



아파트 단지의 외부 공간유형에 따른 미세먼지 확산 특성 및 저감 방안 - 도로 발생 미세먼지의 확산 분석을 중심으로 -

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 -

이건원* · 정윤남**

Gunwon Lee* · Yunnam Jeong**

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

** Corresponding author, Assistant Professor, School of Architecture, Chonnam National Univ., South Korea (ynj@jnu.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: This study aimed to derive effective methods for reducing and managing particulate matter coming from outside the apartment complex. **Methods:** To achieve this, the characteristics of particulate matter were identified through literature reviews and a research framework was established. Next, particulate matter reduction and management techniques were listed through case analysis. After obtaining input data for CFD simulation through AWS data and field measurements, the distribution of particulate matter was analyzed through CFD simulation for the entire Godeok-Gangil District 2. Next, the diffusion of particulate matter over time was analyzed through CFD simulation for Complex 3. Finally, outdoor spaces were classified in consideration of the concentration and diffusion path of particulate matter, importance of outdoor space, etc., and particulate matter reduction and management measures were proposed for each type. **Results:** As a result of the CFD simulation, complex 3 was found to be the most vulnerable to particulate matter, and the outdoor spaces in complex 3 were classified into 13 types, considering the concentration and the diffusion path of particulate matter, and the importance of outdoor space. Among them, measures to reduce and manage particulate matter were presented for eight types of high importance and high concentrations of particulate matter. These results are expected to be used to develop guidelines for reducing particulate matter in outdoor spaces of apartment complexes in the future.

KEYWORD

미세먼지
CFD 시뮬레이션
시계열 분석
아파트단지

Particulate Matter
CFD Simulation
Time Series Analysis
Apartment Complex

ACCEPTANCE INFO

Received Apr. 30, 2023
Final revision received May. 22, 2023
Accepted May. 26, 2023

© 2023. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

대기오염 문제는 급격한 도시화와 함께 1950년대 전후로 발생한 스모그현상을 통해 그 위생성과 심각성이 부각되었으며, 자연 환경과 인체에 직간접적으로 지대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이에, 세계보건기구(WHO)를 비롯한 국내외 기관과 정부에서는 건강을 위협하는 오염물질을 규정하고 이를 관리하기 위한 기준을 마련하여 대기오염으로 인한 문제와 피해를 줄이고자 노력하고 있다. 특히, 최근 주요 대기오염물질로서 주목받고 있는 미세먼지는 작은 입자크기로 인해 인체에 더욱 심각한 문제를 초래한다는 점에서 그 기준이 더욱 강화되고 있으며, 세계보건기구도 미세먼지와 초미세먼지를 2013년 발암물질로 규정한 데 이어, 2021년 대기질 가이드라인(Air Quality Guideline; AQG)에서는 기존 2005년 기준에 비해 훨씬 강화된 기준을 제시한 바 있다. 국내에서는 1995년부터 PM10, 2015년부터 PM2.5에 대한 측정 및 환경기준을 시행하고 있으며, 2019년 『재난 및 안전관리 기본법』 개정을

통해 사회적 재난의 하나로 지정하는 등 개선을 위해 노력하고 있다. 하지만 여전히 2021년 국내의 연평균 미세먼지(PM10) 농도는 $36\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 세계보건기구(WHO) 권고 기준($15\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 2배 이상 초과한다[1][2].

이러한 미세먼지를 저감하기 위해서는 일차적으로 배출원의 관리 및 규제가 중요하나, 최근 다양한 도시정책 및 사례들은 도시의 공간 구조와 형태, 디자인에 의한 미기후 관리를 통해 확산과 저감 효과가 있음을 보여주고 있다. 특히 도시공간에서는 냉난방과 교통 등으로 인한 다양한 대기오염 배출원뿐 아니라 고밀도로 조성된 건조환경으로 인해 대기질 문제가 더욱 심각하며, 그 피해자의 규모 또한 크다는 점에서 건조환경의 특성과 미세먼지 저감효과에 관한 연구는 더욱 절실하다.

이에, 본 연구는 도시공간에서도 사람들이 밀집하여 거주하는 아파트단지의 공간적 특성과 미세먼지 분포 간의 관계를 분석하고자 하였다. 이를 위해 실제 개발 중인 아파트 단지를 대상으로 미세먼지의 흐름을 분석하고, 미세먼지 농도와 외부공간의 특성이 고려된 공간 유형별로 미세먼지 저감 및 관리 방안을 제시하고자 한다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

이를 위해 본 연구는 다음의 방법을 채택했다. 먼저, 미세먼지 저감 및 관리를 위한 기술들에 대해 문헌고찰 및 사례조사를 수행하였다. 다음으로, 단지 외부에서 유입된 미세먼지의 확산 상황을 시뮬레이션하기 위해서 기상 데이터를 취득했고, 현장에서 데이터를 측정하였다. 세 번째로, 거시적으로 고덕강일 2지구에 대해서 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics, 이하 CFD) 분석을 수행하고, 네 번째로, 그 중 상대적으로 취약한 3단지를 대상으로 CFD 시뮬레이션을 통해 시간 흐름에 따른 미세먼지의 확산을 모의 분석하였다. 다섯 번째로, 미세먼지 농도 및 단지 내 외부공간의 용도를 동시에 고려하여 공간 유형을 도출했다. 마지막으로 공간 유형별로 초기에 조사한 미세먼지 저감 및 관리 방안을 매칭하여 아파트 단지 외부공간에서의 미세먼지 저감 및 관리 방안을 제안하였다.

본 연구의 공간적 범위는 공공주택지구개발사업에 의해 개발사업이 진행되고 있는 서울특별시 강동구의 고덕강일지구를 연구대상지로 선정하였다. 이 중 실제 설계 및 시공 작업이 구체화된 고덕강일 2지구와 그 중 상대적으로 여건이 불리한 3단지를 연구의 구체적인 공간범위로 한정하였다.

시간적 범위로는 지형 및 건축물의 형태와 높이, 도로의 형태 등 도시 및 건축 형태 데이터를 구득한 2021년을 기준으로 하였다. CFD 시뮬레이션 수행 및 분석을 위한 기상 관측 데이터 또한 2021년을 기준으로 설정하였다.

내용적 범위는 먼저, 이론고찰 및 사례조사를 통해 도시공간의 미세먼지 측정 및 분석 방법을 고찰하였으며, 국내외 다양한 미세먼지 저감 기술에 대해 검토하여 미세먼지 저감 기술 목록을 도출하였다. 다음으로 현장 데이터 취득을 통해 CFD 시뮬레이션 입력 수치를 결정하였다. 그리고 CFD를 활용하여 분석 대상이 될 대상지를 설정하고 이를 시뮬레이션 결과에 따라 공간 유형을 분류하였다. 최종적으로 고덕강일 2지구 내 3단지 내 각 공간 유형에 대한 미세먼지 저감 방안을 제시하였다.

2. 이론고찰

2.1. 이론검토

1) 미세먼지의 개념 및 특징

미세먼지는 입자의 공기역학적 직경이 매우 작아 눈에 보이지 않을 정도의 상태로 부유하는 먼지를 뜻한다. 그 직경이 2.5 μ m(1,000분의 2.5mm)인 입자를 PM2.5로, 직경이 10 μ m(1,000분의 10mm) 이하인 입자를 PM10으로 분류한다[2]. 미세먼지는 1차적으로 자동차 연료 연소, 생물성 연소, 사업장 연소 및 마찰 등에 의해 자연적으로 발생하거나, 2차적으로 공기 중 화학반응에 의해 생성된다. 특히 PM2.5의 경우는 대부분 장거리 수송과정에서 대기 중 황산화물(SOx), 질소산화물(NOx), 암모니아(NH₃), 휘발성 유기화합물(VOCs)과 반응하여 생성된다[3].

이러한 미세먼지의 작은 입자는 호흡 시 폐포 끝에서 바로 혈관으로 들어가 호흡기 및 심혈관 질환을 발생 혹은 악화하는 물론 사망에 이르기까지 건강에 심각한 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다[4].



