

UAM 운용을 위한 도시 건축물 간접 효과 반영 고해상도 풍속 규모상세화 체계 구축 및 평가

곽병현¹⁾ · 김기영^{1)*} · 원완식²⁾

¹⁾주식회사 포디솔루션 기업부설연구소, ²⁾한국항공대학교 항공교통물류학부

(접수일: 2024년 8월 16일, 게재확정일: 2024년 11월 8일)

Development and Evaluation of High Resolution Wind Speed Downscaling System for UAM Applying Indirect Urban Building Effect

Byeong-Hyeon Kwak¹⁾, Ki-Young Kim^{1)*}, and Wan-Sik Won²⁾

¹⁾Research Institute, 4D Solution, Seoul, Korea

²⁾School of Air Transport and Logistics, Korea Aerospace University, Goyang-si, Korea

(Manuscript received 16 August 2024; accepted 8 November 2024)

Abstract Urban air mobility (UAM) is emerging as a solution to alleviate traffic congestion in urban areas. For the successful implementation and stable operation of UAM, acquiring high-resolution meteorological data, particularly wind, is essential. Despite the existence of various studies that have assessed meteorological downscaling systems, there is little research focusing specifically on the urban environment, where the dynamics of wind and weather patterns are more complex. In response to this need, our study advances and introduces a sophisticated downscaling system designed to facilitate high-resolution (100 m) wind speed simulations based on module in IMPROVER (Integrated Model post-PROcessing and VERification) from Met Office. This system takes into account intricate surface details, including orography, and the characteristics of urban landscapes are represented to enhance simulation accuracy and realism by incorporating the indirect effects of urban buildings. The system is quantitatively evaluated by Pearson correlation coefficient, root mean square error, and mean bias error, demonstrating better correlation and improved predictability relative to raw meteorological data. These results emphasize the significance of downscaling system specialized for urban areas, highlighting its contribution to reliable and realistic wind conditions.

Key words: Downscaling, UAM, IMPROVER, Indirect urban building effect, ERA5

1. 서 론

UAM (urban air mobility, 도심항공교통)은 도시 지역 내 이륙 및 착륙이 가능한 친환경 전기동력 수직이착륙기(eVTOL) 등을 활용하여 해당 지역 내의 타 교통수단과 연계해 교통 및 화물 수요를 분담하는 목

적으로 운용되는 새로운 항공교통체계이다(UAM Team Korea, 2021). UAM은 일반적인 항공기와 달리 최대 지상 600 m의 저고도에서 비행하므로 도시의 기상 조건에 따라 다양한 위험 요인의 영향을 받는다. 특히, UAM의 버티포트 위치는 안정성을 위해 주변의 기반 시설뿐만 아니라 식생과 건물 위치에 따른 바람 패턴 등을 모두 고려해야 하기에 지형 조건 및 도심지의 지표 특성을 반영한 고해상도 기상자료의 제공이 필수적이다(NASA, 2020).

도심지의 바람은 지형고도에 따른 산곡풍뿐만 아니

*Corresponding Author: Ki-Young Kim, Research Institute, 4D Solution, 178 Digital-ro, Geumcheon-gu, Seoul 08513, Korea.
Phone: +82-2-878-0126, Fax: +82-2-6954-0126
E-mail: kiyoungkim3@4dsolution.co.kr

라 열섬 현상으로 인한 교외로부터의 전원풍, 고층 건물 배치에 의한 국지적인 빌딩풍 등이 복합적으로 발생한다. 기상청은 이와 같은 국지적인 기상 현상을 파악하기 위해 ASOS (automated synoptic observing system), AWS (automatic weather station) 등의 지상 관측 시스템을 운영하고 있다. 또한, UAM의 운용 등 연직 기상 자료에 대한 사용자의 수요에 따라 기상청은 기구를 통해 직접 대기 상층을 관측하는 레인 존데와 레이더를 통해 산란된 전파를 측정하는 윈드 프로파일러 등의 고층 관측 데이터를 제공하고 있다. 하지만, 이러한 지점 기반의 기상 정보는 관측이 어려운 지점이나 사용자가 원하는 특정 지점에 대한 정보 제공에 어려움이 있으며 기상 상황에 따라 결측이 발생하는 등 한계점을 가지고 있다. 특히, 상층 관측의 경우 우리나라 전역에 걸쳐 25개 지점만을 제공하고 있으며 대체로 도서지역 또는 주요 도시의 바깥에 위치하고 있기에 실제 UAM이 운용되는 도시지역의 기상자료 제공에 한계를 지니고 있다.

관측 지점 이외 지역의 기상자료에 대한 수요에 따라 기상청에서는 지역예보모델인 RDAPS (Regional Data Assimilation and Prediction System) 등 시·공간적으로 균일한 격자 형태의 수치모델 자료를 제공하고 있으나, 기상 조건을 완전히 모의하기 어렵기에 실제 관측과의 오차가 존재한다. 자료동화 과정은 수치모델의 시·공간적 균일성을 유지하며 관측과의 결합을 통해 오차를 보완하는 방안으로, ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 유럽 중기예보센터)에서는 해당 과정을 거친 재분석자료인 ERA5 (ECMWF Reanalysis v5)를 제공하고 있다 (Hersbach et al., 2020). ERA5는 전구 및 지역적 스케일에서 지표 뿐만 아니라 고층 대기에 대한 정확도 높은 기상자료를 제공할 수 있으나, 수십 km의 수평 해상도를 지나 복잡한 도시 지역의 국지적인 기상 조건을 현실적으로 모의하는 데 한계를 지니고 있다.

