

도시건물정보를 반영한 초고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계(KMAPP) 구축 및 풍속 평가

김도형^{1)*} · 이승욱¹⁾ · 정형세¹⁾ · 박성화¹⁾ · 김연희²⁾

¹⁾국립기상과학원 기상응용연구부, ²⁾기상청 수치모델링센터

(접수일: 2022년 1월 11일, 수정일: 2022년 6월 30일, 게재확정일: 2022년 7월 18일)

Development and Wind Speed Evaluation of Ultra High Resolution KMAPP Using Urban Building Information Data

Do-Hyoung Kim^{1)*}, Seung-Wook Lee¹⁾, Hyeong-Se Jeong¹⁾, Sung-Hwa Park¹⁾, and Yeon-Hee Kim²⁾

¹⁾Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju, Korea

²⁾Numerical Modeling Center, Korea Meteorological Administration, Daejeon, Korea

(Manuscript received 11 January 2022; revised 30 June 2022; accepted 18 July 2022)

Abstract The purpose of this study is to build and evaluate a high-resolution (50 m) KMAPP (Korea Meteorological Administration Post Processing) reflecting building data. KMAPP uses LDAPS (Local Data Assimilation and Prediction System) data to detail ground wind speed through surface roughness and elevation corrections. During the detailing process, we improved the vegetation roughness data to reflect the impact of city buildings. AWS (Automatic Weather Station) data from a total of 48 locations in the metropolitan area including Seoul in 2019 were used as the observation data used for verification. Sensitivity analysis was conducted by dividing the experiment according to the method of improving the vegetation roughness length. KMAPP has been shown to improve the tendency of LDAPS to over simulate surface wind speeds. Compared to LDAPS, Root Mean Square Error (RMSE) is improved by approximately 23% and Mean Bias Error (MBE) by about 47%. However, there is an error in the roughness length around the Han River or the coastline. Accordingly, the surface roughness length was improved in KMAPP and the building information was reflected. In the sensitivity experiment of improved KMAPP, RMSE was further improved to 6% and MBE to 3%. This study shows that high-resolution KMAPP reflecting building information can improve wind speed accuracy in urban areas.

Keywords: KMAPP, LDAPS, Urban, Wind speed, Building height

1. 서 론

전 세계적으로 도시화는 급격하게 이루어지고 있으며, 인구의 집중으로 인한 메가시티의 형성도 증가하

고 있는 추세이다(Fuchs et al., 1994; Taubenböck et al., 2012). 우리나라 역시 수도권으로의 인구 유입 증가로 수도권 인구가 비수도권의 인구를 추월한 실정이다(Statistics Korea, 2019). 급격한 도시화와 인구집중 현상은 폭염, 폭설, 한파, 태풍, 집중호우, 대기오염과 같은 기상재해가 발생했을 때 도시의 인명 및 경제적 피해를 교외 지역 보다 크게 하는 원인이 된다(Adelekan, 2012; Shepherd, 2013; Paul et al., 2018; Zhang et al., 2018; Lu et al., 2021). 또한 도시 지역에서 기상재해에 대한 노출과 취약성은 기후변화로 인해

*Corresponding Author: Do-Hyoung Kim, Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, Korea Meteorological Administration, 33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do 63568, Korea.
Phone: +82-64-780-6680, Fax: +82-64-738-9072
E-mail: kdhsnic@korea.kr

더욱 증가할 수 있다(Cardona et al., 2012; Garschagen and Romero-Lankao, 2015). 따라서 도시지역의 인명 및 경제적 피해의 저감과 도시 계획 및 정책 수립을 위해 상세한 도시 기상 예측 및 분석이 제공될 필요가 있다.

도시의 바람은 건물이나 지형에 의해 생성되는 난류에 영향을 많이 받는다(Oke, 1995; Kalnay and Cai, 2003; Liu et al., 2018). 도시 내 바람은 도시열섬에 의한 국지적인 순환인 전원풍, 도시의 산악지형에 의한 바람인 산곡풍과 사면풍, 그리고 도시의 고층 건물들로 인한 국지 난류로 생성되는 빌딩풍이나 협곡풍 등이 있다. 이러한 도시의 바람을 분석하기 위해서는 도시 관측 자료 및 고해상도의 수치 모델 자료가 필요하다. 현재 기상청에서 제공하는 가장 조밀한 지상 관측 자료는 자동 기상관측 시스템(Automatic Weather Station, AWS), 수치 모델 자료는 현업으로 운영하는 국지예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS)이다. AWS 관측망은 서울에서 대략 5 km 정도의 공간 해상도를 가지지만, 도시의 바람 관측은 복잡한 도시의 지표로 인해 바람의 변화가 커서 더 세밀한 관측 환경이 필요하다. 또한 LDAPS 자료의 경우에는 수평 해상도가 1.5 km로, AWS 관측보다는 조밀하여 데이터 공백을 대체할 수 있지만 관측과 비교·검증했을 때에는 지상 풍속을 크게 과대 모의하는 경향이 나타났다(Kim et al., 2020).

이러한 단점을 보완하기 위해서 도시 지표와 대기 사이의 다양한 물리 과정을 모수화한 도시 캐노피 모델(Urban Canopy Model, UCM)을 이용한 많은 연구가 진행되었다. Masson (2000)과 Kusaka et al. (2001)은 UCM을 중규모 기상모델과 접합하고 빌딩 높이, 면적비, 도로와 빌딩의 비율 등 도시 형태를 가정하여 바람 연직 프로파일을 검증하였다. Byon et al. (2010)은 WRF-UCM (Weather Research and Forecasting model with an UCM)을 이용하여 서울 및 경기지역의 풍속을 AWS와 비교 검증하였다. Varquez et al. (2015)은 도쿄지역의 건물정보(건물 높이, 거칠기 길이, 영면 변위)를 WRF모델에 적용하여 해륙풍에 대한 도시지역 민감도 실험을 진행하였다. Kim et al. (2019)은 서울 건물정보 자료를 이용하여 기상청 현업모델(Unified Model, UM) 기반의 도시 캐노피 모델 입력자료를 생성하고 서울 25개 AWS 지점에 대해서 풍속을 검증하였다. UCM 모델은 도시 협곡 내 도시 형태 정보를 모수화하여 도시 효과를 반영할 수 있지만 중규모 기상모델을 기반으로 다소 낮은 공간 해상도의 분해능을 가진다.

