

ORIGINAL ARTICLE

WRF-UCM을 이용한 연안산업도시지역 고해상도 기상 모델링

방진희 · 황미경 · 김양호 · 이지호 · 오인보*

울산대학교 의과대학 환경보건센터

High-resolution Meteorological Simulation Using WRF-UCM over a Coastal Industrial Urban Area

Jin-Hee Bang, Mi-Kyoung Hwang, Yangho Kim, Jiho Lee, Inbo Oh*

Environmental Health Center, University of Ulsan College of Medicine, Ulsan 44033, Korea

Abstract

High-resolution meteorological simulations were conducted using a Weather Research and Forecasting (WRF) model with an Urban Canopy Model (UCM) in the Ulsan Metropolitan Region (UMR) where large-scale industrial facilities are located on the coast. We improved the land cover input data for the WRF-UCM by reclassifying the default urban category into four detailed areas (low and high-density residential areas, commercial areas, and industrial areas) using subdivided data (class 3) of the Environmental and Geographical Information System (EGIS). The urban area accounted for about 12% of the total UMR and the largest proportion (47.4%) was in the industrial area. Results from the WRF-UCM simulation in a summer episode with high temperatures showed that the modeled temperatures agreed greatly with the observations. Comparison with a standard WRF simulation (WRF-BASE) indicated that the temporal and spatial variations in surface air temperature in the UMR were properly captured. Specifically, the WRF-UCM reproduced daily maximum and nighttime variations in air temperature very well, indicating that our model can improve the accuracy of temperature simulation for a summer heatwave. However, the WRF-UCM somewhat overestimated wind speed in the UMR largely due to an increased air temperature gradient between land and sea.

Key words : Meteorological simulations, WRF-UCM, Ulsan, Industrial area, Air temperature

1. 서론

연안지역 도시의 기상조건은 시·공간적으로 변화가 크며, 지형과 해안선 등의 지리적 특징과 도시의 형태에 따라 국지적 변화가 복잡하게 일어난다(Palau et al, 2005; Zhang et al., 2013; Yi et al., 2016). 최근 도시지역의 확장과 산림 및 초지 면적의 축소는 인공열을 증가

시키는 중요한 요인이 되고 있다(Kimura and Takahashi, 1991; Lee, et al., 2009; Grossman-Clarke, et al, 2010). 이는 기온 상승을 유도하여 연안도시의 바람을 변화시키는 원인으로도 작용한다(Yoshikado, 1994; Oke, 1995; Freitas, et al., 2007). 또한 고층건물 등에 따른 지표 마찰의 증가는 풍속을 감소시킨다(Holt and pullen, 2007; Miao, et al., 2009).

Received 21 October, 2019; Revised 30 December, 2019;

Accepted 9 January, 2020

*Corresponding author: Inbo Oh, Environmental Health Center, University of Ulsan College of Medicine, Ulsan 44033, Korea
Phone : +82-52-250-8402
E-mail : oinbo@ulsan.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.

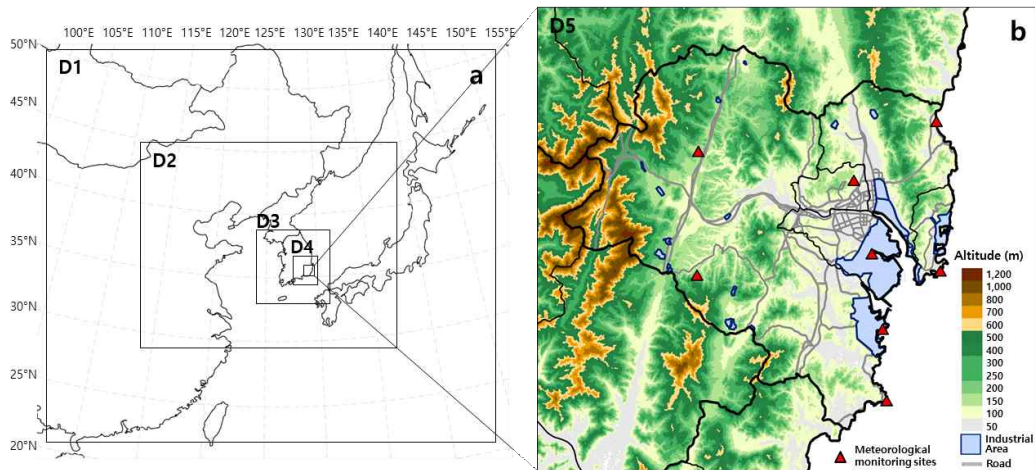


Fig. 1. (a) Five domains for the WRF modeling. (b) Terrain in the Ulsan Metropolitan Region (UMR) and its surroundings. Gray lines and red triangles indicate main roads and meteorological sites, respectively, in the UMR.

따라서 연안 도시지역 기온, 바람에 대한 정확한 진단과 예측은 쉽지 않으며 도시화 효과를 반영한 적절한 모델링 방법 적용과 입력자료 개선을 통한 수치모의 개선 연구가 필요하다. 특히 연안 도시지역에 대규모 대기오염 배출원(산업시설 등)이 존재하는 경우, 대기오염물질의 화학반응, 이류와 확산을 진단하고 예측하기 위해서는 기상모델링의 정확성은 매우 중요하다.

