

TECHNICAL NOTE

WRF-CFD 결합 모델(UAMS)의 구축 및 이를 활용한 도시 내 산업단지의 대기오염물질 확산 분석 사례 연구

김하영 · 김해동^{1)*}

계명대학교 환경과학과, ¹⁾계명대학교 공과대학 환경공학과

Development of a Coupled WRF-CFD Model (UAMS) and Its Application to Atmospheric Pollutant Dispersion in an Urban Industrial Complex

Ha-Young Kim, Hae-Dong Kim^{1)*}

Department of Environmental Science, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

¹⁾*Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Keimyung University, Daegu 42601, Korea*

Abstract

This study developed the Urban Assessment Model System. This coupled framework integrates the Weather Research and Forecasting model with the Open Field Operation and Manipulation-based Computational Fluid Dynamics model to investigate the dispersion of total suspended particles from a combined heat and power plant in the Daegu Dyeing Industrial Complex. Model outputs from the Weather Research and Forecasting simulations were used as boundary conditions for the Open Field Operation and Manipulation calculations to represent pollutant transport under local urban atmospheric conditions. The results indicated that total suspended particles were primarily transported toward the northeast, with peak concentrations observed approximately 20 min post-release. Furthermore, higher total suspended particle concentrations correlated with lower inflow wind speeds, underscoring the critical role of mean wind-field intensity in urban pollutant dynamics. These findings validate the effectiveness of the integrated Weather Research and Forecasting-Open Field Operation and Manipulation approach in assessing pollutant dispersion within complex urban configurations.

Key words : Weather Research and Forecasting, Open Field Operation and Manipulation, Atmospheric pollutant, Total Suspended Particles

1. 서론

도시 내에서 배출되는 매연과 배기가스 등과 같은 인위적 배출원 증가에 따른 도시 내 대기오염의 심각성이 지속적으로 증가하고 있다. 특히 도시 내에 밀집된 고층 건물은 바람에 의한 대기의 순환을 약화시키며, 이는 대기 중 오염물질의 확산을 저해하는 주요 요인으로 작용

한다. 약화된 대기의 흐름으로 인해 고농도의 오염물질이 상공에서 장시간 체류하게 되고 그 결과 시민의 건강 및 생활 환경에 미치는 영향 또한 증가할 수 있다.

대구광역시에는 북쪽에 팔공산, 남쪽에 비슬산으로 둘러싸인 내륙 분지 지형을 이루고 있으며(DEGEC, 2019), 연평균 종관 규모의 풍속이 약 2.2 m s^{-1} 에 불과하다(DROM, 2025). 이와 함께 고밀도의 건축물과 인

Received 26 January, 2026; Revised 12 March, 2026;

Accepted 17 March, 2026

*Corresponding author : Hae-Dong Kim, Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

Phone : +82-53-580-5930

E-mail : khcd@kmu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

간 활동의 영향으로 도심지의 풍속은 더욱 약해져서 바람에 의한 환기 기능은 더욱 약한 지역이다. 이러한 도시 구조적 특성으로 인해 외부와의 대기 순환이 원활하지 않으며, 대기오염물질의 축적 가능성이 높다.

또한 대구광역시의 산업단지와 에너지 생산 시설은 서쪽에 밀집되어 분포하며, 그곳에서 발생한 대기오염물질과 열이 동쪽으로 수송되고 누적되며 도시 환경을 악화시키는 것으로 보고된 바 있다(Kwon, 2018). 서풍 계열의 바람이 탁월한 동계에는 서쪽의 산업단지에서 배출되는 오염물질과 폐열이 동쪽의 도심지로 수송되는 경향성이 더욱 높아진다. 이 문제를 보다 자세히 다룰 수 있는 수치모델 시스템을 구축하고, 이를 활용하여 사례 연구를 수행하였다.

도시 규모의 기상장 수치모의 연구는 크게 종관 규모의 기상모델 또는 초고해상도 전산유체역학모델(Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용하는 크게 두 가지로 분류할 수 있다. 기상모델은 마찰 항 등의 처리에 한계가 있어서 수치모의 결과의 정확도에 한계가 크고, CFD 모델은 초고해상도 격자로 인한 많은 계산 자원을 요구한다는 한계가 존재한다. 그래서 이 문제를 해결하기 위한 방안으로 기상모델과 전산유체역학모델을 결합한 모델을 이용하여 도시 내 기상장 및 대기오염 농도 확산 문제를 연구하는 사례가 활발하다(Lee et al., 2016).

Miao et al.(2013)은 중국 베이징 도시를 대상으로 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델과 Open Field Operation and Manipulation (OpenFOAM)을 결합하여 도시의 대기 흐름 및 오염물질 확산을 수치모의하였는데, WRF 모델의 모의 결과를 OpenFOAM 모델의 경계 조건으로 적용하는 방식으로 건물 주변의 기류의 흐름 특성과 오염물질의 확산 패턴을 분석하였다. 그들은 WRF-OpenFOAM 결합 모델이 고밀도 시가지 내의 대기 흐름과 확산 현상을 파악하는 데에 매우 유용한 도구가 될 수 있음을 밝혔다. Li et al.(2019)도 중국 장자커우시의 충리산 지역을 대상으로 WRF 모델 모의 결과를 CFD (FLUENT) 모델의 경계 조건으로 적용한 결과, 미규모의 바람장 예측에서 WRF 단독 모의보다 우수한 결과를 나타냈다.

Kwon et al.(2020)은 Weather Research and Forecasting coupled with Chemistry (WRF-Chem) 모델과 CFD 모델을 결합한 WRF-CFD 모델을 이용하여 서울 영등포구의 건물 밀집 지역에서의 흐름 및 일

산화탄소 분포를 분석한 결과, WRF-Chem 모델보다 풍속을 더 현실적으로 모의함을 보였다. Kadaverugu et al.(2021)는 Weather Research and Forecasting coupled with Urban Canopy Model (WRF-UCM)의 모의 결과를 OpenFOAM 모델의 경계 조건으로 적용하여 10 m 미만의 고해상도에서 건물 규모의 기류 분석을 수행한 결과, WRF-UCM 모델보다 WRF-UCM과 OpenFOAM을 결합했을 때 풍향 예측의 정확도가 크게 향상됨을 입증하였다.