Fig. 1. Cooling Mist (Source: id-plus.co.kr)

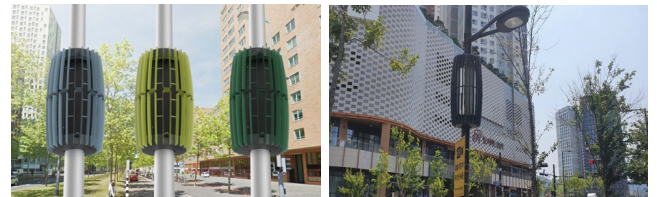


Fig. 2. Power Saving Type Particulate Matter Reduction Device (Source: www.staticair.com/en/product)

Table 1. List of Particulate Matter Reduction Facilities

Classification	Facility Name	Reduction Effect
Blocking	Urban Forest Road	PM10 10~23.46% ↓, PM2.5 10~17.5% ↓ [5]
	Outdoor air purifier dome	PM10 42.5%↓, PM2.5 34.6%↓ per 1 hour [7]
Absorption & Adsorption	Vegetation and dust collection panel	90% ↓ compared to the surrounding area within a radius of 3m where particulate matter concentration is high [5]
	Smart Clean Bus Station	PM2.5 68.5%↓ & PM10 68%↓ Compared to the outside air [5]
	Cooling Mist	96.1% ↓ (Experiment with nozzle thickness of 0.6 mm) [5]
	Power Saving Type Particulate Matter Reduction Device	PM0.1~PM10 3~30~50% ↓[8]
	Roof greening/wall greening	17~29% ↓ PM10, 1~29.6% ↓ PM2.5 (Depends on the type of plant and its surroundings) [21]
	Moss module panel	PM2.5 22.8% ↓, PM10 43.1%↓[9]
	Smog Free Tower	Air purification of 30,000m ³ per hour [5]
	Air purification bench (City Tree)	Particulate Matter emitted from 417 cars can be reduced [5]
	CMA (Calcium Magnesium Acetate)	50% ↓ on unpaved roads 10~30% ↓ paved roads [6]
Information System	Photocatalytic paint	17.35g NOx decomposition per hour & 42.8%↓ Particulate Matter within 20 minutes for 7,140m ² construction [6]
	Particulate Matter signal light	× (Signal features only)
	Smart Filter Monitoring Cube	80% ↓ compared to the surrounding area [6]



Fig. 3. Moss Module Panel (Source: www.achilles.be/case/besix-group/)



Fig. 4. Smart Filter Monitoring Cube (Source: mann+hummel)

따라서 고농도 미세먼지의 환경기준치 초과는 거주민들의 건강에 직접적인 악영향을 미치므로 미세먼지 저감 방안에 대한 연구는 여전히 그 의미를 지닌다고 할 수 있다.

2) 미세먼지 저감 기술 검토

미세먼지 저감 및 관리 방안을 목록화하기 위해 본 연구 대상이 아파트 단지 외부공간에 적용 가능한 미세먼지 저감 기술을 검토하였다. 검토결과 차단을 이용한 저감 기술에는 도시숲길, 옥외용 공기정화 및 차단 돔 등이 있으며, 흡수·흡착을 이용한 저감 기술에는 식생집진패널형 저감시설, 스마트 클린 버스승강장, 쿨링미스트 시스템(Fig. 1), 초절전형 미세먼지 저감기(Fig. 2), 옥상녹화 및 벽면녹화, 이끼모듈 패널(Fig. 3), 스모그 프리타워, 공기정화벤치, CMA, 광촉매 도로 등이 있었다. 그 외에도 정보 안내 시스템인 미세먼지 안내 신호등, 스마트 필터 모니터링 큐브(Fig. 4.) 등의 기술을 검토하였다. 본 연구에서 검토한 저감 기술 목록과 각 기술별로 알려진 미세먼지 저감 효과는 Table 1.과 같다.

2.2. 선행연구 검토

본 연구에 앞서 관련 선행연구를 다음의 세 가지로 구분하여 검토하였다. 먼저, 도시형태와 미기후의 관계성을 입증하는 연구를 검토하여, 도시형태와 미기후 간의 상관관계가 있음을 확인하였다. 다음으로, 도시공간형태와 미세먼지와의 관계를 분석한 연구들을 검토하였다. 이들 연구들은 통계분석, CFD 시뮬레이션 등의 다양한 방법이 활용되고 있음을 확인하였다. 마지막으로, 미세먼지 저감 대책과 관련한 연구들을 검토하였다.

도시형태와 미기후의 관계성을 입증하는 연구는 다음과 같다. 이 건원·정윤남(2018)은 AWS 측정을 통해 가로의 방향, 건축물의 폭, 건축물 깊이, 건축물 높이, 지형 경사도 및 교통량이 국지풍속, 일사량, 국지온도 등 도시 미기후에 영향을 미치고 있음을 입증하였다 [10]. 그리고 이건원·서민호(2021)는 OLS(Ordinary Least Square)를 이용하여 도시형태요소가 건축물 에너지 소비량에 영향을 미치는 것을 입증하였다[11]. 신지용 외2인(2004)은 아파트의 주동 배치 유형에 따라 달라지는 공기연령의 변화를 CFD를 통해 관찰하여 고층 아파트의 주동배치 유형에 따른 자연환기성능 및 공기오염물질의 거동에 대한 고찰의 기초가 되었다[12].

Table 2. Summary of literature review

Subject	Method	Location and object	Author (year)
Urban Form & Micro-climate	AWS	6 Sites installed AWS in Seoul	G.W.Lee Y.N.Jeong (2018)
	Statistics	The Old Downtown of Daejeon city and Jaecheon city	G.W.Lee M.H.Seo (2021)
	CFD	A Study of Age-of-air of Apartment Complex	J.W. Shin T.Y. Kim K.H. Lee (2004)
Urban Form & Particulate Matter	Distribution Map	Spatial distribution of Particulate Matter in comparison with Land-use and Traffic volume in Seoul	J.C.Jeong S.H.Lee (2018)
	Regression Analysis	The Relationship between Particulate Matter Reduction and Space Shielding Fate in Urban Neighborhood Park	M.A.Koo (2019)
	Regression Analysis	The Effect of Urban Spatial Structure and Meteorological Factors on the Particulate Matter	Y.G.Hur MG.Kang (2022)
	CFD	Micri-climate Impact by Floor Height Change Scenarios in Housing Renewal Site	J.W.Baek et al. (2022)
		Effect of Temperature and Particulate Matter(PM2.5) on the Implementation of the Urban Regeneration Project	J.C.Park W.K.Bae (2022)
		Analysis of Particulate Matter Distribution Patterns According to Urban and Architectural Characteristics	Y.N.Jeong (2023)
Measures to Reduce Particulate Matter	CFD	Measures to cope with Particulate Matter in urban districts and complexes	G.W.Lee (2019)
		Application of Ventilation Corridor to Mitigate Particulate Matter for the Sejong-Si	S.W.Nam S.Y.Seon J.S.Park (2020)
	Literature Review	Land and Urban Management Directions to Respond to Particulate Matter	J.S.Park (2019)

다음으로, 도시공간과 미세먼지의 관계성에 대한 분석을 진행한 연구는 크게 회귀분석, 공간보간기법 등의 통계분석을 수행한 연구, CFD 시뮬레이션을 통해 도시형태에 따른 미세먼지 분포를 분석한 연구로 나뉜다. 먼저, 정종철·이상훈(2018)은 서울시를 대상으로, 공간보간기법 중 거리 반비례기법(IDW)를 활용하여, 토지이용률과 시간대별 교통량에 따른 미세먼지의 분포 변화를 분석하였다 [13]. 이에 따라 도시숲이 도시 내 미세먼지 농도를 상대적으로 낮게 유지하며, 교통량이 많은 지역에 미세먼지와 초미세먼지가 다른 지역보다 높게 나타나는 것을 입증하였다. 다음으로, 구민아(2019)는 회귀분석을 통해 공원의 규모가 작고 공간차폐율이 높을수록 미세먼지 저감 효과가 높은 것을 입증하였다[14]. 그리고 허유경·강민규

(2022)는 다중회귀분석을 통해 토지이용변수 중 녹지 면적이 PM10 크기의 미세먼지 농도의 감소에 영향을 미치며, 건축물 허가 건수가 미세먼지 농도 증가에 영향을 미친다는 것을 입증하였다[15]. 이에 따라, 기상요인 및 도시공간구조 요인을 감안한 종합적 도시계획의 추진을 역설하였다.

다음으로 CFD 시뮬레이션을 활용하여 공간 유형에 따른 미세먼지 농도를 분석한 연구는 다음과 같다. 먼저, 백지원 외 6인(2022)은 ENVI-met을 활용한 CFD 시뮬레이션을 통해, 도시하천 인근의 재개발 대상지 건축물의 층수 변화에 따른 미세먼지 농도의 변화를 검토하였다. 그 결과 단지 외곽부를 저층으로 구성하는 것이 미세먼지 농도 감소에 가장 큰 영향을 주는 것을 입증하였다[16]. 이는 건축물의 배치뿐 아니라 높이도 미세먼지에 영향을 줄 수 있음을 확인했다는 점에서 의의가 있다. 박진철·배용규(2022)는 ENVI-met을 활용한 CFD 시뮬레이션을 통해, 도시재생뉴딜의 마중물사업이 진행된 골목에서의 녹지 생성, 도로폭원, 건축물 신축이 온도 및 미세먼지 저감 효과가 있음을 입증하였다[17]. 그리고 정윤남(2023)은 건축물의 형태 및 배치, 건물 간 간격과 배치, 오픈 스페이스와 가로수가 미세먼지 농도에 영향을 끼친다는 것을 STAR-CCM+을 활용한 CFD 시뮬레이션을 통해 입증하였다[18]. 이와 같이 건축물의 형태, 층수 등 다양한 도시·건축적 요소가 미세먼지 저감에 영향을 미치고 있음을 선행연구를 통해 확인하였다.