지금까지 연안도시지역 기온과 바람에 대한 수치 모델링 연구는 다수 있었지만(Park et al., 2010; Jeong et al., 2011; Oh et al., 2015) 상세한 도시형태와 관련 인공열 효과를 적절히 고려한 연구는 매우 부족하며 여전히 도전적인 연구 부분이다. 최근 도시캐노피모델을 이용한 도시 바람장 개선 연구가 있었고(Kinouch and Yoshitani, 2001; Lee, et al., 2011) 도시범주 구분과 관련 건물 정보 및 인공열 수치의 차이로 모델링 결과의 불확실성이 있음을 보여주었다.

이 연구에서는 대규모 산업시설이 연안에 위치한 울산지역을 대상으로 해상도 높은 도시 지표상태를 고려할 수 있는 도시캐노피모델(Urban Canopy Model, UCM)이 결합된 중규모 기상모델인 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델을 수행하여 기온과 바람 수치모의 결과를 분석하였다. 아울러 상세한 지표상태가 반영된 도시효과를 파악하기 위해 UCM이 고려되지 않은 WRF 모델링 결과와 비교하였다.

2. 연구방법

2.1. 대상영역 및 모델링 기간

울산은 한반도의 동남단에 위치한 대표적인 산업도시로 118만(2018년 12월말 기준)의 인구가 거주하고 있다. 서쪽으로는 가지산(1,241 m) 등 해발 1000 m가 넘는 높은 산들이 위치하고 남동쪽으로는 동해와 접하며 복잡한 해안선이 형성되어 있다(Fig. 1). 또한 울산만과 연이어 있는 울산항, 온산항, 방어진항구들의 내안 구릉지에는 대규모 국가산업단지(울산미포 국가산업단지, 온산 국가산업단지)가 조성되어있는 것이 도시환경의 주요 특징이다. 울산 전체 면적은 1,057 km²이며 이 중 산업단지가 차지하는 비율은 약 9%이다(90 km²)(ILIS, 2019). 특히 울산 남구의 경우 전체 면적의 44%가 산업단지이며 인근 지역에 많은 인구가 분포되어 있다.

기상 모델링 수행 기간은 연안도시에서 중규모 및 국지규모 바람이 잘 발달되는 여름철 강수가 없는 일정기간(2018년 7월 20일~7월 26일, 총 7일)으로 선정하였다. 아울러 이 기간은 고온이 지속적으로 기록된 시기로 여름철 폭염과 관련하여 도시 고온현상에 대한 모델의 재현능력을 평가할 수 있는 기간이기도 하다. 기간 중 울산기상대 일평균 기온은 28.8~31.0°C로 높게 나타났고(일최고 기온은 31.4~35.4°C) 일 평균 풍속은 1.2~1.9 ms⁻¹로 기록되었다(Fig. 2).

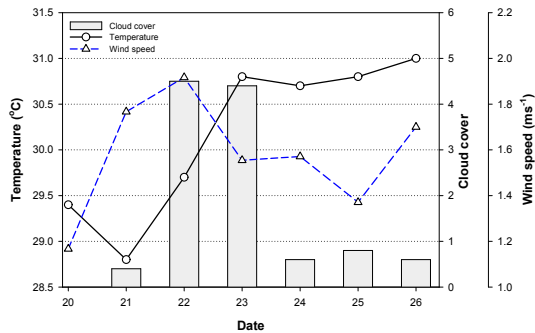


Fig. 2. Daily variations of air temperature, cloud cover amount, and wind speed at ASOS for the period of 20-26 in July 2018.

2.2. 기상모델링

2.2.1. WRF-UCM

도시내 산업지역을 포함한 복잡한 환경의 영향(이후 도시효과)을 고려할 수 있는 기상수치모의를 위해 건물의 면적비, 높이, 도로 등과 같은 다양한 도시 형태에 관한 변수들을 이용하는 도시캐노피 모델이 필요하다. 본 연구에서는 울산지역의 열환경을 모의하기 위해 도시캐노피모델이 결합된 중규모 기상 모델(WRF-UCM, WRF버전: 3.5)을 이용하였으며 추가로 분류된 도시하부카테고리를 WRF 모델에서 고려하도록 UCM 모듈을 수정·보완하였다.

WRF-UCM은 도시 지면과 대기사이의 에너지와 운

동량을 교환하기 위한 단일 층 도시 캐노피 모형으로 도시 형태에 따라 빌딩높이(building height), 거칠기 길이(roughness length), 인공열(anthropogenic heat) 등의 도시효과를 고려할 수 있다(Chen et al., 2011). Land Surface Model (LSM) 중의 하나인 Noah-LSM을 적용 가능하도록 구축하여, 태양으로부터 지표에 흡수된 복사 에너지가 현열 혹은 잠열 플럭스 형태로 토양과 대기에 다시 재분배되는 과정을 고려할 수 있도록 하였다. 일반적으로 대기경계층의 일변화 및 연직적 구조의 모의능력을 향상시키기 위해 지표경계조건이 요구되며, 이는 대기경계층의 구조뿐만 아니라 구름 및 강수과정까지 밀접한 관련이 있다(Mahfouf et al., 1987). 하지만 일반적인 중규모 기상모델에서 지형, 토양수분, 식생, 토질 등을 현실적으로 모두 고려하는데 한계가 있어(Chen and Dudhia, 2001) LSM 모델과의 접합을 통해 지표경계조건을 더욱 현실적으로 고려하여 경계층 모의능력을 향상시키고자 한다. 또한 도시효과를 고려한 기상수치모의 결과를 비교·분석을 위해 기존 WRF 모델링(urban physics option을 끈 모델링: WRF-BASE)을 추가로 수행하였다. Table 1에는 WRF-UCM과 WRF-BASE 모델링 영역, 입력자료, 물리옵션 정보를 제시하였다.