본 연구에서는 대구녹색환경지원센터의 지원으로 광주기후에너지진흥원에서 개발한 WRF-CFD 결합 모델인 도시평가모델시스템(Urban Assessment Model System, UAMS)을 대구염색산업단지를 포함한 대구광역시 전역에 적용할 수 있도록 새롭게 구축하고, 그 활용 사례로 대구염색산업단지관리공단 열병합발전소에서 배출되는 먼지의 확산을 수치적으로 모의하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상지

본 연구에서는 대구광역시 서측에 위치한 대구염색산업단지 일대를 연구 대상으로 선정하여 대기오염물질의 확산을 수치모의하였다. 대상 지역은 금호강의 지류인 달서천을 중심으로 북측에는 대구염색산업단지가 분포하고 있으며 남측으로 대구염색산업단지관리공단 열병합발전소, 서대구역사 및 주거지역이 인접해 있다(Fig. 1). 대구염색산업단지는 섬유 염색 및 가공 공장이 밀집된 지역으로, 개방 지형인 달서천과는 달리 건물의 밀도가 매우 높고 불규칙적으로 배치되어 있다. 이와 같은 도시 구조적 특성은 지표면 거칠기를 증가시켜 하층 대기 유동을 저해하고 지표면 풍속 감소를 유발하는 주요 원인으로 작용한다(Sun et al., 2024). 이로 인해 대구염색산업단지로부터 발생하는 악취 및 열병합발전소에서 배출되는 대기오염물질로 인한 시민들의 우려가 큰 지역이다(Kim and Kim, 2024).

2.2. 수치모형 및 민감도 실험 방법

본 연구에서는 Kim and Kim(2024)의 연구와 동일한 대상지, 사례일(2023년 7월 10일), 기상 조건을 기반으로 UAMS를 적용하여 대구염색산업단지

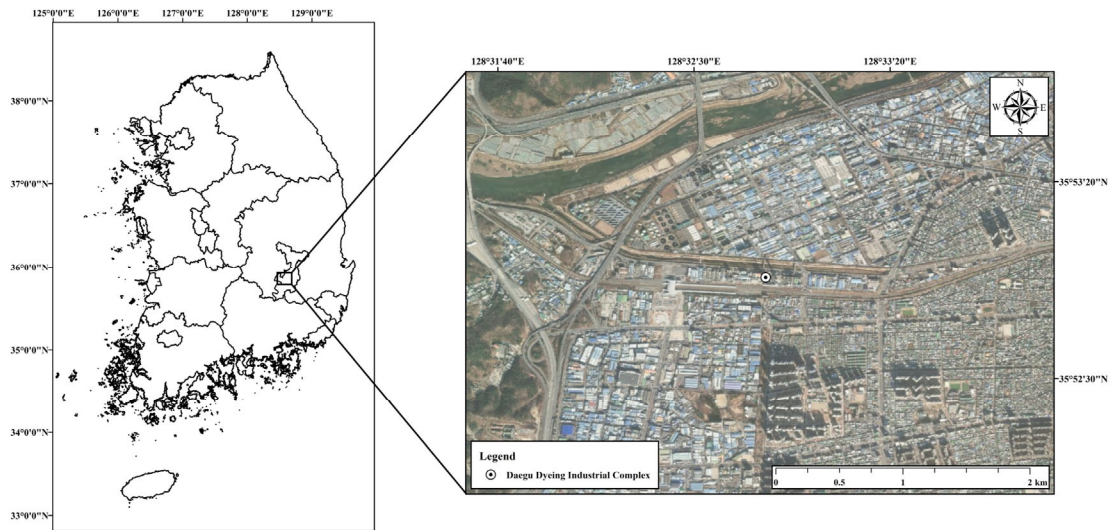


Fig. 1. Location of the study area.

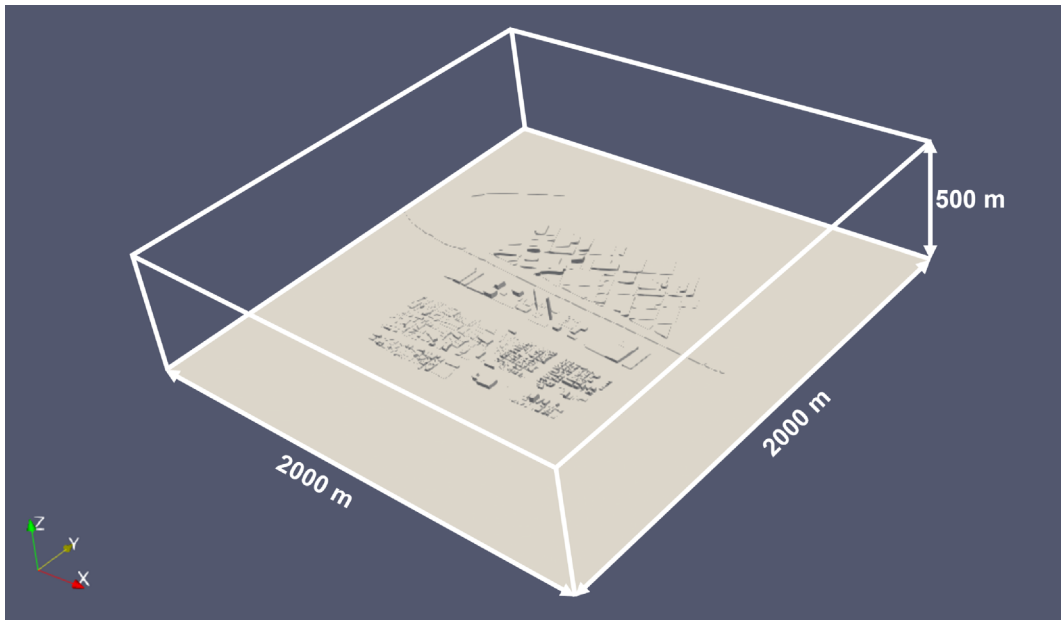


Fig. 2. Three-dimensional computational domain of the CFD model.