이러한 한계점을 보완하기 위해 확률분포나 관측과의 오차 등을 활용하여 통계적인 보정을 수행하거나 (de Rooy and Kok, 2004; Pryor et al., 2005; Schoof, 2013) 역학모델을 활용하여 지표 정보를 반영한 정밀한 기상 조건을 모의하는 등의 연구가 진행되었다 (Nawri et al., 2014; Giorgi et al., 2015; Tang et al., 2016). 하지만, 기존의 연구는 지형고도와 식생 등 제한된 지표 정보만을 반영하거나 수치모델자료를 기반으로 하기에 관측과의 오차가 내재되는 등의 한계점을 지니고 있다. 따라서, 본 연구에서는 자료동화를 거쳐 관측에 가까운 ERA5 재분석자료를 기반으로 지형고도 및 식생 등 지표 특성을 반영하여 상세화할 뿐만 아니라, 도심지의 건물 특성을 추가하여 UAM 운용을 위한 보다 현실적인 고해상도의 기상자료를

산출하고 이를 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 규모상세화 기법

규모상세화(downscaling) 기법은 전구(global) 또는 지역(regional) 규모의 기상변수를 국지(local) 규모 등으로 고해상도화하는 것을 말하며, 크게 통계적 규모상세화와 역학적 규모상세화로 나뉜다(Hewitson and Crane, 1996). 통계적 규모상세화는 상대적으로 큰 스케일과 작은 스케일의 기상변수 간의 관계를 전달함수로 변환하며 대표적으로 회귀(regression), 날씨 분류(weather classification) 등이 있다(Howard and Clark, 2007). 변수 간의 관계식에 기반을 두고 있기에 구현이 간단한 장점이 있으나 변동이 큰 극한 기상에 대한 재현에 한계를 지닌다.

역학적 규모상세화는 정밀한 해상도의 지표 특성 자료와 이를 포함하는 모델을 기반으로 한다. 물리 과정 등을 통한 복잡 지형에서의 현실적인 모의가 가능한 장점이 있으나 계산 비용이 높으며, WRF-ARW (Weather Research and Forecasting-Advanced Research WRF) 등의 모델이 대표적이다.

본 연구에서는 영국의 Met Office에서 개발한 후처리 시스템인 IMPROVER (Integrated Model post-PROcessing and VERification) 내 규모상세화 모듈을 바탕으로, Howard and Clark (2007)에서 제시한 지표 정보에 따른 풍속 관계식뿐만 아니라 건물 분포 등 도시의 지표 특성을 추가 반영하여 발전시킨 고해상도(100 m) 풍속 산출 모델을 구축하였다(Roberts et al., 2023).

2.2 지표 특성 반영

Howard and Clark (2007)은 지형고도 등 지표 정보에 따른 풍속의 규모상세화를 위해 거칠기 보정과 고도보정의 두 가지 물리 식을 제시하고 있다.

먼저, 거칠기 보정은 지상 풍속이 고도에 따라 로그 함수의 형태로 감소한다는 관측 특성을 바탕으로 두고 있다(Porson et al., 2010). 지표면의 식생 분포에 따라 거칠기 길이를 산정하여 활용하며, 다음과 같은 관계식을 통해 보정이 수행된다.

$$\bar{u}(z_1) = \frac{u^*}{K} \ln \frac{z_1}{z_0}$$

여기서 $\bar{u}(z_1)$ 은 고도 z_1 에서의 거칠기 보정된 풍속을 나타내며, u^* 는 마찰 속도(friction velocity), K 는 von Karman 상수로 0.4다. 또한, z_0 는 식생 거칠기 길이를 나타낸다. 상세하고 현실적인 지표 정보를 반영하기 위해, 고해상도의 거칠기 길이 자료를 산정하고 활용

하였다.

고도보정은 상대적으로 저해상도인 모델의 지형고도와 고해상도의 지형고도 간의 고도차에 의한 풍속 효과를 보정하기 위해 수행된다(Sanz Rodrigo et al., 2017). 고도차와 함께 정밀한 보정을 위해 아격자 내 지형고도 분포를 8방위로 나누어 산정되는 실루엣 지표 거칠기(A/S)와 아격자 내의 지면 정보를 나타내는 지형피크고도(H/2)를 활용하며 다음과 같이 산정된다.

$$\frac{A}{S} = \frac{\sum \Theta(\delta H) \delta H}{L}$$

$$\frac{H}{2} = \sqrt{2} \sigma_H$$

실루엣 지표 거칠기(A/S)는 아격자 지형의 수평 면적(A)과 전면적(S)의 비율을 의미하며, 해당 식 내에서 Θ 는 헤비사이드 계단 함수(heaviside step function)를 나타내며 L은 방위별 섹션 길이를 나타낸다(Keum et al., 2021).

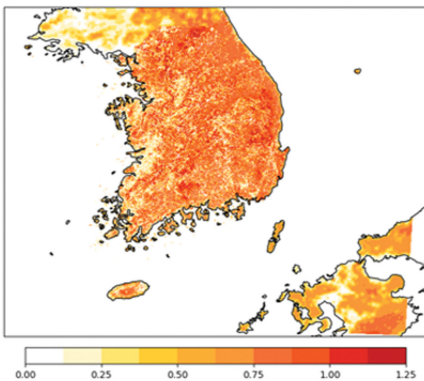
지형피크고도(H/2)는 아격자 영역 내에서 가장 높은 지형의 고도와 가장 낮은 지형의 고도 간의 차이를 의미하며, 지형고도의 표준 편차(σ_H)를 통해 모수화할 수 있다(Webster et al., 2003).

아격자는 1.5 km × 1.5 km 크기로 설정하여 보정 과정에서 아격자 정보가 충분히 반영되도록 하였다. 규모상세화 과정에 활용되는 지형고도 등의 공간분포는 Fig. 1과 같으며, 실루엣 지표 거칠기와 지형피크고도 및 고도차를 포함한 고도보정식은 다음과 같다.

