 내 위치해 있으며, 이 결과를 바탕으로 평택 고덕택지개발지구의 연간 기후 데이터를 분석하였다. 대체로 국내 평균 기후와 유사한 패턴을 갖고 있으며, 5월의 평균 풍속은 약 2.0m/s 수준으로 나타났다.

또한, 미세먼지 농도를 분석하였는데, 본 연구에서는 도시대기 측정망에 속하는 송북동 행정복지센터 옥상의 미세먼지 측정소 일대의 미세먼지 수치를 분석하였다. Fig. 5.와 같이 고덕 택지개발지구

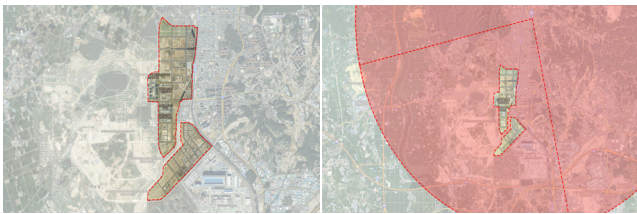


Fig. 1. Location of Goduk Housing Site Development Project of 1st phase (left), Location of Songbuk-dong Air Quality Station (right)

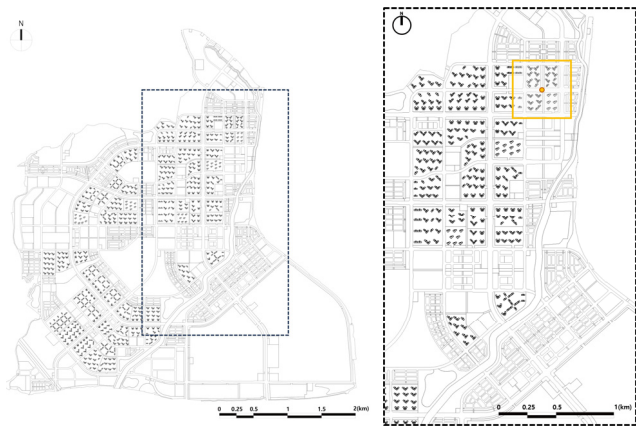


Fig. 2. Phase plan in Goduk International District (left), Location of site for CFD simulation (right)

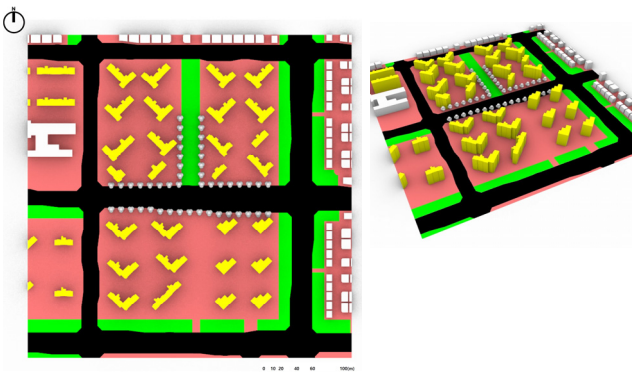


Fig. 3. 3D modeling image

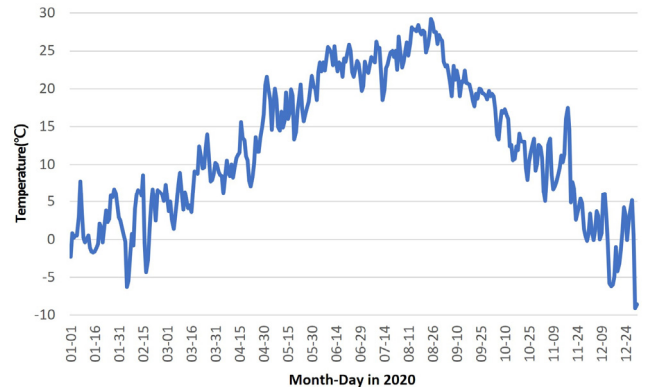


Fig. 4. Annual temperature at the climate station (unit: °C)

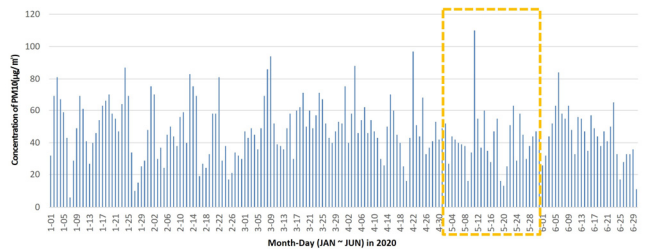


Fig. 5. PM10 concentration at the station (JAN~JUN) (unit: µg/m³)

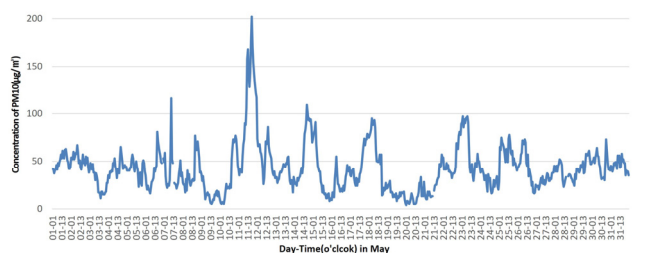


Fig. 6. PM10 concentration by times (in May) (unit: µg/m³)

일대는 1월부터 5월까지 큰 변화폭의 미세먼지 농도가 측정되었다. 특히, Fig. 6.과 같이 4월 말부터 5월 중순에 해당하는 기간에는 시간당 PM10의 농도가 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준을 보이기도 했다. 이러한 미세먼지 농도는 다른 해와 유사하게 5월 말부터 점차 낮아지기 시작했다. 5월의 높은 미세먼지 농도는 상반기에서 가장 높은 수치이며, 2020년 전체 기간 중 12월에 이어 두 번째로 높은 수치이다. 다만, 12월의 경우 일부 데이터에 결측치가 있어 5월을 분석을 위한 기준 기간으로 설정했다.

