Journal of Environmental Science International
34(8); 493~508; August 2025

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2025.34.8.493

ORIGINAL ARTICLE

도심-비도심 폭염 예측 정확도에 인공열이 미치는 영향

박현체[1)] · 박민준[1)] · 백승희[1)] · 이효정[1,2)*]

[1)]부산대학교 대기환경과학과, [2)]부산대학교 환경연구원

Impacts of Anthropogenic Heat on the Accuracy of Urban-Suburban Heatwave Predictions

Hyun-Che Park[1)], Min-Jun Park[1)], Seung-Hee Baek[1)], Hyo-Jung Lee[1,2)*]

[1)]Department of Atmospheric Sciences, Pusan National university, Busan 46241, Korea
[2)]Institute of Environmental Studies, Pusan National University, Busan 46241, Korea

Abstract

Heatwaves are among the most common climate-related disasters globally, posing significant threats to human health, energy systems, ecosystems, and various aspects of society. As the frequency and intensity of heatwaves rise due to climate change, accurate forecasting of such events is becoming increasingly critical. However, numerical models still face substantial limitations in representing key urban features such as anthropogenic heat emissions and the complex structure of urban areas that influence surface air temperature. A representative heatwave event was analyzed focusing on the southeastern region of South Korea, characterized by a high proportion of urbanized areas, to examine the temperature differences between coastal and inland cities. This study examined the performance of the regional-scale numerical weather prediction models (WRF v4.5.2) in reproducing the spatial temperature distributions. A comparative analysis between model simulations and observational data revealed that the model significantly underestimated temperatures in urban areas compared to suburban regions, with errors reaching up to 4–5°C during periods when observed temperatures exceeded 35°C. Sensitivity experiments employing various radiation parameterization schemes showed that while some schemes reduced the degree of underestimation, improvements were limited to approximately 2°C. These findings suggest that adjusting radiation schemes alone does not adequately address structural biases in urban temperature simulations. Therefore, improving the accuracy of heatwave prediction may require improvements in model performance, including the activation of urban canopy models (UCM) and integrating high-resolution land cover data.

Key words : Heatwave, WRF, Urbanization, Radiation scheme, Model uncertainty

1. 서 론

폭염(Heatwave)은 전 세계적으로 대표적인 기후 재해 중 하나로, 온열 질환 발생, 에너지 수요 증가, 농업 생산성 저하 등 다양한 사회적 문제를 야기한다 (Zampieri et al., 2017; Xu et al., 2018; Kim et al., 2022). 폭염으로 인한 향후 전력 수요 변화에 미치는 영향 평가에서는, Representative Concentration Pathways (RCP) 시나리오 기반으로 21세기 후반에는 폭염 발생일의 일일 최대 전력 수요가 현재 대비 9.1%까지 증가할 것이고, 전력 수요 증가 역시 초기 여름부터 늦여름까지 확장될 것으로 예측되었다 (Kim et

Received 24 July, 2025; **Revised** 14 August, 2025;
Accepted 14 August, 2025
***Corresponding author** : Hyo-Jung Lee, Department of Atmospheric Sciences, Pusan National university, Busan 46241, Korea
Phone : +82-51-510-7115
E-mail : hyojung@pusan.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.

al., 2022). 농업에 미치는 영향으로는 1990년대 중반 이후 밀 재배 지역에서 열 스트레스가 증가하고, 다수의 생산 지역에서 동시에 생산량 이상이 발생했다. 생육기 동안 최적 기온보다 높은 기온은 최종 수확량을 감소시키고, 이러한 패턴은 미래 식량 안보에 위협 요인이 될 수 있음이 주장되었다(Zampieri et al., 2017). 세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 기후변화가 인간 건강에 미치는 영향을 수치화했고, 특히 열 스트레스로 인해 전 세계적으로 2030년에는 90,000명 이상, 2050년에는 255,000명 이상의 온열질환 사망자 수가 나올 것으로 추정하였다(WHO, 2014).

최근, 기후 변화에 관한 정부 간 협의체(The Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)는 6차 평가보고서를 통해 근미래 지구의 평균 기온 상승이 극한 고온 현상의 발생 가능성을 증가시킬 것으로 전망하였다(IPCC, 2021). 뿐만 아니라, 많은 선행연구를 통해 폭염 빈도와 강도 및 주기의 증가가 보고되고 있으며(Meehl et al., 2000; Coumou et al., 2013; USGCRP, 2017; IPCC, 2022), 기온과 함께 해수면 온도도 상승하여, 낮 동안 가열된 대규모 수역으로 인해 해안 지역의 밤 기온이 내륙보다 더 따뜻해지며 열대야 발생 일수가 증가하는 현상도 발생하고 있다(Dailidienė et al., 2023). 한국 또한 평균 기온의 상승 및 여름철 폭염의 빈도와 지속 기간 증가가 꾸준히 보고되었다(Jung et al., 2002; Kim et al., 2016; Suh et al., 2016; Yeh et al., 2018). 특히 2016년 여름의 경우, 서울의 폭염과 열대야 일수가 각각 24일과 32일로 기록되었으며(KMA, 2017; Blunden and Arndt, 2017), 온열질환 사망자 수가 343명으로 보고된 바 있다(Lim et al., 2019). 아울러, 2018년에는 기상관측 역사상 111년 만에 가장 강도 높고 장기간 지속된 폭염이 발생하여, 44,000명의 온열질환자와 900명 이상의 사망자를 초래한 것으로 보고되었다(Park et al., 2019; Ha et al., 2020; Lee et al., 2020; Min et al., 2020; Park and Chae, 2020).