2.2.2. 고해상도 토지피복 자료

토지피복자료는 WRF-UCM 모델링 수행을 위해 필요한 주요 초기 입력자료 중 하나이다. 수치모델에서

Table 1. The configuration of the WRF-UCM/BASE modeling

Domain	D1	D2	D3	D4	D5
Horizontal grid	48×43	88×73	76×73	73×73	67×61
Horizontal resolution (km)	81	27	9	3	1
Vertical layer	43 layers				
Initial/Boundary condition	GFS (Global Forecast System) 0.5° data ¹⁾				
Terrain/Land use	SRTM ²⁾ /EGIS ³⁾ data				
Physics options (NIER, 2014)	Microphysics	WSM3 (D1 and D2), WDM6 (D3, D4 and D5)			
	Cumulus	Kain-Fritsch (only D1 and D2)			
	Radiation	RRTMG (long & short wave)			
	PBL	YSU scheme			
	Surface layer	Monin-Obukhov			
	Land Surface	Noah Land Surface Model			
	Urban Physics	Single-layer UCM (only D5)			

¹⁾NOAA(2019), ²⁾Farr et al. (2007), ³⁾Environmental Geographic Information Services (2019)

토지피복도는 토지의 반사도(albedo), 흡수분가 용량(moisture availability), 거칠기 길이(roughness length), 방사율(emissivity) 등의 물리적 성질을 적용하여 열적 특성과 바람장에 영향을 미친다(Jeong and Kim, 2009; Song and Park, 2013). 본 연구에서는 환경부 환경지리 정보서비스(EGIS)에서 제공하는 세분류 자료를 이용하여 울산지역 고해상도 토지피복자료를 생성하였다. 기존 연구에서 대부분 중분류(5 m 공간해상도) 자료를 이용하여 기상모델 입력자료를 생성하였으나, 본 연구에서는 1 m의 공간해상도(1:5,000 축적)의 세분류 자료를 이용하여 토지피복자료를 생성하였다. 세분류 자료의 41 개의 항목을 USGS 코드에 맞춰 재분배하였으며 보다 현실에 가까운 토지 이용도 구현을 위해 도시화된 지표특성을 4 개(저밀도 주거지역, 고밀도 주거지역, 상업지역, 공업지역)로 상세히 분류하여 수치모의 정확도를 높이고자 하였다. WRF-UCM을 수행하기 위해서는 건물 높이 면적 등의 자료가 추가로 필요하며 본 연구에서는 건축물대장을 바탕으로 4개의 도시 하위범주별 3차원 건축물 분포를 재현하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 울산지역 토지피복

Fig. 3은 연구방법에 제시된 방법으로 생성한 모델링 영역의 고해상도 토지피복 분포를 보여준다. 4개의 도시 범주(저밀도 주거지역, 고밀도 주거지역, 상업지역, 공업지역)를 포함한 34개의 범주와 기존 USGS 24개 범주를 비교할 수 있다. 기상모델링 최종 격자(3,960개) 중 울산이 포함되는 격자는 1,134개이며 그중 도시범주가 차지하는 비중은 12.1%(137개)이다. 이를 4개의 도시범주로 상세화시킨 결과 저밀도 주거지역 16.1%, 고밀도 주거지역 5.1%, 상업지역 31.4%, 공업지역 47.4%로 공업지역이 연안도시지역에 넓게 분포해 있는 것으로 나타났다. 울산 토지피복분포의 가장 큰 특징은 넓은 면적에도 불구하고 도심지역이 매우 밀집되어 발달되어 있으며 공업지역과 주거 및 상업지역이 매우 인접해 있는 것이다. 기존의 WRF 모델링 시 하나의 도시 카테고리 입력되며 이때 urban parameter(인공열, 도시 마찰 등)는 WRF-UCM 고밀도 주거지역(land use index 32) urban parameter 값이 적용되었다(Li et al., 2013). 하

지만 실제로 도시범주를 상세화시킨 결과 울산지역의 경우 고밀도 주거지역이 가장 낮은 비율을 차지하였으며, urban parameter 중 대부분에서 주거지역보다 변수값(surface emissivity of roof, thermal conductivity of roof 등)이 큰 상업 및 공업지역이 대부분을 차지하는 것으로 나타났다.

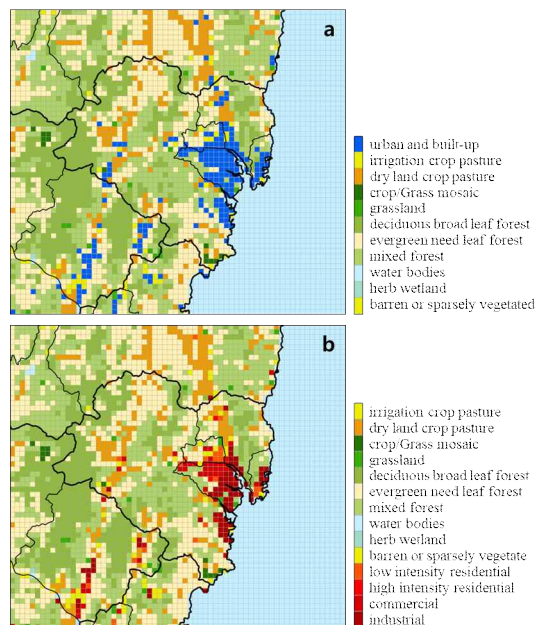


Fig. 3. Land use distributions in the UMR for (a) USGS-24 category and (b) UCM-34 category.