도시지역 내 상세한 바람 자료 생산을 위해 국립기상과학원은 고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계(Korea Meteorological Administration Post Processing,

KMAPP)를 구축 및 개발하고 있다. KMAPP은 영국 기상청에서 개발된 UKPP (United Kingdom Post Processing)을 한반도에 적용하여 2016년부터 규모상세화모델(DowNSCaing, DNSC)을 중심으로 재개발되었다. 기상입력자료는 LDAPS가 사용되고 있으며, 산출되는 공간 해상도는 100 m이다. KMAPP의 풍속 규모상세화는 Howard and Clark (2007)의 방법을 따른다. 지상 풍속의 풍속의 규모상세화 과정에서 거칠기 길이 보정(Roughness adjustment)과 고도 보정(Height correction)이 적용된다. 거칠기 길이 보정은 대수 속도 연직 분포 법칙을 따라 LDAPS의 기준고도에서의 풍속과 거칠기 길이 값, 해당 지점의 고도와 거칠기 길이를 반영하여 풍속의 연직 분포를 계산한다. 고도 보정은 LDAPS의 격자 지형 고도와 해당 지점의 실제 지형 고도의 차에 의한 풍속 효과를 보정한다. KMAPP은 규모상세화 과정을 통해 고해상도의 고품질 분석 및 예측 자료를 비교적 빠르게 계산 및 산출할 수 있기에 시간적인 비용과 전산 자원을 줄일 수 있는 장점이 있다. 따라서 기상 자원, 항공 기상과 같은 여러 분야에서 활용되고 있으며 지속적인 성능평가와 개선이 이루어지고 있다. Keum et al. (2021)은 KMAPP의 지형 피크 고도와 실루엣 거칠기 길이를 개선하여 산악 지형에 대한 지상풍속 성능을 평가하였으며, Yun et al. (2021)은 KMAPP을 이용하여 남한 지역의 고해상도 풍력 기상자원 정보를 생산하고 육상과 해상에 대한 풍력 자원 분석을 진행하였다. 그러나 도시의 상세 바람을 분석하기 위해서는 기존 연구에서 사용된 KMAPP보다 더 높은 해상도 및 최신의 지형과 건물 데이터가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 고해상도 도시 기상정보를 시범 산출하기 위해 건물 정보를 적용한 초고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계를 구축하고 평가하였다. 시범 산출 영역은 수도권 지역으로, 건물 규모를 고려하여 KMAPP의 수평해상도를 50 m로 향상하였으며 최신 지면피복 정보 반영과 도시 건물 거칠기 정보 입력도 수행하였다. 또한, Keum et al. (2021)에서 개선된 KMAPP의 입력자료(실루엣 지표 거칠기, 지형 피크고도)를 이용한 민감도 실험도 진행하였다.

2. 연구 방법

2.1 초고해상도 KMAPP 구축

초고해상도 KMAPP을 구축하기 위해서 시범 구축 영역인 수도권(서울특별시, 인천광역시, 경기도)지역 일대를 대상으로 분석 영역에 대해 50 m 해상도의 격자를 생성하였다. 영역 내 격자는 2,000 × 950개이며, 격자 간 등간격 유지를 위해 회전 위·경도 좌표체계(Rotated latitude-longitude coordinate system)로 구성

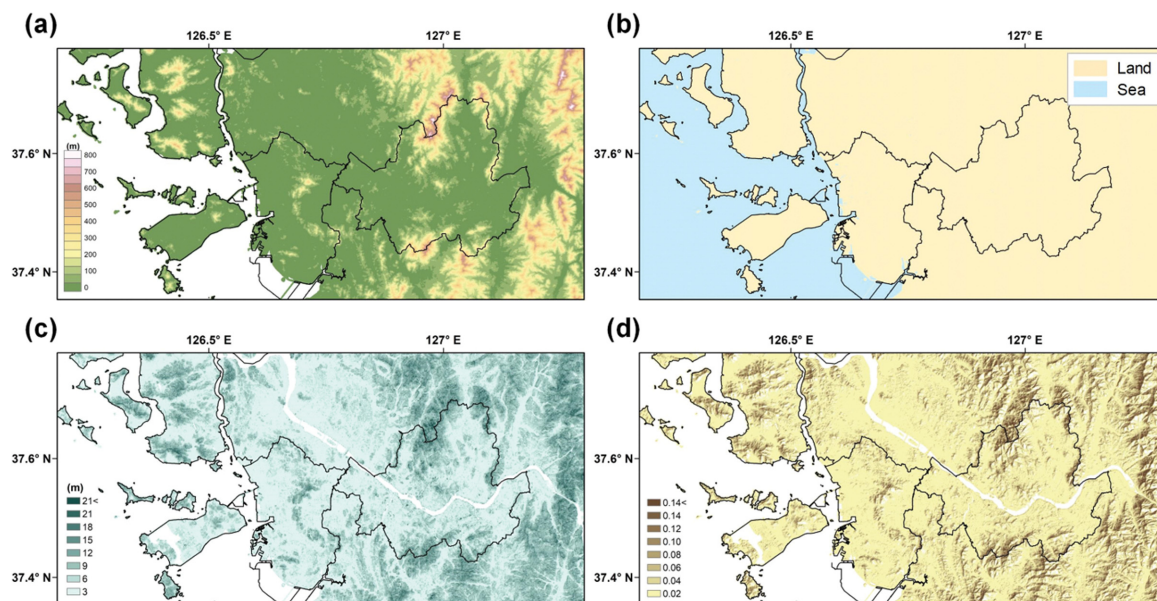


Fig. 1. The model (a) orography, (b) land-sea mask, (c) topographic peak height, and (d) the silhouette roughness of KMAPP input data using SRTM 30 m resolution data.

하였다. 그 후 모델 구동을 위한 보조자료를 생성하였다. KMAPP에서 사용되는 보조자료는 지형, 해륙 구분자료(Land-sea mask), 지형피크고도, 실루엣 지표 거칠기, 식생 거칠기 자료이다. 식생 거칠기 자료를 제외한 보조자료는 지형 고도 자료를 이용하여 산출 가능하다. 자료의 산출에는 30 m 해상도의 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission Version 3; Farr et al., 2007) 지형 고도 자료를 이용하였다(Fig. 1). 추가적인 실험을 위해 Keum et al. (2021)에서 개선된 지형피크고도, 실루엣 지표 거칠기 자료를 이용하였다. 해당 자료는 KMAPP의 입력자료인 LDAPS의 격자 크기(1.5 × 1.5 km)와 남한 영역의 지형 특성을 고려하여 산출되었다. 자료 산출 과정과 관련된 내용은 Keum et al. (2021)에 제시되어 있다.

식생 거칠기 길이 자료는 개선 전 KMAPP의 경우 LDAPS-MORUSES (Met Office Reading Urban Surface Exchange Scheme)의 산출 자료를 사용하고 있다(Fig. 2a). 그러나 보다 상세한 토지피복정보를 반영한 초고 해상도 KMAPP을 구축하기 위해 환경부 중분류 토지피복지도(5 m 해상도, 2007년)를 사용하여 개선하는 과정을 거쳤다. 이를 위해 JULES (Joint U.K. Land Environment Simulator)의 모자이크 기법을 적용하여 중분류 토지피복 22개 유형을 JULES의 9개 유형으로 재분류(Unnikrishnan et al., 2016; Hong et al., 2018)한 후, 식생 피복은 식생 캐노피 고도(Canopy height)에 따른 거칠기 길이 변화율의 값으로, 비식생

지표는 고정된 거칠기 값으로 변환(Best et al., 2011)하였다. Figure 2b는 새롭게 산출한 KMAPP의 식생 거칠기 길이 자료를 나타낸다. 개선 전 KMAPP의 식생 거칠기 길이 자료 대비 뚜렷한 해상도 향상과 해안선 일대 상세한 토지 피복 정보가 반영되었음을 확인할 수 있다.