이러한 폭염 발생 메커니즘은 주로 강한 상층 기압능의 확장, 블로킹 등의 종관 규모 현상과 관련이 있는 것으로 보고되어왔다(Park and Schubert, 1997; Black et al., 2004; Nakamura and Fukamachi, 2004; Ding et al., 2010; Dole et al., 2011; Min et al., 2019; Kim et al., 2021). Park and Schubert(1997)는 1994년 여름철 몬순 기간 동안, 티베트 지역의 지형 효과에 의하여 강하게 발달한 상층 고기압이 동아시아로 확장하면서 7월에 몬순이 확장되지 못하였고, 그 결과 동아시아에 기록적인 폭염과 가뭄이 발생하였음을 제시하였다. Nakamura and Fukamachi (2004)는 오호츠크해 상공의 블로킹 현상이 여름철 동아시아의 평균기온 변동에 큰 영향을 준다고 밝혔다. Yeo et al.(2019)은 기후 정보를 이용하여 850 hPa 고도 편차 분석을 통한 동아시아 폭염을 분류하였고 북대서양과 북서태평양에서의 850 hPa 편차 분포가 동아시아 폭염과 상관관계가 있음을 보고하였으며, Min et al.(2019)은 한반도에서 강하게 발생하였던 1994년, 2013년, 그리고 2016년의 폭염 사례 분석을 통해, 폭염 최성기 기간 동안 고기압 권역의 침강에 의한 단열승온 현상이 폭염을 심화할 수 있음을 제시하였다. 또한, Yoon et al.(2018)은 한반도 상층 고기압의 발달이 대기대순환과 연관되어 있기 때문에 전 지구 규모에서의 변동과 폭염의 연관성에 대해 연구를 수행한 바 있으며, Lee and Lee(2016) 또한 한반도 폭염이 국지규모의 변화보다 전 지구 규모의 변동성과 높은 상관성이 있음을 제시하였다. 이러한 종관 규모에서 발생한 동아시아 및 한반도 폭염 발생의 역학적 메커니즘은 다양한 선행연구를 통해 다수의 요인이 밝혀졌다.

그러나 폭염 현상은 종관 규모의 대기 순환에 의해 발생할 뿐만 아니라, 도시화의 진전, 인구 밀집, 열섬 효과 등 국지적 요인에 의해 유발되거나 심화될 수 있다(Liao et al., 2018; Zhao et al., 2018; Lee et al., 2022). 특히 도심 지역은 아스팔트 포장, 고·저층 건물, 녹지 등 이질적인 토지피복으로 구성되어 있으며, 냉·난방 설비 및 자동차 운행 등으로 발생하는 인공열은 기온 상승에 상당한 기여를 할 수 있다(Murata et al., 2013; Hui et al., 2019; Gogoi et al., 2019; Lal et al., 2021).

또한 지상 기온 분포는 해안–내륙 간의 열용량 차이, 해풍의 존재, 수분 함량 등 다양한 요인에 따라 지역적 특성이 뚜렷하게 나타난다(Hsu et al., 2024). 내륙 지역은 상대적으로 낮은 토양 수분과 빠른 지표 가열·냉각 특성으로 인해 일교차가 크고, 강한 일사 하에서는 기온이 급격히 상승하고 고온이 장시간 지속되는 경향이 있다. 반면 해안 지역은 해양의 높은 비열과 해풍의 냉각 효과로 인해 기온 변동 폭이 작고, 일 최고기온 역시 상대적으로 낮게 형성된다(Zhou et al., 2019). 따라서 동일한

종관 조건 하에서도 한반도 내 지역 특성에 따라 기온 분포와 지역별 폭염 양상이 상이하게 나타날 수 있다.

그러나 이와 같은 도심의 인공열 발생과 해안-내륙 간의 기온 특성은 현재의 수치 예측 모델에 충분히 반영되지 못하고 있으며(Kusaka and Kimura, 2004; Hu et al., 2022), 이는 여름철 기온 모의 오차를 유발할 수 있다. 인공열 발생과 관계된 대부분의 도시 폭염 모델링 연구는 서울을 대상으로 수행되어 왔으며, 다른 지역에 대한 연구는 부족한 실정이다. 또한 도심 인공열 및 도시 지면 특성을 상세히 반영한 모의실험은 건물의 정확한 면적지수와 높이 자료의 부족으로 한계점이 있을 뿐 아니라, 대도시의 복잡한 지면 자료를 반영한 선행연구(Byon et al., 2010; Kim et al., 2019)에서도 주간 기온 모의 결과의 뚜렷한 개선이 나타나지 않았으며, 여전히 도심 인공열과 도심 기온 모의 불확도의 상관관계는 명확히 규명되지 않았다. 이에 본 연구는 2018년 폭염 사례를 중심으로 남동권 해안-내륙 도시 간 기온 특성의 차이를 분석하고, 지역별 기온 분포 메커니즘을 규명하였다. 아울러 남동권 대도시를 포함한 남해 연안 지역을 도심과 비도심으로 구분하여 수치 모델 결과와 관측 자료를 비교함으로써, 인공열 반영 부족이 도심 및 교외 지역의 기온 예측 불확도에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 모델 예측 불확도 개선 가능성을 확인하기 위해, 고온 발생 조건에 중요한 영향을 줄 수 있는 장/단파 복사 모수화 과정에 대한 민감도 실험을 추가적으로 수행하여 폭염 예측 정확도 향상 방안을 고찰하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

2.1. 폭염 사례 및 연구 지역 선정

기상청(Korea Meteorological Administration, KMA)에서는 일 최고기온이 33℃ 이상인 상태가 이틀 이상 지속되는 날에 대해 폭염으로 정의한다. 2018년 여름철(6-8월)은 1973년 이후 두 번째로 짧은 장마 기간이 관측되었고, 전국에 지속적으로 고온 현상이 발생해 낮에는 폭염, 밤에는 열대야가 나타나 폭염 일수 31.4일(평년 9.8일), 열대야 일수 17.7일(평년 5.1일)로 1973년 이후 각각 최다 1위를 기록하였다(KMA, 2019). 30년 기후평균(1976-2005년 7-8월)과 비교하였을 때, 2018년의 일 최고기온은 평균적으로 2℃ 이상 높아졌고, 빈도 분포는 기존 기후 통계의 정규 분포(Gaussian distribution)보다 고온 방향으로 이동했다. 특히 고온 극단값(upper tail) 영역에서의 빈도가 크게 증가하여, 전형적인 종형 곡선 형태가 무너진 비대칭 분포 특성이 나타났다(Im et al., 2019). 따라서, 이러한 특징적인 고온이 관측된 2018년 8월 폭염을 연구 대상 기간으로 선정하였다.