3.3. 시뮬레이션 시작값 설정을 위한 현장 측정

CFD 시뮬레이션의 시작값을 설정하기 위해 본 연구는 현장 측정을 실시하였다. 측정시기는 2020년 5월 9일부터 11일까지 72시간을 기준으로 측정하였다. 진행단계 및 방법은 첫째, 현장 지점 사전 선정 및 사전 점검, 둘째, 장비 설치 및 조사, 셋째, 72시간 이상의 모니터링 및 측정 실시, 넷째, 데이터 확인 및 철거, 다섯째, 데이터 분석의 단계를 거쳐 대상지의 대기환경을 측정하였다.

측정지점은 아래 Fig. 7.과 같이 4개의 지점에서 측정하였다.

측정지점의 설정 원칙은 대기오염공정시험기준 ES 01115.1(환경대기 시료채취 방법)에 따라 대기정체 예상 지역, 예상오염원(도로)로부터 200m 이내, 측정 지점 간 200m 이내, 주변 건조물 및 식재와 1.5m 이상 이격을 원칙으로 하여 설정하였다. 현장 측정에 사용된 측정기기는 AirGuardK OAQ Station이며, 미세먼지(PM10, PM2.5), 온도, 습도의 측정이 가능하다. 각 센서의 성능 스펙은 다음과 같다. 미세먼지 측정은 광산란(적외선) 검출 방식으로 0~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (오차범위 $\pm 1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이내), 온도는 $-40\sim 125^\circ\text{C}$ (오차범위 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ (20~40 $^\circ\text{C}$), $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 이하 (0~70 $^\circ\text{C}$)), 습도는 상대습도를 측정하며, 0~100%(오차범위 $\pm 3.0\%$ (20~80%))이다.

측정 결과 1번 지점에서의 PM10이 평균 62.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5가 평균 32.61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기록되었다. 2번 지점에서는 PM10이 평균 60.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5가 평균 31.39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 기록되었다. 3번 지점에서는 PM10이 평균 55.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5가 평균 29.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 기록되었다. 4번 지점에서는 PM10이 평균 59.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5가 평균 30.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 기록되었다(Table 2.).

이와 같이 미세먼지 유입량은 최대치인 4개 지점 PM10 최대치인

145 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 상회하는 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정하여 극한 조건을 설정했다. 또한, 앞선 대상지의 미기후 특성 및 미세먼지 특성을 분석했을 때, 시뮬레이션을 위한 풍향 및 풍속을 미세먼지 농도가 높은 봄·가을의 주 풍향인 서측 방향, 2.0m/s로 설정했다.

3.4. 시뮬레이션 모델링 및 경계조건

1) 모델링

본 연구는 연구의 대상지의 기본 도시·건축형태(건물, 도로 등)에 대한 자료를 토지정보원의 수치지형도 데이터(2015)를 활용하되, 최신의 정보를 항공사진 등을 참고하여 보완하였다. 또한, 공간정보와 토지피복자료는 'V-world'를 참고했으며 녹지와 아스팔트 등의 피복정보를 보완하였다.

이러한 정보들을 바탕으로 해서 모델링을 실시했다. 도메인은 Hu & Wang(2005)의 연구 기준에 따라[14] 가로와 세로는 5배, 높이는 10배를 상정하여, 0.5km \times 0.5km \times 0.1km에 도메인은 2.5km \times 2.5km \times 1km로 설정하였다.

이렇게 만들어진 모델을 기반으로 Trimmed Mesh와 Prism Layer를 3개 적용하여 구체적인 부분을 분석하고자 하였다. 이를 통해 생성된 격자는 Fig. 8.과 같다. 격자의 수는 약 1.3천만 개가 생성되었다. 격자 생성에는 시뮬레이션과 동일하게 Star-CCM+를 활용하였다.

2) 경계조건 및 물리모델 설정

CFD 시뮬레이션에 적용된 지배방정식은 Navier-Stokes 방정식이며, 일반적으로 유동 시뮬레이션에서 가장 많이 사용되는 난류 모델인 Realizable K-epsilon Turbulence 가 적용되었다.

기반이 되는 기상데이터는 앞서 서술한 평택시 내에 위치한 기상청 AWS 데이터 및 미세먼지 측정소, 연구진이 설치한 미세먼지 측정장치 결과를 기반으로 하여, 미세먼지 농도가 높은 봄, 가을의 주요 풍향인 서풍을 주풍향으로 평균 풍속 2.0m/s의 바람이 불어오는 것으로 가정하였다. 또한, 평균 대기 온도는 16.5 $^\circ\text{C}$ 로 상정하였다(Table 3.).



Fig. 7. Measurement location

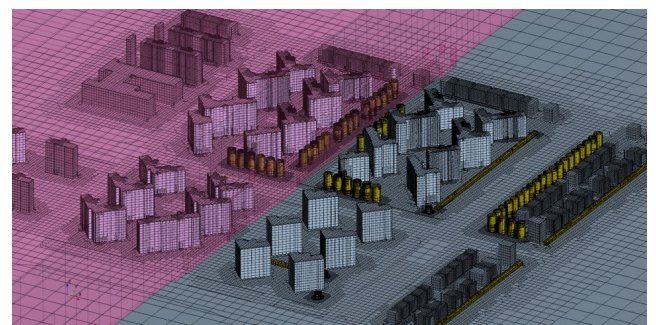


Fig. 8. Mesh results

Table 2. Descriptive statistics of PM10 by locations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Min	Max	Ave.	S.D.
1	1	129	62.3	40.9
2	1	145	60.0	41.6
3	1	139	55.6	41.0
4	1	136	59.1	41.3

Table 3. Boundary conditions

Contents		Conditions
Domain Size		2,500m×2,500m×1,000m
Cell Type		Trimmed Mesh
Cell		13,000,000
Prevailing Wind Direction		West(270°)
Inlet	Velocity	2.0m/s(Height: 85m)
	Temperature	16.5°C
Outlet Condition		Pressure Outlet
Surface Condition		Concrete, Asphalt, Green, Soil

Table 4. Property of surface material

	ρ kg/m ³	Cp J/kg·K	k W/mK	ϵ
Concrete	2050	960	1.0	0.81
Asphalt	2120	920	0.698	0.96
Green	1500	1842	2.6	0.6
Water	1000	4187	0.598	0.1
Soil	1500	1842	2.6	0.6

분석에 적용된 피복에 대한 경계조건은 다음 Table 4.와 같다. 피복은 대지, 녹지, 아스팔트, 건축물(콘크리트), 흙으로 구분하였으며, 각각의 특성에 맞춰 밀도(ρ), 비열(Cp), 열전도계수(k), 방사율(ϵ) 등의 열복사 특성 값을 정의하였다.