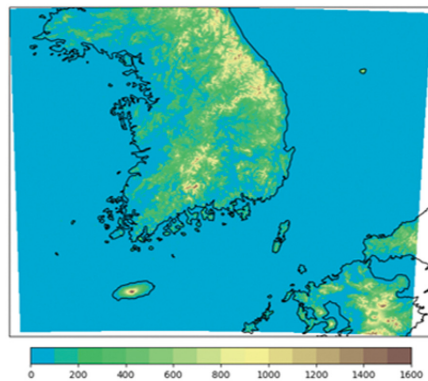
$$u_{HC} = u \left(\frac{H/2}{\pi A/S} \right) e^{-kz} \Delta H$$

Howard and Clark (2007)은 모델과 관측 간의 오차를 증가시키는 원인을 고도차로 명시하고 있으며, 이에 대한 추가적인 보정을 위해 두 가지의 보정 계수($k_1 = 0.74$, $k_2 = 0.6$)를 제시하고 있다. 본 연구에서도 규모상세화 과정에 해당 보정 계수를 적용하였으며, 최종적인 풍속 보정식은 다음과 같다.

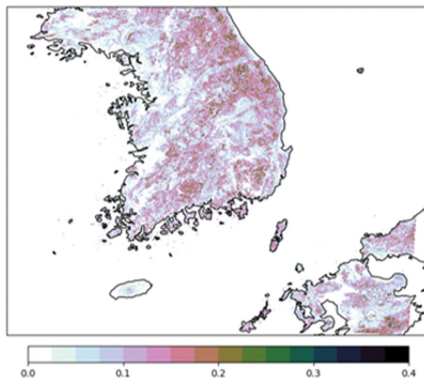
(a) Vegetative Roughness [m]



(b) Orography [m]



(c) Silhouette Roughness [m]



(d) Peak-Trough Height [m]

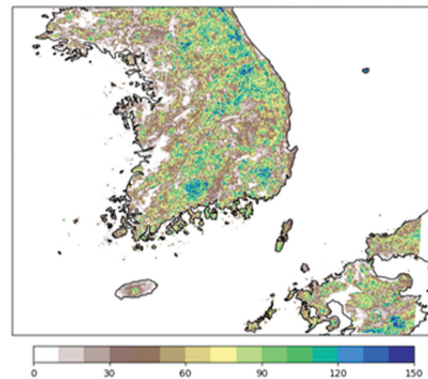


Fig. 1. Spatial distribution of surface features for wind downscaling, vegetative roughness (a), orography (b), silhouette roughness (c), and peak-trough height (d).

$$u' = k_1 \bar{u}(z_1) + k_1 k_2 u_{HC}$$

2.3 건물 정보 반영

최근 항공 및 위성 플랫폼의 발달로 지표 형태 해석을 통한 거칠기 길이 산정 연구가 진행되고 있으며, 건물의 기하학적 형상 및 크기(평균 높이, 폭, 밀도 등)에 대한 측정 결과를 활용하여 근사하는 계산법에 대한 비교검증이 이뤄지고 있다(Yi et al., 2015).

Howard and Clark (2007)는 풍속의 규모상세화에 있어 지형과 식생 분포만을 고려하였으나, 본 연구에서는 실제 UAM이 운용되는 도시 지역에 초점을 맞추고 있으므로 현실적인 풍속 모의를 위해 식생 외 건물 배치 등에 의한 영향도 반영하였다. 수도권(서울특별시, 경기도, 인천광역시)에 대한 100 m 수평 해상도의 건물 높이 및 건축 면적 격자 자료를 획득하고, 이를 바탕으로 거칠기 길이를 추가적으로 산정 및 반영하였다(Fig. 2).

건물 분포에 의한 거칠기 길이 산정을 위해 격자 면적(A_T) 대비 실제 건물 면적(A_P)을 나타내는 평면적비(λ_p)와 건물 높이(Z_H)를 통해 계산되는 건물의 옆면

적비(λ_f)를 계산하였으며, 건물 등의 지표 거칠기에 의해 운동에너지가 흡수되어 풍속 프로파일이 0이 되는 높이인 영면변위(z_d)를 다음과 같이 산정하였다(Yi et al., 2015).

$$\lambda_p = \frac{A_P}{A_T}$$

$$\lambda_f = \frac{\sqrt{A_P Z_H}}{A_T}$$

$$z_d = (1 + \alpha^{-\lambda_p} (\lambda_p - 1)) * Z_H$$

이를 바탕으로 식생 거칠기와 같이 로그의 형태로 풍속이 감소하는 선행연구를 바탕으로 건물에 의한 거칠기 길이를 산정하였으며, Macdonald et al. (1998)에 근거한 경험상수 4종($k = 0.4$, $C_D = 1.2$, $\alpha = 4.43$, $\beta = 1.0$)을 적용하였다(Yi et al., 2015).

$$z_0 = \left[\left(1 - \frac{z_d}{Z_H} \right) \exp \left\{ - \left[0.5 \beta \frac{C_D}{k^2} \left(1 - \frac{z_d}{Z_H} \right) \lambda_f \right]^{0.5} \right\} \right] * Z_H$$

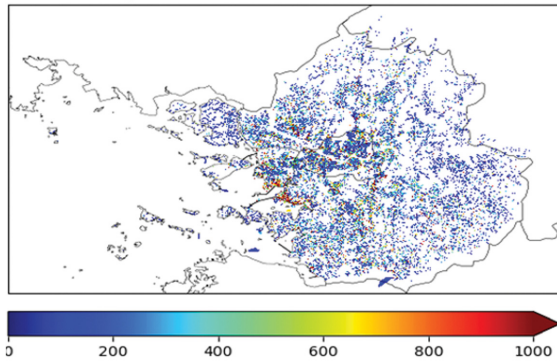
건물 분포에 따른 거칠기 길이를 풍속 모의 과정에 반영하기 위해 앞서 산정한 고해상도 식생 거칠기 자료에 이를 추가적으로 적용하였다. 기존의 식생 거칠기 산정 과정에서 환경도 중분류 상 도시 지역은 1 m의 고정된 거칠기 값을 가지나, 건물 거칠기 길이는 지표의 건물 정보를 활용하여 산정되었기에 고정된 거칠기 길이를 적용할 때보다 더 현실적인 풍속 분포를 모의할 수 있을 것으로 판단된다. Figure 3은 기존의 식생 거칠기 길이(a)와 건물 정보가 추가적으로 반영된 거칠기 길이(b)를 나타내며, 특히 서울의 도심 영역을 중심으로 거칠기 길이가 변화한 것을 확인하였다.