또한, 남동권의 해안-내륙 차이 및 도심·비도심 지역의 기온 특성을 분석하기 위해 토지피복 자료를 활용하여 연구 지역을 선정하였다. 본 연구에서는 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra와 Aqua 위성 관측을 통합한 토지피복 자료인 MCD12Q1 Version 6 (modis_landuse_21class_30s)을 사용하였다. 해당 자료는 약 1 km 공간 해상도의 단일 연도 자료이며, International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) 분류 체계에 따른 18개 토지피복 클래스(침엽수림, 활엽수림, 경작지, 도시지역 등)를 기반으로 수치 예보 모델에 맞게 21개 클래스로 확장·가공되어 제공된다(Sulla-Menashe and Friedl, 2018). MODIS 토지피복은 대기-지면 상호작용 분석에 널리 활용되고 있으며(Tao et al., 2013; Li et al., 2017; Jach et al., 2020), 기존 United States Geological Survey (USGS) 기반 분류보다 아시아 지역에 대한 지표 특성을 더 정확하게 반영하는 것으로 알려져 있다(Friedl et al., 2002). 따라서 본 연구에서는 인공열을 포함하는 도심과 인접 비도심 교외 지역의 기온 모의 결과를 비교하기 위해 MODIS 토지피복 자료를 기반으로 클래스 13 'Urban and Built-up Lands'에 해당하는 지역을 도심(Urban, URB), 그 외 클래스에 해당하는 지역을 교외(Suburban, SUB)로 구분하여 분석을 수행하였다(Fig. 1(a)).

URB와 SUB 구분에는 토지피복 자료뿐 아니라, 기상 관측 자료를 수집할 수 있는 종관기상관측시스템(Automated Surface Observing System, ASOS)의 측정소 정보도 함께 활용하였다. 남동권 지역의 대부분 ASOS 측정소들이 토지피복 자료상 도심으로 구분된 지역으로 확인되어, 도심-교외지역의 기온 특성 차이를 살펴보기 위해 연구 영역을 확장하여 Fig. 1(b)에 제시된 남해 연안 지역을 중심으로 URB와 SUB 지점을 구분하였다. 특히, 남동권의 대도시인 부산, 울산, 창원이 연안 지역에 위치하고 있으므로, 유사한 환경에서 도심-비도심 특징을 비교하기 위해, Fig. 1(b)의 남해 연안 지역을 따라 위치하는 ASOS 지점들에 토지

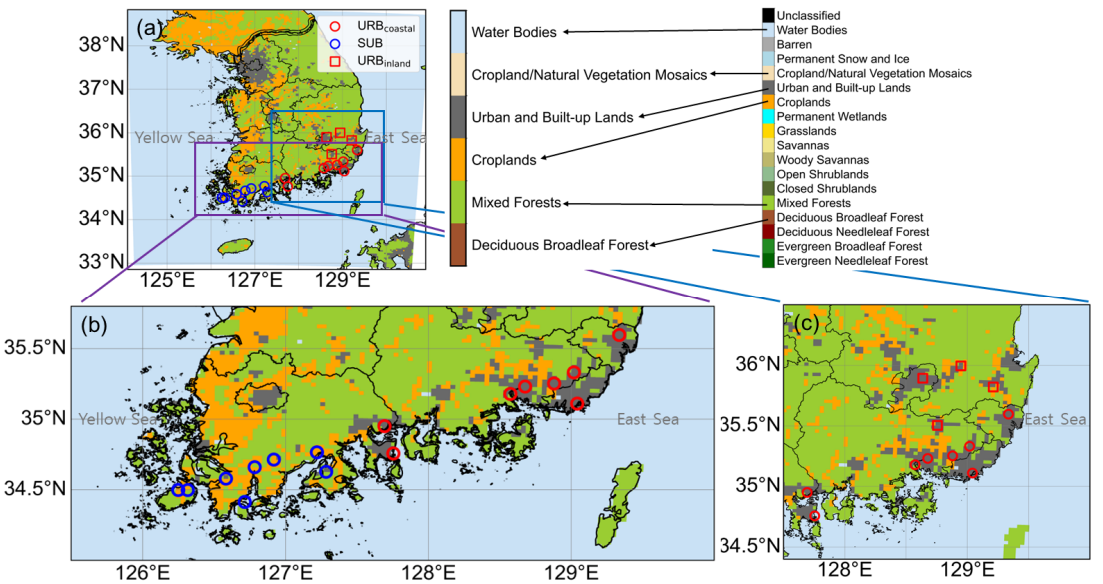


Fig. 1. (a) Spatial distribution of land-use categories in South Korea based on MODIS data. (b) Locations of Automated Synoptic Observing System (ASOS) stations classified as SUB (blue circles) and URB$_{coastal}$ (red circles, coastal sites) within the purple box in (a). (c) ASOS stations in the southeastern part of Korea classified as URB$_{coastal}$ (red circles, coastal sites) and URB$_{inland}$ (red squares, inland sites) within the blue box in (a).

Table 1. Summary of physical schemes used in WRF numerical experiments

Meteorological Initial Conditions & Boundary Conditions	NCEP/FNL 1˚× 1˚ reanalysis data				
Physical options		Base	Exp1	Exp2	Exp3
	Longwave radiation	RRTM	RRTM	RRTMG	RRTMG
	Shortwave radiation	Goddard	Dudhia	Goddard	Dudhia
	Microphysics	Purdue Lin (Chen and Sun, 2002)			
	Surface layer	Revised MM5 (Jiménez et al., 2012)			
	Land surface	Noah (Tewari et al., 2004)			
	Planetary boundary layer	YSU (Hong et al., 2006)			
	Cumulus parameterizations	D01, D02 – Kain-Fritsch (Kain, 2004) D03 - off			