3.2. WRF-UCM 모델링 결과

Table 3에는 모델링 결과 분석에 앞서 모델링 결과와 관측자료와의 검증 통계량(평균 편향 오차(mean bias error, MBE), 평균 절대 오차(mean absolute gross error, MAGE), 평균 제곱근 오차(root mean square error, RMSE), 일치도 지수(Index Of Agreement, IOA)을 제시하였다. 검증은 지역 내 위치한 8개 기상관측지점(AWS 7개와 ASOS 1개 지점, Fig. 1. 참고)의 시간별 관측자료와 해당격자의 모델값을 비교하였고 모델링 전체기간의 자료를 대상으로 하였다.

검증결과, WRF-BASE와 WRF-UCM 두 모델이 여러 기존 문헌에서(Hogrefe et al., 2001; Borge et al., 2008) 제시한 기상모델링 수행 평가를 위한 통계지표의 신뢰성 범주에 대부분 포함되었고, 특히 기온은 다소의

Table 2. Statistics summary results for meteorological variables

Variable (refer. height)	Statistical measures	WRF-BASE	WRF-UCM	Benchmarks*
Temperature (2 m)	$r^{1)}$	0.89	0.92	-
	MBE	-0.91	-0.42	$\leq \pm 0.5^{\circ}\text{C}$
	MAGE	1.45	1.04	-
	RMSE	1.68	1.32	$\leq 2^{\circ}\text{C}$
	IOA	0.92	0.95	≥ 0.8
Wind speed (10 m)	r	0.69	0.65	-
	MBE	0.96	1.62	$\leq \pm 0.5 \text{ m s}^{-1}$
	MAGE	1.32	1.85	-
	RMSE	1.65	2.19	$\leq 2 \text{ m s}^{-1}$
	IOA	0.67	0.63	≥ 0.6
Wind direction (10 m)	MBE	-8.96	-7.39	$\leq \pm 10^{\circ}$
	MAGE	41.52	40.20	$\leq \pm 30^{\circ}$

¹⁾Pearson's correlation coefficient

과소모의 경향이 있지만 관측값의 변화를 매우 잘 재현하였다. 또한 WRF-UCM이 WRF-BASE 결과와 비교해 관측값과 높은 상관과 적은 차이와 오차를 보여 도시 열환경을 잘 모사하고 있는 것으로 평가된다. 반면 풍속의 경우 두 모델 결과는 관측값과 비교하여 과대모의하였고 이러한 경향은 WRF-UCM의 결과에서 상대적으로 뚜렷하였다. 풍속 검증의 경우, 비교 고도의 차이가 있어(관측지점은 지상 3 m 또는 10 m, 모델값의 고도(1층 중간)는 지상 약 16 m) 결과 분석에 한계가 있다. 풍향의 경우 WRF-UCM이 WRF-BASE 결과와 비교하여 상대적으로 관측값을 잘 재현하는 것으로 평가되었다.

Fig. 4는 모델링기간 동안의 WRF-UCM과 WRF-BASE 수치모의 결과와 울산 ASOS의 시간별 기온 및 바람을 비교한 것이다. 울산 ASOS는 도심에 위치하여 도시의 인공열 효과를 분석할 수 있으며, 다양한 풍향이 존재하여 바람의 정확도 평가에 적절한 지점이다. 기온의 경우(Fig. 4-a) 두 모델링 결과 모두 관측된 기온의 시간변화를 잘 모의하고 있지만 WRF-UCM의 결과가 보다 좋게 나타나며, 특히 일 최고 및 최저 기온의 모의 정확도가 매우 높았다. 이는 WRF-BASE 결과와 비교해 모델링 기간 평균 1.6°C 높은 결과이다.

이러한 결과는 WRF-UCM에서 도시 인공열을 고려하여 개선된 것으로 사료된다(Byon et al., 2010; Chen et al., 2014; Sharma, et al., 2014; Ma et al., 2017). 다

양한 기반시설 및 인구가 집중된 도시지역의 경우 인공 지물의 상당부분을 차지하는 아스팔트나 콘크리트 포장면의 낮은 알베도(Albedo)로 인해 많은 양의 태양복사 에너지를 흡수함으로써 지표 부근의 열에너지를 점차적으로 누적시키는 효과를 가져와 도시의 기온 상승효과를 일으킬 수 있다(Grimmond, 2007; Rizwan, et al., 2008; Kim and Yeom, 2012).

풍속은(Fig. 4-b) WRF-BASE, WRF-UCM 모두 과대 모의하는 것으로 나타난다. WRF-UCM에서 관측자료와의 차이가 상대적으로 크며 특히 도심 인공열로 인해 기온이 증가하는 야간에 차이가 더 커지는 것으로 나타난다(주간 MBE; 1.16 m s^{-1} , 야간 MBE; 1.34 m s^{-1}). 이는 앞서 언급한 바와 같이 바람 측정 높이의 차이에 의한 불확실성 및 UCM 모델의 도심 인공열 고려로 인해 발생된 수평 기온차가 기압경도를 야기한 것(Clarke and Hess, 1975; Suzuki, 1991), 울산지역 건물 재현의 불충분함 등이 원인이 될 수 있다.

울산 ASOS의 바람벡터를 살펴보면(Fig. 4-c) 주간 경우 해풍의 영향으로 남동풍이 우세하며 야간의 경우 약한 남서 또는 북서풍이 주로 관측된다. WRF-BASE, WRF-UCM 모두 주간 남동풍을 적절히 모의하였지만 야간 풍향의 정확성은 다소 떨어졌다. 전반적으로 WRF-UCM이 WRF-BASE 보다 야간의 풍향을 잘 재현하는 모습이다.