2.4 기상자료 및 지표 특성 정보

본 연구에서는 전구 영역을 모의하는 ECMWF의 재분석자료인 ERA5 자료를 활용하여 규모상세화를 수행하였다. 재분석자료는 위성, 지상, 레이더 등의 관측자료와 모델 데이터를 이용한 자료 동화를 거쳐 재생산한 기상자료로, 이를 통해 관측자료의 시공간적 비균일성을 극복하고 보다 관측에 가까운 격자 자료를 산출한다. ERA5는 1940년부터 현재까지의 긴 분석기간과 더불어 0.25°의 공간 해상도와 1시간의 시간 해상도, 최대 0.01 hPa까지의 연직층에 대한 기상 자료를 제공하고 있다. 본 연구에서는 2021년 1월 1일~31일에 대한 6시간 간격(0000, 0600, 1200, 1800 UTC) 등압면 및 단일면 자료를 획득하여 실제 UAM이 운용되는 고도 600 m까지의 연직 풍속 자료를 바탕으로 규모상세화를 수행하였다.

규모상세화 과정에서 활용되는 고해상도의 지형고

(a) Building Area [m²]



(b) Building Height [m]

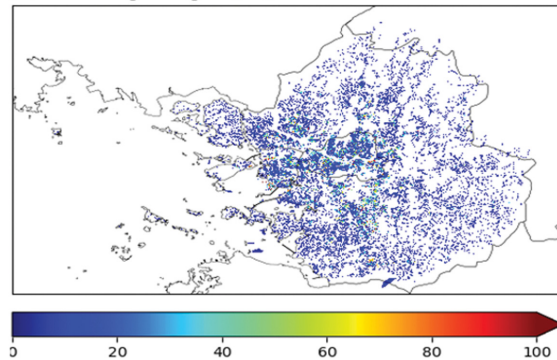


Fig. 2. Spatial distribution of urban building area (a) and height (b) in Metropolitan area.

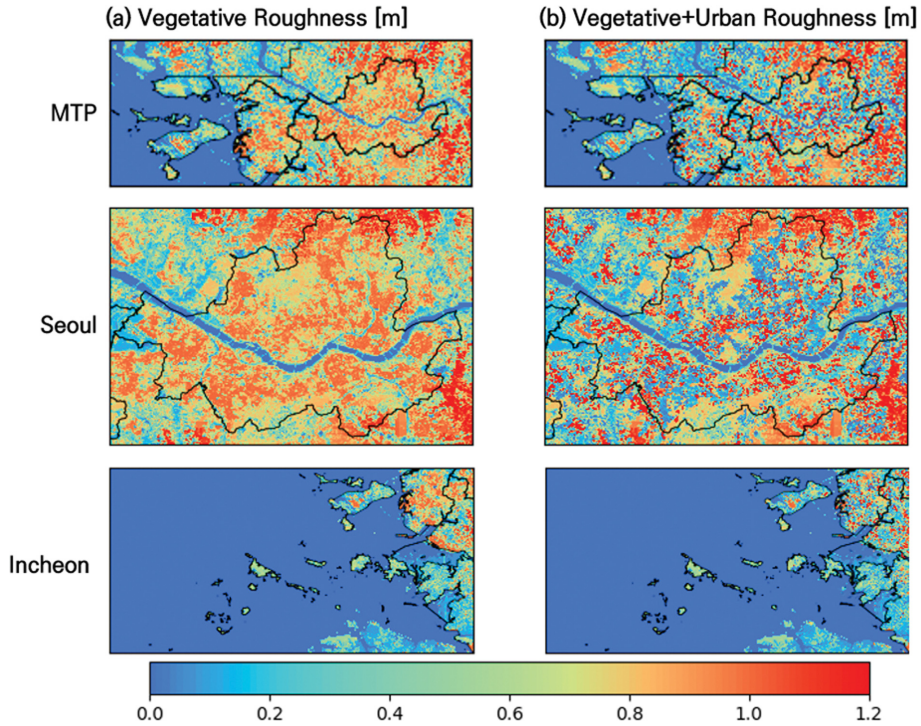


Fig. 3. Vegetation (a) and with urban building (b) roughness in Metropolitan area (MTP, upper), Seoul (middle), and Incheon (lower).

도 정보는 30 m 수평 해상도의 SRTM (shuttle radar topography mission; Farr et al., 2007)을 100 m 수평 해상도로 내삽하여 산정하였으며, 식생을 포함한 지표 피복정보와 이를 활용한 거칠기 길이는 환경부의 환경공간 정보 서비스(egis.me.go.kr)에서 제공되는 30 m 해상도의 지표 피복 중분류 자료를 MORUSES (Met Office Reading urban surface exchange scheme)의 타입에 따라 구분하고 이를 바탕으로 고해상도의 식생 거칠기를 산정하였다(Porson et al., 2010). 환경부 국토지리정보원은 국토정보플랫폼(map.ngii.go.kr)을 통해 건축 면적 및 건물 높이를 행정구역, 격자 등의 형태로 제공하고 있다. 국토정보플랫폼을 통해 본 연구에서 활용되는 수도권 지역에 대한 격자 형태의 건물 높이와 건축 면적 자료를 획득하였다. 기상자료개방

포털(data.kma.go.kr)을 통해 수도권에 위치한 ASOS와 AWS 및 고층관측 자료를 연구기간인 2021년 1월 1일~31일 6시간 간격(0300, 0900, 1500, 2100 KST)에 대해 획득하였으며 추후 연구 검증 및 평가에 활용하였다.