피복 자료를 반영하여 URB와 SUB로 분류하였다. 그 결과 부산, 울산, 창원, 북창원, 김해시, 양산시, 여수, 광양시를 URB$_{coastal}$(붉은 원), 강진군, 고흥, 보성군, 영광군, 완도, 장흥, 진도(첨찰산), 진도군, 해남을 SUB(파란 원)로 구분하였다. 이러한 URB$_{coastal}$과 SUB의 지역 구분은 한반도 남부 지역을 동–서로 나누는 경향이 있어 도심과 교외지역의 특성을 분석하는데 일부 한계가 있으나 본 연구에서 선정한 폭염 사례는 남부 전 지역에서 동시에 발생한 폭염 사례로, 해당 기간 동안 동–서 지역 간의 기후적 차이가 연구 결과에 미치는 영향은 제한적일 것으로 판단된다. 또한, 남동권 내 해안–내륙 위치가 기온 분포 특성에 미치는 영향을 확인하기 위해, 해풍 영향권(해안선으로부터 약 25 km)을 기준으로(Pokhrel and Lee, 2011) 내륙 4개

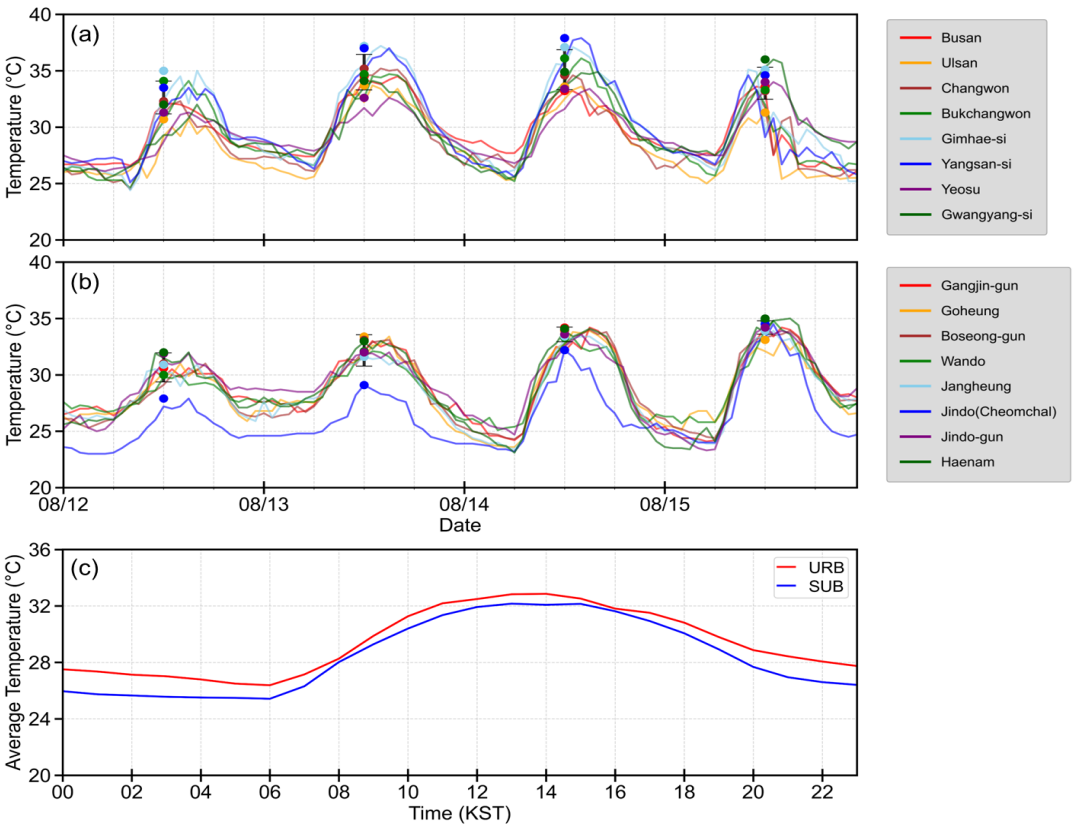


Fig. 2. Hourly temperature time series and daily maximum temperatures for (a) eight $URB_{coastal}$ ASOS stations and (b) eight ASOS SUB stations during August 12–15, 2018. In panels (a) and (b), dots indicate the daily maximum temperature at each station, and the mean of these maxima is shown with error bars denoting ±1 standard deviation. (c) Diurnal cycle of temperature averaged over the same period (Korea Standard Time, KST).

지점(대구, 밀양, 경주시, 영천)을 추가하여 URB_{inland} (붉은 사각형)로 지정하고, 연안 도심 지역과의 기온 모의 특성을 비교하였다.

2.2. 지상 관측자료

본 연구에서는 수치 예보 모델의 예측 성능을 검증하고 기온에 대한 해안-내륙의 지역적 차이와 도심-비도심의 차이를 분석하기 위해 ASOS 자료를 활용하였다. ASOS는 기온, 습도, 풍속, 강수량 등 다양한 기상요소를 1시간 간격으로 자동 측정하며, 품질 검증 및 보정 과정을 거쳐 기상청 기상자료개방포털(https://data.kma.go.kr)을 통해 제공된다.

2.3. 수치 모의 실험 및 평가 지표

폭염 예측 정확도 평가를 위해 중규모 기상 수치 모델인 Weather Research and Forecasting Model (WRF) v4.5.2를 활용하였다. WRF 모델은 전 세계적으로 널리 활용되고 있는 수치 예보 모델로, 비선형적인 대기 흐름을 모의할 수 있으며 다양한 공간 및 시간 해상도에서 유연하게 적용 가능하다(Skamarock et al., 2019). 본 연구에서는 Lambert Conformal Conic (LCC) 투영과 Arakawa-C 격자 체계를 기반으로 WRF를 총 3개의 중첩 도메인(nested domains)으로 구성하였다. 각 도메인은 27 km(D01), 9 km(D02), 3 km(D03)의 수평 해상도로 동아시아, 한반도, 남한을 포함하며, 연직 격자는 지표부터 50 hPa 사이를 29개 층으로 구성하였다. 각 도메인의 수치 계산 시간 간격(time step)은 각각 60초(D01), 20초(D02), 6.67