2.2 도시 건물정보 구축 및 KMAPP 적용

도시 건물이 바람에 미치는 영향을 풍속 물리 보정 과정에 반영하기 위해 도시 건물 정보를 거칠기 길이의 형태로 변환하여 식생 거칠기 길이 자료에 추가 입력하였다. 도시 건물 거칠기 길이는 건물 높이, 평면적비, 앞면적비 등의 형태 속성을 통해 산출한 자료이다(NIMS, 2020). 형태 속성은 국토지리정보원 수치지도 2.0(1:5,000 축적)의 건물 레이어를 이용해 계산하였다. 토지피복지도를 식생 거칠기 길이 값으로 변환하는 과정에서 도시에 해당하는 영역은 1 m의 고정된 거칠기 길이 값으로 변환된다(Best et al., 2011). 그러나 도시 건물 거칠기 길이 정보는 건물 속성 정보를 통해 산출된 것으로 고정된 거칠기 길이 값보다 현실적인 도시 캐노피 환경 모사가 가능할 것으로 판단된다. Figure 2c는 도시 건물 정보가 반영된 거칠기 길이 자료를 나타낸다. 서울 도심 영역을 중심으로 식생 거칠기 길이 최대값이 1.2 m 이상의 값을 보이는 격자가 전반적으로 증가하였으며, 건물이 밀집하지 않은 도시 영역에 대해서는 거칠기 길이가 감소한 것을

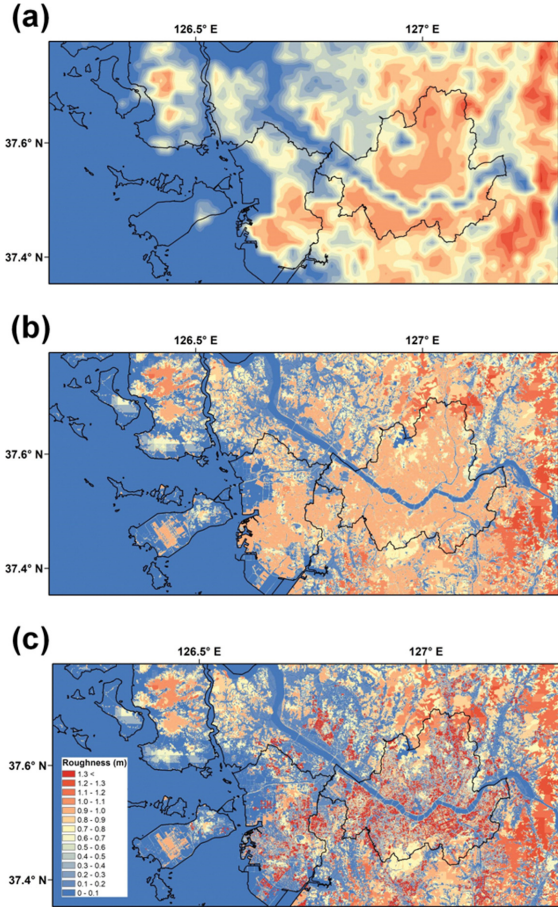


Fig. 2. Vegetation roughness length of KMAPP used in the (a) CTL, (b) EXP1, and (c) EXP2 experiment. Note that the EXP3 experiment uses the same vegetation roughness length as in the EXP2 experiment.

확인할 수 있다. 시범 구축 영역 내 전반적으로는 바다와 하천 영역을 제외하고 거칠기 길이가 증가된 격자(9.6%) 보다는 감소된 격자(21.1%)의 비율이 큰 것으로 분석되었다. 이는 지표 이용에 따라 일괄적으로 변환하는 거칠기 길이 값이, 풍속 물리 보정 과정에서 복잡한 도심의 실제 지표 특성을 반영하지 못할 수 있다는 것을 의미한다. 최대 거칠기 길이의 값은

153 m까지도 나타났으나 KMAPP의 바람 산출 고도가 10 m임을 고려하여 10 m로 제한하여 입력하였다.

2.3 실험 설계

입력자료 개선에 대한 50 m 해상도의 KMAPP 검증을 위해 4가지 실험을 설계하였다(Table 1). 현업에서 운영되는 LDAPS를 대조군으로 KMAPP과 비교·검증하였다. 민감도 실험은 기존 식생 거칠기 길이 자료를 이용한 실험(CTL), 환경부 중분류 토지피복지도 자료를 이용하여 산출된 식생 거칠기 길이 자료를 사용한 실험(EXP1), 국토연구원에서 제공한 수도권지역 건물 거칠기 길이 자료와 EXP1에서 사용한 자료를 합성한 실험(EXP2), Keum et al. (2021)에서 사용된 실루엣 지표 거칠기 및 지형피크고도 자료와 EXP2에서 사용한 자료를 합성한 실험(EXP3)으로 진행하였다. 건물 정보가 반영된 50 m 해상도의 KMAPP 검증을 위해 2019년 1월에서 12월까지 3시간 간격으로 모델을 수행하였고 수도권 지역의 지상 풍속에 대해 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 식생 거칠기 자료 비교

식생 거칠기 길이 변화에 따른 풍속 공간 분포 변화를 분석하고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Figure 3a는 서울 및 인천지역에 대해서 EXP1과 CTL의 풍속 공간 분포 차이를 나타낸다. EXP1에서 인천 해안 지역 간척지와 영종도 인천공항 일대에 식생 거칠기 길이가 반영되어 풍속이 감소되었음을 확인할 수 있다. 또한 서울의 한강 영역을 따라 풍속이 뚜렷하게 증가한 것을 통해 CTL의 지리 공간정보 불일치 문제가 개선됨을 확인할 수 있다. 해당 결과는 고해상도의 규모상세화 자료 산출에 정확한 공간정보 데이터 사용의 중요성을 나타낸다. Figure 3b는 EXP2와 EXP1의 풍속 공간 분포 차이를 나타낸다. EXP2의 실험은 최신의 건물정보가 적용되어 서울 및 인천지역의 건물 밀집지역에 풍속이 감소된 것을 확인할 수 있다. 서울에서는 강남, 잠실, 송파, 양천, 마곡, 노원구 지역이 건물로 인한 풍속 감소가 나타났다. 경기지역에는 성남, 부천, 고양, 일산 지역이 풍속 감소가 뚜렷

Table 1. KMAPP model sensitivity experiment design.