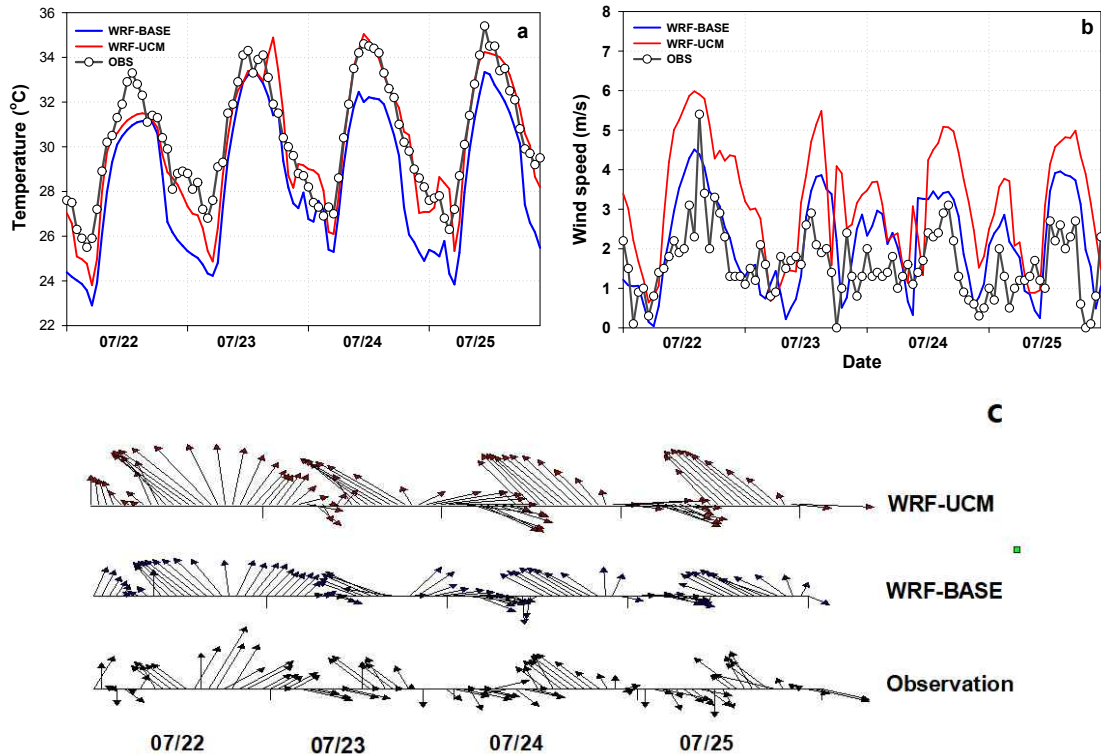


Fig. 4. Day to day variations of (a) air temperature, (b) wind speed and (c) wind vector for the period of 22-25 July 2018.

Fig. 5는 울산지역 8개 관측지점 및 WRF-BASE, WRF-UCM 평균 일중 기온변화를 보여준다. 두 모델은 하루 중의 변화를 전반적으로 잘 모의하였다. 관측값, WRF-BASE와 WRF-UCM 모두 오전 6시에 최저기온(각각 25.8°C, 24.3°C, 25.3°C)과 오후 2시에 최고기온(각각 32.8°C, 31.0°C, 32.0°C)이 나타남을 알 수 있다. WRF-UCM이 상대적으로 관측치의 일중 변화를 잘 재현하였고 WRF-BASE 보다 크게 개선된 수치모의의 결과를 보였다. 특히 야간에 높은 정확도를 보였고 새벽에는 오히려 관측값과 비교해 약 0.1 ~ 0.6°C 높게 나타났다. 이러한 기온의 일중 변화들은 WRF-UCM이 도시효과를 반영함을 보여주는 결과이다. 즉 도시 인공열의 영향이 기온의 일중 변화에 나타난 것으로 인공열로 인한 야간의 느린 냉각 속도 및 저장열속으로 인해 야간에 기온 상승효과가 더 크게 나타난 것으로 판단된다(Grimmond and Oke, 1999; Coutts et al., 2007, Kusaka et al., 2012). Fig. 5에서 WRF-UCM 모델이 하루 중 관측값

의 변화를 잘 모의함에도 불구하고 전반적으로 과소모의하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 모델입력자료의 한계와 함께 인공열 정보의 불확실성이 큰 원인이 될 수 있다.

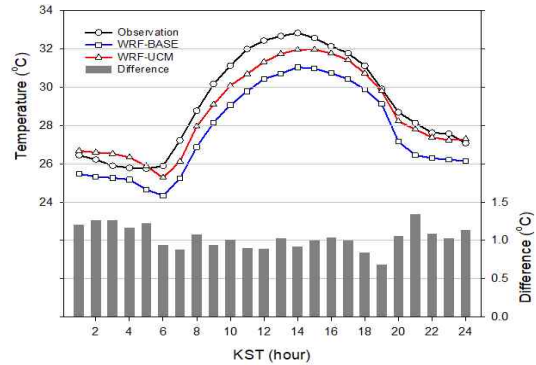


Fig. 5. Averaged diurnal variations of air temperature (°C) for observations, WRF-UCM and WRF-BASE. Vertical dark gray bars indicate the differences of air temperature between WRF-UCM and WRF-BASE.