초(D03)로 설정하여, 높은 해상도일수록 더 짧은 시간 간격으로 계산이 이루어지도록 하였다. 기온 모의 결과의 상세 분석에는 D01, D02와 달리 cumulus parameterization의 Kain-Fritsch 옵션이 적용되지 않은, 3 km 공간 해상도의 D03 영역(Fig. 1(a))의 모의 결과를 활용하였다. 이러한 공간 설정을 바탕으로, 본 연구는 폭염일과 비폭염일의 기온 특성을 비교 분석하기 위해, 비폭염일과 폭염일이 연속적으로 나타난 2018년 8월 10일부터 15일까지를 분석 기간으로 선정하였다. 이 중 12일은 비폭염일의 대표 사례, 13-15일은 전국 대부분 지역에서 폭염이 발생한 대표 사례로 집중적으로 분석하였다. 초기 및 경계조건은 National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR)의 Final Analysis (FNL) 자료를 이용하였으며, 모델의 적분 기간은 분석 대상 기간을 충분히 포함하도록 스핀업(Spin-up) 3일을 포함하여 2018년 8월 7일 00시(Korea Standard Time, KST)부터 8월 15일 23시(KST)까지로 설정하였다.

특히, 본 연구의 수치모의 실험에는 선행연구들에서 널리 활용되는 물리 모수화 방안의 조합을 적용한 규준 실험(Base)과 단파(short wave) 및 장파(long wave) 복사 모수화 방안을 다르게 설정한 3가지 비교 실험(Exp1, Exp2, Exp3)을 수행하였다. 모델 내 복사 모수화 과정은 지표면과 대기층 간의 에너지 전달을 결정하는 핵심 요소로, 단파 복사는 주로 대기를 가열하며 장파 복사는 냉각 효과를 유발하고(NCAR, 2018), 각 모수화 방안별 계산 방식의 차이는 지표 기온 및 열적 안정도에 영향을 주기 때문에 고온 현상을 모의하는 데 있어 중요하다(Zittis and Hadjinicolaou, 2017). 따라서 복사 모수화 방안의 적절한 활용이 도시 지역의 기온 과소 모의 개선에 기여할 수 있는지를 평가하고자, 다른 물리 옵션을 고정한 상태에서 각각의 장/단파 계산 과정이 다른 복사 모수화 방안에 대해 민감도 실험을 수행하여 도심 기온 모의에 최적인 모수화 기법을 모색하였다. 각 수치모의 실험에서 설정한 모수화 옵션은 Table 1에 정리하였다.

Base와 Exp1 비교를 통해 단파 복사 모수화 변경이 기온에 미치는 영향의 차이를 확인하였다. Dudhia 모수화 옵션(ra_sw_physics=1)은 구름과 맑은 하늘 조건에서의 흡수 및 산란을 고려하여 단파 복사를 지표면 방향으로 적분하는 방식으로 구성되어 있으며, 계산 효율이 높다(Dudhia, 1989). Goddard 모수화 옵션(ra_sw_physics=2)은 기후통계자료 기반의 오존 농도와 구름의 산란 및 흡수 효과를 고려하는 다중 파장대 이류 방사선 전달 모델로 구성되어 있으며, 상향 및 하향 복사를 모두 계산한다(Chou and Suarez, 1994). Base와 Exp2 및 Exp1과 Exp3의 비교 분석을 통해 장파 복사 모수화 변경이 기온에 미치는 영향을 평가하였다. Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) 모수화 옵션(ra_lw_physics=1)은 다중 스펙트럼 밴드와 validated correlated-k 방법을 기반으로, 이산화탄소(CO_2), 메탄(CH_4), 아산화질소(N_2O) 등의 대기 중 미세 성분을 고려한 정밀한 장파 복사 전이 계산을 수행하며, 계산 효율을 높이기 위해 사전 계산된 참조 테이블(look-up table)을 활용한다(Mlawer et al., 1997). 이러한 특성으로 인해 기후 변화 및 극한 기상현상 재현을 위한 수치 모델링에 널리 활용되고 있다. RRTM for GCMs (RRTMG) 모수화 옵션(ra_lw_physics=4)은 RRTM의 향상된 버전으로, 무작위 클라우드 중첩 방식(Monte Carlo Independent Column Approximation, MCICA)을 포함하여 복사-구름 상호작용의 현실적인 처리가 가능하며, 층간 복사 냉각(flux divergence) 계산을 통해 지표면 및 대기 경계층의 열적 안정도 변화 과정을 분석하는 데 적합한 복사 모수화 옵션으로 평가된다(Iacono et al., 2008).

관측과 모델 간의 오차를 평가하기 위해, 상관계수(Pearson correlation coefficient, R), 일치도지수(Index of Agreement, IOA), 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE) 세 가지 통계 지표를 활용하여 비교 분석을 수행하였다. 각 지수를 구하는 계산식은 다음과 같다.

$$R = \frac{\Sigma_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O}) \cdot (M_i - M)}{\sqrt{\Sigma_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \cdot \sqrt{\Sigma_{i=1}^{n}(M_i - M)^2}}$$

$$IOA = 1 - \frac{\Sigma_{i=1}^{n}(M_i - O_{i)}^2}{\Sigma_{i=1}^{n}(|M_i - \overline{O}| + |O_i - \overline{O}|)^2}$$

$$\mathrm{SE} = \sqrt{\frac{1}{\mathrm{n}}\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}}(\mathrm{M_i} - \mathrm{O_i})^2}$$