Table 1. Summary of experiment cases (Kim and Kim, 2024)

| | Land-use and topographic data | Initial and boundary conditions |
|--------|-------------------------------|---------------------------------|
| CASE 1 | Default data | GFS |
| CASE 2 | High-resolution data | GFS |
| CASE 3 | High-resolution data | GDAPS |

일대의 수치모의를 수행하였다. UAMS는 광주광역시를 대상으로 구축된 기상모델(WRF)과 특정 대상지에 대한 상세 규모(micro scale) 해석이 가능한 전산유체역학(CFD) 모델인 OpenFOAM을 결합한 시스템이다. WRF 모델은 실제 토지피복 정보를 반영하여 역학적 다운스케일링을 수행하며 11 m 공간해상도의 고해상도 기상장(기온, 바람장)을 생산한다. 이를 CFD 모델의 경계 조건으로 활용하여 건축물, 강, 하천 등 도시 구성 요소를 포함한 3차원 모델을 구축하여 도시 기후 환경을 평가하고 예측할 수 있다(ICEC, 2022).

NCAR (National Center for Atmospheric Research)에서 개발된 WRF 모델은 중규모 및 미규모의 기상 현상 수치모의를 위해 설계된 기상모델로 연직 좌표계는 시그마(sigma) 좌표를 사용하고 수평 좌표계는 Arakawa-C 격자를 기반으로 구성된다. 또한 다양한 물리 모수화 방안을 제공하여 기상 및 대기환경 분야의 여러 연구에서 활용되고 있다(Skamarock et al., 2021). OpenFOAM 모델은 영국 OpenCFD에서 개발된 전산유체역학 모델로, C++ 기반의 구조를 가지며 비압축성 유동(incompressible flows), 난류 유동(direct numerical simulation and large eddy simulation), 열전달(heat transfer) 등 다양한 물리 현상을 해석할 수 있는 표준 solver들을 제공한다(Park and Kang, 2010).

대구염색산업단지관리공단 열병합발전소에서 배출되는 대기오염물질의 확산 분석을 수행하기 위해 연구 대상지 일대의 건축물 및 하천을 실제 공간 정보를 기반으로 3차원 형태로 구현하였다. 계산 영역은 2000 m × 2000 m × 500 m로 설정하였으며, 배경 격자에는 약 20 m 해상도를 적용하고 세부 영역에서는 약 2.5 m 수준의 상세 격자를 적용하는 가변 해상도 격자를 구성하였다. 연구 대상지 내 위치한 건축물과 하천은 국토교통부의 연속수치지형도 자료를 활용하여 건물별로 속성 정보를 부여하고, 실제 좌표값을 기반으로 3차원 형태로 형상화하였다(Fig. 2).

본 연구에서는 OpenFOAM v2206를 사용하여 대구염색산업단지 일대의 대기 유동을 수치모의하였으며 simpleFoam과 scalarTransportFoam을 결합한 turbScalarTransportSimpleFoam solver (Lohani, 2021)를 사용하여 바람장에 따른 오염물질의 확산을 수치모의하였다. 유동 해석에는 Reynolds Averaged

Simulation (RAS) 기법을 적용하였으며, 난류 모형으로는 kEpsilon 모델을 적용하였다.

WRF 모델의 도메인 구성과 물리 모수화 방안은 Kim and Kim(2024)와 같이 적용하였다. 또한 민감도 실험 설계 역시 선행 연구와 동일하게 구성하였다. WRF 모델의 입력 자료에 따른 모의 결과의 민감도를 평가하기 위해 토지피복 자료, 지형 자료, 초기장 및 경계장 자료를 달리한 민감도 실험을 Table 1과 같이 수행하였다. 토지피복 자료 및 지형 자료는 WRF 모델 기본 제공 자료(약 1 km 해상도), 기후에너지환경부의 중분류 토지피복지도 및 국토교통부의 Digital Elevation Model (DEM)을 활용하여 생성한 고해상도 자료(약 10 m 해상도)를 사용하였다. 모델의 초기장 및 경계장 자료로는 0.25° 공간해상도의 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)의 Global Forecast System (GFS) 자료와 기상청 Unified Model (UM) 기반의 10 km 해상도 전지구예보모델 Global Data Assimilation and Prediction System (GDAPS) 자료를 적용하였다.

WRF 모델의 모의 결과로부터 산출된 풍향, 풍속, 온도(기온, 지표면 온도, 하천의 수면 온도) 자료를 전산유체역학 모델의 경계 조건으로 사용하였다. 배출량 입력 자료는 한국환경공단 굴뚝자동측정기기(Tele-Monitoring System, TMS) 측정결과와 공개 시스템에서 제공하는 연간 배출량 통계 자료를 활용하였다. 대구염색산업단지관리공단 열병합발전소의 2022년 먼지(Total Suspended Particles, TSP)의 연간 배출량을 모델 입력 형식에 맞게 변환하여 열병합발전소 굴뚝으로부터 배출되는 먼지의 확산 과정을 수치적으로 모의하였다.

본 연구에서 CFD 모델의 경계 조건으로 활용한 WRF 모델 기상장의 신뢰성을 확보하기 위하여, 동일 기간 및 대상지(대구염색산업단지 일대)를 대상으로 수행된 선행 연구(Kim and Kim, 2024)의 검증 결과를 기반으로 모델의 재현성을 평가하였다. 해당 연구에서는 토지이용도 및 기상 입력 자료(초기장 및 경계장)에 따른 지상 기온 예측 정확도를 평가하기 위하여 기상청 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS) 관측값과 수치모의 결과를 정량적으로 비교하였다.