Experiment name	Description of the input of KMAPP ancillary data
CTL	Control run
EXP1	Resolution enhancement of vegetation roughness length (1.5 km to 50 m)
EXP2	Added building roughness length to vegetation roughness length
EXP3	EXP2 + modified silhouette roughness and topographic peak height

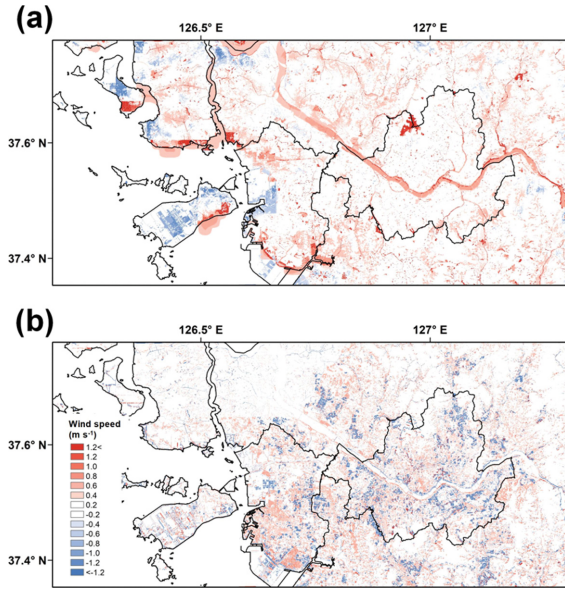


Fig. 3. The spatial distribution of wind speed during the entire period of simulation for (a) difference between CTL and EXP1, (b) difference between EXP1 and EXP2.

하게 나타났다. 반면에 도시지역에서 풍속이 증가하는 지역도 나타났다. 해당지역은 EXP1에서 도시 영역으로 분류되어 식생 거칠기 길이가 1m로 고정되어 있었지만 건물 정보를 포함한 식생 거칠기 길이 변화로 인해 거칠기 길이가 감소하여 풍속이 증가하였다.

3.2 KMAPP 검증 결과

관측 자료의 분석은 수도권에 설치된 기상청 AWS 관측 자료 중에 데이터의 오류가 상대적으로 많았던 지점 및 미관측 지점을 제외한 48개 지점을 대상으로 수행하였다. 정량적 검증 지수로 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE), 평균편차오차(Mean Bias Error, MBE)를 통해 관측과 LDAPS 및 KMAPP 결과

를 비교 검증하였다. 2019년 수도권 지역에 대한 50 m 해상도의 KMAPP 검증 결과를 표로 정리하였다 (Table 2). 수도권 지역의 전체 AWS에 대한 LDAPS의 RMSE는 1.93 m s^{-1} , KMAPP을 적용하였을 때에는 1.47 m s^{-1} 로 LDAPS 풍속 대비 KMAPP의 풍속 정확도가 약 23%로 증가하였다. 건물정보를 포함하고 입력 자료가 개선된 EXP3의 경우에는 LDAPS 풍속 대비 약 29% 개선효과를 확인하였다. 서울지역에 대해서 식생 거칠기 길이를 개선했을 때 RMSE는 약 1.33 m s^{-1} 으로 뚜렷한 변화가 나타나지 않았다. 오히려 건물 정보가 포함된 EXP2에서 약간 RMSE가 증가하는 것을 볼 수 있었지만 EXP3 실험이 가장 RMSE가 낮게 나타나 높은 모의정확도를 보였다. 하지만 인천 및 경기지역에서는 EXP2 실험의 RMSE가 1.57 m s^{-1} 으로 건물 자료로 인해 개선되는 것을 확인하였고 입력 자료가 전부 개선된 EXP3에서 가장 크게 개선되었다. MBE는 LDAPS를 포함한 KMAPP 민감도 실험 평균적으로 양의 MBE를 나타내어 관측보다 풍속을 과대모의하는 것을 알 수 있다. 전체적으로 MBE는 EXP3가 LDAPS 대비 약 50% 개선되었고 특히, 서울지역의 경우 양의 MBE가 뚜렷하게 감소하였다.

Figure 4는 수도권 지역에 대한 AWS 지점별 풍속 RMSE를 LDAPS의 RMSE가 높은 순으로 정렬하여 나타낸다. 전체적으로 대부분의 검증 지점에 대해 LDAPS 풍속 모의정확도보다 50 m 해상도 KMAPP의 모의정확도가 높은 것을 볼 수 있다. LDAPS보다 KMAPP의 풍속 모의정확도가 개선된 지점은 전체 48개 지점 중 41개 지점이다. 48개 AWS 지점에 대해서 서울 29개 지점(Fig. 4a), 인천 및 경기지역 19개 지점(Fig. 4b)으로 나누어 분석하였다. 서울지점 중에서 대표적으로 강남(400), 광진(413) 지점의 경우, 식생 거칠기 길이 및 도시 건물정보를 적용함으로써 LDAPS보다 크게 모의 정확도가 향상되었다. 하지만 은평(416) 지점, 영등포(510) 지점의 경우는 모의정확도가 LDAPS보다 낮게 나타났다. 또한 강동(402), 관악(509), 서대문(412) 지점의 경우에는 개선된 실루엣 거칠기

Table 2. RMSE and MBE of wind speed for simulation according to experiments (m s^{-1}).

	Location	LDAPS	CTL	EXP1	EXP2	EXP3
RMSE	Seoul	1.97	1.33	1.33	1.35	1.31
	Incheon	1.86	1.67	1.65	1.57	1.47
	Gyeonggi	1.93	1.47	1.46	1.44	1.37
	Total	1.93	1.47	1.46	1.44	1.37
MBE	Seoul	1.06	0.37	0.37	0.40	0.32
	Incheon	0.87	0.74	0.75	0.72	0.59
	Gyeonggi	0.7	0.37	0.38	0.37	0.35
	Total	0.7	0.37	0.38	0.37	0.35