이에 따라 본 연구에서 착안한 공간유형이 미세먼지 특성에 영향을 미치며, 따라서 이 특성에 따라 공간유형의 분류가 가능함을 확인할 수 있었다. 또한, 이 특성에 따라 미세먼지 저감 기법 역시 달리 적용할 수 있음을 가정할 수 있었다.

마지막으로 미세먼지 대응방안에 대한 연구는 다음 세 가지 연구를 검토하였다. 이건원(2019)는 미세먼지의 도시 미기후와의 관련성을 언급하며 도시숲 혹은 수공간 형성 등의 순환형 도시구조 조성 과 함께 일정한 바람유동이 발생할 수 있는 지구(District) 단위 차원에서의 도시공간 조성의 중요성을 강조하였다[19]. 다음으로, 박종순(2019)은 미세먼지에 대한 대응으로 국토·도시 차원의 도시 바람길 조성의 중요성과 도입방안에 대해 역설하였다[20]. 또한, 남성우 외 2인(2020)은 미세먼지 저감 대책으로 바람길에 대한 연구를 하였으며, CFD 시뮬레이션을 활용하여 블록 단위에서 바람길과 순환하는 건축물 배치로 미세먼지 저감효과가 발생함을 정량적으로 검증하였다[21].

위와 같은 선행연구를 통해 도시단위에서의 미세먼지 대응은 주로 도시·건축 형태 및 배치에 따른 바람길의 변화에 초점이 맞춰져 있음을 확인할 수 있었다.

3. 연구 체계 설정

3.1. 연구대상지 설정

본 연구는 서울특별시 강동구 고덕동, 강일동, 상일동 일대에 조성 중인 고덕강일지구 공공주택지구사업을 연구의 대상으로 설정하였다. 고덕강일지구는 토지 면적 1,660,535㎡에 공공주택 12,033세대를 건설하는 공공주택사업이다. 총 3개 지구, 14개 단지로 개발이

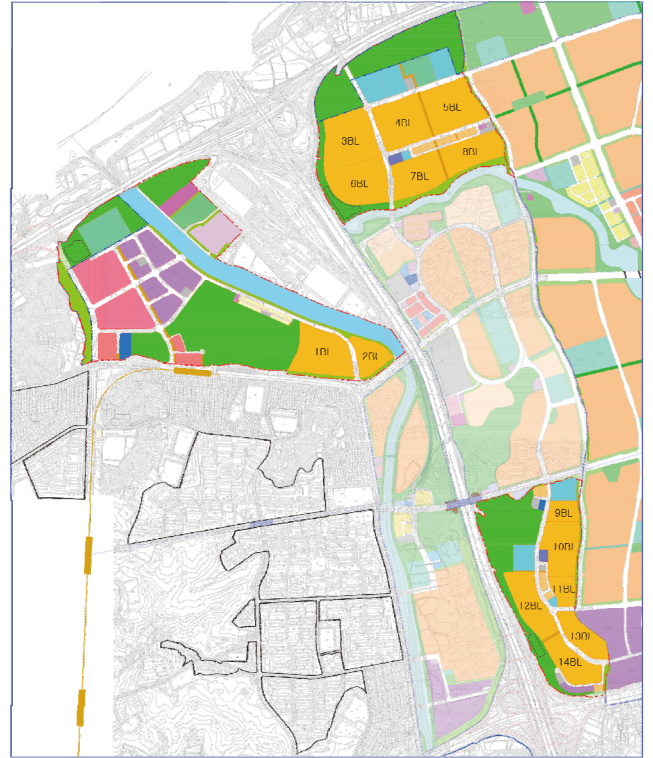


Fig. 5. Land Use Plan in Godeok Gangil District

추진되고 있다.

제1지구는 고덕동에 위치하며 대부분 상업 시설 및 업무시설 위주로, 주거지구는 1단지과 2단지만 조성되어 있다. 제2지구는 강일동 북부지역이 해당하며, 6개 주거단지가, 제3지구는 상일동 지역이 해당하며, 6개 주거단지가 조성되고 있다. 서울외곽순환고속도로(이하, 수도권 제1순환고속도로) 및 올림픽대교가 지구들과 인접해 있어 접근성이 매우 우수하나, 이들 주간선도로로부터의 미세먼지 유입에 대한 대응 및 관리가 지속적으로 필요한 지역으로 판단된다. 이 중 제2지구는 미세먼지 계절적 관리가 중요한 시기의 주풍향 측에 간선도로가 위치하고 있어, 도시 내 차량 운행에 의한 미세먼지 대응이 필수적인 지역으로 사료된다.

3.2. 적용구간의 기상 현황

1) 기후 현황

해당 지역 근처의 기상청 자동기상관측(AWS, Automatic Weather System)소는 강동구 고덕동 317-1 종합직업학교 내에 위치해 있으며, 이 결과를 바탕으로 고덕강일지구의 연간 기후 데이터를 분석하였다. 대체로 국내 평균 기후와 유사한 패턴을 갖고 있으며, 봄과 가을에는 서풍 또는 서남풍이 주된 풍향으로 조사되며, 평균 풍속은 3.7m/s 수준이다.

2) 미세먼지 농도 현황

미세먼지 측정소는 서울 강동구 구천면로 42길 59 천호1동 주민센터에 설치되어 운용되고 있어 이 데이터의 미세먼지 농도 현황을 관측하였다.

2020년 기준의 고덕동 측정소 일대의 PM2.5 미세먼지 농도 분석

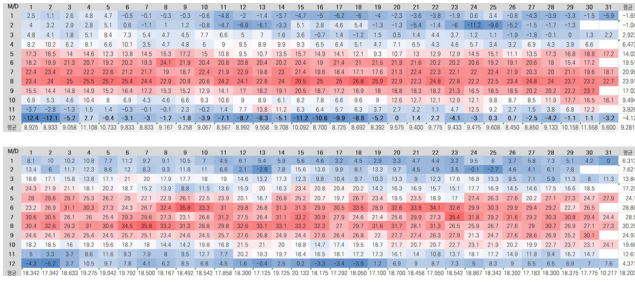


Fig. 6. Annual highest/lowest temperature at the climate station



Fig. 7. Location of Godeok-gangil Site Development Project(left), Location of Godeok-dong air quality station(right)

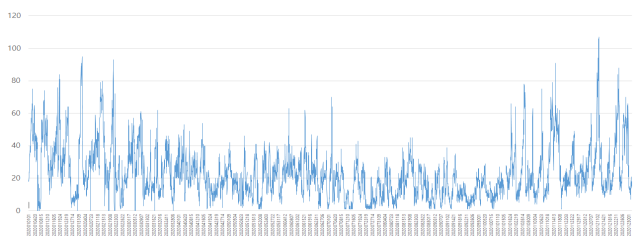


Fig. 8. Annual variation of Particulate Matter in the Godeok 1-dong monitoring station(PM 2.5)

결과, 강동 고덕 일대는 1월부터 7월, 10월부터 12월 미세먼지 농도의 변화폭이 크게 측정되었다. 특히 12월 초 겨울에 최대 107µg/m³를 넘는 제일 높은 농도를 보였다. 미세먼지 농도는 8월 말부터 점차 낮아져 10월 초까지 40µg/m³ 이하로 지속되며, 이어 10월 초부터 다시 미세먼지 농도가 높아져, 40~110µg/m³의 수치를 보이고 있다.

시간대별 분석 결과, 일출과 일몰 전후부터 미세먼지 농도가 높아지고, 정오와 자정 전후부터 미세먼지 농도가 낮아지는 것으로 나타났다. 미세먼지 농도는 7시와 18시 전후부터 높아지기 시작하여 12시 및 익일 2시 전후에 최고수치 도달 후 다시 감소하여 순환주기가 일 2회인 경향을 띤다.

3.3. 모델링 및 경계조건

본 연구에서 미세먼지의 유동 및 농도를 관찰하기 위해 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, 이하CFD)시뮬레이션 모델을 활용하였다. CFD 시뮬레이션을 위해 활용된 프로그램은 Siemens사의 STAR-CCM+ v13.06이다. 아파트단지 인근 고속도로에서 발생하는 국지적 오염물질의 저감을 목표로하여 시뮬레이션 영역을 설정하였으며, 대기오염물질의 확산 분석을 위해 CFD 기반의 확산 모델을 추가 적용하였다.