2023년 7월 10일 12 LST를 기준으로 대구서구(지점번호 846) 및 신암(지점번호 860) 지점에서 관측값

Table 2. Air temperature (°C) in Seogu and Sinam on 12 LST 10 July 2023 (Kim and Kim, 2024)

| Station | Observation | CASE 1 | CASE 2 | CASE 3 |
|---------|-------------|--------|--------|--------|
| Seogu | 31.1 | 29.2 | 28.4 | 31.5 |
| Sinam | 32.0 | 29.9 | 29.7 | 32.5 |

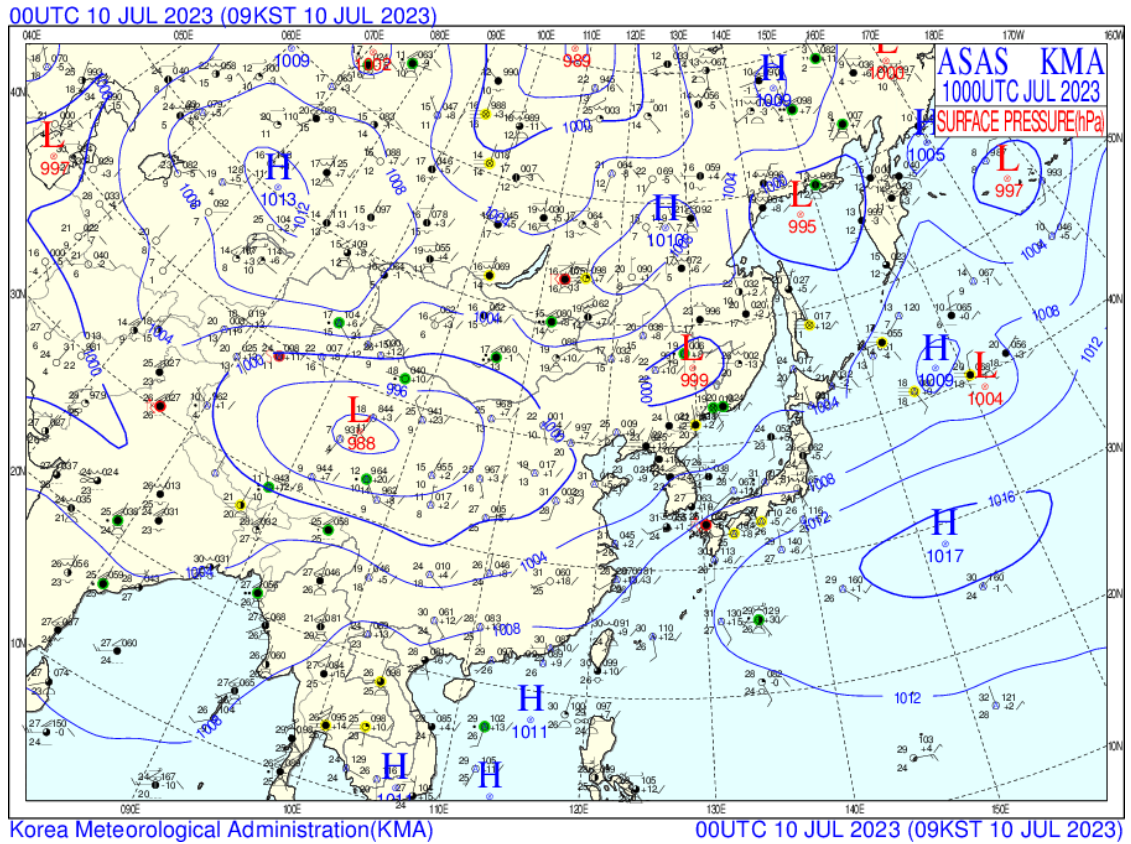


Fig. 3. Surface weather chart at 00 UTC 10 July 2023.

Table 3. Configuration of OpenFOAM simulation cases

| | Wind speed (m s ⁻¹) | Air temperature (K) |
|--------|---------------------------------|---------------------|
| CASE 1 | 6.0 | 302 |
| CASE 2 | 4.0 | 301 |
| CASE 3 | 6.0 | 305 |

과 모의값을 비교한 결과, 고해상도 토지이용도 및 지형자료와 기상청 GDAPS 자료를 적용한 CASE 3이 관측값과 가장 근접한 결과를 보였다. 대구서구 지점에서는 약 0.4°C, 신암 지점에서는 약 0.5°C의 오차가 나타나 저해상도 입력자료를 적용한 경우보다 오차가 감소함을 확인할 수 있었다(Table 2).

본 연구에서 수치모의에 적용한 사례일(2023년 7월 10일)의 지상일기도를 Fig. 3에 제시하였다. 해당 사례일에서 한반도는 일본 열도의 동남쪽 해상에 중심을 둔 북태평양 고기압의 영향을 받고 있는데, 등압선 간격이 비교적 넓어 약한 남서풍 계열의 기류가 한반도 전역으로 유입되는 조건에 있었다. 현장 관측 자료에서도 그러한 바람 특성이 나타났다(Kim and Kim, 2024).

따라서 본 연구에서 OpenFOAM 모델의 경계 조건으로 사용한 기상장은 관측 자료와의 비교를 통해 재현성이 검증된 바람장을 기반으로 생성되었다고 판단할 수 있다. 본 연구는 기상모델로 산출한 검증된 바람장 조건에서, 유체역학 모델을 적용하여 도시 내의 협소한 장소에서 오염물질이 확산하는 특성을 파악할 수 있음을 제안하고자 하였다.