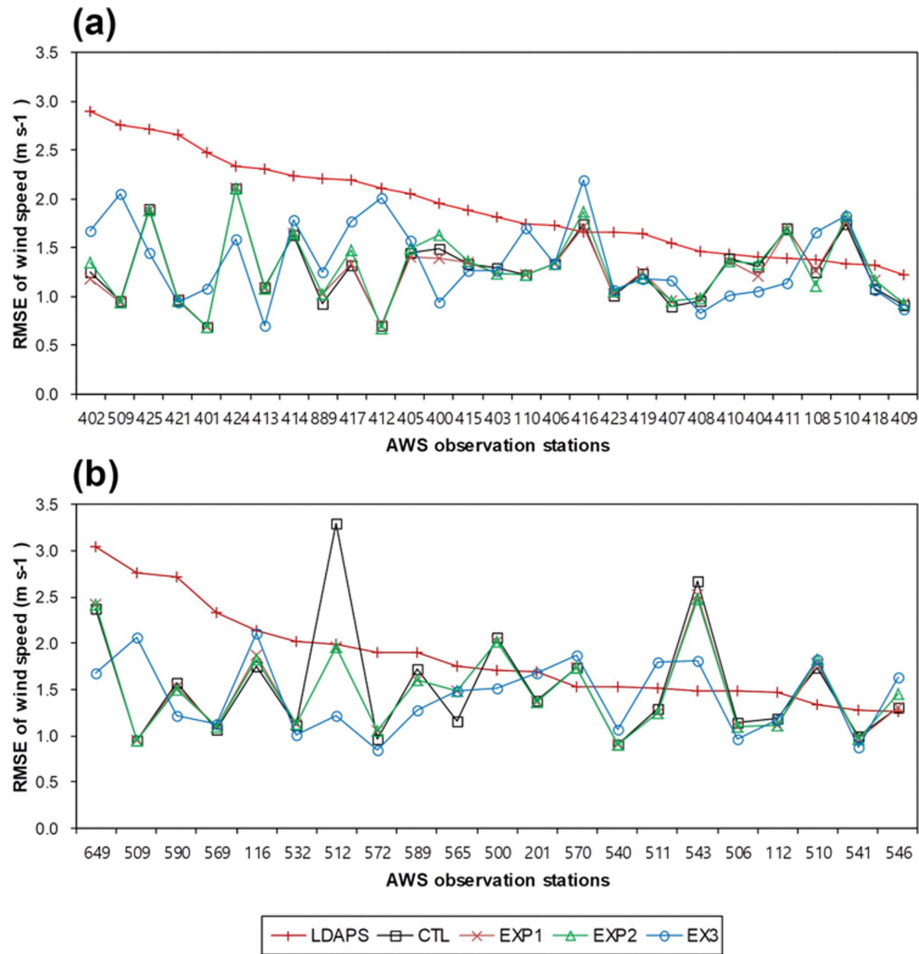


Fig. 4. The RMSE of wind speed for LDAPS and KMAPP experiments with (a) Seoul and (b) Incheon and Gyeonggi AWS.

와 지형 피크고도 자료를 적용한 EXP3 실험의 RMSE가 EXP2 실험에 비해 높게 나타났다. Keum et al. (2021)은 KMAPP 풍속의 과대 보정으로 인해 실루엣 거칠기와 지형 피크고도 자료가 개선하였는데, 위의 세 지점에서는 개선된 자료로 인해 과소 보정 효과가 적용된 것으로 판단된다. Figure 5b는 서울지역과 마찬가지로 대부분의 지점이 LDAPS 풍속 모의정확도보다 50 m 해상도 KMAPP의 모의정확도가 높은 것을 볼 수 있다. 하지만 경기광주(546) 지점, 영종도(543) 지점은 모의정확도가 LDAPS보다 낮게 나타났다. 특히 인천연수(512) 지점에서는 식생 거칠기길이 개선자료(EXP1)를 적용했지만 낮은 모의정확도가 나타났고 건물정보 적용과 실루엣 지표 거칠기 및 지형 피크고도 자료 개선을 통해 모의 정확도가 크게 개선되었다.

Figure 5는 모의 성능이 가장 높게 나타난 EXP3 실험

결과와 LDAPS의 RMSE 차이에 대한 AWS 지점별 공간분포를 나타낸다. KMAPP의 모의정확도가 높은 지점은 LDAPS의 풍속을 고해상도의 지형과 건물효과로 인해 저감 시켜주는 것으로 판단된다. 또한 KMAPP의 과대보정으로 인해서 관측보다 낮게 풍속 모의된 지점은 실루엣 지표 거칠기와 지형 피크고도 자료가 개선되면서 풍속을 과대 보정하는 현상이 완화되었다. AWS 지점별 KMAPP이 LDAPS보다 모의정확도가 낮은 지점에 대해서 추가적인 분석을 진행하였다(Table 3). 은평(416), 영등포(510), 경기광주(546)에서 LDAPS보다 낮은 모의정확도를 나타내었다. 또한 섬에 위치한 영종도(543)의 모의정확도가 낮은 것으로 확인되었다. 해당 지점의 식생거칠기 길이 차이는 0.01임을 고려할 때, 해안과 섬 지역의 관측지점을 대상으로 추가적인 실험을 통해 KMAPP의 모의 성능에 대한 검증이 필요할 것으로 판단된다. 영등포, 은평, 경기 광

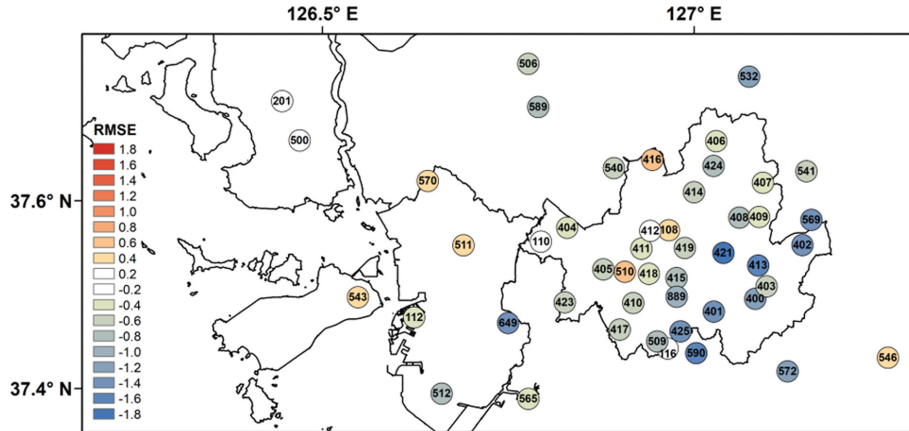


Fig. 5. The spatial distribution of wind speed RMSE(KMAPP-LDAPS) by Seoul, Incheon and Gyonggi AWS.

Table 3. Case by bad simulation experiment was analyzed by averaged wind speed, RMSE, MBE, Height and Roughness length.

AWS (location)	Ave_WS (AWS/LDAPS /KMAPP)	RMSE (LDAPS /KMAPP)	MBE (LDAPS /KMAPP)	Height (AWS/LDAPS /KMAPP)	Roughness (LDAPS /KMAPP)
510 Yeong deungpo (Rooftop)	1.13/1.85/2.65	1.34/1.89	0.71/1.51	25/14/15	0.49/0.15
416 Eunpyeong (Ground)	1.00/2.05/2.74	1.65/2.27	1.04/1.73	57/117/62	0.5/0.15
546 Gwangju (Hill)	1.43/2.00/2.71	1.26/1.98	0.56/1.28	122/173/118	0.5/0.05
543 Yeongjongdo (Island)	1.95/2.29/3.66	1.47/2.32	0.33/1.71	25/12/28	0.35/0.36

주 지역은 LDAPS의 거칠기 길이보다 KMAPP의 거칠기 길이가 낮게 적용되어 풍속 증가 효과가 나타났다. 이로 인해 KMAPP이 과대 모의하는 경향이 나타났다. 특히 세 지점 중 도심 중앙에 위치한 영등포 관측 지역에 대해 KMAPP 격자 자료를 살펴보았다 (Fig. 6). 서울 영등포(510) AWS 관측 장비는 서울 영등 초등학교 옥상(지상으로부터 약 12 m) 위에 설치되어 있다. 영등포 지점은 환경부의 5 m 해상도 토지피복지도를 살펴보았을 때 도시로 분류되며, 바로 아래 학교 운동장은 나지로 분류되어 있음을 확인할 수 있다(Fig. 6a). 또한 KMAPP의 식생 거칠기 길이 자료의 격자를 살펴본 결과, 관측 지점이 운동장에 영향을 받아 거칠기 길이가 약 0.4 m에 해당하는 격자에 위치하고 있는 것으로 확인되었다(Fig. 6b). 영등포 지역은 복잡한 도시 중앙에 위치 하지만 거칠기 길이는 LDAPS 보다 낮게 나타나고 오히려 고해상도의 거칠기 길이 자료로 인해 풍속 모의정확도가 낮아졌다.