2.5 연구 설계 및 검증·평가 방법

건물 거칠기 길이 반영에 대한 고해상도(100 m) 풍속 규모상세화 검증을 위해 Table 1과 같이 나누어 연구를 설계하였다. 기존의 식생 거칠기 길이만을 활용하여 규모상세화를 수행한 모델 1, 건물 거칠기 길이를 추가로 반영하여 규모상세화를 수행한 모델 2로 나누어 연구를 진행하였다. 거칠기 길이 변화에 따른 규모상세화 검증은 ERA5와 규모상세화 모델 간의 지

Table 1. Experiment details for verifying downscaling models by surface roughness types.

Experiment		Description
Downscaling	ERA5	Input Meteorological data
	Model 1	Wind speed downscaled using vegetative roughness
	Model 2	Wind speed downscaled using vegetative and urban roughness

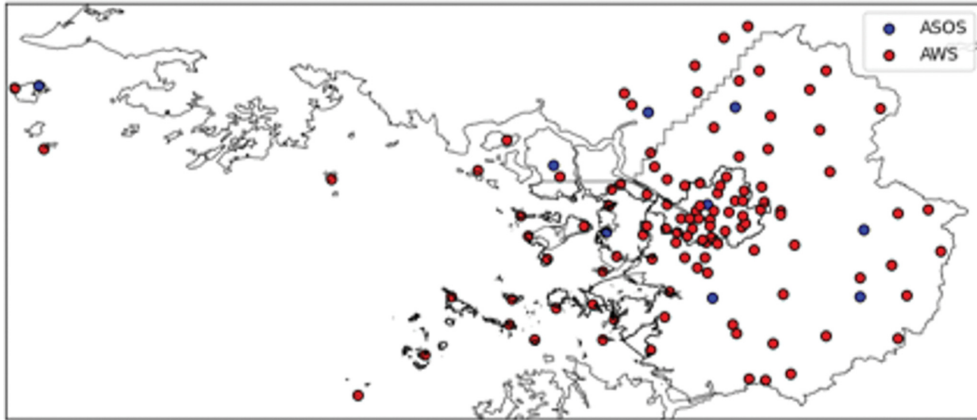


Fig. 4. Location of KMA observation stations, ASOS (blue) and AWS (red).

상(10 m) 풍속 비교를 통해 수행하였다.

규모상세화 결과에 대한 평가는 관측과의 비교를 통해 수행하였다. 수도권의 ASOS 및 AWS 지점은 Fig. 4와 같이 118개로 확인되었으며, 분석 기간에 대해 관측이 없는 지점을 제외한 110개 지점의 자료를 활용하였다. 관측과의 오차를 평가하는 방법으로 Pearson 상관계수(correlation coefficient, $Corr$), RMSE (root mean squared error)와 MBE (mean bias error)를

선정하였다.

$$Corr = \frac{\sum(P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum(P_i - \bar{P})^2 \sum(O_i - \bar{O})^2}}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum(P_i - O_i)^2}$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum(P_i - O_i)$$

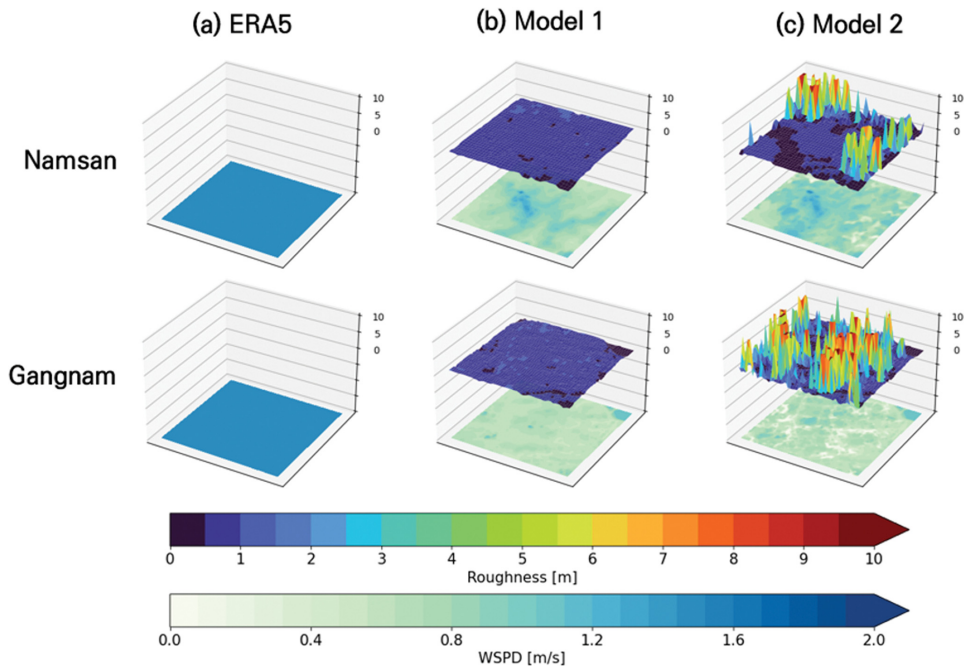


Fig. 5. Wind speed (green-blue) and roughness length (rainbow) distribution in Namsan (upper) and Gangnam (lower) of ERA5 (a), Downscaling Model 1 (b), and Downscaling Model 2 (c).