3. 연구 결과

본 연구에서는 CASE 1~3에 대해 WRF 모델을 사용한 수치모의를 수행하였으며 2023년 7월 10일 12시의 수치모의 결과를 OpenFOAM 모델의 초기 입력 조건으로 사용하였다. CASE 별 OpenFOAM 모델 수치모의 실험 구성을 Table 3에 제시하였다. WRF 모델 모의 결과로부터 도출된 풍속과 온도(기온, 지표면 온도, 하천의 수면 온도) 값을 CFD 모델의 경계 조건으로 적용하였다. CASE 1~3에서 풍향은 남서풍(SW) 조건, 지표면 온도는 302K, 하천의 수면 온도는 296K로 동일한 조건에서 모의를 수행하였다. 지표면 온도와 하천의 수면 온도는 WRF 모델 모의 결과에서 나타난 대상 지역의 평균적인 표면 온도 조건을 반영하여 설정하였으며, 기온 또한 WRF 모델 모의 결과에서 도출된 값을 각 CASE에 적용하였다. 이러한 조건을 기반으로 WRF 모델 입력 자료의 차이에 따른 바람장 및 대기오염물질 확산 특성을 비교·분석하였다.

각 CASE 별 수치모의 결과를 5분 간격으로 Fig 4, 5, 6에 제시하였다. 세 CASE 모두에서 배출원인 열병

합발전소 굴뚝으로부터 배출된 먼지는 시간이 경과하면서 바람(남서풍)을 따라 도메인의 북동쪽 방향으로 이동하였으며, 대상지의 북측에 위치한 대구염색산업단지 내부로 유입되는 양상을 보였다. 약 15분 이후부터는 건물이 밀집된 영역 인근에서 농도가 점차 증가하는 경향이 나타났으며, 모든 CASE에서 약 20분 경과 시점에 최대 농도 값을 보였다.

먼지 농도의 최댓값이 나타나는 20분 시점의 먼지 농도 분포를 Fig. 7과 Table 4에 제시하였다. 각 CASE 실험에서 나타난 먼지 농도의 최댓값은 붉은 점으로 표시하였다. 수치모의 결과, 먼지 농도의 최댓값은 CASE 1, CASE 2, CASE 3에서 각각 $46.0 \mu\text{g m}^{-3}$, $105.7 \mu\text{g m}^{-3}$, $46.0 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 나타났으며 세 CASE 모두에서 건물의 후면부에 해당하는 영역에서 최대 농도가 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 공간적 분포는 건물 주변에서 형성되는 후류 영역과 관련된 국지적 체류 현상과 연관될 가능성이 있다. 다만 본 연구의 목적은 건물 배치를 변수로 두는 것이 아니라 실제 고밀도 산업단지라는 고정된 환경 내에서 기상 조건(유입 풍속, 기온)이 변할 때 국소적인 확산 양상이 어떻게 변화하는지를 수치모의하였다. 따라서 CASE 간 유입 조건이 상이하므로 건물 배치 및 밀집도가 농도 증가의 직접적인 원인이라고 단정하기에는 제한이 있다.

먼지 농도 평균값은 CASE 1과 CASE 3에서 각각 $2.0 \mu\text{g m}^{-3}$, CASE 2에서는 $4.7 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 나타났다. CASE 1과 CASE 3에서는 먼지 농도의 최댓값과 평균 농도가 유사한 수준을 보였으나, CASE 2에서는 최댓값과 평균 농도 모두 CASE 1과 CASE 3에 비해 상대적으로 높게 나타나는 결과를 보였다. CASE 2의 유입 풍속 조건이 4.0 m s^{-1} 로 CASE 1과 CASE 3(6.0 m s^{-1})에 비해 낮았으며 이에 따라 대기의 환기 능력이 상대적으로 감소하여 오염물질의 확산 범위가 제한되고 국지적 농도 축적이 증가한 것으로 해석된다. CASE 별 기온 차이는 약 1~4K 차이로 크지 않아 확산에 미치는 영향은 제한적인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 평균 풍속 조건이 도시 내 오염물질 체류 시간과 농도 형성에 중요한 영향을 미칠 가능성을 보여준다.