1) 활용자료 및 격자 생성

본 연구 대상지의 기본 도시 형태 등에 대한 자료는 국토지리정보원의 SHP데이터(2015)를 활용하였으며, ‘V-world’의 공간정보와 토지 피복자료를 참고하여 녹지 와 아스팔트 등의 피복 정보를 보충

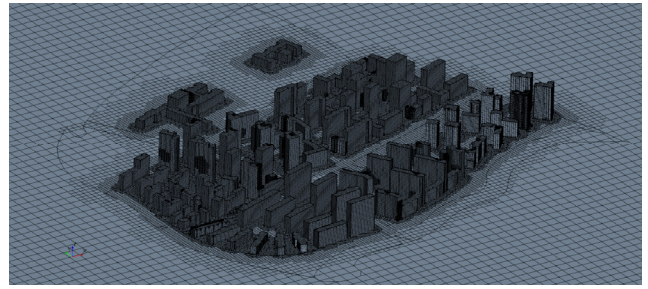


Fig. 9. Mesh results of Godeok Gangil

Table 3. Boundary Conditions

Contents		Conditions
Domain Size		4,500m × 4,000m × 1,000m
Cell Type		Trimmed Mesh
Cell		25,000,000
Prevailing Wind Direction		West(270°)
Inlet	Velocity	3.7m/s(Height: 85m)
	Temperature	27.5°C
Outlet Condition		Pressure Outlet
Surface Condition		Concrete, Asphalt, Green, Soil

하였다. 신도시 조성에 대한 건축물 배치 및 피복정보에 대한 최신화 정보는 고덕강일지구의 계획도면을 참고하여 고덕강일 2지구에 대한 모델링을 구현하였다. 도메인은 선행연구에 따라 가로와 세로는 5배, 높이는 10배를 상정하여 4.5km × 4km × 1km로 설정하였다[22]. 위와 같이 설정한 모델을 바탕으로 Star-CCM+의 자동격자 생성 기법을 이용하여 Trimmed Mesh와 Prism Layer를 적용하여 격자를 생성하였으며 2,500만 개의 격자가 생성되었다.

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.

$$\frac{\partial}{\partial t}(pk) + \nabla \cdot (pk \bar{V}) \tag{Eq.1}$$

$$= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - p(\epsilon - \epsilon_0) + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(p\epsilon) + \nabla \cdot (p\epsilon \bar{V}) \tag{Eq.2}$$

$$= \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{1}{T_c} C_{\epsilon 1} P_\epsilon - C_{\epsilon 2} f_2 p \left(\frac{\epsilon}{T_c} - \frac{\epsilon_0}{T_0} \right) + S_\epsilon$$

- k is the kinetic energy.
- ϵ is the turbulent dissipation rate.
- \bar{V} is the mean velocity.
- μ is the dynamic viscosity.
- $\sigma_k, \sigma_\epsilon, C_{\epsilon 1},$ and $C_{\epsilon 2}$ are Model Coefficients.
- P_k and P_ϵ are Production Terms.
- f_2 is a Damping Function.
- S_k and S_ϵ are the user-specified source terms.

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



Fig. 10. Measurement Points of Godeok Gangil District2

기반이 되는 기상데이터는 앞서 서술한 강동구 고덕동 317-1 종합직업학교 내에 위치한 기상청 AWS 데이터를 기반으로 하여, 미세먼지 농도가 높은 봄가을의 주요 풍향인 서풍을 주풍향으로 설정하였으며, 평균풍속 3.7m/s의 바람이 불어오는 것으로 가정하였다. 평균 대기 온도는 27.5°C로 상정하였다.

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.

3.4. 시뮬레이션 시작값 설정을 위한 현장 측정

CFD 시뮬레이션의 시작값을 설정하기 위해 본 연구는 현장 측정을 실시하였다. 측정시기는 2021년 6월 14일 24시간을 기준으로 측정하였으며, 진행방법은 첫째, 현장 지점 사전 선정 및 사진 점검. 둘째, 장비 설치 및 조사. 셋째, 24시간 이상의 모니터링 및 측정 실시. 넷째, 데이터 확인 및 철거. 다섯째, 데이터 분석으로 대상지의 대기 환경을 측정하였다.

측정지점은 아래 Fig. 10.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 측정 결과, PM10의 경우에는 1번 측정지점과 2번 측정지점 간의 상관관계가 나타났고, 2번 측정지점과 3번 측정지점 간 역시 상관관계가 나타났다. 다만, 그 크기는 아주 크지는 않았다. 4번 측정지점이 타 측정지점과 상관관계가 매우 낮게 나타났다. PM2.5의 경우는 2, 3, 4번 측정지점 간 상관관계가 상당히 높게 나타났다.

측정 결과, 1번 측정소에서 PM10, PM2.5 모두 상당히 낮게 나타났다. 모두 3번, 4번, 2번 측정소 순으로 농도가 높게 나타났다. 이로부터 서편의 수도권제1순환고속도로로부터의 미세먼지가 바람에 의해 2지구에 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 이 결과를 바탕으

Table 5. Correlation coefficient of PM10

	1	2	3	4
1				
2	0.4057			
3	-0.0874	0.5867		
4	0.0885	0.1713	0.2514	

Table 6. Correlation coefficient of PM2.5

	1	2	3	4
1				
2	0.3666			
3	0.1818	0.8941		
4	0.2041	0.8973	0.9779	

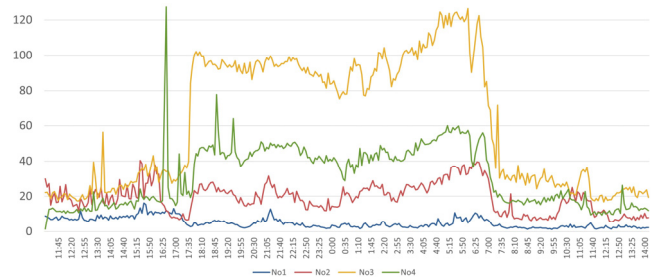


Fig. 11. PM10 concentration in Godeok Gangil District2 (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

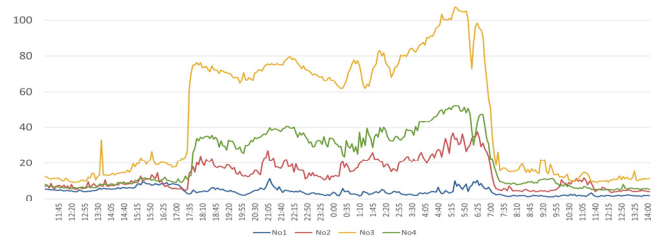


Fig. 12. PM2.5 concentration in Godeok Gangil District2 (Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

로 본 연구는 가장 좋지 않은 상황인 3번 측정소의 측정값의 최대치를 기준으로 시뮬레이션 시작값을 설정하였다.

4. 미세먼지 확산 특성 분석

4.1. 고덕강일 2지구 시뮬레이션 결과 분석

고덕강일 2지구의 시뮬레이션 결과는 다음 Fig. 13.와 같다. 전체적인 확산 경로는 북서측 및 서측의 올림픽대로 및 수도권 제1순환고속도로에서 시작하여 서풍을 따라 동측 방향으로 크게 두 가지 경로로 확산되는 것으로 나타났다.

첫 번째 확산 경로는 3단지 북서측부터 3단지 북측의 아리수로93다길을 따라 확산되는 경로이다. 이 경로를 따라 고농도의 미세먼지가 동측으로 이동하고 있으며, 이렇게 이동한 미세먼지가 다시 3단지 4단지 사이의 아리수로93가길을 따라 남측으로 확산되는 경향이 관찰되었다. 또한 해당 경로로 이동하는 미세먼지는 3, 4, 5단지의 각 주동사이를 따라 단지 내부로 확산되고 있다.

두 번째 확산 경로는 6단지의 서남측에서 시작하여 동서측 방향의 열린 공간인 망월천로를 따라 서측으로 이동하는 경로이다. 동서 방향으로 긴 주동행상을 가진 6단지와 7단지의 행상을 따라 바람이 거동하고 있으며, 이에 편승하여 미세먼지 역시 서측으로 이동하는

것으로 판단된다. 다만, 첫 번째 경로와는 달리 6, 7, 8단지 내부로의 확산은 다소 미미하며, 특히 8단지에는 거의 도달하지 않고, 망월천로를 따라 이동하는 것을 확인할 수 있다.