3. 연구 결과

3.1 공간분포를 통한 규모상세화 검증

앞서 구축된 풍속 규모상세화 시스템을 바탕으로, 수도권 지역에 대해 재분석자료인 ERA5에 지형, 식생, 건물 분포 등을 반영하여 고해상도 풍속 자료를 산출하였으며, 이에 따른 지상 풍속의 공간분포 변화를 비교하였다. 거칠기 길이 변화에 따른 풍속 변화를 확인하기 위해, 식생 및 건물 분포에 차이가 크고 지형에 따른 풍속 변화도 확인할 수 있는 남산(126.974°~127.021°E, 37.563°~37.567°N)과 강남(127.012°~127.071°E, 37.4835°~37.5272°N) 지역을 선정하여 상세 비교하였다(Fig. 5).

검증 결과, 풍속 관계식에 따라 지형고도가 증가할수록 풍속이 증가하는 것을 확인했으며, 식생 및 건물 분포에 따른 거칠기 길이가 증가할 경우 지상 풍속이 감소하고, 반대로 거칠기 길이가 감소할 경우 지상 풍속이 증가하는 경향을 확인하였다. 특히, 건물이 밀집한 강남 지역의 경우 기존의 식생 거칠기만 반영된 모델 1에서는 고정된 거칠기 값(=1)이 반영되어 지상 풍속의 공간분포가 격자 간에 유사하게 나타났으나, 건물 거칠기가 반영된 모델 2에서는 공간분포 상에서 건물 분포에 따른 풍속의 차이를 확인할 수 있다. 결과적으로, 건물 거칠기 반영으로 인해 더 현실적인 지상 풍속의 모의가 가능해진 것으로 판단된다.

3.2 지상 풍속 규모상세화 평가

건물 거칠기 길이에 반영에 따른 지상 풍속의 변화를

Table 2. Evaluation of 10 m wind speed using correlation coefficient, RMSE and MBE

	ERA5	Downscaling (Model 2)
Correlation coefficient	0.923**	0.791**
RMSE ($m s^{-1}$)	2.178	1.770
MBE ($m s^{-1}$)	1.633	1.002

*p-value < 0.05, **p-value < 0.01

수도권 ASOS 및 AWS 110개 지점과 비교하고 상관 계수, RMSE 및 MBE 분석을 통해 규모상세화 결과를 평가하였다. 먼저, ERA5 및 각 규모상세화 모델의 관측지점 평균 시계열 비교를 통해 전반적인 모의 경향을 확인하였으며 그 결과는 Fig. 6과 같다. 비교 결과, ERA5는 전반적으로 모든 분석 기간에서 과대 모의하는 경향을 보였으며 규모상세화를 통해 해당 경향이 감소한 것으로 확인하였다.

상관계수, RMSE, MBE를 통한 규모상세화 평가 결과는 Table 2와 같으며, 관측과 비교했을 때 규모상세화를 통해 관측과의 경향성은 다소 감소하였으나 RMSE와 MBE가 크게 감소하였다. 수도권 전체 지점에 대한 ERA5의 상관계수, RMSE와 MBE는 0.924, $2.178 m s^{-1}$, $1.633 m s^{-1}$ 였으나 규모상세화를 통해 각각 0.792, $1.770 m s^{-1}$, $1.002 m s^{-1}$ 로 낮아진 결과를 보였다. ERA5와 비교해 규모상세화를 통해 전체 110개 지점 중 84개 지점에서 RMSE 기준 모의 성능이 개선된 결과를 보였으며, 평균적으로 14.3%의 개선율을 보였다.

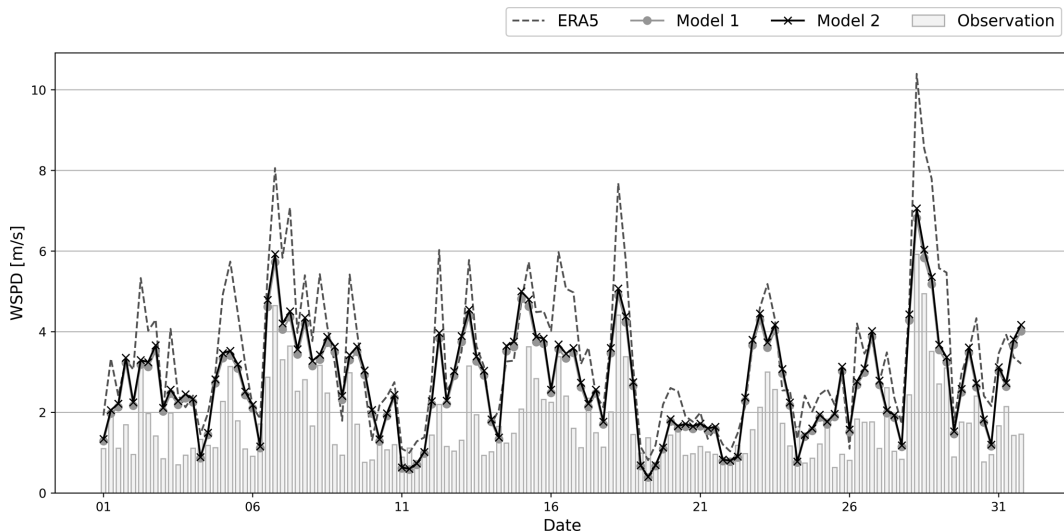


Fig. 6. 10 m wind speed timeseries of Observation (light gray bar), ERA5 (gray dotted line), Downscaling Model 1 (gray line with circle), and Downscaling Model 2 (black line with X marker), averaged by stations within MTP.

3.3 상층 풍속 규모상세화 평가

기상청은 레윈존데와 윈드 프로파일러를 활용한 고층 풍속 관측자료를 제공하고 있다. 레윈존데는 11개 지점에 대해 매일 0000, 1200 UTC에 정시 관측을 수행하며 30 km 이상의 대기상태를 관측할 수 있으나, 직접 기구를 띄우는 관측 특성 상 고도가 불균일하며 실제 UAM이 운용되는 고도 600 m 이하에서는 고도 약 200 m의 자료만 활용 가능한 것으로 파악하였다.