3.5. 미세먼지 저감 기법 검토

본 연구의 대상지는 택지개발사업지구이므로, 아파트로 대표되는 고층 주거건축물 및 외부공간에 적용가능한 미세먼지 저감 기법에 대한 검토가 필요하다. 미세먼지 저감과 관련된 기술은 크게 차단, 흡수·흡착, 데이터 취득 및 정보제공을 위한 지원 시스템과 같이 세 가지로 구분이 가능하다. 이들과 관련된 다양한 미세먼지 저감 기술이 존재하는데, 그 중 이권원·정윤남(2023)에 따르면, 아파트 단지 외부공간에 적용 가능한 기술로는 차단과 관련하여 도시숲, 옥외용 공기정화 및 차단 돔 등이, 흡수·흡착과 관련해서는 식생 집진패널형 저감시설, 스마트 클린 버스승강장, 쿨링미스트 시스템, 초절전형 미세먼지 저감기, 옥상녹화 및 벽면녹화, 이끼모듈 패널, 스모그 프리타워, 공기정화벤치, CMA, 광촉매 도료 등이 있었다. 그 외에도 데이터 취득 및 정보 안내 시스템인 미세먼지 안내 신호등이 있다[15].

이중 고덕국제화지구의 미세먼지 저감을 위해 계획단계에서 고려된 저감기술은 도시숲, 식생 집진 패널형 저감시설, 스마트 클린 버스승강장, 쿨링미스트 시스템, 미세먼지 안내 신호등 등이다. 이중 미세먼지 안내 신호등을 제외한 쿨링 미스트, 식생 집진 패널형 저감시설, 미세먼지 차단 도시숲 총 3가지 실제 미세먼지 저감 기술들이 선정되었다. 먼저, 쿨링 미스트 시스템은 노즐의 크기에 따라 그 효과가 차이가 있는데, 0.6mm 노즐의 경우 96.1%의 저감 효과가 있는 것으로 알려져 있다[16]. 이는 실험실 연구로, 800mm(W)×1,000mm(D)×1,950mm(H) 크기의 투명 박스 내에서 바람의 효과를 제거한 상태에서 측정된 결과이다. 다음으로 식생 집진 패널형

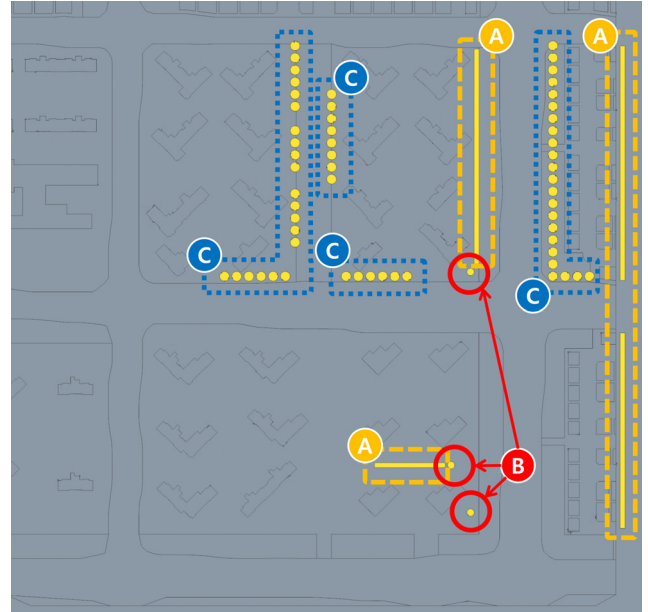


Fig. 9. Location of PM reduction techniques

저감시설은 미세먼지가 고농도인 지역에서 3m 반경 안에서 90%의 저감 효과가 있는 것으로 알려져 있다[16]. 이 결과는 현장에서 측정된 것으로, 바람을 통제하지는 못한 결과이다. 이를 보완하기 위해서 0.5m/s, 2m/s의 경우에 대해서 CFD 시뮬레이션을 수행했고, 바람이 강해짐에 따라 정화영역이 축소되는 것으로 나타났다. 도시숲은 PM10의 경우 10~23.46% 수준으로, PM2.5의 경우 10~17.5%의 저감 효과가 있는 것으로 알려져 있다[16].

3.6. 미세먼지 저감 기법 모델링

이 세 가지 기법들을 대상지에 적용하기 위해서 모델링하였다. 쿨링 미스트는 광범위하게 미세먼지의 농도가 관찰될 것으로 예상되는 A지점에 설치하였으며, 식생 집진 패널형 저감시설은 은 좁지만 높은 미세먼지 농도가 예상되는 지역인 B지점에, 미세먼지 차단 도시숲은 상대적으로 열지만 넓은 지역에 걸쳐 미세먼지가 분포할 것으로 예상되는 C지점에 설치하였다(Fig. 9.).

쿨링 미스트는 총 4개 지점에 선형으로 모델링하였으며, 보통 보행자의 보행로를 따라 설치되므로 4m 폭에, 4m 높이를 갖도록 모델링하여 각 길이는 180m, 200m, 160m, 60m로 설치하였다. 실제 모델링에서의 측정된 총 체적은 약간 큰 9,622m³으로 모델링되었다. 식생 집진 패널형 저감시설은 총 3개 지점에 직경 6m, 높이 5m의 원통형으로 모델링하였다. 모델링 상의 체적은 약간 작은 416m³로 모델링되었다. 마지막으로 미세먼지 차단 도시숲은 나무를 모델링한 것으로 직경 4.3m, 높이 10m의 원통형으로 모델링하였고, 나무의 간격은 서로 10m 가 이격되도록 하였다. 이에 총 58그루가 모델링되었다. 모델링 상의 체적은 8,551m³이다.

