

# 실측 자료를 활용한 ENVI-met 모델의 PM<sub>2.5</sub> 농도 정확도 검증\*

정다은<sup>1</sup>·박건웅<sup>2</sup>·김태경<sup>1</sup>·송봉근<sup>3</sup>·박경훈<sup>4</sup>\*

## Validation of PM<sub>2.5</sub> Concentration Accuracy in the ENVI-met Model Using Field Measurements\*

Da-Eun JEONG<sup>1</sup>·Geon-Ung PARK<sup>2</sup>·Tae-Gyeong KIM<sup>1</sup>  
Bong-Geun SONG<sup>3</sup>·Kyung-Hun PARK<sup>4</sup>\*

### 요 약

도시화가 진행됨에 따라 대부분 도시의 중요한 과제로 부각된 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)를 효과적으로 관리하기 위해서는 도시 구조와 기상 요소 간의 복잡한 상호작용을 분석하고 세밀하게 추정하는 것이 필수적이다. 이를 위해서 모델링 프로그램이 활용되는데 그 중 ENVI-met이 다양한 미기후를 반영할 수 있고 식물의 표면에서 작용하는 대기오염물질의 침강 및 흡수를 분석할 수 있기에 PM<sub>2.5</sub> 농도 분석에 많이 쓰이고 있다. 그러나 국내에서는 실측값을 통한 검증 연구가 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 현장 측정 자료를 활용하여 ENVI-met 모델에서 예측되는 PM<sub>2.5</sub> 농도를 검증하고자 한다. 연구 결과, PM<sub>2.5</sub> 농도 예측은 전체 시간대에서 R<sup>2</sup>값이 0.479였으며 13시~16시의 오후 시간대에서 0.695로 가장 높은 상관성을 보였다. 이러한 결과로 ENVI-met 모델은 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화를 신뢰성 있는 결과로 예측할 수 있다는 것을 확인하였다. 본 연구는 ENVI-met 모델의 예측값을 현장 측정값과 비교하여 검증함으로써, 향후 도시 내 PM<sub>2.5</sub> 관리에 있어 모델의 활용 가능성을 제시하였다.

주요어 : ENVI-met, 초미세먼지, 미기후, 대기오염

2024년 10월 14일 접수 Received on October 14, 2024 / 2024년 11월 6일 수정 Revised on November 6, 2024 / 2024년 11월 8일 심사완료 Accepted on November 8, 2024

\* 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2022R1F1A1074483).  
본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음  
(IITP-2024-RS-2024-00438409).

1 국립창원대학교 환경공학과 석사과정 M.S. Student, Dept. of Environmental Engineering, Changwon National University

2 국립창원대학교 산업기술연구원 전임연구원 Full-time Researcher, Institute of Industrial Technology, Changwon National University

3 주식회사 엔비랩스 대표이사 CEO, ENVILABS Co., Ltd.

4 국립창원대학교 스마트그린공학부 교수 Professor, School of Smart & Green Engineering, Changwon National University

※ Corresponding Author E-mail : landpkh@changwon.ac.kr

## ABSTRACT

As urbanization progresses, fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) has emerged as a significant issue in most cities. Effectively managing PM<sub>2.5</sub> requires a detailed analysis of the complex interactions between urban structures and meteorological factors. To achieve this, modeling programs such as ENVI-met are often utilized, as they can simulate microclimate and analyze the deposition and absorption of pollutants on plant surfaces, making them widely used in PM<sub>2.5</sub> concentration analysis. However, studies validating these models with actual measurement data are lacking in Korea. Therefore, this study aims to validate PM<sub>2.5</sub> concentrations predicted by the ENVI-met model using field measurement data. The results showed that the overall R<sup>2</sup> value for PM<sub>2.5</sub> concentration predictions was 0.479, with the highest correlation observed in the afternoon (13:00-16:00) with an R<sup>2</sup> value of 0.695. These results confirm that the ENVI-met model can reliably predict changes in PM<sub>2.5</sub> concentrations. By comparing the predicted values from ENVI-met with actual measurements, this study demonstrates the potential application of the model for future PM<sub>2.5</sub> management in urban areas.

**KEYWORDS** : ENVI-met, PM<sub>2.5</sub>, Microclimate, Air pollution

## 서론

도시화가 진행됨에 따라 대기오염물질 중 특히 초미세먼지(PM<sub>2.5</sub>)는 대부분의 도시에서 해결해야 할 중요한 과제 중 하나로 부각되고 있다(Li et al., 2023). PM<sub>2.5</sub>는 직경이 2.5 μm 미만인 대기 오염물질로, 농도가 높을 경우 호흡기 손상, 암, 조기 사망 등을 초래하여 인간의 건강에 해를 끼칠 수 있다(Tan et al., 2023). 이러한 PM<sub>2.5</sub>는 기상 조건에 매우 민감하여 기온, 풍속, 습도 등이 변화하면 영향을 받을 가능성이 높고 동일한 공간에서도 건물, 식생 등의 도시 공간 구조에 따라 변화한다(Kim et al., 2018). 따라서, PM<sub>2.5</sub>를 관리하기 위해서는 도시 구조와 기상 요소 간의 복잡한 상호작용을 분석하여 공간적, 시간적 변화를 세밀하게 추정하는 것이 필수적이다(Tsoka et al., 2018; Li et al., 2017).

이를 위해서 다양한 모델링 기법을 활용할 수 있으며 그중 CFD(Computational Fluid Dynamic) 모델이 있다. 수 m~수 십 m의 해상도를 가지는 3차원 모델이기 때문에 건물과 복잡한 지형

정보를 직접적으로 고려할 수 있어 실제 공간적 정보를 반영할 수 있다는 장점이 있다(Baek, 2022). CFD 모델 중에서도 도시 환경적 요소와 기상적 요소, 녹화 요소에 따른 대기오염물질의 농도 및 수목에 의한 흡착량 등을 분석할 수 있어 미세먼지 분석에 효과적인 ENVI-met이 도시 기후 및 PM<sub>2.5</sub> 연구에 주로 사용되고 있다(Eum et al., 2023).

ENVI-met은 1998년 독일 Michael Bruse가 개발한 3차원 미기후 모델링 프로그램이다. 도시의 토지피복, 식생, 대기 환경 간의 미세한 상호작용을 시뮬레이션할 수 있으며, 수목 위치 변화, 새로운 건물 배치 등 작은 변화가 미기후에 미치는 영향까지 분석할 수 있다(Bruse and Fleer, 1998). 격자 형태의 모델링 환경을 구축할 수 있으며 미기후 변화를 수치적으로 확인하고 분석할 수 있는 특징이 있다(Choi, 2016a). 또한 건물과 식생 각각의 세밀한 표현이 가능하고 기온, 습도, 풍속 등의 다양한 기상정보 예측 결과를 상세하게 생성할 수 있다(Kim et al., 2009). 1998년에 공식 출시된 후, 2010년부터 본격적으로 이를 활용한 연구가 증가하여 2013년부터 5년간 출판된 연구가 2018년을 기준으로

로 ENVI-met을 활용한 전체 연구의 77%를 차지했다. 또한, 미기후 조건을 분석하기 위해서만 적용된 것이 아니라 오염물질 확산에 초점을 맞춰 대기질을 분석하기 위해서도 사용되어 왔다(Tsoka et al., 2018).

ENVI-met을 활용하여 PM<sub>2.5</sub>를 분석한 연구는 국외에서 활발히 진행되어 왔다(Wania et al., 2012; Deng et al., 2019; Du et al., 2021; Sun et al., 2021; Heshani and Winijkul, 2022; Liu and Zheng, 2023; Liu et al., 2022; Wang et al., 2022; Li et al., 2023; Jareemit et al., 2023). 이러한 연구들은 ENVI-met 시뮬레이션을 통해 도심 내 교통량, 녹지 공간, 도로 구조 등 다양한 도시 요소와 미기후가 PM<sub>2.5</sub> 농도에 미치는 영향을 분석하여 정량적으로 평가하였다. 이 중 다수의 연구에서 PM<sub>2.5</sub> 농도 및 기상 요인의 현장 측정 데이터를 바탕으로 시뮬레이션 결과의 정확성을 검증하였다. Du et al.(2024)은 측정값과 모델링 값의 R<sup>2</sup>는 여름과 겨울 분석 결과를 종합하여 기온이 0.72-0.92, 상대습도 0.70-0.94, PM<sub>2.5</sub> 0.65-0.93의 상관분석 결과를 확인하여 ENVI-met 모델의 기온, 상대습도, PM<sub>2.5</sub>에 대한 전반적으로 높은 예측 정확도를 보여주었다. Li et al.(2023)은 풍상측, 풍하측 양쪽에서 시뮬레이션 값과 상관분석을 했으며 그 결과는 풍상측 R<sup>2</sup>가 0.93, 풍하측이 0.84로 ENVI-met 이 PM<sub>2.5</sub> 시뮬레이션에 적합함을 시사하였다.