3.3 도시기상관측망 추가 검증

국립기상과학원에서 도시기상 특성을 살펴보기 위해 운영하는 도시기상관측망 지상 풍속 자료를 이용하여 초고해상도 KMAPP에 대한 추가 검증을 진행하였다. 수도권 도시기상관측망은 2013년부터 도시에 너지수지, 에어로졸라이더, 운고계, 라디오미터, 윈드라이더, 복합기상센서 등 관측 환경을 구축하고 2019년 1월부터 총 24개 지점으로 운영하고 있다(Park et al., 2017). KMAPP의 풍속 비교를 위해 민감도 실험 중에 가장 모의 성능이 뛰어난 EXP3 실험에 대하여 검증을 진행하였다. 도시 풍속 관측은 도시 에너지 수지 타워(약 10 m)에 설치된 복합기상센서 자료를 사용하였다. 검증 기간은 2019년 1월부터 12월까지 3시간 간격이다. Figure 7은 수도권 도시기상관측망과 KMAPP의 풍속 RMSE와 MBE에 대한 공간 분포를 나타낸다. 수도권 도시기상관측망 24개 지점에 대한 KMAPP 검증 결과 RMSE는 1.67 m s^{-1} , MBE는 0.75 m s^{-1} 로 나타났다. 검증 결과 송도(210), 송마장(001),

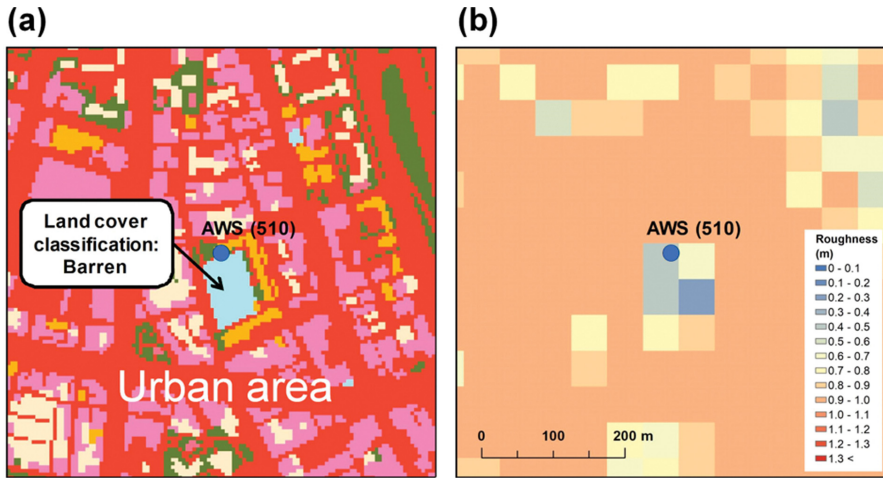


Fig. 6. The surrounding environment of Yeongdeungpo AWS station. (a) Land cover map and (b) KMAPP (50 m) vegetation roughness length.

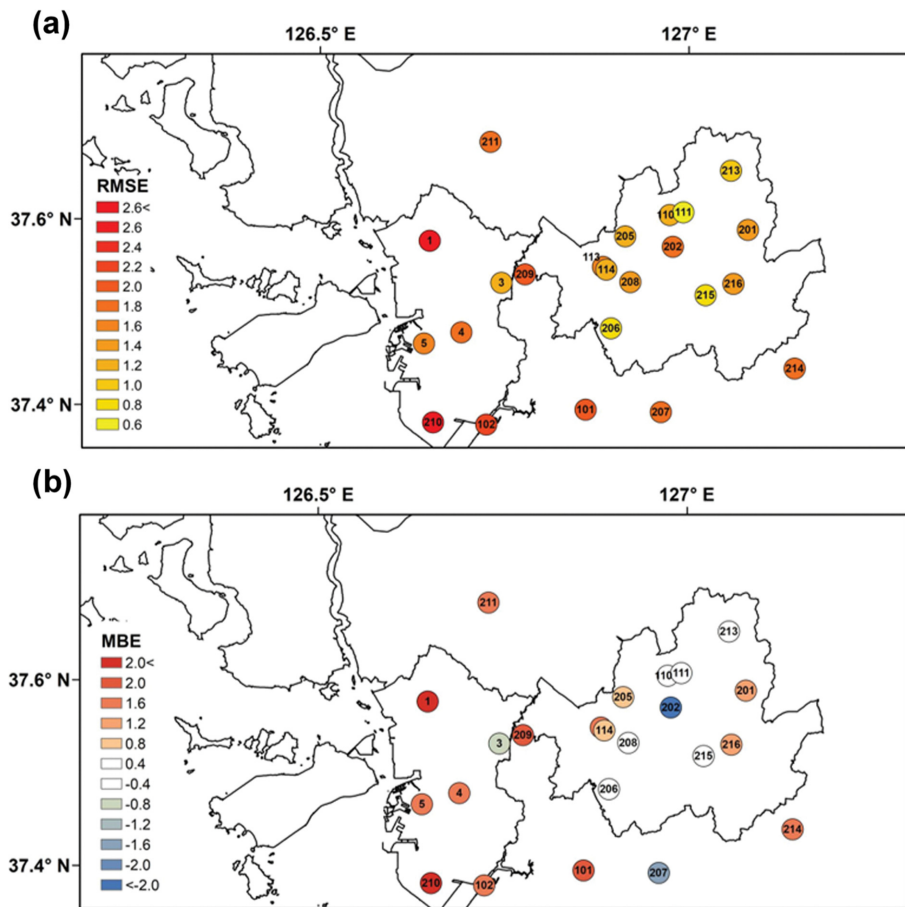


Fig. 7. The spatial distribution of KMAPP wind speed (a) RMSE and (b) MBE by metropolitan urban meteorological observation network.