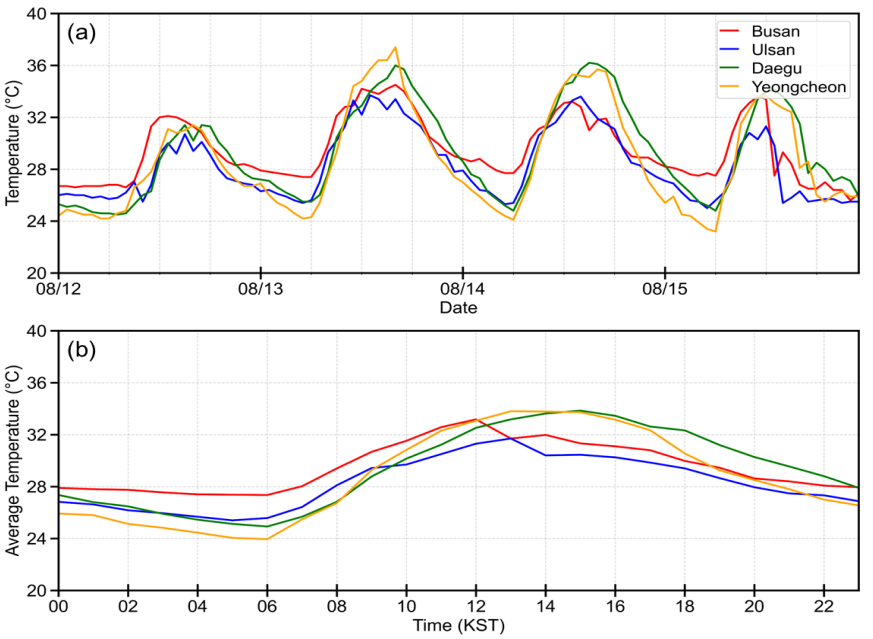


Fig. 3. (a) Hourly temperature time series for four southeastern cities in South Korea during August 12–15, 2018. (b) Diurnal temperature variations averaged over the same period.

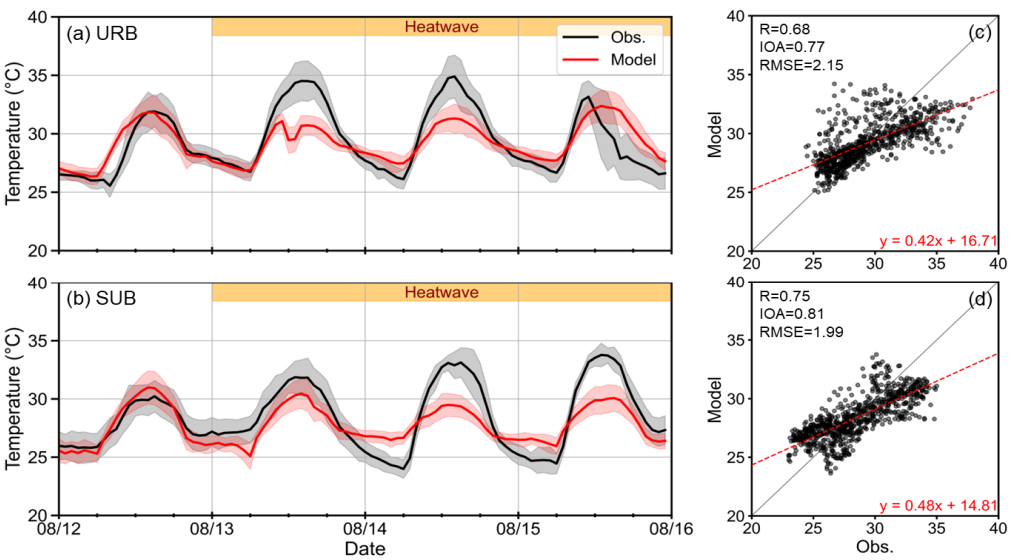


Fig. 4. Time series of ASOS observations and modeled temperatures for (a) $URB_{coastal}$ and (b) SUB during 12–16 August 2018. Lines indicate the mean temperature averaged over all stations within each group, with shading indicating ±1 standard deviation among the stations. The yellow shaded bar at the top indicates the heatwave period. Scatter plots of ASOS observations versus modeled temperatures for (c) $URB_{coastal}$ and (d) SUB include all station–time data points, with the gray line indicating the 1:1 reference and the red dashed line indicating the simple linear regression fit. Pearson correlation coefficient (R), Index of Agreement (IOA), and Root Mean Square Error (RMSE) are reported in each panel.

Table 2. Statistical evaluation of WRF-simulated temperature using ASOS observations for the selected study period (August 10–15, 2018)

	Region	R	IOA	RMSE
$URB_{coastal}$	Busan	0.70	0.70	1.86
	Ulsan	0.64	0.72	2.26
	Changwon	0.62	0.75	2.13
	Bukchangwon	0.70	0.77	2.26
	Gimhae-si	0.69	0.75	2.49
	Yangsan-si	0.56	0.71	2.55
	Yeosu	0.67	0.78	1.40
	Gwangyang-si	0.72	0.80	1.87
SUB	Gangjin-gun	0.81	0.89	1.64
	Goheung	0.80	0.85	1.59
	Boseong-gun	0.79	0.84	1.75
	Wando	0.54	0.44	2.06
	Jangheung	0.76	0.86	1.79
	Jindo (Mt. Cheomchal)	0.76	0.77	1.96
	Jido-gun	0.81	0.87	1.54
	Haenam	0.84	0.87	1.86

M_i는 i번째 시점의 모델 결과이며, O_i는 이에 대응하는 관측값이다. $\overline{M}$와 $\overline{O}$는 각각 모델값과 관측값의 평균을 나타내며, n은 전체 비교에 사용된 자료의 개수이다. 모델과 관측값의 선형적 상관성을 나타내는 R은 1에 가까울수록 높은 상관성을 의미하며, IOA는 관측값과 예측값의 일치도를 나타내는 지표로 마찬가지로 1에 가까울수록 일치도가 높음을 의미한다. RMSE는 모델값과 관측값 간의 절대적인 오차 크기를 정량화하여, 값이 작을수록 모델의 모의정확도가 높다.