윈드 프로파일러의 경우, 초단파를 활용하여 난류로부터 바람 자료 관측을 수행하기에 균일한 고도별 풍속 자료를 제공한다. 본 연구에서는 수도권 지역에 대해서만 분석을 수행하며, 이에 따라 파주(47099)의 윈드 프로파일러 관측과 오산(47122)의 레윈 존데 관측만이 활용 가능하다. 해당 지점의 고층 관측 자료를 바탕으로 UAM이 주로 운행되는 고도 600 m까지의 연직 바람에 대한 풍속 규모상세화 성능 평가를 수행하였다.

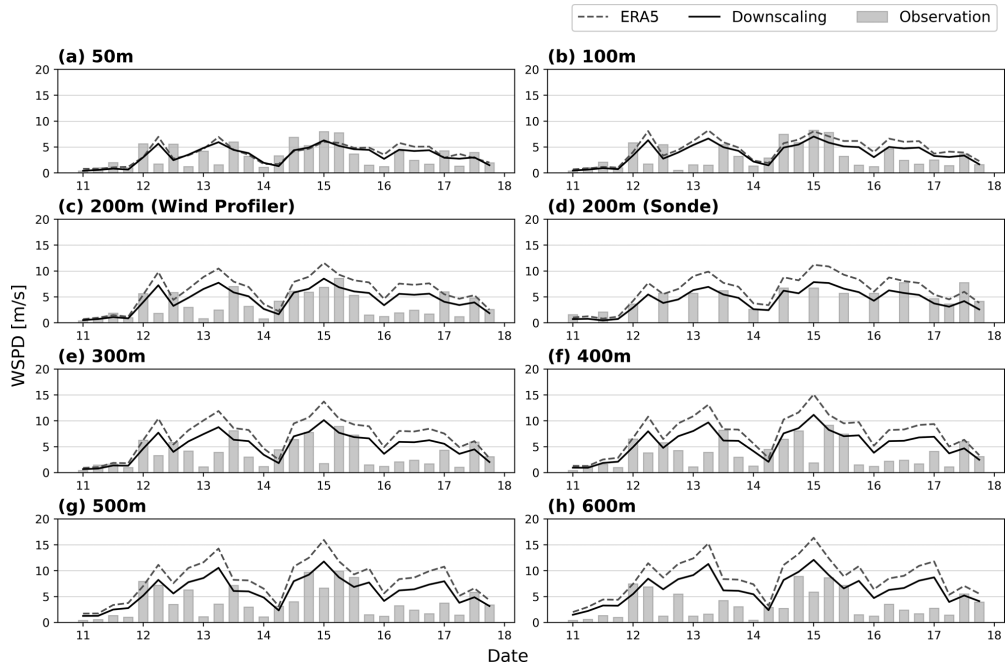


Fig. 7. Wind profile timeseries of Observation (gray bar), ERA5 (gray dotted line), Downscaling Model 2 (black solid line).

Table 3. Evaluation of wind speed profile using correlation coefficient, RMSE and MBE

Elevation (m)	Correlation coefficient		RMSE (m s ⁻¹)		MBE (m s ⁻¹)	
	ERA5	Downscaling (Model 2)	ERA5	Downscaling (Model 2)	ERA5	Downscaling (Model 2)
50 m	0.371	0.499**	2.282	1.974	0.459	0.132
100 m	0.437*	0.471*	2.840	2.268	1.531	0.703
200 m	47099	0.433*	3.941	2.649	2.679	1.092
	47122	0.826**	0.827**	1.933	1.421	0.965
300 m	0.382*	0.382*	4.761	3.179	3.379	1.553
400 m	0.372*	0.372*	5.286	3.492	3.952	1.960
500 m	0.528**	0.528**	5.330	3.427	4.246	2.108
600 m	0.429*	0.429*	6.369	4.164	5.376	3.090

*p-value < 0.05, **p-value < 0.01

과주(47099)와 오산(47122) 지점에 대해 고층 관측에 결측이 없는 2021년 1월 11일~18일에 대한 각 연직 고도별 시계열 비교 결과는 Fig. 7과 같으며, 상관계수, RMSE와 MBE는 각각 Table 3과 같다. 분석 결과, 모든 고도에서 규모상세화 적용에 따라 관측과의 경향성이 유사해지고 오차가 감소하였으며, ERA5에서 나타난 과대모의 경향을 개선하였다. 더 높은 고도로 올라갈수록 과대모의 경향은 증가하였으나 규모상세화를 통한 성능 개선이 이루어졌다.