4. 결론

본 연구에서는 광주기후에너지진흥원에서 개발한 UAMS를 기반으로 대구광역시 환경 특성에 맞게 구

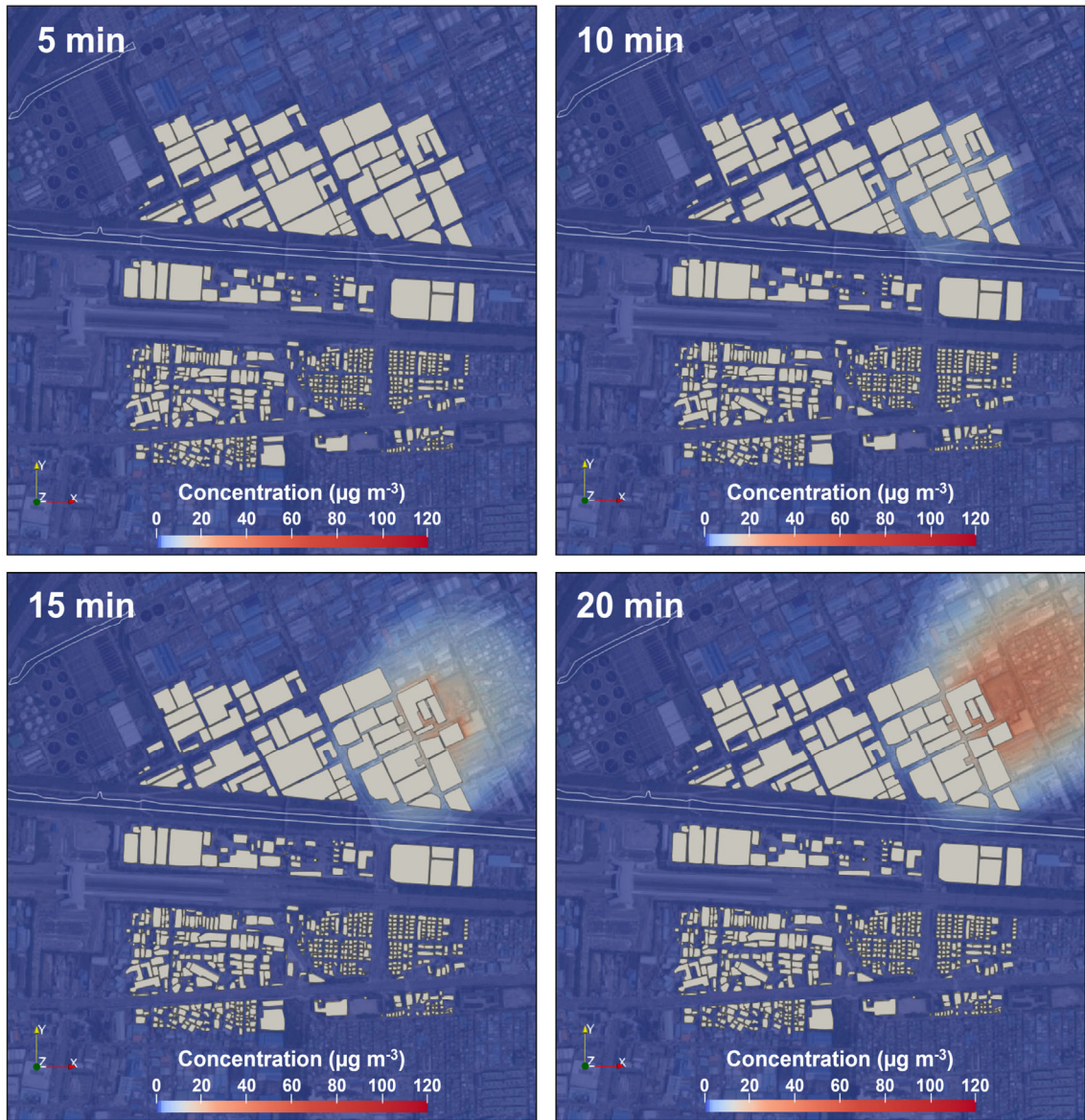


Fig. 4. Spatial distribution of simulated TSP concentrations at 2 m above ground (CASE 1).

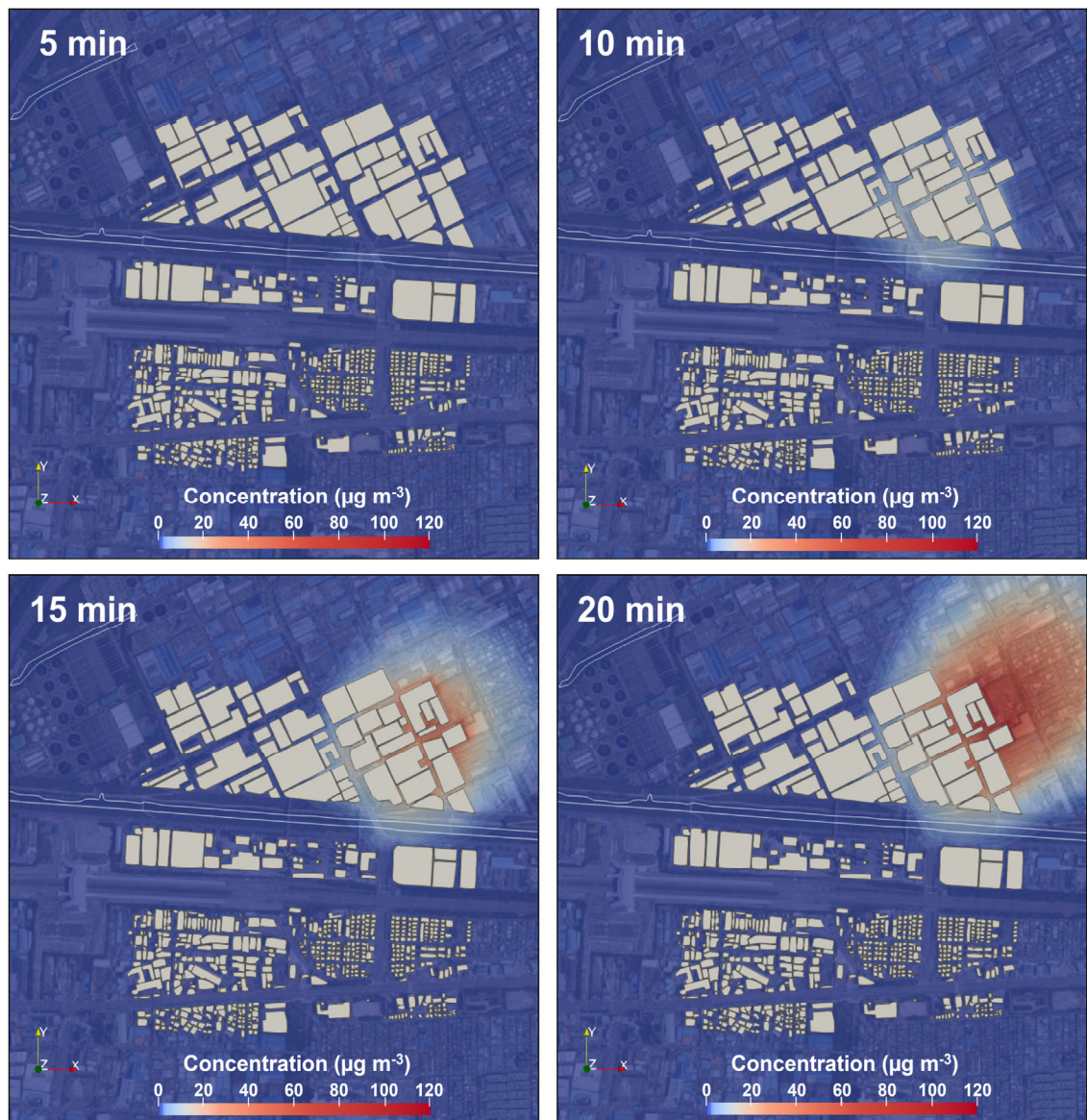


Fig. 5. Spatial distribution of simulated TSP concentrations at 2 m above ground (CASE 2).