이들은 도시숲, 식생 집진 패널형 저감시설, 쿨링 미스트 시스템이다. 이 기술들을 시뮬레이션에 적용하기 위해서 보다 구체적으로 수치화하였다.

이은엽 외(2020)의 실측 연구에 따르면, 쿨링 미스트 시스템은 평균 90% 정도의 저감효과를 보였으며, 이를 수치화하면 10초당 13.6

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감 효과로 1초당 $1.36\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 수치화가 가능하다. 다음으로, 식생 집진 패널형 저감시설의 저감효과는 평균 50% 정도, 이를 수치화하면 10초당 $7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감 효과로 1초당 $0.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 나타났다. 미세먼지 차단 도시숲은 평균 10% 정도, 이를 수치화하면, 10초당 $2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감 효과로 1초당 $0.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감 효과가 있는 것으로 나타났다[16]. 이 수치를 바탕으로 각 모델에 porous 효과를 부여해서 미세먼지가 바람을 타고 모델에 부딪히면, 초당 해당 수치만큼 저감되도록 하였다. 이를 정리하면 Table 5.와 같다.

4. 미세먼지 저감 효과 비교 분석

4.1. 미세먼지 저감 효과 결과 분석

앞서 검토된 미세먼지 저감 기법들을 적용 체적과 원단위 저감 효과를 이용해서 계산하는 방법으로 단순 계산할 때, 총 20분 동안 22.4g이 저감된 것으로 나타났다. 계산과정에 활용된 수치들을 정리하면 Table 6.와 같다.

4.2. 시뮬레이션 결과 분석

1) 시뮬레이션 결과

서측 방향에서 바람이 유입되며, 이러한 바람이 서남측의 건축물에 의해서 방해가 이루어지는 것이 관찰되었다. 북측 블록의 경우에는 엇배치 및 사선배치의 공동주택 블록에 의해서 바람의 유동 속도가 떨어지는 것이 관찰된다. 이러한 이유로 대상지 중간 이전부터 바람의 유입이 어려운 곳이 다수 관찰된다. 이에 비해 남측 블록의 경우에는 북측 블록에 비해 큰 방해 없이 바람의 유동이 관찰되었다. 각 공동주택의 서남측 끝의 주동 후면에서 바람의 유입이 어려운 곳이 다수 관찰되다보니 최서측의 저층 주거지역에서도 바람의 유입이 어려운 곳이 다수 관찰되었다(Fig. 10.).

시뮬레이션 결과를 유형화할 때, 공기의 정체로 인해서 미세먼지 농도가 높게 나타는 지점은 크게 두 가지로 정리할 수 있다(Fig.

11.). 첫 번째는 사선배치 주동의 특성에 의해서 바람의 반대편에서 발생하는 공기 정체에 의한 미세먼지 정체로, 이는 Fig. 11.에서 A로 표시된 영역들에서 관찰할 수 있다. 두 번째는, 서측에서 유입되어 다수의 엇배치 및 사선배치의 주동과의 충돌로 동측의 끝단에서 넓게 나타나는 공기정체에 의한 미세먼지 농도 축적으로, Fig. 11.에서 B로 표시된 영역들에서 관찰할 수 있다. 전체적으로 바람의 분석과 동일하게 북측 블록에서 공기 정체에 의한 미세먼지 고농도 현상이 관찰되었다. 동일한 동측에서도 북측 블록쪽에서 미세먼지의 농도가 높은 구간이 넓게 관찰되었다.

2) 저감효과 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과 서측에서 바람을 타고 미세먼지가 유입되며, 시간이 지나며 대상지의 전체 미세먼지 농도는 균질하게 높아지는 것이 관찰되었다. 북측 블록과 남측 블록에 설치된 미세먼지 저감시설의 차이 및 건축물 주동의 형상이 다르므로 북측 블록과 남측 블록으로 나눠서 설명하고자 한다(Fig. 12.).

먼저, 북측 블록의 경우에는 중앙의 아파트에 의해서 가려진 동측 지역에는 일시적으로 미세먼지 농도가 낮은 것이 관찰되었다. 특히, 북측 중앙의 녹지축 옆에 설치되어 있는 도시숲길을 지나면서 미세

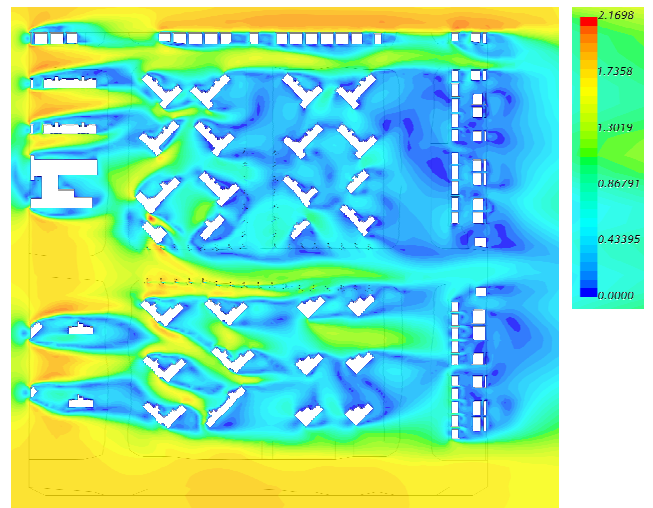


Fig. 10. Simulation result (wind velocity)

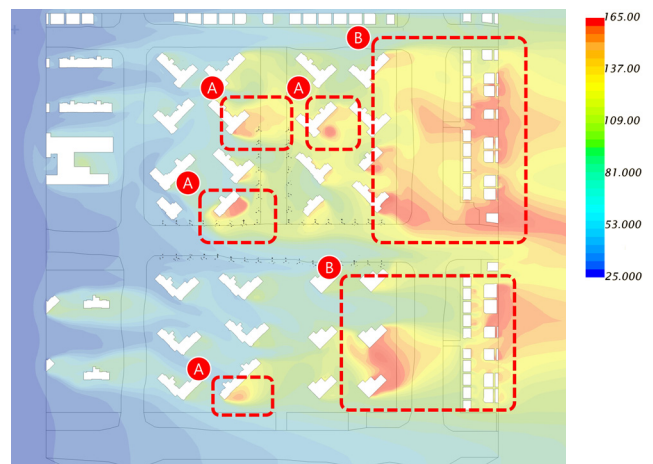


Fig. 11. Classification of simulation result (particulate matter concentration: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Table 5. Details of reduction techniques