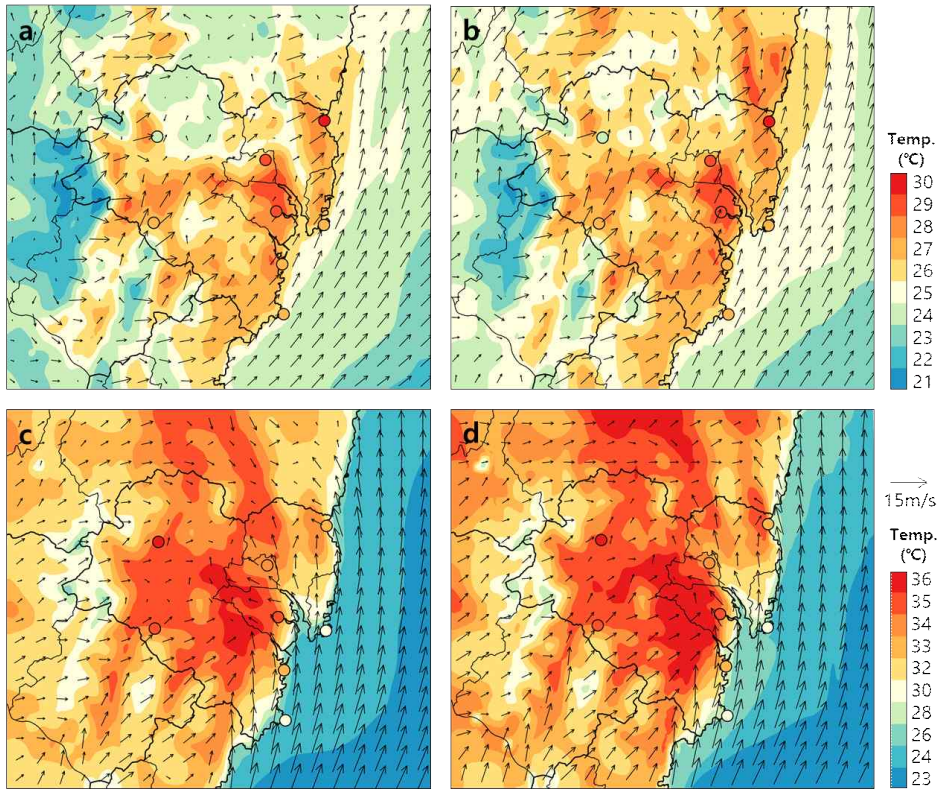


Fig. 6. Horizontal distributions of air temperature and wind for (a) WRF-BASE, 0300 KST, (b) WRF-UCM 0300 KST, (c) WRF-BASE 1500 KST, and (d) WRF-UCM 1500 KST in 23 July 2018. Colored circles indicate air temperatures observed at meteorological sites.

향후 다양한 지표정보와 맞는 개선된 인공열 산정과 모델에 적용이 필요할 것이다.

Fig. 6은 모델링 기간 중 국지풍이 잘 발달한 2018년 7월 23일의 두 시간대(0300 KST와 1500 KST)에 WRF-BASE와 WRF-UCM으로 재현된 기온과 바람분포를 보여준다. 새벽인 0300 KST의 경우, WRF-UCM (Fig. 6-b) 기온이 22.1 ~ 29.3°C로 WRF-BASE(21.8°C~28.6°C)에 비해 도심지역(Fig. 3a의 파란색 영역)을 중심으로 기온이 높았다. 도심지역 평균 기온은 26.1°C로 WRF-BASE 모델 결과에 비해 약 0.4°C 상승하였다. 오후 1500 KST는 수치모의 결과 내륙과 해양의 뚜렷한 기온 차이를 나타내며 강한 해풍이 발달하는 모습을 보이며 WRF-UCM에서 상대적으로 뚜렷하다. WRF-UCM 수치모의 결과 23.6~36.1°C의 분포를 보이고 도심지역 평균기온이 31.6°C로 WRF-BASE에 비해 약 0.

5°C 상승하였다. 일반적으로 도시효과에 따른 기온상승과 풍속 약화는 잘 알려져 있다(Hwang et al., 2010; Lee et al., 2015; Zhou and Chen, 2018). 본 연구의 사례 기간에서도 도시지역 기온상승이 WRF-UCM모델을 통해 잘 재현되었다. 하지만 연안도시지역과 해상을 포함한 영역에서 나타난 강한 기온 정도로 인해 오히려 풍속이 높아지는 현상이 수치모의 되었다. 이는 대상지역 특성에 따라 도시효과가 미치는 기온과 바람의 영향이 다를 수 있음을 보여주는 결과이며 다양한 사례와 장기 모델링을 통한 추가 연구가 필요할 것이다.

4. 결론

이 연구에서는 WRF-UCM을 이용하여 연안산업도시지역을 대상으로 고해상도 기상모델링을 수행하고

기온과 바람 수치모의 결과를 분석하였다. WRF-UCM 수행을 위해 울산지역 토지피복 및 건물자료를 재가공하였으며 특히 공단지역을 포함한 도시범주를 상세화시켰다. 고해상도 토지피복정보를 산출한 결과 울산지역 도시역의 비율은 약 12%이며, 이 중 공단지역이 47.4%로 높은 비율을 차지하였다. 이러한 상세정보는 WRF-UCM 모델링에 입력되어 대상지역 기온과 바람의 수치모의 정확도를 일부 향상시켰다.