국내에서 ENVI-met을 활용한 연구는 바람과 열환경에 대해 주로 이루어졌고(Ryu and Ko, 2010; Song, 2012; Yang et al, 2013; Song et al., 2014; Choi, 2016b; Wu et al., 2019; Kim et al. 2023), 2020년부터 ENVI-met으로 미기후와 함께 PM<sub>2.5</sub>를 분석한 연구가 본격적으로 등장하기 시작하였다(Hong et al., 2020; Baek, 2021; Kim et al., 2021; Baek et al., 2022; Eum et al., 2023). 국내 연구에서도 국외 연구와 유사하게 녹지, 건물 배치 등이 PM<sub>2.5</sub> 농도에 미치는 영향을 분석하였다. 그러나 대부분의 국외 연구에서 모델링의 검증이 이뤄진 것과 달리, 국

내 연구에서는 소수만이 현장 측정 데이터를 활용하여 모델의 정확성을 검증한 것으로 보인다. 일부 선행연구에서는 제한된 장비 여건으로 인해 측정 지점의 수가 적거나, 실제 미세먼지 데이터를 활용하지 못하고 시뮬레이션을 기반으로 농도를 추정하여 정확도 검증이 필요하다는 한계를 지적하고 있다. 국내에서 ENVI-met을 활용하여 PM<sub>2.5</sub>를 분석한 연구는 국외에 비해 부족하며, 현장 측정을 통한 검증 연구도 상대적으로 미흡한 실정이다.

국내에서 ENVI-met을 활용한 PM<sub>2.5</sub> 관련 연구는 아직 초기 단계로 파악되며 실측값으로 모델을 검증한 연구도 부족한 상황이다. 이에 본 연구는 ENVI-met을 통해 실제 환경과 유사한 공간을 구축하고 해당 공간에서의 PM<sub>2.5</sub>와 미기후 예측 결과를 실측값과 비교·검증하여 모델의 예측 성능을 평가하는 것을 목표로 한다. 특히, 예측값의 수치적 정확도보다는 공간적 분포에 따른 경향성 평가에 중점을 둔다. 본 연구를 통해 향후 ENVI-met 모델링 환경 구축 시 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 연구방법

### 1. 연구 범위

연구의 공간적 범위는 경상남도 창원시의 원이대로를 중심으로 가로 1,120 m, 세로 200 m의 영역으로 설정하였다(그림 1). 원이대로는 창원시의 간선도로 중 하나인 7차로 도로로 교통량이 많은 지역이다. PM<sub>2.5</sub>는 차량에서 직접 배출되기도 하므로 일반적으로 도로와 인접한 지역에서 농도가 높다(Choi and Kim, 2022). 그에 따라 원이대로에서 발생하는 대기오염물질 배출이 많을 것으로 예상된다. 또한, 이 지역은 다양한 상업·업무시설, 단독주거시설, 공동주거시설이 혼재되어 있어 유동인구가 많으며 이로 인해 PM<sub>2.5</sub>가 사람들에게 미치는 영향도 클 것으로 판단되었다(그림 2). 이러한 특성 때문에 원이대리가 적합한 연구대상지로 선정되었다.

시간적 범위는 연구대상지 내의 도로변대기

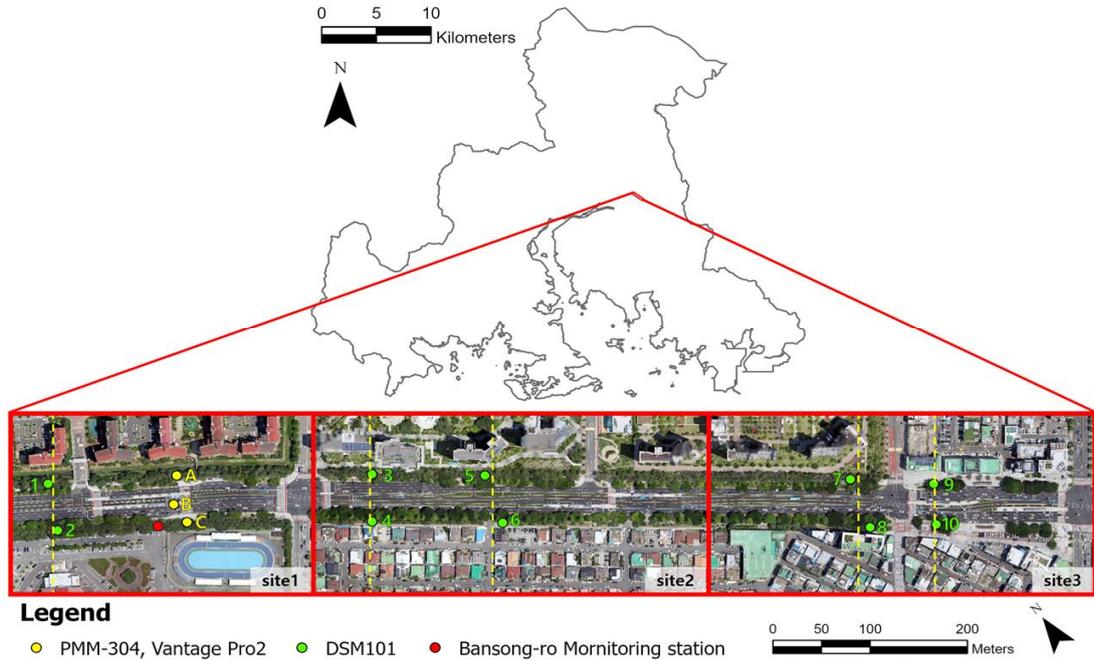


FIGURE 1. Study area and measurement points



FIGURE 2. Subdivision land cover map of study area

측정망인 반송로 측정소 자료의 최근 5년간 월 평균  $PM_{2.5}$  농도 중 5년 평균 농도와 가장 유사한 값을 보인 5, 6, 11월 중에서 고려하였다. 현장 측정 시 사용되는 간이측정기의 경우 습도 보정이 불가능하여 측정 오차를 최소화하기 위해 습도가 비교적 높은 6월은 제외하였다.  $PM_{2.5}$ 는 기온이 상승할수록 변동성이 커지기 때문에(Tai et al., 2012) 농도 변화가 활발한 때의 검증에 위해 11월도 제외하여 최종적으로 2024년 5월 31일로 선정하였다.

## 2. ENVI-met 입력자료

시뮬레이션 규모는 그림 1과 같이 3가지 영역으로 나누어 분석을 진행하였다. X×Y 규모는 각각 310 m×200 m, 410 m×200 m, 400 m×200 m이다. 각 영역의 Z 규모는 ENVI-met에서 권장하는 높이인 최대 높이 건물의 3배 이상으로 설정하였다(Baek, 2021). 셀 크기는 2 m×2 m×2 m로 진행하였다. ENVI-met 입력자료는 두 가지로 나뉜다. 첫 번째는 Configuration File로 대상지의 위치, 시

TABLE 1. Input surface material

Category	Input values
Walkway	Granite pavement(single stones), Brick road(red stones), Wood planks
Green space	Loamy soil
Road	Asphalt road
Sports facility	Concrete pavement light, Concrete pavement gray
Stream	Deep water

간, 기상 등의 데이터를 입력하고, 두 번째는 Area Input File로 대상지의 건물, 토지피복, 식생 등을 반영하여 시물레이션 공간을 구축한다(Kwon et al., 2019).

첫 번째 입력자료인 Configuration file은 다음과 같다. 시물레이션은 2024년 5월 31일 2시부터 22시까지 총 21시간 동안 1시간 간격의 데이터를 생성하도록 설정하였다. 시간 범위는 현장 측정 시간인 8~20시를 포함하며, 시물레이션 안정화를 위해 일출시간을 포함하도록 4시간 이상의 여유를 두었다(De and Mukherjee, 2016). 기상 자료는 경상남도보건환경연구원이 운영하는 도로변대기 측정망인 반송로 측정소의 데이터를 활용하였다. 해당 일자의 풍속은 최소 0.5 m/s로 ENVI-met 모델링 환경에서 풍속이 1 m/s 미만일 경우 오류가 발생할 수 있어 일 평균 값인 1.1 m/s로 조정하였다.

두 번째 입력자료는 Area input file이다. 대상지의 물리적 환경은 ENVI-met의 Spaces 도구를 사용하여 INX 파일로 구축하게 된다. Spaces에서 건물, 식생, 피복재질, 배출원 등을 지정할 수 있다. 본 연구에서는 건물과 피복 재

질은 QGIS에서 벡터 데이터로 생성한 후, ENVI-met 플러그인은 활용하여 INX 파일로 변환하였다. 건물은 국토지리정보원에서 제공하는 연속수치지형도(2023년도)를 이용하여 건물 위치 및 높이 정보를 반영하였다. 피복재질은 현장 조사 및 로드뷰를 참고하여 ENVI-met에서 제공되는 재질 중에서 입력하였다(표 1).