	Size		Number	Volume (m ³)	Reduction Amount ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$)
	W (m)	H (m)			
Cooling Mist	4	4	600**	9,622	1.36
Vegetation and Dust Collection Panel	6*	5	3	416	0.7
Urban Forest Road	4.3*	10	58	8,551	0.2

*: Diameter, **: Total Length(m)

Table 6. Reduction of PM10

	Volume (m ³)	Time (second)	Reduction of PM10	
			μg	g
Cooling Mist	9,622	1,200	11,646,400	11.55
Vegetation and Dust Collection Panel	416	1,200	499,200	0.50
Urban Forest Road	8,551	1,200	10,261,200	10.26
Total			22,406,800	22.40

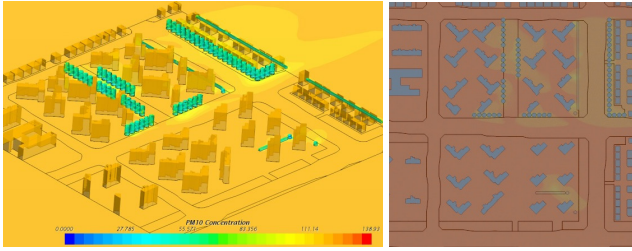


Fig. 12. Simulation result of reduction of particulate matter

먼지 농도가 낮아지는 것이 관찰되었다. 다만, 시간이 지나면서 북측과 남측방향에서 유입되는 미세먼지에 의해 다시 미세먼지 농도가 높아지는 것이 관찰되었다. 하지만 이러한 미세먼지는 동측 도로 변의 쿨링 미스트 시스템과 도시숲길을 만나면서 미세먼지 농도가 크게 감소하는 관찰되었다.

남측 블록의 경우에는 북측에 비해서 상대적으로 건축물 주동이 건축면적이 작고, -자 배치에 가까워 미세먼지의 농도가 균질하게 나타났다. 다만, 남측 블록의 동측 끝에 위치해있는 쿨링 미스트 시스템과 식생 집진 패널형 저감시설을 지나면서 일부 국지지역을 중심으로 미세먼지 농도가 떨어지는 것이 관찰되었다. 다만, 시설 설치 지점의 면적이 매우 좁아서 그 효과가 아주 크지는 않은 것으로 관찰되었다. 이러한 시뮬레이션을 바탕으로 저감량을 산정한 결과 총 18.6g이 저감된 것으로 나타났다. 이 수치는 1,200초(20분)의 시뮬레이션 수행 동안에 저감기법 모델링에서 porous가 설정되어 있는 면을 통과해서 도메인 상에서 사라진 미세먼지의 양이다.

3) 바람 속도 변화에 따른 저감효과 시뮬레이션 결과

바람 속도에 따라 미세먼지 저감효과가 어떻게 영향을 받는지 추가로 확인하기 위해서 초기 시뮬레이션을 위한 2m/s보다 바람 속도를 빠르게 변화시켜 미세먼지 저감 양상을 살펴봤다. 5m/s, 10m/s로 속도를 증가시키며 미세먼지 저감량을 살펴봤다. 각 시뮬레이션 결과는 Figs. 13.~15.와 같다.

또한, 각 시뮬레이션 결과 미세먼지 저감량은 5m/s일 경우에는 11.8g이었으며, 10m/s일 경우에는 8.3g이었다. 앞서 살펴본 2m/s일 경우 미세먼지 저감량이 18.6g이었다는 것을 고려할 때 미세먼지 저감량이 상당히 줄어든 것을 알 수 있었다. 이 수치는 바람의 거동을 전혀 고려하지 않고 원단위만으로 미세먼지 저감량을 산정한 것보다 상당히 낮은 수치인 것으로 나타났다.

각 시뮬레이션 결과를 보다 정량적으로 분석하기 위해서 시뮬레이션 도메인 공간에 대해서 5m 간격으로 총 5,604개의 포인트에서 미세먼지 농도를 추출하였다. 각 모델별로 이 수치들의 평균 및 표준편차를 살펴봤다. 먼저, 평균의 경우, Fig. 16.과 같이 2m/s인 경우가 148.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 5m/s의 149.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 10m/s의 149.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 평균적인 미세먼지 농도가 낮은 것으로 나타났다.

또한, 각 측정 포인트 간의 미세먼지 농도 차이를 살펴보기 위해서 시뮬레이션 결과에서 추출한 값들의 표준편차를 계산하였다. 아래 그래프와 같이, 2m/s인 경우가 4.5로, 5m/s의 2.4, 10m/s의 1.9에 비해서 높은 것으로 나타났다. 이 결과는 바람 속도가 낮은 2m/s인 경우, 전체 도메인에서 미세먼지 농도가 높은 곳과 낮은 곳의 차이가 바람속도가 빠른 모델들 보다 크다는 것이다. 즉, 바람의 속도

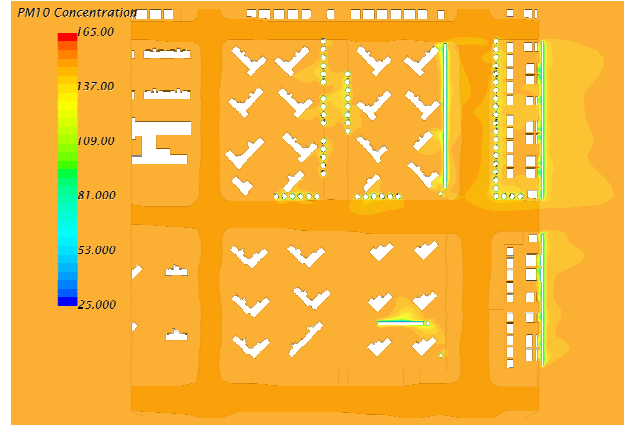


Fig. 13. Simulation result (wind speed: 2m/s)