WRF-UCM 수치모의 결과 기온은 실제 관측자료 변화를 매우 잘 재현하였지만 바람의 경우는 뚜렷한 개선을 설명하기 어려웠다. 특히 사례기간 울산 도심지역에서 관측된 일 최고 및 최저 기온을 WRF-UCM 모델이 매우 유사하게 모의하였다. 풍속은 다소 과대모의하는 경향을 보였지만 풍향은 야간의 관측값 변화를 비교적 잘 모의하였다. 기온의 하루 중 변화에서는 WRF-UCM 이 주-야간 고온현상을 잘 재현하여 여름철 도시 폭염 및 열대야현상 수치모의 개선에 기여할 수 있음을 보여주었다. 수평분포 분석결과에서는 WRF-UCM이 WRF-BASE에 비해 도심지역 높은 기온을 관측치와 유사하게 잘 재현하였지만 풍속도 강하게 모의하였다.

이 연구에서는 공단지역을 포함한 연안지역 도시효과를 기상모델에 반영하여 수치모의 정확도를 높이고자 하였다. 그 결과 해상도 높은 토지피복자료와 도시 모수화 방안의 적용이 기온 수치모의의 개선에 기여함을 확인하였다. 하지만 이는 단기 사례를 통해 연구된 결과이며 일 반복의 어려움이 있다. 향후 입력자료의 추가적인 개선과 여러 지역을 대상으로 한 추가 모델링 연구를 통해 충분히 검증될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 환경부 환경보건센터 재원에 의해 이루어졌습니다.

REFERENCES

- Borge, R., Alexandrov, V., Del Vas, J. J., Lumbreras, J., Rodriguez, E., 2008, A Comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula, *Atmos. Environ.*, 42, 8560-8574.
- Byon, J. Y., Choi, Y. J., Seo, B. G., 2010, Evaluation of urban weather forecast using WRF-UCM (Urban Canopy Model) over Seoul. *Atmos.*, 20, 13-26.
- Chen, F., Dudhia, J., 2001, Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity, *Mon. Weather Rev.*, 129, 569-585.
- Chen, F., Kusaka, H., Bornstein, R., Ching, J., Grimmond, C. S. B., Grossman-Clarke, S., Oridan, T., Manning, K. W., Martilli, A., Miao, S., Sailor, D., Salamanca, F. P., Taha, H., Tewari, M., Wang, X., Wyszogrodzki, A. A., Zhang, C., 2011, The integrated WRF/urban modelling system: development, evaluation, and applications to urban environmental problems, *Int. J. Climat.*, 31, 273-288.
- Chen, F., Xuchao Y., Weiping, Z., 2014, WRF simulations of urban heat island under hot-weather synoptic conditions: The case study of Hangzhou City, China., *Atmos. res.*, 138, 364-377.
- Clarke, R. H., Hess, G. D., 1975, On the relation between surface wind and pressure gradient, especially in lower latitudes, *Bound-Lay. Meteorol.*, 9, 325-339.
- Coutts, A. M., Beringer, J., Tapper, N. J., 2007, Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia, *J. App. Meteorol. Clim.*, 46, 477-493.
- Environmental Geographic Information Services (EGIS), 2019, <http://egis.me.go.kr/map/map.do?type=land>
- Farr, T. G., Kobrick, M., 2007, The shuttle radar topography mission, *Rev. Geophys.*, 45, 1-33.
- Freitas, E. D., Rozoff, C. M., Cotton, W. R., Dias, P. L. S., 2007, Interactions of an urban heat island and sea-breeze circulations during winter over the metropolitan area of São Paulo, Brazil, *Bound-Lay. Meteorol.*, 122, 43-65.
- Grimmond, C. S. B., Oke, T. R., 1999, Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model, *J. App. Meteorol.*, 38, 922-940.
- Grimmond, S., 2007, Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming, *Geog. J.*, 173, 83-88.
- Grossman-Clarke, S., Zehnder, J. A., Loridan, T., Grimmond, C. S. B., 2010, Contribution of land use changes to near-surface air temperatures during recent