3. 연구 결과 및 고찰

3.1. 남동권 폭염 사례 기상 특성 분석

Fig. 2는 폭염이 발생했던 2018년 8월 12-15일 기간 동안 도심-교외 지역의 기온 변화와 일 최고기온, 그리고 기간 평균 기온의 일변화를 나타낸다. Fig. 2(a)의 $URB_{coastal}$과 Fig. 2(b)의 SUB의 기온 시계열 비교에서 확인할 수 있듯이, 전반적으로 $URB_{coastal}$ 지역들의 기온과 최고기온이 SUB보다 높게 나타났다. $URB_{coastal}$ 지점들의 최고 기온은 모두 33℃ 이상의 고온을 기록했으며, 일부 지점은 최고 기온 평균값의 ±1 표준편차 범위를 벗어나며 각 지점별 차이 또한 크게 나타났다. SUB의 경우는 12-13일에는 상대적으로 기온이 낮았으나, 14-15일에 33℃ 이상의 온도가 관측되었다. 진도(첨찰산)를 제외한 대부분의 SUB 지점에서는 최고기온과 일변화 폭이 크지 않았고, Fig. 2(c)의 기온 일변화에서 $URB_{coastal}$과 SUB의 기온 차이가 야간에 뚜렷하게 나타났다. 이는 도심의 인공열의 영향으로 $URB_{coastal}$ 지역의 야간 기온이 SUB보다 높게 유지된 것으로 판단된다(Ryu and Baik, 2012).

이러한 도심의 인공열 효과뿐 아니라, 연안-내륙 위치에 따른 기온 차이를 확인하기 위해 남동권 내 도심 지역(부산, 울산, 대구, 영천)의 ASOS 관측 자료들을 비교하였다(Fig. 3). 앞서 해풍 영향권을 기준으로 부산과 울산은 연안지역, 대구와 영천은 내륙지역을 대표하는 것으로 분류하였다. 네 지역 모두 최고 기온이 33℃를 초과하는 고온 현상이 관측되었으며, 일 최고 기온은 대구(36.2℃)와 영천(37.4℃)이 부산(34.5℃)과 울산(33.7℃)보다 높게 나타났다. 기온의 일변화 상승폭 역시 대구와 영천은 각각 11.4℃, 13.3℃로 부산과 울산(7.1℃, 8.4℃)보다 컸다. 특히 내륙 지역에서는 낮 동안 급격한 기온 상승과 30℃ 이상의 고온이 해안 지역보다

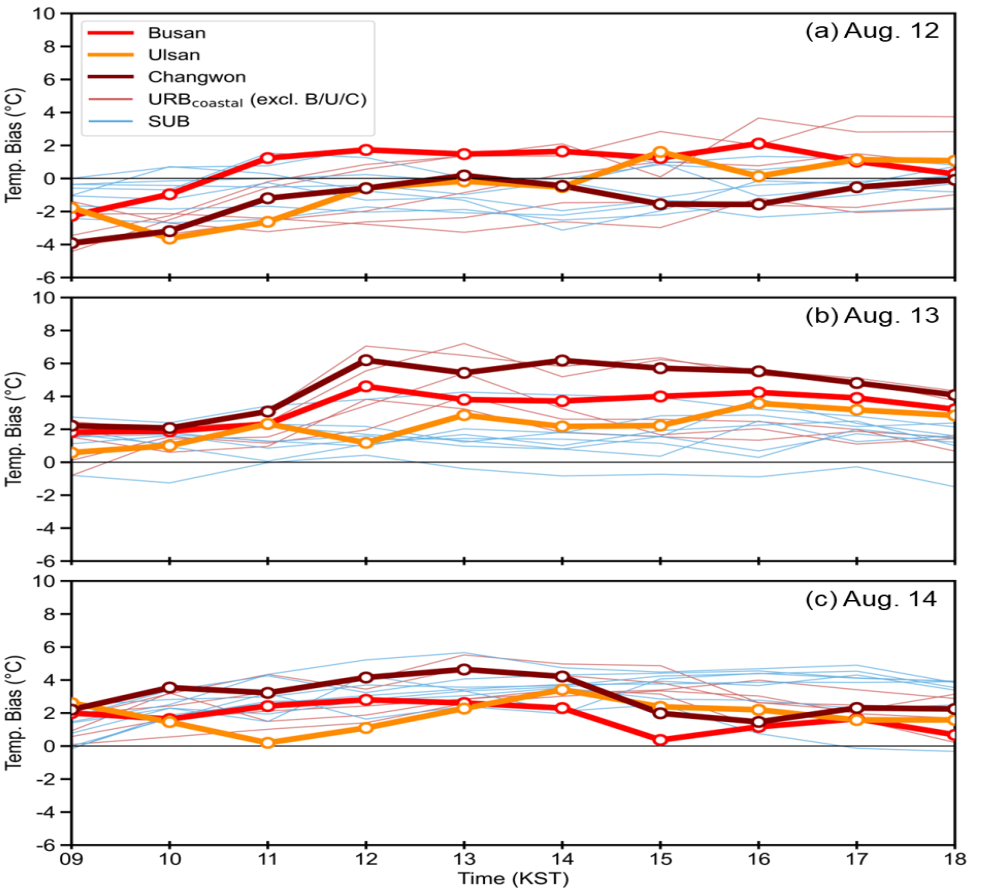


Fig. 5. Hourly temperature bias (Obs. - Model) from 09:00 to 18:00 KST for (a) August 12, (b) August 13, (c) August 14 shown for Busan, Ulsan, Changwon, $URB_{coastal}$ (excluding Busan, Ulsan, Changwon), and SUB.

더 길게 지속되는 특징이 나타났다. 이러한 특징은 지역별 4일간 평균 일변화 곡선(Fig. 3(b))에서도 확인할 수 있다. 이는 내륙 지역의 낮은 토양 수분 함량으로 인해 증발산 냉각이 제한되고, 이로 인해 열이 축적되면서 폭염이 더욱 심화되는 메커니즘(Gurung and Chen, 2024)에 의한 것으로 보인다. 반면 부산과 울산은 상대적으로 일 최고기온이 낮고 일변화 상승폭도 작았으며, 일반적인 해안 지역의 특성(Scheitlin, 2013)이 유사하게 관측되었다. 또한, 대구는 영천과 비슷한 일 최고 기온을 보였으나 30℃ 이상의 온도가 상대적으로 더 길게 지속되었는데, 이는 대구의 도심 및 분지 지형 특성 등이 복합적으로 작용한 것으로 해석된다(Clements et al., 2003; Phelan et al., 2015). 이러한 결과는 해안 인접성과 주변 지형 특성이 지역별 기온 변화에 영향을 미침을 보여주며, 도심의 인공열에 대한 고찰을 위해서는 지형 및 지리적 위치에 대한 비교 또한 모의 결과 분석에 포함하여야 함을 시사한다.