제2지구 전체에 대한 시뮬레이션 결과, 3~8단지 중 가장 북서측에 위치한 3단지가 가장 미세먼지 농도가 높은 것으로 나타났다. 반면, 상대적으로 동측에 위치한 5단지와 8단지는 미세먼지 농도가 낮은 것으로 나타났다. 이를 통해 3단지의 미세먼지 저감 관리가 가장 필요한 것으로 나타났으며, 특히, 3~5단지의 북측을 연결하는 아리수로93다길에 대한 미세먼지 관리가 필요한 것으로 나타났다.

4.2. 고덕강일 3단지 시뮬레이션 결과 분석

전체 시뮬레이션 결과에 따라 고덕강일 2지구 내 3단지를 중점 연구대상지로 설정하였다. 3단지에 대해 서측 및 서북측의 미세먼지 발생 및 유입을 시간의 흐름에 따라 분석하고, 대표적인 시간대의 시

뮬레이션 결과를 활용하여 주요 미세먼지의 유입, 확산, 정체 지역을 선별하였다.

1) 15분 경과 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 초기 15분 경과 시기의 분석결과는 다음 Fig. 14.과 같다. 서측 및 서북측의 미세먼지가 이동하고 있으나, 아직 방음벽에 도달하기 이전이며, 이 시기에 이미 3단지 최북서측인 317동의 모서리에 미세먼지가 유입되는 것이 확인되며, 이 지점이 최초의 미세먼지 유입지점이라고 할 수 있다. 분석지점인 1.5m에서는 방음벽 및 주변 높은 언덕에 의해 미세먼지가 일시적으로 차폐가 되지만 상공으로 확산된 미세먼지가 이 지점을 중심으로 3단지 내로 유입이 이뤄지는 것으로 추정된다. 이외에도 단지 서측의 313, 314, 314동과 310동 사이에도 미세먼지 농도가 조금씩 높아지고 있으며, 적은 농도이지만 유입 및 정체가 되고 있는 양상이 있어 북서측의 317동과 함께 관리가 필요한 지점으로 사료된다.

2) 30분 경과 시뮬레이션 결과

다음은 첫 번째 분석 결과로부터 다시 15분 시간이 흐른 후 분석 결과이다. 그 결과는 다음 Fig. 16.와 같다. 시뮬레이션 결과에 따르면, 관찰한 1.5m 지점에서는 고농도의 미세먼지가 아직 방음벽에 도달하지 못했음을 확인할 수 있다. 하지만 상공을 통해 확산된 미세먼지로 인해, 초기 주요 유입 지점 2곳의 미세먼지 농도가 점차 높아지는 것을 확인할 수 있다. 최북서측인 317동 지점의 북서측 모서리에서는 고농도 지점이 서측으로 이동하면서 고농도 반경이 넓어지고 있으며, 이러한 확산이 바로 남측에 인접한 316동, 317동 사이에서 정체를 빚으며 농도가 높아지고 있다.

최서측의 313, 314, 315동과 310동 사이 공간도 미세먼지 농도가

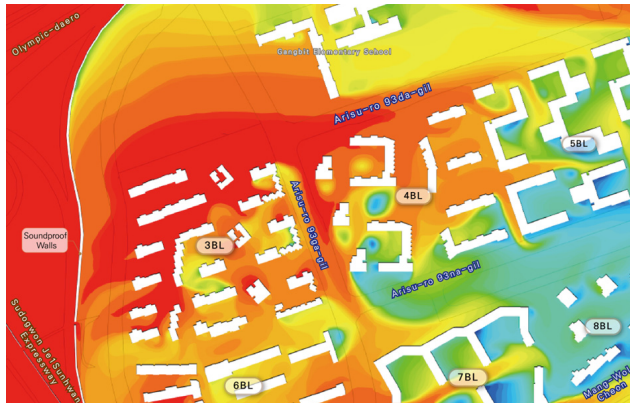


Fig. 13. Simulation results of Godeok Gangil District

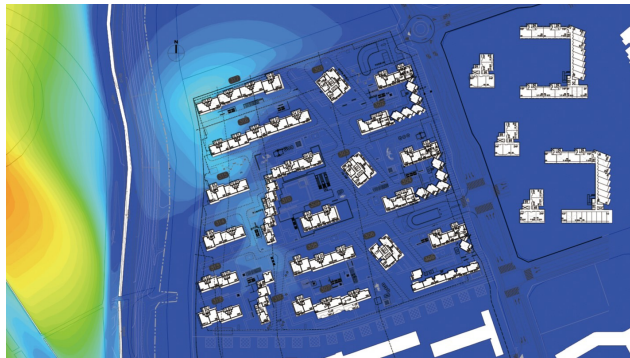


Fig. 14. Simulation results after initial 15 minutes

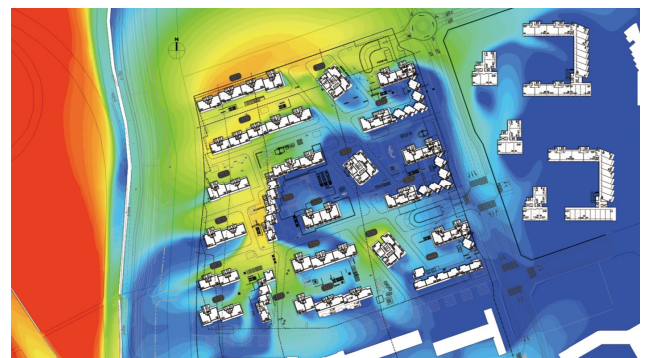


Fig. 16. Simulation results after 30 minutes



Fig. 15. Particulate Matter movement path after initial 15 minutes



Fig. 17. Particulate Matter movement path after 30 minutes

높아지고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 310동의 상대적으로 요철이 많고 남북방향으로 긴 주동 특성으로 인해 310동 인접지점의 미세먼지 농도가 높은 것으로 판단된다.

이외에도 306동 북측지점이 미세먼지 농도가 높아지고 있는 것이 관찰된다.

3) 45분 경과 시뮬레이션 결과

두 번째 분석 결과로부터 15분이 지난 시점의 분석결과는 Fig. 18. 와 같다. 아직 고농도 미세먼지가 방음벽에 도달하지 않은 상태이다. 두 번째 분석 결과에서 도출된 3개의 주요 지점을 주로 살펴보면, 먼저 북서측 317동 부근의 지점의 농도는 더 높아지고 범위가 넓어지고 있다. 가장 농도가 높은 지점이 두 번째 분석 시점보다 더 서측으로 이동하여 317동과 301동 사이에 위치하고 있다. 이 지점을 따라 미세먼지가 서측으로 확산되고 있으며, 3단지 동편에 위치한 남북방향의 도로인 아리수로93가길을 따라 남측방향으로의 확산이 두드러지게 나타나고 있다. 하지만 도로변의 302동 304동에는 302동의 주동형태에 부딪힌 바람의 방향에 따라 미세먼지 농도가 낮으며, 오히려 3단지 동측의 4단지의 미세먼지 농도가 높아지고 있고, 304동을 지나 305동 지점에서 재확산되고 있는 현상이 관찰된다.

두 번째 주요지점으로 관찰되었는 서측의 313, 314, 315동과 310동 사이 공간의 미세먼지 농도 역시 높아졌으며, 310동의 형상에 따라 남서측 방향으로의 확산세가 강해지고 있다.

세 번째 지점인 306동 북측은 국지적으로 농도가 높아지면서 주변으로의 확산이 점차 이루어지면서, 아리수로93가길을 통해 유입된 미세먼지의 영향도 받고 있는 것으로 분석된다.

4) 60분 경과 시뮬레이션 결과

세 번째 분석 결과로부터 15분이 지난 시점의 분석결과는 Fig. 20. 과 같다. 317동 북서측에서 시작된 첫 번째 지점에 대해서는, 농도가 더 높아지고 범위가 더욱 넓어지고 있으며, 가장 농도가 높은 지점이 15분 전보다 더 넓어져서 3단지 북측 대부분에서 상당히 높은 농도가 관찰되고 있다. 미세먼지 농도가 높은 영역이 302동과 316동까지 영향을 주고 있다.

두 번째 주요 지점 313, 314, 315동과 310동 사이 공간 또한 미세먼지 농도가 더 높아지고 범위가 넓어졌다. 확산세는 서측방향으로 더욱 강해지고 있으며 남측 방향으로의 확산은 적었다.

세 번째 지점 306동의 북측은 농도가 국지적으로 높아지면서 주변으로 확산되고 있으며, 아리수로93가길을 통해 유입되는 미세먼지에 영향을 받아 점차 주변으로 영역이 확대되고 있다.