식생은 Spaces 내에서 제공되는 3D plants로 수목, simple plants를 활용하여 잔디를 적용했다. 「창원시 도시림등의 조성 및 관리에 관한 조례」의 주요 가로수 수종 중 3D plants 항목에 있는 은행나무, 메타세쿼이아, 단풍나무와 현장 조사를 통해 확인한 소나무까지 4가지 수종을 고려하였다. ENVI-met의 수목 편집 도구인 Albero를 활용하여 3D plants에서 제공되는 수목의 높이를 조절하여 적용하였다(표 2). 수목 높이는 현장 조사 시 LiDAR 센서를 장착한 드론(dji사 M300 RTK)으로 대상지를 촬영하고 Arcgis pro S/W의 Create LAS Dataset, LAS Dataset to Raster, Raster Calculator 도구를 사용하여 생성한 nDSM을 참고하여 수정하였다. ENVI-met에 사이트별 Area input

TABLE 2. Input tree species

Category	Provided by ENVI-met		Input height(m)
	Name	Height(m)	
Ginkgo tree	Ginko/fan leave tree(middle)	13.59	12.24
	Ginko/fan leave tree(young)	8.45	10.53
Metasequoia	Primeval sequoia(old)	24.18	22.2
	Field maple(middle)	14.75	10
Maple tree	Field maple(old)	17.18	13
	Field maple(young)	10.45	5.5
Pine tree	Pine tree(middle)	19.55	17
	Pine tree(young)	10.47	14
	Pine like tree	4.52	-

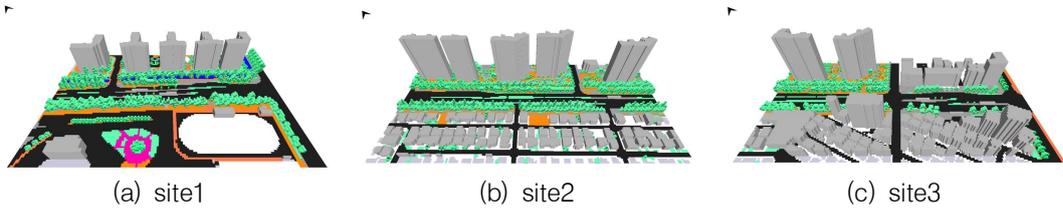


FIGURE 3. Results of the ENVI-met simulation environment configuration

TABLE 3. PM<sub>2.5</sub> emission factor

Vehicle classification	Actual application model year	Ratio	Emission factor (g/km)
LCV (light commercial vehicle)	2008~2011	0.17	$k \times 0.3111 \times V^{(-0.5125)}$
	2012~2016	0.32	$k \times 0.1119 \times V^{(-0.5125)}$
	2017~	0.51	$k \times 0.0086547 \times V^{(-0.97564)}$
BUS	2008~2010	0.14	$k \times 0.2418 \times V^{(-0.4727)}$
	2011~2014	0.32	$k \times 0.2125 \times V^{(-0.4650)}$
	2015~	0.54	$k \times 0.0363 \times V^{(-0.4727)}$
PC(passenger car)	-	-	$k \times 0.0010$

$k = 0.92$  for PM<sub>2.5</sub>,  $V =$  Average speed

file을 입력한 결과는 그림 3과 같다.

PM<sub>2.5</sub> 배출원은 ENVI-met의 DB Manager에서 Traffic Tools로 계산하여 입력할 수 있으며, 필요한 변수는 일일 통행차량수, 차선수, 차종 비율, 배출계수이다. 매시간 차량 비율은 지정된 비율만 사용할 수 있다는 한계가 있다. 따라서 한국교통연구원의 View-T에서 제공하는 링크별 추정 교통량(2022년) 자료를 통해 연구대상지 내 시·군도의 평일 시간대별 추정 교통량, 평균 속도, 차량 비율(승용차, 버스, 트럭)을 수집하여 계산하였다. 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(VI)의 배출계수를 적용하였고 차량 연식별 비율은 국토교통 통계누리에서 제공하는 2024년 4월 자동차 등록자료 통계 자료의 차종별 상세등록(시도)에서 창원시가 속한 경상남도에 해당하는 자료를 참고하여 반영하였다(표 3). 수집한 데이터를 Traffic Tools에 입력한 후, 계산된 PM<sub>2.5</sub> 배출량을 차량 1대당 배출량으로 환산하여 시간대별 추정 교통량을 곱해 최종 배출량을 산출하였다. 배출원의 높이는 차량 배기가스 배출구 높이를 고려하여 0.5 m로 적용하였다. 또한 PM<sub>2.5</sub>의 배경농도는 5월

31일의 반송로 측정소 일평균 농도인 16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정하였다.

### 3. 현장측정

5월 31일 8시부터 20시까지 현장측정을 진행했다. PM<sub>2.5</sub> 측정에 사용된 기기는 PMM-304 3대, DSM101 10대이고, 기상 측정에 사용된 기기는 Vantage Pro2 3대이다(표 4). PM<sub>2.5</sub> 측정 기기의 경우 두 가지 모두 환경부 미세먼지 간이측정기 성능인증 1등급을 받았으며 광산란법으로 측정한다. Vantage Pro2는 온도, 습도, 풍속, 풍향 등의 여러 기상 요소를 측정하는 자동기상관측시스템이다. 측정에 사용된 기기들은 1분 간격으로 데이터를 저장하며 매시간 정각의 데이터를 분석에 활용하였다.

연구대상지 내에서 측정 기기를 설치한 위치는 그림 1과 같다. PMM-304와 Vantage Pro2는 각 1대씩 도로의 중앙분리대(B지점), 양쪽 보행로(A, C지점)에 설치하였다. 도로변 측정망(반송로 측정소)과 인접한 곳에 설치하여 반송로 측정소 데이터와의 비교를 통해 현장측정값의 정확도 또한 확인하고자 하였다.

TABLE 4. Equipment used to collect data

	PM <sub>2.5</sub> measurement equipment		meteorological measurement equipment
	PMM-304	DSM101	Vantage Pro2
Manufacturer	APM Engineering	RadonFTlab	DAVIS
Measurement items	PM <sub>2.5</sub> , Temperature, Relative humidity	PM <sub>2.5</sub> (Humidity correction unavailable)	Temperature, Relative humidity, Wind speed, Wind direction, etc

Equipment image



DSM101 10대(1~10지점)는 그림 1의 노란 점선으로 표시된 5개 지점에서 도로를 중심으로 양쪽 보행로의 가로수에 고정하여 측정하였다. 노란 점선으로 표시한 지점은 도로를 기준으로 양쪽의 토지피복이 다른 지역으로 선정하고자 하였다. 모든 기기는 보행자 평균 호흡 위치인 1.5 m 높이(Li et al., 2023)에서 측정되도록 설치하였다(그림 4).

군 데이터로 편집하였다. 첫 번째 단계로 ENVI-met의 Leonardo 도구에서 Export map layer(s) 기능으로 1.4 m 높이의 데이터를 엑셀 형식으로 추출하였다. 두 번째로 Arcgis pro에서 Create Fishnet 도구를 활용하여 격자 폴리곤을 생성하였고 추출한 엑셀 데이터를 Add Join 도구로 폴리곤 내에 입력하였다. 마지막 단계로 측정 지점에 포인트 폴리곤을 생성하고 반경 4m 범위로 버퍼 영역을 지정한 후 그 범위에서의 평균 데이터를 추출하여 활용하였다. 버퍼 영역의 경우 각 측정 지점에서 건물 등으로 인해 누락된 데이터가 포함되지 않는 범위로 설정하고자 했다.

#### 4. PM<sub>2.5</sub> 농도 검증 방법

실측값과의 정확한 비교를 위해서 측정 지점에 대한 예측값이 필요하였다. 따라서 ENVI-met 결과를 Arcgis Pro S/W에서 각 지점 평



(a) Installation images of PMM-304 and Vantage Pro2

(b) Installation images of DSM101

FIGURE 4. Installation images of equipment

이렇게 수집된 ENVI-met 결과의 정확도 검증 을 위해서 8시부터 20시까지의 매시간 기상 및 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대해 실측값과 통계분석을 진행하였다. 분석은 SPSS S/W와 EXCEL을 사용하여 Pearson 상관분석 및 선형회귀분석을 진행하고 RMSE(Root Mean Square Error)를 계산하여 검증하였다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 현장측정 결과

기상 요소의 현장측정 결과는 그림 5와 같다. 기상 요소는 A~C 지점에서 기온, 습도, 풍속, 풍향 데이터가 수집되었으며 반송로 측정소 데이터와 비교·분석하였다. 8시부터 20시까지 시간에 따른 변화 경향을 봤을 때, 기온, 습도는 반송로 측정소와 유사한 패턴을 보였으나 풍속, 풍향의 경우 그렇지 않았다. 5월 31일에 측정소에서 측정된 풍속은 최소 0.7 m/s에서 최대 1.9 m/s이다. 이는 보퍼트 풍력계급표의 실바람 (0.3~1.5 m/s)과 남실바람(1.6~3.3 m/s)으로,

실바람의 경우 풍향계가 움직이지 않을 정도로 풍속이 낮은 환경이고 남실바람은 나뭇잎이 흔들리고 깃발이 가볍게 날리는 정도이다(Guo et al., 2017). 실측값과 측정소 풍속이 매우 낮았기 때문에 풍속 및 풍향 측정이 원활히 진행되지 않았을 가능성이 높다.