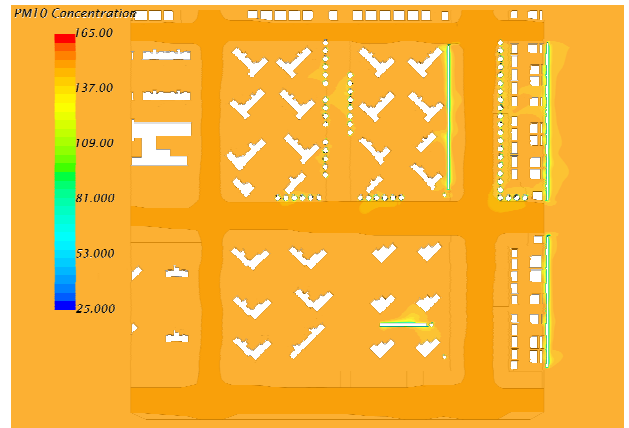


Fig. 14. Simulation result (wind speed: 5m/s)

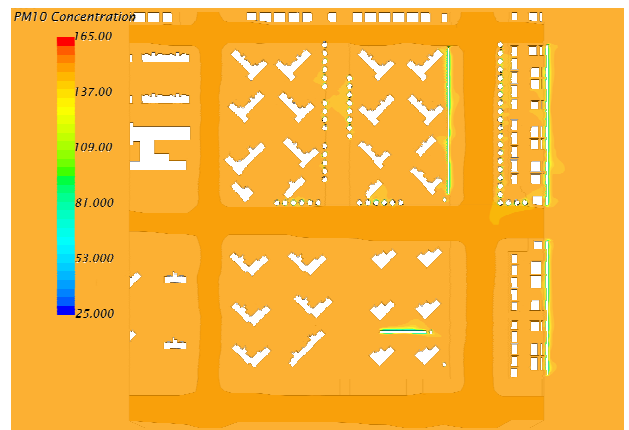


Fig. 15. Simulation result (wind speed: 10m/s)

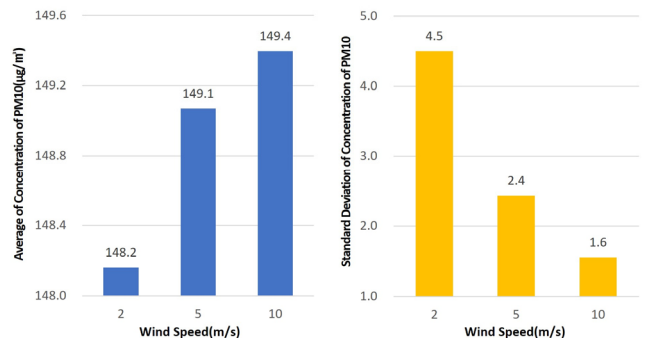


Fig. 16. Average (left) and Standard deviation (right)

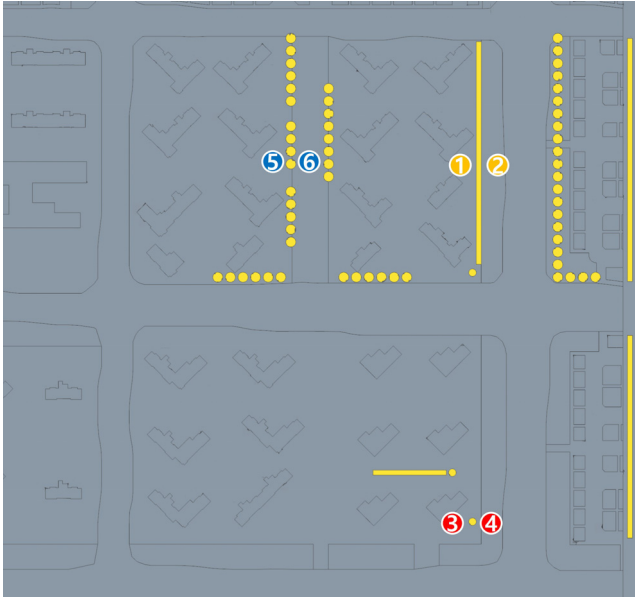


Fig. 17. Location of measurement points

Table 7. PM10 reduction effect by measurement points

		2m/s	5m/s	10m/s
Cooling Mist	①	125.8	126.1	126.6
	②	104.8	123.4	123.1
	Effect	-21.0	-2.7	-2.5
Vegetation and Dust Collection Panel	③	126.4	126.4	126.6
	④	111.2	125.2	125.6
	Effect	-15.2	-1.2	-1.0
Urban Forest Road	⑤	126.1	126.5	126.6
	⑥	105.0	124.6	124.7
	Effect	-21.1	-1.9	-1.9

가 낮은 경우, 저감시설에 의한 미세먼지 농도가 저감효과가 크게 나타나므로 포인트 별로 미세먼지 농도의 차이가 크게 나타나는 것이다.

평균과 표준편차 통해 앞서 정성적으로 시뮬레이션 결과 이미지를 통해 미세먼지 저감효과를 살펴본 결과와 동일한 결과를 정량적 분석에서도 확인할 수 있었다.

Fig. 17.과 Table 7.에서 볼 수 있듯이, 각 저감기법마다 바람의 흐름 전과 후의 미세먼지 저감량을 살펴보기 위해서 6개의 지점을 설정하여 미세먼지 농도의 변화를 살펴봤다. 결과적으로 2m/s에서 미스트의 경우에는 미스트의 앞과 뒤의 지점에서 $21\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감 효과가 관찰되었다. 또한, 식생 집진 패널의 경우에는 $15.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감 효과가 관찰되었으며, 도시숲에서는 $21.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감 효과가 관찰되었다. 다음으로 5m/s에서 미스트의 경우에는 미스트의 앞과 뒤의 지점에서 $2.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감 효과가 관찰되었다. 또한, 식생 집진 패널의 경우에는 $1.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감 효과가 관찰되었으며, 도시숲에서는 $1.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감 효과가 관찰되었다. 10m/s에서 미스트의 경우에는 미스트의 앞과 뒤의 지점에서 $2.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감 효과가 관찰되었다. 또한, 식생 집진 패널의 경우에는 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감 효과가 관찰되었으며, 도시숲에서는 $1.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저감 효과가 관찰되었다.