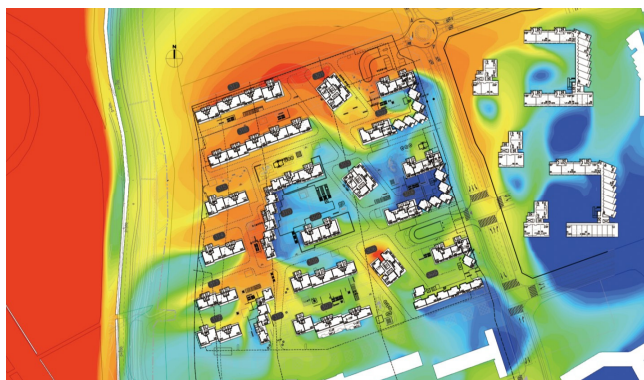


Fig. 18. Simulation results after 45 minutes



Fig. 21. Particulate Matter movement path after 60 minutes



Fig. 19. Particulate Matter movement path after 45 minutes

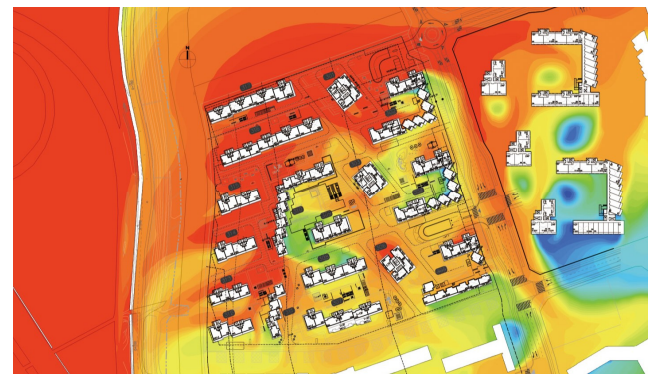


Fig. 22. Simulation results after 75 minutes



Fig. 23. Particulate Matter movement path after 75 minutes

5) 75분 경과 시뮬레이션 결과

네 번째 분석 결과로부터 15분이 지난 시점의 분석결과는 Fig. 22. 과 같다. 고농도의 미세먼지가 방음벽에 도달하여 상공을 통해 이동한 미세먼지가 3단지 서측에 크게 영향을 미치고 있다. 첫 번째 지점인 3단지 북측의 농도가 높아지고 범위가 넓어져 316, 317, 301, 302동까지 영향을 미치고 있다.

두 번째 주요 지점인 단지 서측의 농도는 꾸준히 높아지고 있으며, 서측의 313, 314, 315동이 방음벽을 넘어 유입되는 미세먼지의 영향을 직접적으로 받아 농도가 상당히 높아졌다.

305동 북측 지점의 농도는 여전히 국지적으로 높은 상태이며, 주변에서 다양한 경로로 유입되는 미세먼지가 집적되고 있는 것으로 추정된다.

6) 90분 경과 시뮬레이션 결과

다섯 번째 분석 결과로부터 15분이 지난 시점, 즉 초기에서 90분이 지난 시점의 분석결과는 Fig. 24.와 같다. 고농도의 미세먼지가 방음벽을 넘어 3단지 서측에 강하게 영향을 미치고 있는 상태이다. 미세먼지의 영향범위가 확산되어 단지 북서측 전체에 큰 영향을 미치고 있다. 단지 북측의 농도는 더욱 높아지고 범위가 더 넓어져 사실상 단지 북측 전체가 강한 미세먼지의 영향을 받고 있다. 302동의 안쪽까지 영향을 주고 있는 것으로 관찰된다. 또한 아리수로93가길을 따라 남북방향으로 확산되는 미세먼지의 농도도 더욱 짙어져 단지 동측의 4단지과 동남측의 305동의 미세먼지 농도가 높아졌다.

방음벽을 따라 넘어온 고농도의 미세먼지로 인해 단지 서측의 312, 313, 314, 315동 일대의 미세먼지 농도가 상당히 높아졌다. 단지 내부에서 확산되는 미세먼지와 방음벽 방향에서 유입되는 미세먼지가 합쳐져 높은 농도가 관찰되며, 사실상 하나의 영역으로 관찰되고 있다. 남측 방향의 확산세가 미미하던 이전 시뮬레이션과 다르게, 90분이 지난 해당 시점에서는 미세먼지 농도 및 층위가 두꺼워지면서 남측 방향으로의 확산이 발생하고 있는 것이 관찰된다.

306동 북측의 국지적으로 농도가 높은 부분은 그 농도가 점차 높아지고 면적도 넓어지고 있으며, 주변으로의 확산도 강하게 이루어지고 있다. 아리수길93가길에서의 유입과, 북서측에서 유입되는 미세먼지로 인해 이 지점의 미세먼지 층위가 더욱 두꺼워지고 있다.

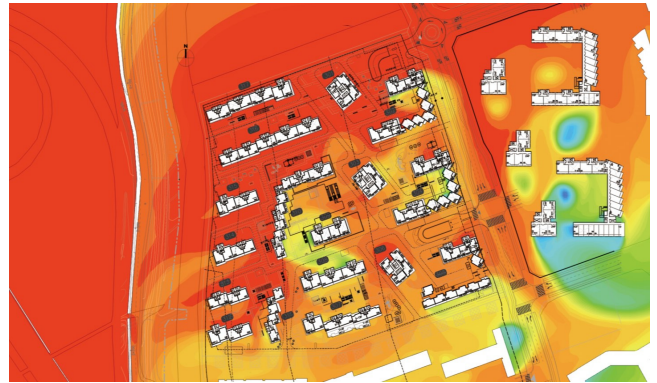


Fig. 24. Simulation results after 90 minutes



Fig. 25. Particulate Matter movement path after 90 minutes

4.3. 공간유형별 저감 방안 제안

1) 미세먼지 저감 방안 제안을 위한 주요 문제 구역 설정

미세먼지는 외부로부터 오염원이 꾸준히 유입된다는 특징을 갖는다. 대기 전체의 문제이기 때문에 광범위한 대책을 세우기 오히려 어려워 공간 범위를 축소하여 대안이 제시되어야 실현가능성과 문제 해결 가능성이 제고될 수 있다. 이를 위해 주요 문제 구역에서 단지 내 거주민들이 주로 이용하는 주요 생활가로와 보행자 주요 진출입 구간, 어린이들의 주요 통학로 등 취약계층이 이용한 구간을 고려하여 구역을 분류하였다.

우선, 첫 번째 기준은 미세먼지 농도에 따른 구분이다. 미세먼지 농도가 가장 높은 구역을 1이라고 설정하였으며, 숫자가 높아질수록 미세먼지 농도가 낮은 구역으로 설정하여 총 1부터 8까지로 분류하였다.

두 번째 기준은 미세먼지의 주요 확산 지점 여부와 사람들의 통행량에 대한 미세먼지 민감도에 따라 구분하였다. 모두 A, B, C 세 단계로 구분하였으며, A는 미세먼지의 주 확산지점 또는 주요통로가 되는 구역이며, B는 확산지점의 주위에 있으면서 통행량이 상대적으로 많은 구역, C는 확산량이 적고 통행량도 적은 구역으로 설정하였다. 이러한 기준들을 도식화하면 Fig. 26.과 같다.

이 기준에 따라 구분한 구역은 Fig. 27.과 같으며, 각 영역의 특징은 Table 7.과 같다.

2) 주요 문제 공간유형의 공간 특성

시뮬레이션 결과를 바탕으로 위와 같이 분류하여 도출한 문제구

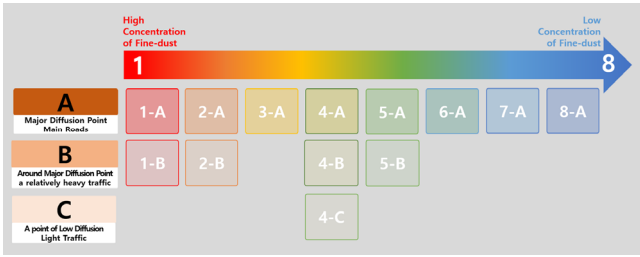


Fig. 26. Zoning criteria



Fig. 27. Zoning according to criteria

Table 7. Summary of features by zone

Concentration	Importance	Characteristic by Zone
1	A	High Concentration, High Seriousness, Initial Particulate Matter Inflow Channel
	B	High Concentration, Wide Range of Seriousness, Heavy Traffic
2	A	High Concentration, High Seriousness, Main Roads
	B	High Concentration, Heavy Traffic (The Main Entrance)
3	A	High Concentration, Particulate Matter Inflow Channel
4	A	High Concentration, Inflow From Other Areas
	B	Point Of Diffusion, Heavy Traffic
	C	Small Amount Of Diffusion, Light Traffic
5	A	Stagnation Of Particulate Matter, Inflow From Other Areas
	B	Low Concentration, Heavy Traffic
6	A	Low Concentration, Light Traffic
7	A	Low Concentration, Light Traffic
8	A	Low Concentration, Light Traffic

역은 총 13개소로 분류된다. 이 중 가장 문제가 되는 지점 및 미세먼지 저감에 대한 대응이 필요한 지점으로 8개 구역을 선정하였다. 선정된 문제 구역의 공간 유형은 아래 내용과 같다.