반송로 측정소와 각 측정 지점의 기상 데이터를 그림 6에 산점도로 나타내었다. 기온, 습도는 선형 관계가 명확히 확인되었으나 풍속, 풍향은 그렇지 않았다. 기온은 R<sup>2</sup> 값이 A 지점 0.952, B 지점 0.991, C 지점 0.993으로 매우 높게 나타났다. 습도도 A 지점 0.939, B 지점 0.994, C 지점 0.994로 높은 결과를 나타냈다. 이는 각 지점에서 실측값과 반송로 측정소 값간의 설명력이 매우 우수함을 보여준다. 따라서 A~C 지점에 설치된 기상 측정 기기가 현장의 기온, 습도를 정확히 측정하는 것으로 판단할 수 있다. 반면, 풍속은 R<sup>2</sup> 값이 A 지점 0.517, B 지점 0.006, C 지점 0.261로 설명력이 낮은 결과를 보였다. 중앙분리대에 위치한 B 지점이 가장 낮은 값을 보였으며 위치상 양쪽으로 차량이

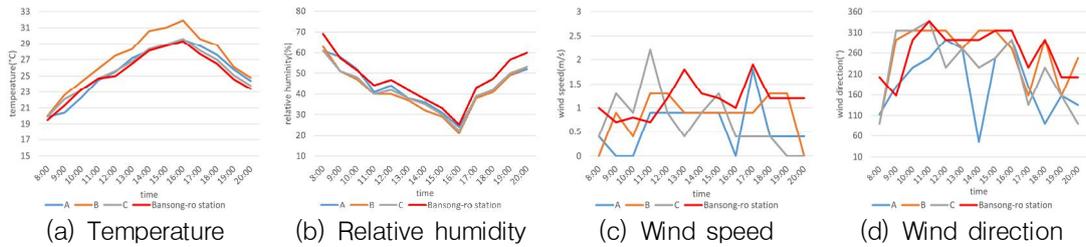


FIGURE 5. Meteorological data from field measurements(sites A–C) and bansong-ro station

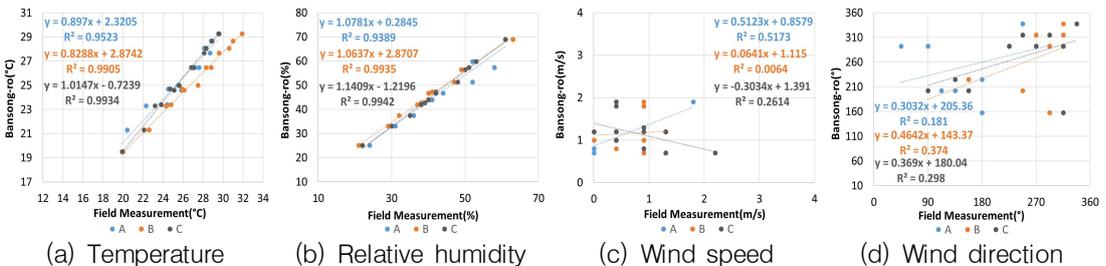


FIGURE 6. Correlation of meteorological data from field measurements(sites A–C) and bansong-ro station

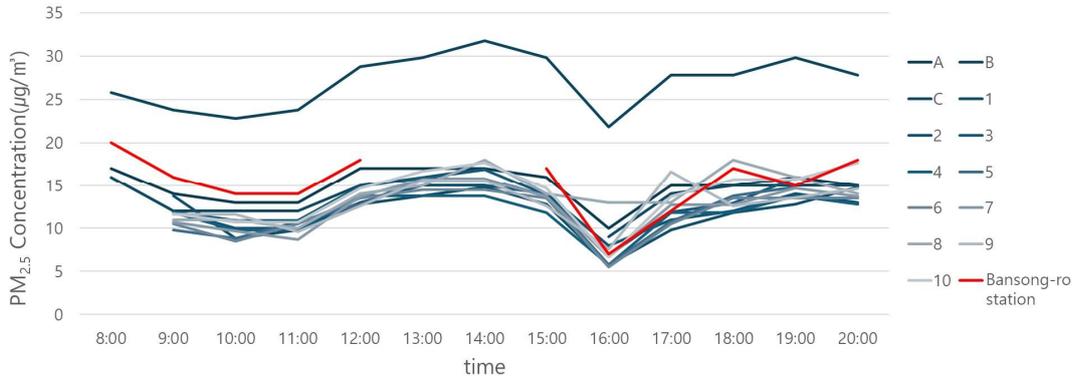


FIGURE 7. PM<sub>2.5</sub> concentration from field measurements and bansong-ro station

통행하기 때문에 차량 속도로 인해 발생하는 바람으로 풍속이 영향을 받아 설명력이 매우 낮게 나온 것으로 판단된다(Wang et al., 2021). 풍향도 R<sup>2</sup> 값이 A 지점 0.181, B 지점 0.374, C 지점 0.298로 낮은 설명력을 나타냈다. 앞서 설명한 바와 같이 측정일의 풍속이 낮아 풍향계의 변화가 적었기 때문에 실제 풍향 및 풍속을 충분히 반영하지 못했을 것으로 판단된다.

PM<sub>2.5</sub> 농도의 현장측정 결과는 그림 7과 같다. PM<sub>2.5</sub>는 총 13곳(A~C, 1~10 지점)에서 측정되었으며 기상 요소과 마찬가지로 반송로 측정소 데이터와 비교·분석하였다. 반송로 측정소의 경우 당일 13시, 14시의 데이터가 누락되어 그 외의 데이터만 사용할 수 있었다. 그림 7에서 반송로 측정소와 비슷한 경향으로 측정된 것을 확인할 수 있었다. 반송로 측정소를 제외하더라도 13대의 측정값이 유사한 변화를 보였다. 유독 높은 값을 보인 지점은 도로의 중앙분

리대에서 측정한 B 지점이다. 차량과 매우 가까운 거리로 인해 다른 지점에 비해 차량으로 인한 배출량에 직접적인 영향을 받았을 것으로 보인다(Sun et al., 2021).

각 지점별 매시간 PM<sub>2.5</sub> 측정값을 산점도로 시각화하였으며 그림 8과 같다. 측정에 사용된 기기를 기준으로 PMM-304를 사용한 지점은 (a) 그래프, DSM101을 사용한 지점은 3~4지점씩 나누어 (b), (c), (d)의 그래프로 생성하였다. B, 8, 9 지점을 제외하고 10개의 지점에서 R<sup>2</sup> 값이 0.5 이상으로 확인되었다. (a)의 R<sup>2</sup> 값은 A 지점 0.718, B 지점 0.283, C 지점 0.701이었다. B 지점은 앞서 설명한 바와 같이, 도로 중앙에서 차량의 영향으로 인해 높은 농도가 측정되어 설명력이 28.3%로 낮게 나타난 것으로 보인다. (b), (c)의 R<sup>2</sup> 값은 1 지점 0.811, 2 지점 0.676, 3 지점 0.681, 4 지점 0.702, 5 지점 0.627, 6 지점 0.789로 대체로

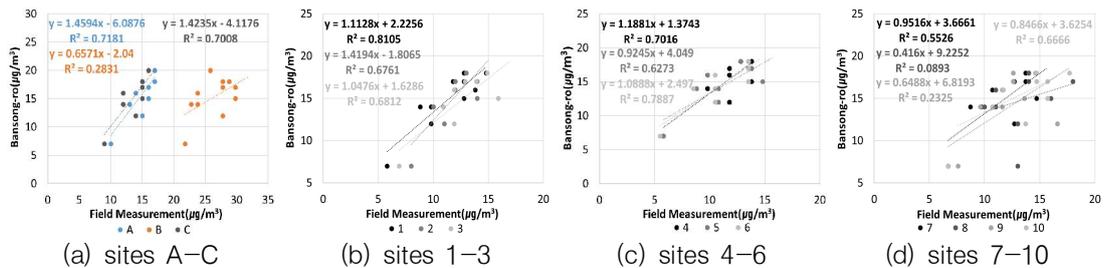


FIGURE 8. Correlation of PM<sub>2.5</sub> concentration from field measurements and bansong-ro station