연직 풍속에 대한 규모상세화 검증 및 평가 결과 한 개 지점에 한정되었기에 모델 전체에 대한 성능 해석 결과로 활용되기 어렵다. 따라서, 건물 거칠기를 광역시 등 수도권 외 도시 지역에 대해서도 산정하고 이를 바탕으로 추가적인 검증 및 평가가 필요할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 지형 조건 및 도시 식생, 건물 분포 반영을 통해 UAM 운용을 위한 보다 상세하고 현실적인 도시 지역의 기상 정보 제공 체계를 구축하는데 목적을 두고 있다. 이를 위해, 선행연구를 참조하여 상세 풍속 모의를 위해 제안된 지표 특성-풍속 간 관계식과 고해상도(100 m)의 지형 및 식생 자료를 바탕으로 규모상세화 시스템을 구축하였다. 또한, 현실적인 풍속 모의를 위해 기존의 시스템에 건물 영향으로 인한 건물 거칠기 길이를 추가하여 각 모델의 성능을 비교·검증 및 평가하였다. 입력되는 기상자료로는 전구 영역을 모의하는 ECMWF의 ERA5 재분석자료를 활용하였으며, 각 모델의 공간분포를 비교한 결과 거칠기 길이 변화에 따라 풍속의 변화를 확인하였으며, 보다 현실적인 풍속 모의가 가능함을 확인하였다. 수도권의 ASOS 및 AWS 관측지점과 고층 관측 지점에 대한 성능을 평가한 결과, 대부분의 지점에서 ERA5가 과대모의한 풍속이 규모상세화를 통해 관측과 더 가깝게 모의하여 상관계수가 증가하고 RMSE와 MBE 값이 감소한 것을 확인하였다. 본 연구에서는 연구 지역 및 기간이 한정되었기에 향후 건물 거칠기 길이를 수도권 외 도시 지역에 대해 확대하여 산정하고, 이를 바탕으로 긴 분석 기간에 대해 추가 분석을 진행할 필요성이 있다. 또한, 도시 지역의 연직 관측자료의 확보를 통해 규모상세화 시스템에 대한 추가적인 검증 및 평가를 수행하고, 성능 추가 개선을 위한 알고리즘에 대한 연구가 필요할 것이다. 본 연구를 통해 구축된 도시 지역의 건물 영향을 반영한 규모상세화 시스템을 기상청 국지예보모델인 LDAPS 등의 예측자료에 적용한다면 UAM 운용에 실제적으로 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 「기후적 요소를 고려한 UAM PORT 위치선정 기법 연구」(21CTAP-C164083-01)와 기상청 「수요자 맞춤형 항공기상서비스 기술개발」(RS-2024-00403421)의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

de Rooy, W. C., and K. Kok, 2004: A combined physical-statistical approach for the downscaling of model wind speed. *Wea. Forecasting*, **19**, 485-495, doi:10.1175/1520-0434(2004)019<0485:ACPAFT>2.0.CO;2.

Farr, T. G., and Coauthors, 2007: The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys.*, **45**, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.

Giorgi, F., J. William, and Jr. Gutowski, 2015: Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, **40**, 467-490, doi:10.1146/annurev-environ-102014-021217.

Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **146**, 1999-2049, doi:10.1002/qj.3803.

Hewitson, B. C., and R. G. Crane, 1996: Climate downscaling: Techniques and application. *Climate Res.*, **7**, 85-95, doi:10.3354/cr007085.

Howard, T., and P. Clark, 2007: Correction and downscaling of NWP wind speed forecasts. *Meteorol. Appl.*, **14**, 105-116, doi:10.1002/met.12.

Keum, W.-H., S.-H. Lee, D.-I. Lee, S.-S. Lee, and Y.-H. Kim, 2021: Evaluation and improvement of the KMAPP surface wind speed prediction over complex terrain areas. *Atmosphere*, **31**, 85-100, doi:10.14191/Atmos.2021.31.1.085.

Macdonald, R. W., R. F. Griffiths, and D. J. Hall, 1998: An improved method for estimation of surface roughness of obstacle arrays. *Atmos. Environ.*, **32**, 1857-1864, doi:10.1016/S1352-2310(97)00403-2.

NASA, 2020: UAM Vision Concept of Operations (Con-Ops) UAM Maturity Level (UML) 4. National Aeronautics and Space Administration, [Available online at <https://www.nasa.gov/directorates/armd/aosp/uam-vision-concept-of-operations-conops-uam-maturity-level-uml-4/>].

Nawri, N., G. N. Petersen, H. Bjornsson, A. N. Hahmann, K. Jónasson, C. B. Hasager, and N.-E. Clausen, 2014: The wind energy potential of Iceland. *Renewable Energy*, **69**, 290-299, doi:10.1016/j.renene.2014.03.040.

Porson, A., P. A. Clark, I. N. Harman, M. J. Best, and S. E.

- Belcher, 2010: Implementation of a new urban energy budget scheme in the MetUM. Part I: Description and idealized simulations. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 1514-1529, doi:10.1002/qj.668.
- Pryor, S. C., J. T. Schoof, and R. J. Barthelmie, 2005: Empirical downscaling of wind speed probability distributions. *J. Geophys. Res.*, **110**, D19109, doi:10.1029/2005JD005899.
- Roberts, N., and Coauthors, 2023: IMPROVER: The new probabilistic postprocessing system at the Met office. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **104**, E680-E697, doi:10.1175/BAMS-D-21-0273.1.
- Sanz Rodrigo, J., R. C. Chávez Arroyo, P. Moriarty, M. Churchfield, B. Kosović, P.-E. Réthoré, K. Hansen, A. Hahmann, J. Mirocha, and D. Rife, 2017: Mesoscale to microscale wind farm flow modeling and evaluation. *WIREs Energy Environ*, **6**, e214, doi:10.1002/wene.214.
- Schoof, J. T., 2013: Statistical downscaling in climatology. *Geography Compass*, **7**, 249-265, doi:10.1111/gec3.12036.
- Tang, J., X. Niu, S. Wang, H. Gao, X. Wang, and J. Wu, 2016: Statistical downscaling and dynamical downscaling of regional climate in China: Present climate evaluations and future climate projections. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **121**, 2110-2129, doi:10.1002/2015JD023977.
- UAM Team Korea, 2021: Operating Concept of Korean Urban Air Mobility (K-UAM) 1.0. MOLIT, [Available online at https://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmspage=1&id=95086041] (in Korean).
- Webster, S., A. R. Brown, D. R. Cameron, and C. P. Jones, 2003: Improvements to the representation of orography in the Met Office Unified Model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **129**, 1989-2010, doi:10.1256/qj.02.133.
- Yi, C., T. H. Kwon, M.-S. Park, Y. J. Choi, and S. M. An, 2015: A study on the roughness length spatial distribution in relation to the Seoul building morphology. *Atmosphere*, **25**, 339-351, doi:10.14191/Atmos.2015.25.2.339.