- summer extreme heat events in the Phoenix metropolitan area, *J. Appl. Meteor. Climat.*, 49, 1649-1664.
- Hogrefe, C., Rao, S. T., Kasibhatla, P., Kallos, G., Tremback, C. J., Hao, W., Alapaty, K., 2001, Evaluating the performance of regional-scale photo-chemical modeling systems: Part I—Meteorological predictions. *Atmos. Environ.*, 35, 4159-4174.
- Holt, T., Pullen, J., 2007, Urban canopy modeling of the New York city metropolitan area: A comparison and validation of single-and multilayer parameterizations. *Mon. Weather Rev.*, 135, 1906-1930.
- Hwang, M. K., Kim, Y. K., Oh, I. B., Kang, Y. H., 2010, High-resolution simulation of meteorological fields over the coastal area with urban buildings, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 26, 137-150.
- Industrial Land Information System (ILIS), 2019, <https://www.industryland.or.kr/>
- Jeong, J. H., Kim, Y. K., 2009, The application of high-resolution land cover and its effects on near-surface meteorological fields in tow different coastal areas, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 25, 432-449.
- Jeong, J. H., Oh, I. B., Ko, D. K., Kim, Y. K., 2011, The characteristics of seasonal wind fields around the Pohang using cluster analysis and detailed meteorological model, *J. Environ. Sci. Int.*, 20, 737-753.
- Kim, H. O., Yeom, J. M., 2012, Effect of the urban land cover types on the surface temperature case study of Ilsan new city, *Kor. J. Rem. Sens.*, 28, 203-214.
- Kimura, F., Takahashi, S., 1991, The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment, *Atmos. Environ.*, 25, 155-164.
- Kinouchi, T., Yoshitani, J., 2001, Simulation of the urban heat island in Tokyo with future possible increases of anthropogenic heat, vegetation cover and water surface. *Proceedings of 2001 International Symposium on Environmental Hydraulics, Arizona, USA.*
- Kusaka, H., Chen, F., Tewari, M., Dudhia, J., Gill, D. O., Duda, M. G., Wang, W., Miya, Y., 2012, Numerical simulation of urban heat island effect by the WRF model with 4-km grid increment: An inter-comparison study between the urban canopy model and slab model, *J. Meteor. Soc. Japan. Ser. II*, 90, 33-45.
- Lee, B. R., Lee, D. G., Nam, K. Y., Lee, Y. G., Kim, B. J., 2015, Study on heat environment changes in Seoul metropolitan area using WRF-UCM: A comparison between 2000 and 2009, *Atmos.*, 25, 483-499.
- Lee, S. H., Kim, S. W., Angevine, W. M., Bianco, L., McKeen, S. A., Senff, C. J., Trainer, M., Tucker, S. C., Zamora, R. J., 2011, Evaluation of urban surface parameterizations in the WRF model using measurements during the Texas Air Quality Study 2006 field campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 2127-2143.
- Lee, S. H., Song, C. K., Baik, J. J., Park, S. U., 2009, Estimation of anthropogenic heat emission in the Gyeong-In region of Korea, *Theor. Appl. Climat.*, 96, 291-303.
- Li, D., Bou-Zeid, E., Baeck, M. L., Jessup, S., Smith, J. A., 2013, Modeling land surface processes and heavy rainfall in urban environments: Sensitivity to urban surface representations, *J. Hydrometeorol.*, 14, 1098-1118.
- Ma, S., Pitman, A., Hart, M., Evans, J. P., Haghdadi, N., MacGill, I., 2017, The impact of an urban canopy and anthropogenic heat fluxes on Sydney's climate, *Int. J. Climatol.*, 37, 255-270.
- Mahfouf, J. F., Richard, E., Mascart, P., 1987, The influence of soil and vegetation on the development of mesoscale circulations, *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 26, 1483-1495.
- Miao, S., Li, P., Wang, X., 2009, Building morphological characteristics and their effect on the wind in Beijing. *Advances in Atmos. Sci.*, 26, 1115.
- National Centers for Environmental Information (NOAA), 2019, <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>
- Oh, I. B., Bang, J. H., Kim, Y. H., 2015, Meteorological characteristics in the Ulsan metropolitan region: Focus on air temperature and winds, *J. Korean Soc. Atmos. Environ.*, 31, 181-194.
- Oke, T. R., 1995, The heat island of the urban boundary layer: characteristics, causes and effects. In *wind climate in cities*, Springer Netherlands. 81-107.
- Palau, J. L., Pérez-Landa, G., Diéguez, J. J., Monter, C., Millán, M. M., 2005, The importance of meteorological scales to forecast air pollution scenarios on coastal complex terrain. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 2771-2785.

- Park, S. Y., Lee, H. W., Kim, D. H., Lee, S. H., 2010, Numerical study on wind resources and forecast around coastal area applying inhomogeneous data to variational data assimilation, *J. Environ. Sci. Int.*, 19, 983-999.
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y., Chunho, L. I. U., 2008, A Review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island, *J. Environ. Sci.*, 20, 120-128.
- Sharma, A., Fernando, H. J., Hellmann, J., Chen, F., 2014, Sensitivity of WRF model to urban parameterizations, with applications to Chicago metropolitan urban heat island, ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2014 12th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, Chicago, Illinois, USA.
- Song, B. G., Park, K. H., 2013, Air ventilation evaluation at nighttime for the construction of wind corridor in urban area, *J. Korean Assoc. Geogr. Inf. Stud.*, 16, 16-29.
- Suzuki, R., 1991, The response of the surface wind speed to the synoptic pressure gradient in central Japan, *J. Meteor. Soc. Japan. Ser. II*, 69, 389-399.
- Yi, C., An, S. M., Kim, K., Kwon, H. G., Min, J. S., 2016, Surface micro-climate analysis based on urban morphological characteristics: Temperature deviation estimation and evaluation, *Atmos.*, 26, 445-459.
- Yoshikado, H., 1994, Interaction of the sea breeze with urban heat islands of different sizes and locations, *J. Meteor. Soc. Japan*, 72, 139-143.
- Zhang, H., Pu, Z., Zhang, X., 2013, Examination of errors in near-surface temperature and wind from WRF numerical simulations in regions of complex terrain, *Weather and Forecasting*, 28, 893-914.
- Zhou, X., Chen, H., 2018, Impact of urbanization-related land use land cover changes and urban morphology changes on the urban heat island phenomenon, *Sci. Total Environ.*, 635, 1467-1476.

-
- Researcher. Jin-Hee Bang
Environmental Health Center, University of Ulsan College of Medicine
jhbang@ulsan.ac.kr
 - Researcher. Mi-Kyoung Hwang
Environmental Health Center, University of Ulsan College of Medicine
hmk1001@naver.com
 - Professor. Yang-Ho Kim
Department of Occupational & Environmental Medicine, University of Ulsan College of Medicine
yanghokm@ulsan.ac.kr
 - Professor. Ji-Ho Lee
Department of Occupational & Environmental Medicine, University of Ulsan College of Medicine
oemdoc@naver.com
 - Research Professor. In-Bo Oh
Environmental Health Center, University of Ulsan College of Medicine
oinbo@ulsan.ac.kr