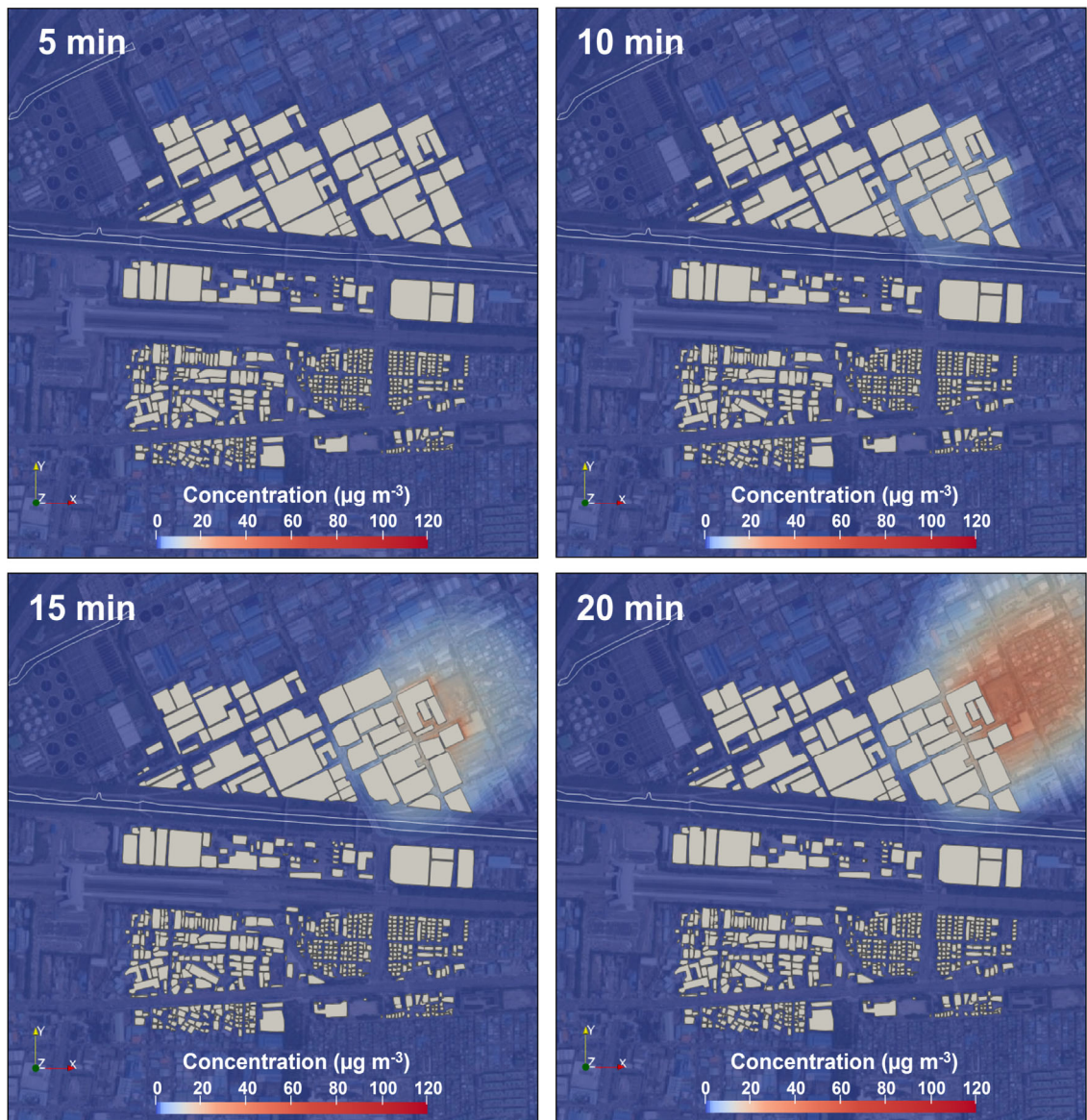


Fig. 6. Spatial distribution of simulated TSP concentrations at 2 m above ground (CASE 3).

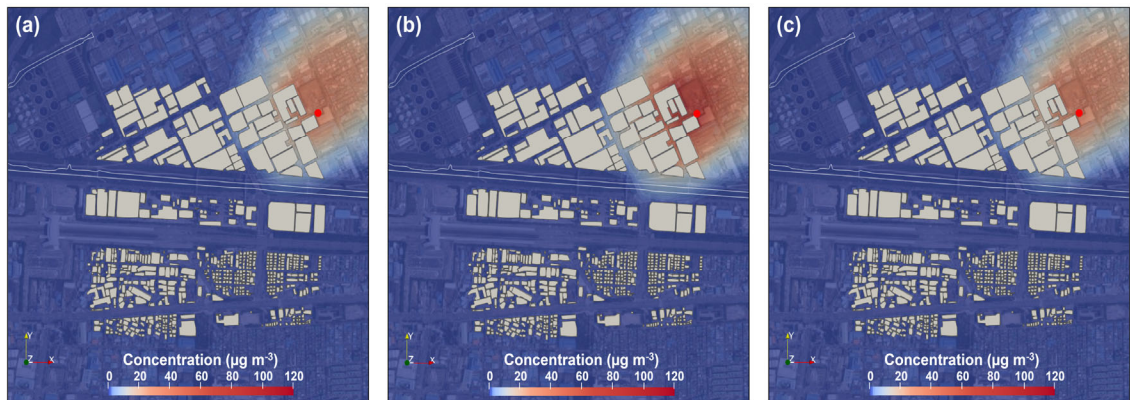


Fig. 7. Spatial distribution of simulated TSP concentrations at 2 m above ground at 20 min after release. (a) CASE 1, (b) CASE 2, (c) CASE 3.