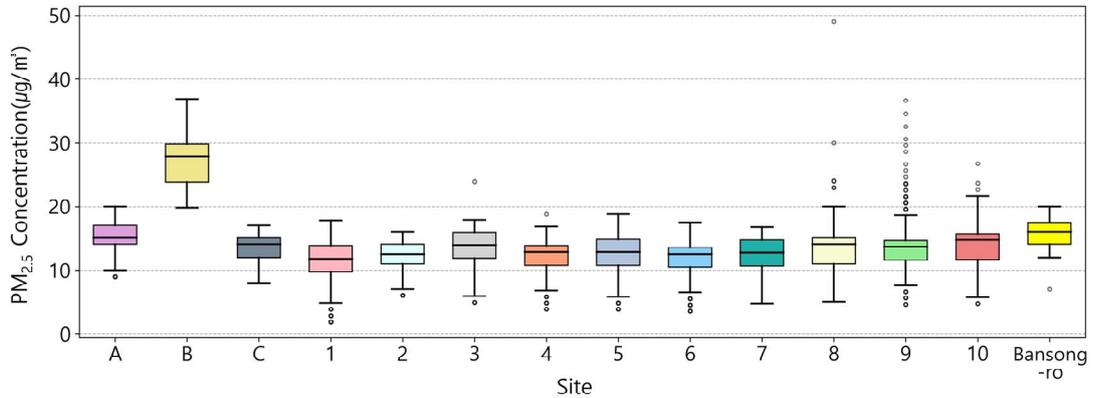


FIGURE 9. Boxplot of PM<sub>2.5</sub> concentration from field measurements and bansong-ro station

0.6 이상의 높은 값을 나타냈으며 이는 현장 측정 데이터와 반송로 측정소 측정값 간의 설명력이 우수함을 알 수 있다. (d)는 R<sup>2</sup> 값이 7 지점 0.553, 8 지점 0.089, 9 지점 0.233, 10 지점 0.667로 나타났다. 8 지점이 0.1 미만으로 매우 낮은 값을 보였고 9 지점도 0.233으로 낮은 상관성을 나타냈다.

이러한 결과는 1분 간격 실측값을 박스플롯으로 표현한 그림 9에서도 확인할 수 있다. 13 개의 지점 중 B 지점은 상대적으로 높은 농도를 나타냈다. B 지점의 중앙값은 27.8 µg/m<sup>3</sup>로 반송로 측정소 데이터의 중앙값 16 µg/m<sup>3</sup>에 비해 약 1.7배 높은 수치를 보였다. 8 지점은 중앙값이 14 µg/m<sup>3</sup>로 반송로 측정소와 유사했으나

이상치가 최대 49 µg/m<sup>3</sup>까지 나타났고 9 지점은 확연히 많은 이상치를 보였다. 이는 해당 지점에서 PM<sub>2.5</sub> 농도의 변동폭이 크다는 것을 의미한다. 앞서 분석된 R<sup>2</sup> 값이 낮았던 이유는 분석에 사용된 데이터가 이상치였을 가능성이 크기 때문이다. 특히나 8, 9 지점은 상업·업무시설과 공동주거시설이 위치한 사거리 교차로 인근으로 차량의 정차 및 출발이 빈번히 일어나는 지점이기 때문에 이상치가 많이 발생한 것으로 판단된다.

2. ENVI-met 시뮬레이션 결과

ENVI-met 시뮬레이션의 8시, 14시, 20시 결과를 그림 10에 기온과 습도, 그림 11에 풍

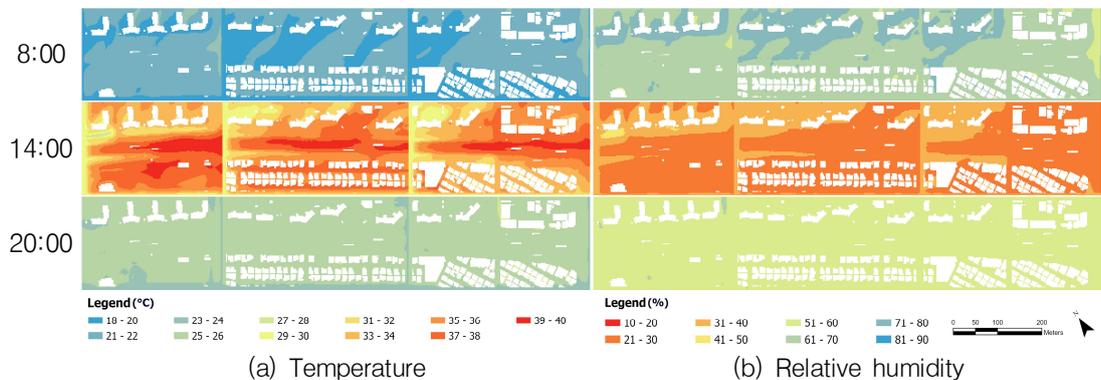


FIGURE 10. Temperature and relative humidity simulation results

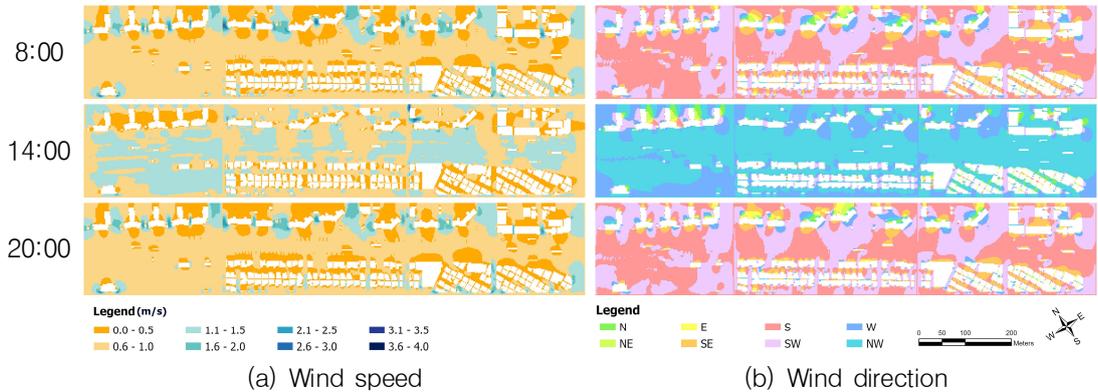


FIGURE 11. Wind speed and wind direction simulation results

TABLE 5. Two highest wind direction proportions at 2-hour intervals

	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00
Wind direction proportion	S(48%), SW(36%)	NW(50%), W(42%)	NW(72%), W(20%)	NW(67%), W(25%)	NW(86%), N(6%)	NW(56%), W(38%)	S(45%), SW(39%)

속과 풍향을 나타냈다. 먼저 그림 10의 (a) 기온의 경우 8시에 18~24℃ 범위의 값을 보였다. 그중에서도 더 낮은 18~20℃에 해당하는 부분은 주로 건물 인근에서 나타났으며 이는 건물의 그림자 영향으로 부분적으로 기온이 낮게 형성된 것으로 판단된다. 14시에는 27~40℃ 범위의 값을 나타냈다. 39~40℃로 기온이 가장 높은 지역은 도로가 대부분을 차지하였다. 그림 9의 (b) 습도는 8시 71~80%, 14시 31~50%, 20시 51~70%의 결과를 나타냈다. 대체적으로 시간에 따라 기온 상승으로 인해 습도가 감소했다가 기온이 다시 낮아지며 습도가 증가하는 양상으로 확인되었다. 이는 습도가 주로 일사량으로 인한 기온 상승에 영향을 많이 받기 때문으로 보인다.

그림 11의 (a) 풍속 시뮬레이션 결과는 주로 실바람에 해당하는 1.5 m/s 이하의 풍속으로 분포하고 있다. 특히 8시, 20시에는 대부분의 지역이 1 m/s 이하로 나타났다. 이는 시뮬레이션의 풍속 입력값인 해당일의 평균 풍속이 1.1 m/s로 매우 낮았기 때문이다. 낮은 풍속 조건 내에서도 변화가 있는 지역은 대체로 건물 인근

지역이었다. (b)의 풍향 결과는 8시, 20시에는 남풍(S), 남서풍(SW)이 대부분이었으며 14시에는 북서풍(NW)과 서풍(W)으로 변화한 것을 알 수 있었다(표 5). 풍속과 마찬가지로 각 시간대에서의 변화는 건물 인근 지역에서 많이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

PM<sub>2.5</sub> 농도 예측값은 그림 12에 나타났다. 배출원을 입력한 도로를 중심으로 높은 농도를 보였다. PM<sub>2.5</sub>의 농도 변화는 시뮬레이션 내에서의 풍향의 영향을 많이 받은 것으로 판단된다(표 5). Liu and Zheng(2023)에서도 PM<sub>2.5</sub> 농도가 시간대에 관계없이 풍향에 따라 확산 경향을 보인다고 설명하였다. 표 5을 보면 8시는 남풍(S) 48%, 남서풍(SW) 36%이었는데 그림 11의 8시 그림을 보면 배출원인 도로에서부터 북쪽으로 PM<sub>2.5</sub>가 확산된 것을 확인할 수 있다. 12시의 경우 북서풍(NW) 72%로 시뮬레이션 결과 그림을 보면 남쪽으로 PM<sub>2.5</sub>가 확산된 것을 볼 수 있다. 16시는 북서풍(NW)이 86%로 우세하여 그림을 봤을 때 풍향이 도로의 방향과 일치하여 주변으로 분산되지 않고 도로에 집중된 것을 확인할 수 있다.