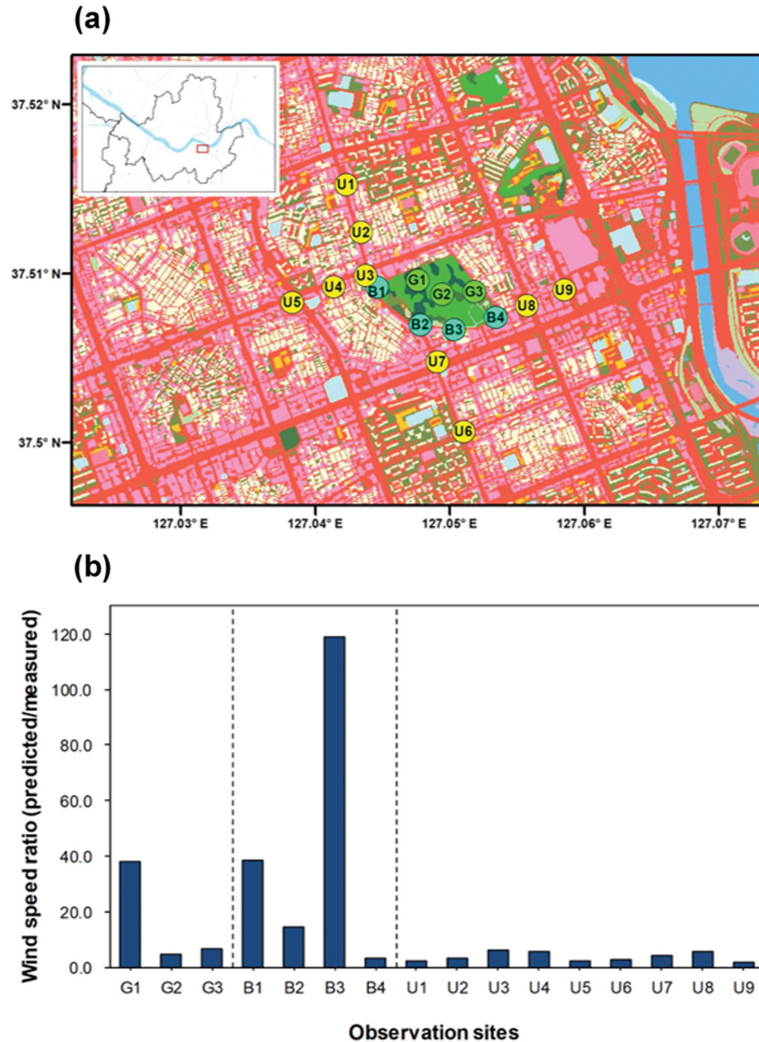


Fig. 8. (a) Location of 16 subsites of the observation network over Seolleung, (b) ratios between measured wind speeds at Seolleung and predicted wind speed of KMAPP wind speed (Seolleung observation/KMAPP).

군자(102) 지점 등과 같이 해안지역의 상대적으로 높은 RMSE는 AWS 영종도(543)의 사례와 같이 해안 지역 KMAPP 모의성능 저하와 관련된 것으로 판단된다. 또한 건물 옥상에 설치된 광화문(202, 71 m), 안양(207, 63.5 m)의 경우 음의 MBE가 나타나 관측기기의 위치, 높이 등도 KMAPP 모의 성능에 부정적 영향을 미칠 수 있는 것으로 분석되었다. 반면 도심지 중심에 위치한 가좌(205), 구로(206), 여의도(208), 강남(215) 지점은 건물 거칠기 길이 개선으로 풍속 모의 정확도가 높게 나타났다.

추가적으로 도심 녹지가 주변에 미치는 영향을 관측하기 위해 2014년부터 국립기상과학원이 운영하고 있는 강남 선릉 도시기상관측망에 대해서도 추가 검

증을 진행하였다. 강남 선릉 도시기상관측망은 복합 기상센서가 설치되어 있으며, 공원 안에 3개 지점(G1~G3), 공원과 건물의 경계에 4개 지점(B1~B4), 공원 주변에 도심 9개 지점(U1~U9)으로 이루어져 있으며, KMAPP을 검증하는데 이 관측 지점을 사용하였다(Fig. 8). 강남 선릉 도시기상관측망의 관측 고도는 2 m이고 KMAPP의 풍속 고도는 10 m이기 때문에 직접 비교하기가 어렵다. 따라서 강남 선릉 도시기상관측 풍속 대비 KMAPP 풍속 비율로 분석하였다. 강남 선릉 도시기상관측 16개 지점 평균 풍속비는 15.7으로 나타났다. 녹지지역(G1~G3)에서는 16개 지점 평균 보다 높은 16.1으로 선릉 공원 안에 위치해 있는 복합기상센서가 숲 안에 설치되어 KMAPP의 풍속과

는 많은 차이를 보였다. 녹지지역에 관측 평균 풍속은 0.4 m s^{-1} , KMAPP의 평균 풍속은 2.3 m s^{-1} 으로 나타났다. KMAPP에서 식생 거칠기 효과가 반영되어 있지만 수목 효과와 같은 추가적인 개선이 필요한 것으로 판단된다. 도심지(U1~U9)에서는 3.6으로 16개 지점 평균보다 낮게 나타났다. 도심지 관측 평균 풍속은 0.7 m s^{-1} , KMAPP의 평균 풍속은 1.9 m s^{-1} 으로 나타났다. 녹지지역보다 관측 풍속이 증가하였고 KMAPP의 건물 거칠기 길이 반영으로 풍속비가 16개 지점 평균보다 낮아진 것으로 판단된다. 특히 가로수와 건물의 영향을 받지 않는 U5 지점과 U9 지점은 관측과의 풍속비가 각각 2.0, 1.6으로 KMAPP과의 비율이 높게 나타났다. 하지만 경계지역(B1~B4)에서는 녹지지역보다 높은 풍속비인 41.3으로 나타났다. 도심지 관측 평균 풍속은 0.3 m s^{-1} , KMAPP의 평균 풍속은 1.9 m s^{-1} 으로 나타났다. B4 지점의 경우 도심지 지점과 유사한 풍속비를 보이지만 B1~B3 지점에서는 녹지지역 보다 낮은 풍속비가 나타났다. B1~B3의 관측 지점은 가로등에 설치되어 있는데 바로 옆에 붙어있는 큰 가로수의 영향으로 관측 풍속이 아주 낮게 측정된 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 상세한 도시기상정보 제공을 위해서 건물정보를 적용한 초고해상도 규모상세화 수치자료 산출체계를 사용하여 풍속 정보를 시범산출하고 입력 자료에 대한 민감도를 분석하였다. 이를 위해 수도권 지역에 대해 50 m 해상도의 KMAPP을 구축하였다. KMAPP에서 사용된 지형 자료는 30 m 해상도의 SRTM 자료이며, 규모상세화 과정에서 상세한 건물의 영향을 반영하기 위해 식생 거칠기 길이를 개선하였다. 구축된 KMAPP의 검증에 대해 AWS 자료와 도시기상 관측망 자료를 비교 검증하였다. 또한 입력자료 개선에 대한 4가지 민감도 실험도 진행하였다. KMAPP의 입력자료 개선으로 지형 불일치 문제를 개선하였고 최신 지형과 피복 자료로 업데이트 하였다. KMAPP에 대한 AWS의 검증결과 수도권지역은 LDAPS 대비 풍속이 약 29% 모의정확도가 개선되었다. AWS의 검증뿐만 아니라 좀 더 조밀하게 설치된 도시기상관측망과의 검증에서도 LDAPS보다 KMAPP이 고해상도의 보다 정확한 풍속 자료를 산출할 수 있음을 확인하였다. KMAPP은 LDAPS가 지표면 바람을 과대 모의 하는 경향을 개선하였고 지표 특성을 반영하였다. 특히 건물정보를 적용한 KMAPP은 거칠기 길이 증가로 인해 도심 내의 풍속을 저감하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 입력자료 개선은 KMAPP에서 풍속이 과대 보정되는 지점의 풍속 모의 정확도를 개선함