Table 4. Simulated TSP concentrations at 2 m above ground at 20 min after release

| | TSP concentration ($\mu\text{g m}^{-3}$) | |
|--------|--|---------------|
| | Maximum | Building area |
| CASE 1 | 46.0 | 2.0 |
| CASE 2 | 105.7 | 4.7 |
| CASE 3 | 46.0 | 2.0 |

축하고 대구광역시 서측에 위치한 대구염색산업단지 일대를 대상으로 대기오염물질의 확산을 수치모의하였다. 중규모 기상모델인 WRF의 수치모의 결과를 경계 조건으로 활용하고, OpenFOAM 모델을 이용하여 먼지(TSP)의 확산 특성을 분석하였다. WRF 모델 입력 자료(토지피복, 지형, 초기 및 경계장)에 따른 민감도 실험을 수행하여 입력 자료의 차이가 오염물질 확산에 미치는 영향을 비교·분석하였다.

CASE 1~3의 수치모의 결과를 살펴보면, 모든 CASE에서 열병합발전소 굴뚝으로부터 배출된 먼지는 남서풍을 따라 도메인의 북동쪽 방향으로 이동하였다. 이로 인해 대상지 북측에 위치한 대구염색산업단지 내부로 먼지가 유입되는 경향을 확인할 수 있었다. 시간 경과에 따른 먼지의 농도 변화를 보면 모든 CASE에서 약 20분 시점에 먼지 농도의 최댓값을 보였고 최대 농도는 공통적으로 건물 후면부 인근에서 나타났다.

CASE별 비교 결과, 풍속이 상대적으로 낮은 CASE 2에서 먼지 농도의 최댓값과 평균 농도가 CASE 1과 CASE 3에 비해 높게 나타났다. 이는 유입 풍속이 감소함에 따라 대기의 환기 능력이 저하되어 오염물질의 체류 및 축적 가능성

이 증가할 수 있음을 나타낸다. 기온의 경우 CASE 간 편차가 크지 않아 확산에 미치는 영향은 제한적인 것으로 판단되며, 본 연구에서는 풍속이 오염물질 확산을 지배하는 주요 인자로 작용한 것으로 판단된다.

본 연구는 중규모 기상모델과 CFD 모델이 결합된 UAMS를 활용하여 평균 바람장에 따른 도시 내 오염물질 확산 경향을 평가하였으며 WRF-CFD 결합 접근법이 도심지에서의 대기 유동 분석에 유용한 도구가 될 수 있음을 확인하였다. 다만 본 사례 연구에서는 정상상태 조건을 적용하였기 때문에, 시간에 따른 배출 변동성이나 화학 반응 과정은 무시하였다.

향후엔 이 모델을 활용하여, 현실에 부합하는 비정상상태의 대기오염물질 배출과 다양한 기상 조건을 고려하여 대기오염 확산 특성을 규명해 보고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2023년 대구녹색환경지원센터 연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NO. 23-04-03-40-42).

REFERENCES

- DEGEC, 2019, A Study on the development of extreme climate adaptation measures in Daegu City, No.19-04-01-90-94, Daegu, Korea.
- DROM, 2025, Daegu climate change analysis report, No.11-1360731-100001-01, Daegu Regional Office of Meteorology, Daegu, Korea.
- ICEC, 2022, A Study on climate, environment and energy based on Gwangju's big data platform system: Towards an improved application, No. 22ICEC-R-01~04, International Climate and Environment Center, Gwangju, Korea.
- Kadaverugu, R., Purohit, V., Matli, C., Biniwale, R., 2021, Improving accuracy in simulation of urban wind flows by dynamic downscaling WRF with OpenFOAM, *Urban Climate*, 38, 100912.
- Kim, H. D., Kim, H. Y., 2024, Comparative study on the accuracy of surface air temperature prediction based on selection of land use and initial meteorological data, *J. Environ. Sci. Int.*, 33(6), 435-442.
- Kwon, A. R., Park, S. J., Kang, G., Kim, J. J., 2020, Carbon monoxide dispersion in an urban area simulated by a CFD model coupled to the WRF-Chem model, *Korean J. Remote Sens.*, 36(5-1), 679-692.
- Kwon, Y., 2018, Estimation and countermeasure of the heat wave cause of Daegu Metropolitan basin from the urban structural dimension, *The Korea Spatial Planning Review*, 98, 23-35.
- Lee, T. J., Lee, S. H., Lee, H., 2016, A Study of the characteristics of input boundary conditions for the prediction of urban air flow based on fluid dynamics, *J. Environ. Sci. Int.*, 25(7), 1017-1028.
- Li, S., Sun, X., Zhang, S., Zhao, S., Zhang, R., 2019, A Study on microscale wind simulations with a coupled WRF-CFD model in the Chongli mountain region of Hebei Province, China, *Atmosphere*, 10(12), 731.
- Lohani, B., 2021, Pollutant dispersion modelling using CFD: A Walkthrough of solver development in OpenFOAM, *OpenFOAM Case Study*, FOSSEE, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai, India.
- Miao, Y., Liu, S., Chen, B., Zhang, B., Wang, S., Li, S., 2013, Simulating urban flow and dispersion in Beijing by coupling a CFD model with the WRF model, *Adv. Atmos. Sci.*, 30(6), 1663-1678.
- Park, J. K., Kang, K. H., 2010, Review on OpenFOAM - An open source software, *Journal of Computational Fluids Engineering*, 15(3), 46-53.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D. M., Huang, X. Y., 2021, A Description of the advanced research WRF model version 4.3, NCAR Technical Note (NCAR/TN-556+STR), National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, USA.
- Sun, Y., Zhang, N., Ao, X., Gao, Y., 2024, Numerical studies on the influence of building morphology on urban canopy wind speed, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 16(6), e2023MS003881.

-
- Professor. Hae-Dong Kim
Department of Environmental Engineering, College of Engineering, Keimyung University
khd@kmu.ac.kr
 - Ph.D. Ha-Young, Kim
Department of Environmental Science, Keimyung University
hyk2410@naver.com