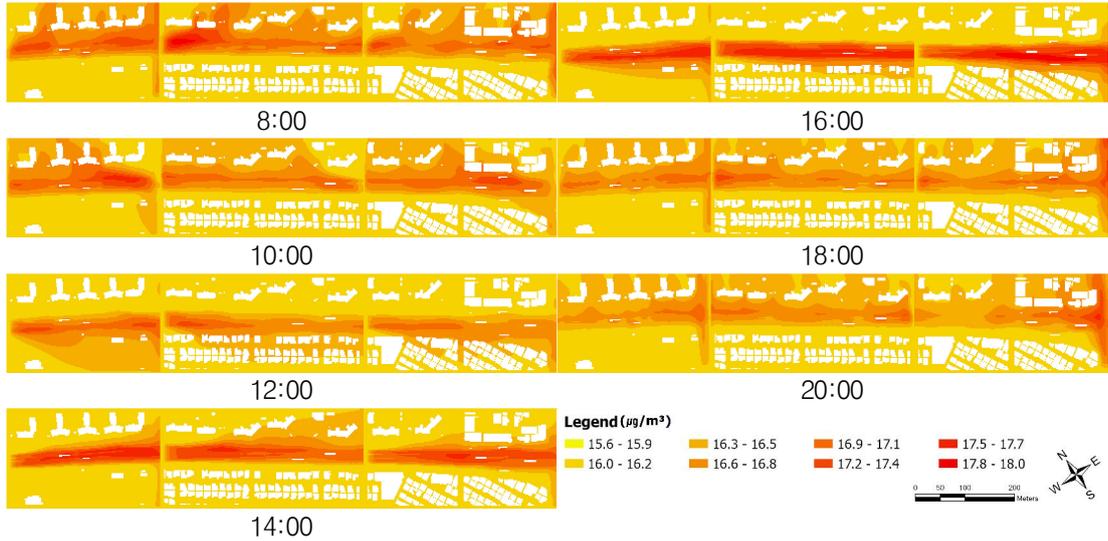


FIGURE 12. PM<sub>2.5</sub> concentration simulation results

3. ENVI-met 검증 결과

기상 요소를 측정한 A~C 지점의 매시간 실측값 및 예측값을 산점도로 제작하였으며 그림 13과 같다. 상관분석과 RMSE 결과는 표 6에 나타내었다. 기온은 유의수준 0.01 이내에서 A 지점 0.889, B 지점 0.929, C 지점 0.941로 실측값과 예측값이 매우 높은 상관관계를 가진다. 이는 두 값 간의 변화 패턴이 매우 유사함을 의미한다. 회귀분석 결과인 R<sup>2</sup>는 A 지점 0.791, B 지점 0.863, C 지점 0.885로 예측값이 실제 데이터를 높은 설명력으로 예측한다는 것을 알 수 있다. 예측값과 실측값 사이의 평균적인 오차 크기를 나타내는 RMSE는

3.62~5.37°C로 다소 높게 도출되었지만, 본 연구의 검증 목적은 실측값과 예측값의 수치적인 일치보다 각 지점 간 데이터를 상대적으로 분석하여 전체적인 경향성을 평가하는 데 있다. 따라서, 상관계수와 R<sup>2</sup>를 봤을 때 ENVI-met은 각 지점에서의 기온 변화 경향을 신뢰성 있게 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

습도도 기온 분석 결과와 유사하게 높은 상관성과 설명력을 보였다. 유의수준 0.01 이내에서 A 지점 0.922, B 지점 0.975, C 지점 0.978로 기온 분석 결과보다 더 높은 상관성을 나타냈다. R<sup>2</sup>도 A 지점 0.851, B 지점 0.951, C 지점 0.956으로 매우 높은 수준의 회귀분석 결과를

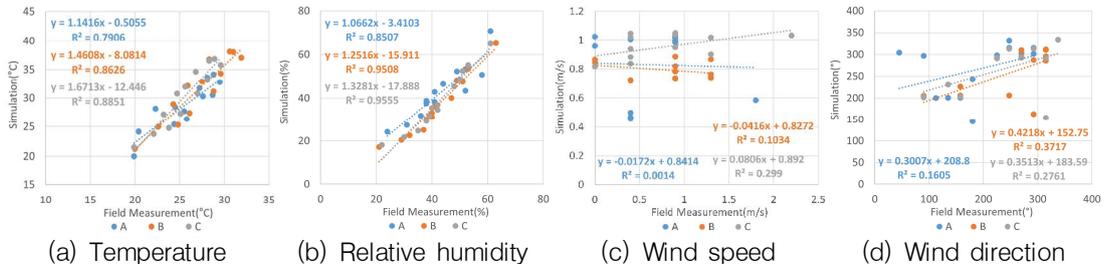


FIGURE 13. Correlation of meteorological data from field measurements (sites A-C) and simulation data

TABLE 6. Verification results of meteorological data

		Pearson correlation coefficient	RMSE
Temperature	A	0.889**	3.62
	B	0.929**	5.04
	C	0.941**	5.37
Relative humidity	A	0.922**	4.64
	B	0.975**	6.78
	C	0.978**	5.88
Wind speed	A	-0.037	0.59
	B	-0.322	0.46
	C	0.547	0.59
Wind direction	A	0.401	106.72
	B	0.610*	57.52
	C	0.525	79.28

\*: p&lt;0.05, \*\*: p&lt;0.01

보였다. RMSE의 경우 4.64~6.78%로 다소 높게 나타났으나 상관분석과 회귀분석에서 매우 높은 값을 보였기 때문에 지점별 습도 변화 경향성은 정확하게 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

반면, 풍속과 풍향은 상관성 및 설명력이 매우 낮았다. 두 요소 모두 상관성 분석 결과는 대체로 유의수준이 0.05 이상으로 유의미하지 않은 값을 나타냈으며 풍향에서 B 지점이 유일하게 유의수준 0.05 이내에서 0.610의 상관성을 보였다. R<sup>2</sup>는 풍속이 0.001~0.299, 풍향이 0.160~0.372로 설명력이 매우 낮은 결과를 나타냈다. RMSE 결과는 풍속이 0.46~0.59 m/s로 낮은 오차를 보이는 것 같지만 이는 평균 풍속 자체가 매우 낮았기 때문으로 판단된다. Jareemit et al.(2023)에서도 현장측정을 통해 풍속 예측값을 검증했을 때 R<sup>2</sup> 값이 0.32로 나타났으며 다른 선행연구를 통해서 ENVI-met 모델이 실측값과 비교했을 때 풍속을 과대 추정할 수 있고 오차가 80%까지 나타날 수 있음을 언급했다.

현장측정을 통해 ENVI-met의 PM<sub>2.5</sub> 농도 예측 정확도를 검증한 결과는 다음과 같다. PM<sub>2.5</sub>는 연구대상지 내의 13개의 모든 지점에서 측정되었으며 지점별로 전체(8~20시), 오전(8~12시), 오후(13~16시), 저녁(17~20시) 시간대로 평균을 내어 산점도를 나타내었다(그림 14). 상관분석과 RMSE 결과는 표 7에 나타

내었다. R<sup>2</sup>값은 전체가 0.479, 오전은 0.235, 오후는 0.695, 저녁은 0.376으로 오후 시간대가 가장 높은 상관성을 보였다. 상관계수는 유의수준 0.01 이내에서 전체가 0.692, 오후 시간대가 0.834로 높은 상관성을 보였다. 오전은 유의수준 0.05 이상으로 유의미하지 않은 값을 보였고 저녁 시간대는 유의수준 0.05 이내에서 0.613의 값을 보였다. R<sup>2</sup>값과 상관계수 모두 13~16시인 오후 시간대에 높은 값을 보였다. Liu and Zheng(2023)은 8~9월, 12월에 도로의 한 지점에서 측정하여 ENVI-met 예측값과 검증하였으며 그 결과는 R<sup>2</sup>는 0.779로 나타났다. 본 연구의 오후 시간대 R<sup>2</sup>값이 0.695로 나타나 선행연구와 유사한 결과로 판단된다.