을 확인할 수 있었다. 그러나 해안선 지역이나 일부 특정 지역에서 LDAPS보다 모의 성능이 낮게 나타나는 한계를 보였다. 향후 초고해상도 KMAPP은 보다 최신의 토지피복지도 자료 적용, 해안 지역 정확도 검증 및 개선, 풍속 보정 알고리즘 개선과 같은 노력이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「고해상도 도시 기상서비스 기술개발(KMA2018-00627)」의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Adelekan, I. O., 2012: Vulnerability to wind hazards in the traditional city of Ibadan, Nigeria. *Environ. Urban.*, **24**, 597-617, doi:10.1177/0956247812454247.
- Best, M. J., and Coauthors, 2011: The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 1: Energy and water fluxes. *Geosci. Model Dev.*, **4**, 677-699, doi:10.5194/gmd-4-677-2011.
- Byon, J.-Y., Y.-J. Choi, and B.-G. Seo, 2010: Evaluation of urban weather forecast using WRF-UCM (Urban Canopy Model) over Seoul. *Atmosphere*, **20**, 13-26 (in Korean with English abstract).
- Cardona, O. D., and Coauthors, 2012: *Determinants of risk: Exposure and vulnerability. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 65-108pp.
- Farr, T. G., and Coauthors, 2007: The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys.*, **45**, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Fuchs, R. J., E. Brennan, F.-C. Lo, J. I. Uitto, and J. Chamie, 1994: *Mega-city Growth and the Future*. United Nations University Press, 392 pp.
- Garschagen, M., and P. Romero-Lankao, 2015: Exploring the relationships between urbanization trends and climate change vulnerability. *Climatic Change*, **133**, 37-52, doi:10.1007/s10584-013-0812-6.
- Howard, T., and P. Clack, 2007: Correction and downscaling of NWP wind speed forecasts. *Meteor. Appl.*, **14**, 105-116.
- Hong, S.-O., J.-Y. Byon, H. Park, Y.-G. Lee, B.-J. Kim, and J.-H. Ha, 2018: Sensitivity analysis of near surface air temperature to land cover change and urban parameterization scheme using Unified Model. *Atmosphere*, **28**, 427-441, doi:10.14191/Atmos.2018.28.4.427 (in

- Korean with English abstract).
- Kalnay, E., and M. Cai, 2003: Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, **423**, 528-531, doi:10.1038/nature01675.
- 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 (in Korean with English abstract).
- Kim, D. H., S. O. Hong, J. Y. Byon, H. S. Park, and J. C. Ha, 2019: Development and evaluation of urban canopy model based on unified model input data using urban building information data in Seoul. *Atmosphere*, **29**, 417-427, doi:10.14191/Atmos.2019.29.4.417 (in Korean with English abstract).
- Kim, D. J., G. Kang, D. Y. Kim, and J. J. Kim, 2020: Characteristics of LDAPS-predicted surface wind speed and temperature at Automated Weather Stations with different surrounding land cover and topography in Korea. *Atmosphere*, **11**, 1224, doi:10.3390/atmos11111224 (in Korean with English abstract).
- Kusaka, H., H. Kondo, Y. Kikegawa, and F. Kimura, 2001: A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models. *Bound.-Layer Meteorol.*, **101**, 329-358, doi:10.1023/A:1019207923078.
- Liu, J., Z. Gao, L. Wang, Y. Li, and C. Y. Gao, 2018: The impact of urbanization on wind speed and surface aerodynamic characteristics in Beijing during 1991-2011. *Meteor. Atmos. Phys.*, **130**, 311-324, doi:10.1007/s00703-017-0519-8.
- Lu, X., D. Yuan, Y. Chen, and J. C. H. Fung, 2021: Impacts of urbanization and long-term meteorological variations on global PM_{2.5} and its associated health burden. *Environ. Pollut.*, **270**, 116003, doi:10.1016/j.envpol.2020.116003.
- Masson, V., 2000: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Bound.-Layer Meteorol.*, **94**, 357-397, doi:10.1023/A:1002463829265.
- NIMS, 2020: *Development of Production Techniques on User-Customized High Resolution Weather Information*. National Institute of Meteorological Sciences, 72 pp (in Korean).
- Oke, T. R., 1995: *The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects*. In J. E. Cermak, A. G. Davenport, E. J. Plate, and D. X. Viégas (Eds.), *Wind Climate in Cities*, Springer Netherlands, 81-107 pp.
- Park, M. S., S. H. Park, J. H. Chae, M. H. Choi, Y. Song, M. Kang, and J. W. Roh, 2017: High-resolution urban observation network for user-specific meteorological information service in the Seoul Metropolitan Area, South Korea. *Atmos. Meas. Tech.*, **10**, 1575-1594, doi:10.5194/amt-10-1575-2017.
- Paul, S., S. Ghosh, M. Mathew, A. Devanand, S. Karmakar, and D. Niyogi, 2018: Increased spatial variability and intensification of extreme monsoon rainfall due to urbanization. *Scientific Reports*, **8**, 3918, doi:10.1038/s41598-018-22322-9.
- Shepherd, J. M., 2013: Impacts of urbanization on precipitation and storms: Physical insights and vulnerabilities. *Climate Vulnerability*, **5**, 109-125 pp.
- Statistics Korea, 2019: Household projections by province 2017-basaed: 2017-2047 [Available online at <https://kosis.kr/publication/publicationThema.do>] (in Korean).
- Taubenböck, H., T. Esch, A. Felbier, M. Wiesner, A. Roth, and S. Dech, 2012: Monitoring urbanization in mega cities from space. *Remote. Sens. Environ.*, **117**, 162-176, doi:10.1016/j.rse.2011.09.015.
- Unnikrishnan, C. K., B. Gharai, S. Mohandas, A. Mamgain, E. N. Rajagopal, G. R. Iyenger, and P. V. N. Rao, 2016: Recent changes on land use/land cover over Indian region and its impact on the weather prediction using Unified model. *Atmos. Sci. Lett.*, **17**, 294-300, doi:10.1002/asl.658.
- Varquez, A. C. G., M. Nakayoshi, and M. Kanda, 2015: The effects of highly detailed urban roughness parameters on a sea-breeze numerical simulation. *Bound.-Layer Meteorol.*, **154**, 449-469, doi:10.1007/s10546-014-9985-4.
- Yun, J., Y. H. Kim, and H. W. Choi, 2021: Analyses of the meteorological characteristics over South Korea for wind power applications using KMAPP. *Atmosphere*, **31**, 1-15, doi:10.14191/Atmos.2021.31.1.001 (in Korean with English abstract).
- Zhang, W., G. Villarini, G. A. Vecchi, and J. A. Smith, 2018: Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston. *Nature*, **563**, 384-388, doi:10.1038/s41586-018-0676-z.