① 1-A 구역

317동의 북측 모서리 구역으로, 317동의 판상형 주동형태가 301동 방향으로 미세먼지를 확산시키고 있다. 북서측의 미세먼지가 유입되는 핵심 구간이기 때문에 미세먼지 저감 대책이 가장 필요한 구역이다.

② 1-B 구역

1-A에서 유입된 미세먼지가 동서방향으로 뺀 도로(아리수로 93다길)를 따라 확산되는 유형이다. 317동의 판상형 주동에 따라 301동, 302동 까지 광범위한 영향을 주며 확산된다. 보행자의 이동은 적을 것으로 예상되지만, 미세먼지의 전체적인 확산의 핵심 구역으로 3단지 내부는 물론 4단지까지 영향을 주고 있는 만큼 적극적인 대응이 필요하다.

③ 2-A 구역

1-B를 통해 이동해온 미세먼지가 남북방향으로 뺀 도로(아리수로93가길)를 따라 확산되는 유형이다. 도로 방향을 따라 배치된 3단지 도로변 주동(302, 304동)과 4단지 도로변 주동이 이 구역의 미세먼지 확산을 강화하고 있다. 단지와 단지 사이에 위치한 통행량이 많은 도로 구역이므로 미세먼지의 대응이 필요한 구역이다.

④ 2-B 구역

2-A구역을 통해 유입된 미세먼지가 단지 내로 유입되는 구간으로, 3단지의 주출입구가 위치해 있다. 보행자 대기시간이 길고, 자동차의 정차로 인한 2차 미세먼지 발생이 큰 구역으로 대책이 필요한 구간이다. 304동과 305동의 주출입구를 중앙으로 두고 마주보는 주동형태로 인해 단지 안쪽으로 미세먼지를 유입시키는 구간으로 관리가 필요하다.

⑤ 3-A 구역

방음벽과 가장 인접한 구역으로, 방음벽을 따라 미세먼지가 유입되는 지점으로 높은 미세먼지 농도가 나타난다. 이 구역에서의 유입이 단지 내 미세먼지 농도 수준을 높이는 주된 원인이 되며, 특히 4-A 구역에 큰 영향을 주므로 해결책 마련이 필요하다.

⑥ 4-A 구역

4-A구역은 북측에서 유입되는 미세먼지와 서측의 방음벽에서 유입되는 미세먼지가 만나는 지점으로, 높은 미세먼지 농도를 보이며, 동서 방향으로 배치된 315, 316동의 주동 형상으로 인해 동서측으로의 미세먼지 확산을 강화시키는 구역이다. 단지의 외부 광장 및 부대 복리시설, 생활가로와 연계가 되며, 이 지점의 미세먼지가 310동, 313동 등 단지 남동측 방향으로 영향을 주므로 관리가 필요하다.

⑦ 4-B 구역

4-B구역은 1-A와 4-A의 영향을 받아 고농도의 미세먼지가 확산되는 지역으로, 단지 사이에 사람의 통행이 많을 것으로 예상되는 구역이다. 이곳에서의 미세먼지 확산이 저감될 경우, 6-A, 7-A, 8-A구역의 미세먼지 저감을 유도할 수 있을 것으로 예상된다.

⑧ 5-A 구역

5-A구역은 306동 북측에 고농도의 미세먼지가 정체되어 있는 구간으로, 다양한 구간에서 유입되는 미세먼지가 정체되어 있는 구간이다. 주출입구가 있는 2-B 지역과 연계되어 2차 미세먼지 발생량이 많을 것으로 예상되며, 주출입구를 통한 인구 유동량이 가장 많은 것으로 판단된다. 또한 어린이집, 놀이터 등이 근접하여 문제 해결책이 필요한 구역이다.

3) 각 구역별 주요 저감 방안 제안

각 구역별 공간 특징에 따라 앞서 검토한 미세먼지 저감 방안의 적용을 Table 8.과 같이 제안하였다.

Table 8. Suggestion of major reduction measures for each zone

Classification	Facility Name	Zone							
		1-A	1-B	2-A	2-B	3-A	4-A	4-B	5-A
Blocking	Urban Forest Road	●		●		●			
	Outdoor air purifier dome				●			●	
Absorption & Adsorption	Vegetation and dust collection panel						●		
	Smart Clean Bus Station				●				
	Cooling Mist		●					●	
	Power Saving Type Particulate Matter Reduction Device	●	●				●		
	Roof greening/wall greening	●				●			
	Moss module panel					●			
	Smog Free Tower								●
	Air purification bench (City Tree)						●	●	
	CMA (Calcium Magnesium Acetate)			●					
	Photocatalytic paint	●					●		●
Information System	Particulate Matter signal light				●				
	Smart Filter Monitoring Cube			●				●	

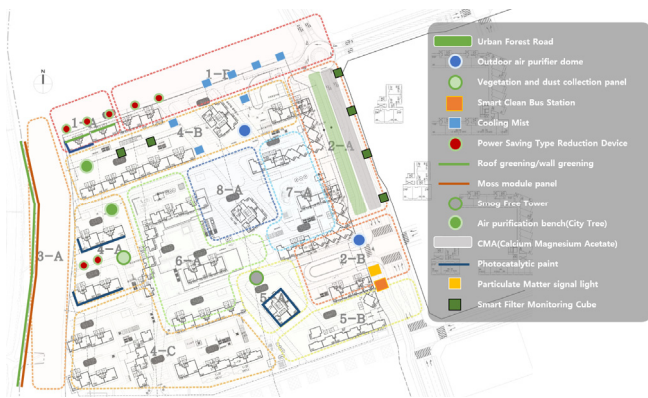


Fig. 28. Layout of major reduction measures for each zone

① 1-A 구역

북서측의 미세먼지가 유입되는 핵심 구간이기 때문에 지속적이면서도 고효율의 미세먼지 저감 수법의 활용이 필요하다. 이를 위해서 차단 식재와 지속적으로 미세먼지 저감에 효과가 있는 녹화와 광촉매를 바탕으로 하고자 하였다. 또한, 고효율의 미세먼지 저감 기계를 배치하여 미세먼지가 심각한 특정 시점에 대응하기 위해서 관련 기술을 배치하였다.

② 1-B 구역

이 구역은 1-A에서 유입된 미세먼지가 다수의 연결된 공간으로 확산되는 교두보가 되는 구역이다. 그러므로 선형 공간에서의 고효율 미세먼지의 순간적인 저감에 유리한 미스트와 기계식 미세먼지 저감 장치를 설치하여 이에 대응하고자 하였다.

③ 2-A 구역

이 구역은 1-B를 통해 이동해 온 미세먼지가 자동차 통행량이 많은 도로와 연계되어 미세먼지가 확산 또는 발생되는 구역이다. 이러한 특징을 고려하여, 도로변에 배치하여 미세먼지를 제거하는 스마트 큐브 필터 기법을 활용하고, 아파트의 벽면 등을 활용하여 미세먼지를 효과적으로 저감하는 화학적 기법인 CMA 기법을 적용하고자 하였다.

④ 2-B 구역

이 구역은 단지의 입구부로, 2-A구역을 통해 확산된 미세먼지 이외에 차량의 진출입, 정차 등에 의해서 2차 미세먼지 발생이 높은 지역이며, 보행자의 진출입이 많은 구간이므로 보다 세심한 대응이 필요한 구역이다. 미세먼지 정보를 보행자에게 제공함으로써 미세먼지에 대한 개인 수준의 주의를 환기하며, 버스 등의 대중교통 대기 시 미세먼지로부터 안전하게 대기할 수 있는 쉼터 제공이 필요하다. 이외에 자동차를 기다리거나 만남을 위해 대기하는 보행자를 위해서 일정 반경에 미세먼지 프리존을 만들어 줄 수 있는 미세먼지 프리덤을 적용하였다.

⑤ 3-A 구역

방음벽과 가장 인접한 구역으로, 방음벽을 넘어 중간 수준의 농도의 미세먼지가 지속적으로 유입되는 구역이다. 특정 시점에만 가동하는 기법 보다는 긴 시간 동안 지속적으로 미세먼지를 차단하고 이를 저감할 수 있는 차단 식재, 녹화 등의 수법을 적용하였다.

⑥ 4-A 구역

이 구역은 미세먼지 유입도 중요하지만 단지 내 생활가로 및 단지 내 부대복리시설이 집중된 지역이다. 이에 식재 패널 및 광촉매 도료를 통해서 지속적인 미세먼지 저감 대책을 수립하였으며, 단지민들이 쉬면서 미세먼지를 피하기도 하며, 동시에 미세먼지 저감 효과가 있는 공기정화 벤치 기법을 적용하였다.