이 분석에서도 바람의 속도가 증가하면서 미세먼지 저감 효과가 저감됨을 확인할 수 있었다. 다만, 바람의 속도가 증가함에 따라서 그 효과가 비례적으로 감소하는 것은 아니며 도시숲의 경우에는

5m/s와 10m/s에서 저감효과의 차이가 없었다. 본 연구에서 0m/s부터 바람 속도를 점진적으로 증가시키면서 시뮬레이션을 수행한 것은 아니므로 바람 속도가 증가함에 따라서 미세먼지 저감기법의 저감효과는 저감되는 것은 확인할 수 있으나 이들 간의 보다 정밀한 함수관계를 밝히기는 어려웠으나 본 결과를 통해 추가적인 연구를 통해 이들의 함수 관계에 대해서 보다 면밀하게 검토할 필요가 있음을 발견할 수는 있었다.

5. 결론

5.1. 결과의 종합

국민적 관심에 의해서 미세먼지의 관리를 위한 다방면에서의 노력이 이루어졌다. 이는 시민의 삶을 담아내는 도시·건축 분야에서도 예외는 아니었고, 이에 따라 도시·건축 공간에 적용할 수 있는 미세먼지 저감 기법들이 개발되어왔다. 또한, 이를 도시·건축공간에 적용하는 기법과 그 기준들 역시 개발되었고, 이는 실무에서 적용할 수 있도록 저감기법별 원단위로 정리되어 배포되어 설계 단계에서 활용할 수 있도록 개발되기도 하였다.

본 연구결과를 통해서 원단위를 기반으로 미세먼지 저감량을 산정하는 방식이 다소 오차가 있다는 것이 밝혀졌다. 그 원인은 다양할 수 있으나 본 연구에서는 그 원인 중 하나로 유동 조건을 주목하였다. 실제로, 미세먼지가 바람의 흐름을 타고 거동하는 것은 상식적인 수준에서 이해될 수 있기 때문이고, 이 미세먼지를 저감하는 장치나 기법들 역시 바람의 유동을 고려해서 설치되어야 하기 때문이다. 또한, 그 기법들의 효율 역시도 바람과 관련이 깊을 것이기 때문이다. 본 연구에서는 미세먼지 저감 기법별 저감량 산정에 있어서 보다 정교한 수치와 기준이 개발될 필요가 있다는 점을 환기하는 연구로, 바람의 다양한 강도와 방향 등을 모사하며 그 효과를 측정하는 연구는 아니기 때문에 어느 수준이 적절하다고 판단할 수는 없지만 대체로 바람의 강도가 높아질수록 본 연구에서 검토한 도시숲, 식생 집진 패널형 저감시설, 쿨링 미스트 시스템의 미세먼지 저감 효율은 떨어지는 것으로 나타났다.

실제로, 본 연구의 결과인 바람속도에 의한 저감기법의 효율성에 관련한 부분은 기존 연구들과도 유사하게 나타났다. 먼저, 바람속도와 미스트의 가스 물질의 저감 효율과 관련해서는 Zhichao Liu et al.(2011)에서도 바람의 속도가 빠를수록 미스트의 가스를 저감시키는 효율이 떨어지는 것을 지적하고 있다[17]. 그리고 이은엽 외(2020)에서도 바람속도가 빨라진 경우 식생 집진 패널형 저감시설의 효율이 떨어지는 것을 CFD 시뮬레이션을 통해 확인한 바 있다[16]. 또한, Chiara Letter-Georg Jäger(2020)의 연구에서는 수중에 따라 차이가 있지만 식생의 미세먼지 흡수 능력이 0m/s에서 1m/s까지는 높아지지만, 오히려 1m/s를 넘으면서 크게 저하되는 것을 지적하고 있다[18]. 이러한 점을 고려할 때, 미세먼지 저감 기법별 원단위 개발시 바람에 대한 부분은 반드시 고려가 될 필요가 있다고 사료된다. 또한, 각 저감기법별 효율적인 바람의 속도, 바람의 방향 등에 대한 최적 수치 도출과 관련된 연구 역시 후속적으로 진행될 필요가 있다.

5.2. 시사점

본 연구를 통해 미세먼지 저감 기법별 저감량 산정을 위해 원단위 기법의 보완 필요성을 밝힐 수 있었다. 특히, 본 연구에서는 바람의 존재와 바람의 속도가 고려될 필요가 있다는 점을 밝혀냈다. 가능하다면 설계단계에서 시뮬레이션이 수행되는 것이 가장 좋겠지만 시간 및 비용 차원에서 이는 어려운 일일 수 있으므로 이를 대체할 수 있는 원단위 개발시 몇 가지 중요한 조건들이 동시에 검토된 원단위 개발이 필요할 것으로 사료된다.

이러한 본 연구 결과는 도시·건축 설계 시, 미세먼지 저감을 위해 다양하게 도입되는 저감기법들을 적용하고 그 효과를 추정하는 과정에 대한 상세한 연구의 필요성을 제시했다는 점에서 의의를 지닌다. 실제로 다양한 미세먼지 저감 기법이 개발된다고 해도 도시건축 설계 단계에서 이들의 외부공간에서의 설치 위치, 설치 방향과 그에 따른 저감 효과 추정은 반드시 필요하다. 그러한 점에서 본 연구 결과는 이러한 실무분야에서의 참고를 위한 추가적인 향후 연구의 방향을 제시했다는 점에서 의의를 갖는다.

다만, 본 연구 결과는 특정한 도시·건축 형태를 갖는 대상지만을 검토했고, 미세먼지 유동에 영향을 미치는 온도, 바람 속도, 바람 방향, 미세먼지 양, 수목의 밀도, 도로 위의 자동차의 존재 등 다양한 실질적인 변수들을 모두 고려하지 못했다는 점 역시 한계를 지닌다. 이러한 한계는 향후 연구들을 통해서 해결해나갈 필요가 높다.

References

[1] IARC(International Agency for Research on Cancer), Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths, WHO(World Health Organization), 2013.10.