다만 오전, 저녁 시간의 상관성이 낮게 나타난 것은 ENVI-met에서 초기에 입력하는 PM<sub>2.5</sub> 배경농도값이 모든 픽셀에 고정적으로 나타나기 때문으로 보인다. 그림 12를 보면 배출원의 영향이 미치지 않는 지역에서는 입력된 배경농도인 16  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 고정되는 경향을 확인할 수 있었다. 그림 14에 제시한 산점도에서 예측값의 최솟값은 16.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 실측값의 최솟값인 10.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 차이를 보였다. 이는 ENVI-met이 배출원의 영향이 미치지 않는 지점의 PM<sub>2.5</sub> 농도를 정확하게 반영하지 못하는 것으로 판단된다. 이러한 특징은 Li et al.(2023)이 ENVI-met의 초기 입력 PM<sub>2.5</sub> 배

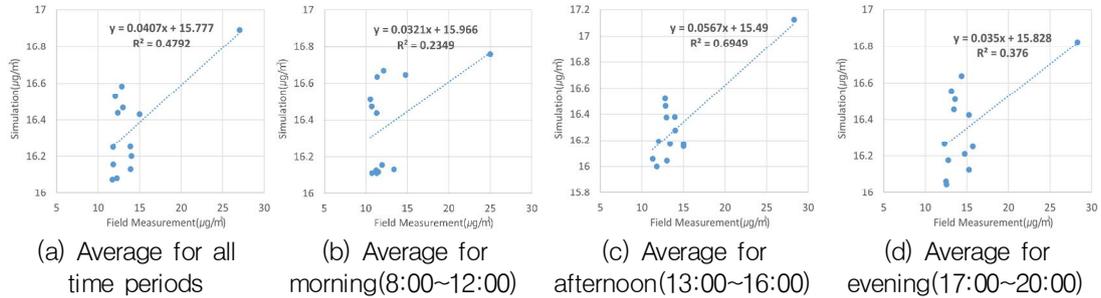


FIGURE 14. Correlation of PM<sub>2.5</sub> concentration from field measurements and simulation data

TABLE 7. Verification results of PM<sub>2.5</sub> concentration

	Pearson correlation coefficient	RMSE
All avg.	0.692**	4.43
8:00-12:00	0.485	5.09
13:00-16:00	0.834**	4.40
17:00-20:00	0.613*	4.14

\*: p<0.05, \*\*: p<0.01

경농도는 미세 규모에서 확산 경향을 이해하는데 큰 영향을 미치지 않는다고 설명한 결과와 일치한다.

### 결론

본 연구에서는 창원시 원이대로를 중심으로 ENVI-met 미기후 모델을 활용한 PM<sub>2.5</sub> 농도와 기상 요소(기온, 습도, 풍속, 풍향)의 예측 결과를 현장측정 데이터를 통해 모델의 예측 성능을 검증하였다. 이를 위해 모델링 환경 구축 시 식생, 배출량 입력 등을 최대한 현실과 유사하게 구축하였다. 대상지 내에 13곳 지점의 데이터를 분석하였으며 각 위치별 경향성 정확도 분석에 집중하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

첫째, ENVI-met 모델은 기온, 습도의 변화를 충분히 모의할 수 있었다. 기상 요소의 현장 측정값과 예측값 간의 상관성 분석 및 회귀분석 결과, 기온 및 습도는 매우 높은 상관성 (0.889~0.978, p<0.01) 및 설명력 (R<sup>2</sup>=0.791~0.956)을 보였고 이는 시뮬레이션

결과가 실제 데이터와 유사하게 예측한다는 점을 입증하였다. 선행연구에서도 ENVI-met이 기온 및 습도를 잘 예측할 수 있음을 보여줬으며(Heshani and Winijkul, 2022; Maggiotto et al., 2014) 본 연구에서도 유사한 결과를 확인하였다. 반면, 풍속, 풍향의 변화는 상대적으로 낮은 상관성(대부분 p>0.05)과 설명력 (R<sup>2</sup>=0.001~0.372)을 보였다. 이러한 결과는 매우 낮은 풍속의 환경에서는 ENVI-met의 한계가 있음을 시사한다. 본 연구는 풍속이 1.1 m/s인 특정 날에 대해 분석하였기에, 향후 풍향과 풍속에 대한 정확한 검증을 위해서 습도가 높은 여름철을 제외한 다양한 계절에 여러 날을 대상으로 한 연구가 필요하다. 특히 겨울철의 경우 서해안이 초미세먼지로 심각하여 이를 대상으로 검증한다면 유의미한 결과를 도출할 수 있을 것으로 보인다.

둘째, ENVI-met 모델은 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화도 신뢰성 있는 결과로 예측할 수 있었다. 시간대별로 평균을 내어 지점별 PM<sub>2.5</sub> 농도의 현장 측정값과 예측값을 비교한 결과, 전체 시간대에서

상관계수 0.692와 R<sup>2</sup>값 0.479로 다소 높은 상관성을 보였다. 오전, 오후, 저녁 중에는 13시~16시인 오후 시간대가 상관계수 0.834와 R<sup>2</sup>값 0.695로 매우 높은 상관성을 나타냈다. 다만, 오전과 저녁 시간대의 상관성이 낮게 나타난 것은 ENVI-met에서 배출원의 영향을 받지 않는 지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도가 입력된 배경농도로 고정되기 때문으로 판단된다.

본 연구는 도시 내 도로 주변의 소규모 지역에서 미기후와 PM<sub>2.5</sub> 농도를 예측하고 여러 지점에서의 현장 측정값과 비교함으로써 ENVI-met 모델의 신뢰성을 검증하였다. 이러한 결과를 바탕으로 향후 교통 배출원을 중심으로 한 소규모 지역에서 ENVI-met 모델을 활용한 다양한 요인과의 분석 연구로 적용 가능성을 기대할 수 있다. 또한 현실과 최대한 유사한 환경으로 모델링하기 위해 드론을 활용하여 기초 공간 데이터를 구축하였고, 교통량을 통해 PM<sub>2.5</sub>의 배출량을 정밀하게 산정하여 입력자료로 사용하였다. 이러한 입력자료 구축 방법은 향후 ENVI-met을 활용한 연구에서 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 

## REFERENCES

- Baek, J.B. 2021. Planning of Wind Ventilation Forest for Reducing Heatwave and Fine Dust -Focused on Wind-Connecting Forest-. Master Thesis, Kyungpook National University, Daegu, Korea. 1-6pp (백준범. 2021. 폭염과 미세먼지 저감을 위한 바람길 숲 조성방안 - 연결숲을 중심으로 -. 경북대학교 대학원 석사학위논문. 1-6쪽).
- Baek, J.W. 2022. A Study on Predicting Changes in Temperature and Particulate Matter through Building Arrangement and Green Area Scenario for Housing Improvement Project in Seoul. Master Thesis, University of Seoul, Seoul, Korea. 15pp (백지원. 2022. 서울시 주택정비사업 내 건물배치 및 녹지면적 시나리오에 따른 기온 및 미세먼지 변화 예측 연구. 서울시립대학교 대학원 석사학위논문. 15쪽).
- Baek, J.W., S.R. Kim, D.G. Kang, A. Aida, J.Y. Choi, C. Park. 2022. 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):124-137 (백지원, 김수린, 강동균, 고아라, 아이다 아야노, 최재연, 박찬. 2022. 주택재개발사업지의 층수변화 시나리오별 미기후 영향 예측 : 기온, 미세먼지, 초미세먼지를 중심으로. 대한국토·도시계획학회지 57(6):124-137).
- Bruse, M., H. Fler. 1998. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environmental Modelling & Software 13:373-384.
- Changwon City. (2017). Former Changwon City Ordinance on the Creation and Management of Urban Forests, etc. (Prior to the full revision to the Ordinance on the Creation and Management of Urban Forests, etc., on October 7, 2022), Article 9 (창원시. 2017. 구 창원시 도시림 등의 조성 및 관리에 관한 조례(2022. 10. 7. 창원시 도시숲 등의 조성 및 관리 조례로 전부 개정되기 전의 것) 제9조).
- Choi, H.J. 2016a. Diffusion Simulation Using Envi-Met. in Urban Planetary Boundary Layer. Journal of Climate Change Research 7(3):357-371 (최현정. 2016. Envi-Met.을 이용한 도심 대기경계층 내 확산장 변화 수치 모의. 한국기후변화학회지 7(3):357-371).