⑦ 4-B 구역

이 구역은 선형으로 미세먼지가 확산되고, 주동들 사이의 주요 보행통로가 되는 공간이므로 선형 공간의 미세먼지 저감에 유리한 쿨링 미스트 및 큐브형 미세먼지 정화 필터를 적용하였다. 또한, 보행자들이 쉬면서 미세먼지로부터 피할 수 있고, 자체적으로 미세먼지 저감 효과가 있는 미세먼지 차단 돔, 공기정화 벤치 등을 설치하여 생활 편의제공 및 미세먼지 저감 효과를 극대화하고자 관련 기법을 적용하였다.

⑧ 5-A 구역

이 구역은 미세먼지 농도가 높지는 않지만 미세먼지의 정체가 높은 구역이다. 또한, 어린이집, 놀이터 등이 근접하고 있기 때문에 평

상시에 미세먼지를 저감할 수 있는 광촉매 도료를 적용하였다. 또한, 특정 시점에 미세먼지를 효과적으로 저감할 수 있는 스모그 프리 타워를 제안하였다.

5. 결론

본 연구는 미세먼지 저감 국내의 기술사례 조사함으로써 다양한 미세먼지 저감 기법 및 기술의 효과와 특징을 정리하였다. 이후, 현재 건설 중인 아파트 단지를 대상으로 실제 측정을 통해 시뮬레이션을 위한 초기값을 정하였다. 이를 바탕으로 CFD 시뮬레이션을 통해서 미세먼지의 확산 현황에 대해서 시계열적으로 분석하였다. 이러한 미세먼지의 확산 경로, 미세먼지 농도 이외에 아파트 단지의 외부 공간의 이용상의 특성을 고려하여 아파트 단지의 외부공간을 유형화하였다. 이러한 공간 유형별로 효율적인 미세먼지 저감 기법 및 기술을 제안하였다.

이처럼 본 연구는 특정 아파트 단지의 미세먼지에 대한 공간구조를 분석·분류하고, 국내외 미세먼지 저감 방식을 검토하여 지역에 적합하면서도 즉시 적용가능한 실용적인 저감 방안을 제시했다는 데에 의의가 있다.

하지만 여전히 몇 가지 한계를 지닌다. 우선, CFD 시뮬레이션이 계획도면에 따른 가상의 모델링으로 실행되었고, 모델링의 정확도에 따라 그 결과에 다소 차이가 있을 수 있어 시뮬레이션의 정확도 제고를 위한 관련 연구가 더욱 필요하다. 또한, 본 연구에서 제안된 미세먼지 저감 기법이 과연 최적 저감기법인지 그 효과 및 설치 효율, 적용에 따른 비용 등을 고려한 후속연구 역시 필요할 것이다.

References

[1] 국립환경과학원, 2021 대기환경연보, 국가통계 승인번호 제106003호, 2022. // (National Institute of Environmental Research, Annual report of air quality in Korea 2021, National Statistical Approval No. 106003, 2022.)

[2] World Health Organization, WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide., September 2021, pp.36-95.

[3] 김용석, 공업지역과 상업지역에서의 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5) 발생원 추정에 관한 연구, 동아대학교 대학원, 2013. // (Y. Kim, PM10 and PM2.5 Source identification study in industrial and commercial region, Dong-A university Master of Science in Environmental Engineering, 2013.)

[4] Beate Ritz 1, Barbara Hoffmann, Annette Peters, The effects of fine dust, ozone, and nitrogen dioxide on health, *Dtsch Arztebl Int.* Dec 23, 2019. pp.881-886.

[5] 이은엽, 김미나, 신수훈, 미세먼지 저감을 위한 시범도시 조성 기법 연구, 토지주택연구원 연구지원 2020-140, 2020. // (E.Y. Lee, M.N. Kim, S.H. Shin, Method for making PM free pilot city, Land and Housing Institute, Korea, 2020-140, 2020.)

[6] 김정근, 경대승, 이성희, 미세먼지 저감 도시 조성기법 및 사례 연구, 토지주택연구원 연구지원, 2018-155, 2018. // (J.G. Kim, D.S. Kyung, S.H. Lee, Methods for making PM free city and case study, Land and Housing Institute, Korea, 2018-155, 2018.)

[7] 쉐앤쓰컴퍼니, 공기정화 에어돔, http://www.nthcompany.co.kr/sub/sub01_02.php, 2023.04.24. // (Nthcompany, Air dome, http://www.nthcompany.co.kr/sub/sub01_02.php, 2023.04.24.)

[8] Air spectrm environmental, PAMARES, <https://www.airspectrum.com/product/staticair-pamares/>, 2023.04.24.

[9] Besix Group, Moss module pannel, [https://www.besix.com/en/news/like-](https://www.besix.com/en/news/like-its-mosses-besix-clean-air-is-growing)

[its-mosses-besix-clean-air-is-growing](https://www.besix.com/en/news/like-its-mosses-besix-clean-air-is-growing), 2023.04.24.

[10] 이건원, 정윤남, 도시·건축형태와 미세먼지의 관계에 대한 관찰 연구, 한국: 예술인문사회 융합 멀티미디어 논문지, 제8권 제11호, 2018.11, pp.109-119. // (G.W. Lee, Y.N. Jeong, An observation study of the relationship of between the urban and architectural form and microclimate, Korea: Asia-pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology, 8(11), 2018.11, pp.109-119.)

[11] 이건원, 서민호, 도시형태와 건축물 특성이 원도심 에너지 효율에 미치는 영향 - 대전 및 제천 원도심의 비교 분석을 중심으로, KIEAE Journal, 제21권 제2호, 2021. pp.53-63. // (G.W. Lee, M.H. Seo, The impacts of urban forms and building character on the energy consumption of old downtowns - Based on a comparative analysis of the old downtowns of Daejeon city and Jaechon city-, KIEAE Journal, 21(2), 2021, pp.53-63.)

[12] 신지웅, 김태연, 이경희, 아파트의 실내의 공기질 향상을 위한 주동배치 계획 연구, KIEAE Journal, 제4권 제3호, 2004, 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, pp.195-202.)

[13] 정종철, 이상훈, 서울시 토지이용과 교통량에 따른 미세먼지의 공간분포, 지적과 국토정보, 제48권 제1호, 2018, pp.123-138. // (J.C. Jeong, 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, pp.123-138.)

[14] 구민아, 도시근린공원 미세먼지(PM)저감과 공간차폐율과의 관계 -대구광역시 수성구 근린공원을 중심으로-. 한국조경학회지, 제47권 제6호, 2019. pp.67-77. // (M.A. Koo, the relationship between particular matter reduction and space shielding rate in urban neighborhood park, J.KILA, 47(6), 2019. pp.67-77.)

[15] 허유경, 강민규, 도시공간구조와 기상요인이 계절별 농도 미세먼지 발생에 미치는 영향에 관한 연구, 국토계획, 제57권 제1호, 2022, 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. pp.145-160.)

[16] 백지원 외 6인, 주택재개발사업지의 층수변화 시나리오별 미세먼지 영향 예측 : 기온, 미세먼지, 초미세먼지를 중심으로, 국토계획, 제57권 제6호, 2022, 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, pp.124-137.)

[17] 배용규, 박진철, CFD 시뮬레이션을 통한 저층주거지 도시재생뉴딜사업 마중물사업의 시행에 따른 온도 및 미세먼지(PM2.5) 감소효과 분석 연구, 한국산학기술학회 논문지, 제23권 제1호, 2022, 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. pp.67-83.)

[18] 정윤남, 도시·건축적 특성에 따른 미세먼지 분포패턴 분석, KIEAE Journal, 제23권 제1호, 2023. pp.93-101. // (Y.N. Jeong, Analysis of particulate matter distribution patterns according to urban and architectural characteristics, KIEAE Journal, 23(1), 2023. pp.93-101.)

[19] 이건원, 도시 및 지구·단지 차원의 미세먼지 대응 방안, 국토·통권 제452호, 2019, pp.26-33. // (G.W. Lee, Measures to cope with fine dust in urban and district-complex areas, Planning And Policy, (452), 2019, pp.26-33.)

[20] 박종순, 미세먼지 대응을 위한 국토·도시 관리 방향, 국토·통권 제452호, 2019, pp.6-12. // (J.S. Park, Land and urban management directions to respond to fine dust, Planning And Policy, (452), 2019, pp.6-12.)

[21] 남성우, 성선용, 박종순, 미세먼지 저감대책으로서 바람길 적용 방안 : 세종시를 대상으로, 한국콘텐츠학회논문지, 제20권 제3호, 2020, pp.1-9. // (S.W. 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, pp.1-9.)

[22] 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, 2005, pp.617-631.