[2] 정종철, 이상훈, 서울시 토지이용과 교통량에 따른 미세먼지의 공간분포, 지적과 국토정보, 제48권 제1호, 2018.06, pp.123-138. // (J.C. Jeong, P.S.H. Lee, Spatial distribution of particulate matters in comparison with land-use and traffic volume in Seoul, Republic of Korea, Journal of Cadastre & Land InformatiX, 48(1), 2018.06, pp.123-138.)

[3] 구민아, 도시근린공원 미세먼지(PM)저감과 공간차폐율과의 관계: 대구광역시 수성구 근린공원을 중심으로, 한국조경학회지, 제47권 제6호, 2019.12, pp.67-77. // (M.A. Koo, The relationship between particular matter reduction and space shielding rate in urban neighborhood park, Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture, 47(6), 2019.12, pp.67-77.)

[4] 허유경, 강민규, 도시공간구조와 기상요인이 계절별 고농도 미세먼지 발생에 미치는 영향에 관한 연구, 국토계획, 제57권 제1호, 2022.02, pp.145-160. // (Y.G. Hur, M.G. Kang, The effects of urban spatial structure and meteorological factors on the high concentration of fine dust pollution, Journal of Korea Planning Association, 57(1), 2022.02, pp.145-160.)

[5] 한상철 외 3인, 수목의 초미세먼지(PM2.5) 저감 효과에 대한 CFD 수치 모의: 부산 감만동 지역을 대상으로, 대한원격탐사학회지, 제38권 제5호, 2022.10, pp.851-861. // (S.C. Han et al., CFD simulations of the trees' effects on the reduction of fine particles (PM2.5): Targeted at the Gammandong area in Busan, Korean Journal of Remote Sensing, 38(5), 2022.10, pp.851-861.)

[6] 홍석환, 텐완팅, 안로사, 가로녹지 및 건물 높이가 미세먼지 농도에 미치는 영향, 한국환경생태학회지, 제34권 제5호, 2020.10, pp.466-482. // (S.H. Hong, W. Tian, R. Ahn, 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), 2020.10, pp.466-482.)

[7] B. Hong, B. Lin, H. Qin, Numerical investigation on the coupled effects of building-tree arrangements on fine particulate matter (PM2.5)

dispersion in housing blocks, Sustainable Cities and Society, 34, 2017.10, pp.358-370.

[8] H. Qin et al., How dynamic growth of avenue trees affects particulate matter dispersion: CFD simulations in street canyons, Sustainable Cities and Society, 61, 2020.10, 102331.

[9] 신지용, 김태연, 이경희, 아파트의 실내의 공기질 향상을 위한 주동 배치 계획 연구, KIEAE Journal, 제4권 제3호, 2004.09, pp.195-202. // (J.W. Shin, T.Y. Kim, K.H. Lee, A study on the site planning of an apartment complex for improving the outdoor and indoor air quality, KIEAE Journal, 4(3), 2004.09, pp.195-202.)

[10] 백지원 외 6인, 주택재개발사업지의 층수변화 시나리오별 미기후 영향 예측: 기온, 미세먼지, 초미세먼지를 중심으로, 국토계획, 제57권 제6호, 2022.11, pp.124-137. // (J.W. Baek et al., Prediction of micro-climate impact by floor height change scenarios in housing renewal site: Focusing on the temperature, particulate matter (PM10), fine particulate matter (PM2.5), Journal of Korea Planning Association, 57(6), 2022.11, pp.124-137.)

[11] 배웅규, 박진철, CFD 시뮬레이션을 통한 저층주거지 도시재생뉴딜사업 마중물사업의 시행에 따른 온도 및 미세먼지(PM2.5) 감소효과 분석 연구, 한국산학기술학회 논문지, 제23권 제1호, 2022.01, pp.67-83. // (W.K. Bae, J.C. Park, A study on the effect of temperature and fine dust (PM2.5) on the implementation of the urban regeneration new deal project in low-rise residential areas through CFD simulation, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 23(1), 2022.01, pp.67-83.)

[12] 정윤남, 도시·건축적 특성에 따른 미세먼지 분포패턴 분석, KIEAE Journal, 제23권 제1호, 2023.02, pp.93-101. // (Y. Jeong, Analysis of particulate matter distribution patterns according to urban and architectural characteristics, KIEAE Journal, 23(1), 2023.02, pp.93-101.)

[13] 남성우, 성선용, 박종순, 미세먼지 저감대책으로서 바람길 적용 방안: 세종시를 대상으로, 한국콘텐츠학회논문지, 제20권 제3호, 2020.03, pp.1-9. // (S. Nam, S. Sung, J.S. Park, Application of ventilation corridor to mitigate particulate matter for the Sejong-si, Journal of the Korea Contents Association, 20(3), 2020.03, pp.1-9.)

[14] C.H. Hu, F. Wang, Using a CFD approach for the study of street-level winds in a built-up area, Building and Environment, 40(5), 2005.05, pp.617-631.

[15] 이갑원, 정윤남, 아파트 단지의 외부 공간유형에 따른 미세먼지 확산 특성 및 저감 방안 - 도로 발생 미세먼지의 확산 분석을 중심으로 -, KIEAE Journal, 제23권 제3호, 2023.06, pp.77-88. // (G. Lee, Y. Jeong, Diffusion characteristics and reduction methods of particulate matter according to the type of outdoor space in apartment complexes: Focusing on the analysis of the diffusion of particulate matter generated from roads, KIEAE Journal, 23(3), 2023.06, pp.77-88.)

[16] 이은엽, 김미나, 신수훈, 미세먼지 저감을 위한 시범도시 조성 기법 연구, 토지구획연구원, 2020. // (E.Y. Lee, M.N. Kim, S.H. Shin, Method for making PM free pilot city, Land and Housing Institute, 2020.)

[17] Z.C. Liu, F.W. Sun, F.M. Meng, Effect of wind speed to water mist in coal mine laneway, Applied Mechanics and Materials, 71-78, 2011.07, pp. 4935-4938.

[18] C. Letter, G. Jäger, Simulating the potential of trees to reduce particulate matter pollution in urban areas throughout the year, Environment, Development and Sustainability, 22(5), 2020.06, pp.4311-4321.