- Choi, H.J. 2016b. Thermal Comfort Evaluation Using the Envi-Met. Micro Climate Model. *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems* 10(6):416-427 (최현정. 2016. 미기상 도시모델(Envi-Met.)을 이용한 도시 내 열환경 안정도 연구. *한국건축친환경설비학회논문집* 10(6):416-427).
- Choi, Y.J., Y.P. Kim. 2022. A Study on Ammonia and Non-Exhaust Dust Emissions from On-Road Vehicles. *Seoul Studies* 23(1):87-104 (최유진, 김용표. 2022. 도로이동오염원의 암모니아와 비배기 먼지 배출에 대한 고찰. *서울도시연구* 23(1):87-104).
- De, B., M. Mukherjee. 2016. Impact of Canyon Design on Thermal Comfort in Warm Humid Cities: A Case of Rajarhat-Newtown, Kolkata, India. In 4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island, 30-31 May and 1 June, 2016. Singapore.
- Deng, S., J. Ma, L. Zhang, Z. Jia, L. Ma. 2019. Microclimate simulation and model optimization of the effect of roadway green space on atmospheric particulate matter. *Environmental Pollution* 246:932-944.
- Du, J., C. Sun, L. Liu, X. Chen, J. Liu. 2021. Comparison and modification of measurement and simulation techniques for estimating Tmrt in summer and winter in a severely cold region. *Building and Environment* 199(107918).
- Eum, J.H., J.K. Min, J.H. Park, J.M. Son, H.D. Sou, J.H. Oh. 2023. An Analysis of the Effect of Reducing Temperature and Fine Dust in the Roadside Tree Planting Scenario. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 26(2): 68-81 (엄정희, 민진규, 박주현, 손정민, 서홍덕, 오정학. 2023. 가로수 식재 시나리오에 따른 기온 및 미세먼지 저감 효과 분석. *한국지리정보학회지* 26(2):68-81).
- Guo, S.J., J.H. Chen, C.H. Chiu. 2017. Fuzzy duration forecast model for wind turbine construction project subject to the impact of wind uncertainty. *Automation in Construction* 81:401-410.
- Heshani, A.L.S., E. Winijkul. 2022. Numerical simulations of the effects of green infrastructure on PM2.5 dispersion in an urban park in Bangkok, Thailand. *Heliyon* 8(9):e10475.
- Hong, S.H., W. Tian, R. Ahn. 2020. The Effect of the Green Space in Roadside and Building Height on the Mitigation of Concentration of Particulate Matters. *Korean Journal of Environment and Ecology* 34(5):466-482 (홍석환, 텐완팅, 안로사. 2020. 가로녹지 및 건물 높이가 미세먼지 농도에 미치는 영향. *한국환경생태학회지* 34(5):466-482).
- Jareemit, D., J. Liu, M. Srivanit. 2023. Modeling the effects of urban form on ventilation patterns and traffic-related PM2.5 pollution in a central business area of Bangkok. *Building and Environment* 244(110756).
- Kim, J.K., D.S. Kyung, S.H. Lee. 2018. Methods for making PM free city and case study. *Land & Housing research institute*. 2pp (김정곤, 경대승, 이성희. 2018. 미세먼지 저감 도시 조성기법 및 사례 연구. *한국토지주택공사 토지주택연구원*. 2쪽).
- Kim, M.K., H.W. Lee, W.G. Dou, W.S. Jung.

2009. An Analysis of Wind Field around the Air Quality Monitoring Station in the Urban Area by Using the Envi-met Model. *Journal of the Environmental Sciences* 18(9):941-952 (김민경, 이화운, 도우근, 정우식. 2009. Envi-met 모델을 이용한 도심지역 대기오염측정망 주변의 바람장 분석. *한국환경과학회지* 18(9):941-952).
- Kim, S.H., K.H. Park and B.G. Song. 2023. Comparing Physical and Thermal Environments Using UAV Imagery and ENVI-met. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 26(4):145-160 (김성현, 박경훈, 송봉근. UAV 영상과 ENVI-met 활용 물리적 환경과 열적 환경 비교. 2023. *한국지리정보학회지* 26(4):145-160).
- Kim, S.W., D.K. Lee, C.Y. Bae. 2021. Analysis of the effect of street green structure on PM<sub>2.5</sub> in the walk space - Using microclimate simulation -. *Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology* 24(4):61-75 (김신우, 이동근, 배채영. 2021. 가로녹지 유형이 보행공간의 초미세먼지에 미치는 영향 분석 - 미기후 시뮬레이션을 활용하여 -. *한국환경복원기술학회지* 24(4):61-75).
- Kwon, Y.J., D.K. Lee, S.K. Ahn. 2019. Urban Street Planting Scenarios Simulation for Micro-scale Urban Heat Island Effect Mitigation in Seoul. *Journal of Environmental Impact Assessment* 28(1):23-34 (권유진, 이동근, 안새결. 2019. 미시적 열섬현상 저감을 위한 도시 가로수 식재 시나리오별 분석 - 서울시를 대상으로 -. *환경영향평가* 28(1):23-34).
- Li, L., J. Zhang, W. Qiu, J. Wang, Y. Fang. 2017. An Ensemble Spatiotemporal Model for Predicting PM<sub>2.5</sub> Concentrations. *Environmental Research and Public Health* 14(5):549.
- Li, L., M. Zheng, J. Zhang, C. Li, Y. Ren, X. Jin, J. Chen. 2023. Effects of green infrastructure on the dispersion of PM<sub>2.5</sub> and human exposure on urban roads. *Environmental Research* 223(115493).
- Liu, J., B. Zheng. 2023. A Simulation Study on the Influence of Street Tree Configuration on Fine Particulate Matter (PM<sub>2.5</sub>) Concentration in Street Canyons. *Forests* 14(8):1550.
- Liu, J., B. Zheng, Y. Xiang, J. Fan. 2022. The Impact of Street Tree Height on PM<sub>2.5</sub> Concentration in Street Canyons: A Simulation Study. *Sustainability* 14(19):12378.
- Maggiotto, G., R. Buccolieri, M.A. Santo, L.S. Leo, S.D. Sabatino. 2014. Validation of temperature-perturbation and CFD-based modelling for the prediction of the thermal urban environment: the Lecce(IT) case study. *Environmental Modelling & Software* 60:69-83.
- National Air Emission Inventory and Research Center. 2023. National Air Pollutant Emission Estimation Method Manual(VI). 346-386pp (국가미세먼지정보센터. 2023. 국가 대기오염물질 배출량 산정방법 편람(VI) 346-386쪽).
- Ryu, B.R., E.A. Ko. 2010. Wind Simulation and Optimal Building Allocation using Envi-met 3-D Model. *Journal of the Korean Society for Environmental Technology* 11(4):207-215 (유병로, 고은아. 2010. Envi-met에 의한 바람길 해석 및 건물배치 계획. *한국환경기술학회지* 11(4):207-215).

- Song, B.G., K.H. Park, S.G. Jung. 2014. Validation of ENVI-met Model with In Situ Measurements Considering Spatial Characteristics of Land Use Types. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 17(2): 156-172 (송봉근, 박경훈, 정성관. 2014. 토지이용 유형별 공간특성을 고려한 ENVI-met 모델의 현장측정자료 기반의 검증. *한국지리정보학회지* 17(2):156-172).
- Song, D.W. 2012. An Analysis of Local Wind Field by Location of Industrial Complex using CALMET and ENVI-MET. *Journal of Environmental Impact Assessment* 21(3):417-429 (송동웅. 2012. CALMET 및 ENVI-MET를 이용한 산업단지 입지에 따른 국지 바람장 분석. *환경영향평가* 21(3):417-429).
- Sun, D.J., S. Wu, S. Shen, T. Xu. 2021. Simulation and assessment of traffic pollutant dispersion at an urban signalized intersection using multiple platforms. *Atmospheric Pollution Research* 12(7): 101087.
- Tai, A.P.K., L.J. Mickley, D.J. Jacob, E.M. Leibensperger, L. Zhang, A.J. Fisher, H.O.T. Pye. 2012. Meteorological modes of variability for fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) air quality in the United States: implications for PM<sub>2.5</sub> sensitivity to climate change. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12(6):3131-3145.
- Tan, X., Z. Zhou, W. Wang. 2023. Relationships between urban form and PM<sub>2.5</sub> concentrations from the spatial pattern and process perspective. *Building and Environment* 234(110147).
- Tsoka, S., A. Tsikaloudaki, T. Theodosiou. 2018. Analyzing the ENVI-met microclimate model' s performance and assessing cool materials and urban vegetation applications -A review. *Sustainable Cities and Society* 43:55-76.
- Wang, B.W., Y. Li, Z. Tang, N. Cai, H. Niu. 2021. Effects of vehicle emissions on the PM<sub>2.5</sub> dispersion and intake fraction in urban street canyons. *Journal of Cleaner Production* 324(129212).
- Wang, W., X. Cheng, M. Dei. 2022. Strategies for sustainable urban development and morphological optimization of street canyons: Measurement and simulation of PM<sub>2.5</sub> at different points and heights. *Sustainable Cities and Society* 87 (104191).
- Wania, A., M. Bruse, N. Blond, C. Weber. 2012. Analysing the influence of different street vegetation on traffic-induced particle dispersion using microscale simulations. *Journal of Environmental Management* 94(1):91-101.
- Wu, J.D., J.H. Lee, S.H. Yoon. 2019. An Analysis on Micro-climate Characteristic of Apartments in Beijing, China Using ENVI-met Simulation. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction* 35(8):169-176 (오금동, 이준호, 윤성환. ENVI-met를 이용한 중국 베이징 아파트 하절기 미기후 특성 분석. *대한건축학회 논문집·구조계* 35(8):169-176).
- Yang, I.C., H.C. Hwang, Y.H. Lee, J.H. Lim. 2013. Study on Impact Analysis of Reducing Temperature in Central Business Area by Installation of Tree Box Using ENVI-met. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 13(1):221-228 (양인철, 황환철, 이유화, 임지현. 2013. 3차원 미

기상모형 ENVI-met을 활용한 가로수목 식재박스의 도심 온도저감효과 분석에 관한 연구. 한국방재학회 논문집 13(1):221-228).

**KAGIS**