3.2. 도심-비도심 폭염 예측 정확도 평가

WRF 모델의 폭염 모의 능력을 평가하기 위해, MODIS 기반 토지피복 자료로 분류된 $URB_{coastal}$과 SUB에 해당하는 ASOS 지점의 위치 정보를 활용하여, 수치 모델 내 가장 근접한 격자값과 관측된 기온 자료를 비교 분석하였으며, 일변화 및 시간 변화 패턴에 대한 검증도 수행하였다. Fig. 4는 $URB_{coastal}$과 SUB에 대한 기온 관측값과 모델 결과의 시계열과 산점도이다. 시계

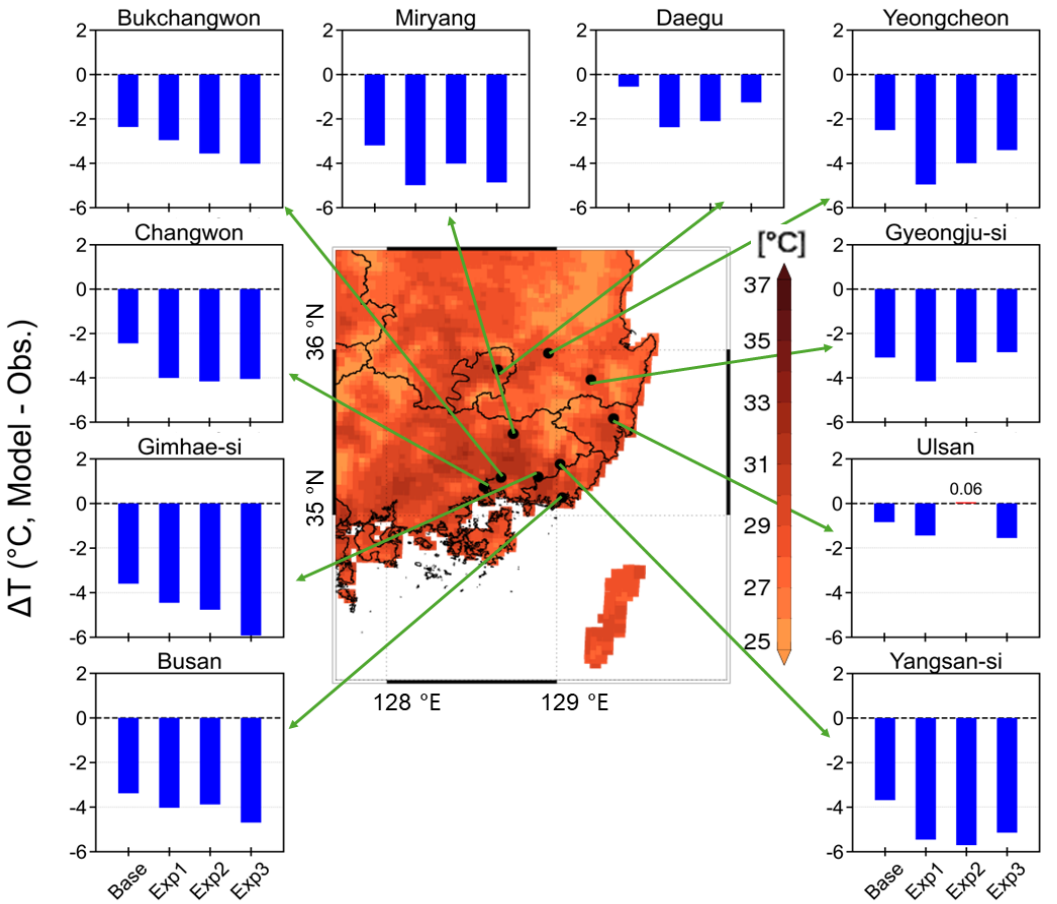


Fig. 6. Maximum temperature bias (Model – Obs.) during August 12–14, 2018 for each experiment (Base, Exp1–3) at 10 sites ($URB_{coastal}$ and URB_{inland}) located in the southeastern part of Korea, out of a total of 12 such sites (black circles in the central panel).

열 그래프(Fig. 4(a), 4(b))는 각 그룹 내 지점들의 시간별 평균 기온과 ±1 표준편차 범위를 음영으로 표시하였고, 산점도(Fig. 4(c), 4(d))는 관측값과 모델 결과 간의 관계를 의미한다. 전반적으로 두 그룹 모두에서 모델은 기온의 일변화 패턴을 잘 모의하며, $URB_{coastal}$의 R은 0.68, IOA는 0.77(Fig. 4(c)), SUB의 R은 0.75, IOA는 0.81(Fig. 4(d))로 비교적 높은 상관성을 보였다. 다만, 회귀 추세선의 기울기가 모두 1보다 작으며 전반적으로 과소 모의하는 경향이 나타났다. 특히 폭염이 발생한 8월 13–14일 동안, 두 그룹의 대부분 지역에서 일 최고기온의 과소 모의가 두드러졌는데, 이는 모델이 폭염 발생 시 급격한 온도 상승을 반영하는데 한계가 있음을 시사한다. 특히 $URB_{coastal}$에서는 관측값이 35℃ 이상 올라갔으나, 모델은 이를 약 4–5℃ 낮게 모의하며 상승 폭을 제대로 반영하지 못했다. SUB에서도 기온의 과소모의 경향이 나타났지만, 최고 기온 발생 시점을 잘 모의하여 통계지수가 $URB_{coastal}$에 비해 높았고, 추세 회귀선의 기울기도 SUB에서 더 큰 값을 가지며 상대적으로 관측값을 잘 모의함을 보였다.

두 그룹의 모든 측정 지점에 대한 통계 분석 결과(Table 2), $URB_{coastal}$의 대부분 지점에서 R은 0.56–0.72, IOA는 0.70–0.80 범위를 보였고, SUB는 섬 지역인 완도를 제외하고 R은 대체로 0.76 이상, IOA 역시 0.80 이상으로 $URB_{coastal}$보다 전반적으로 높게 나타났

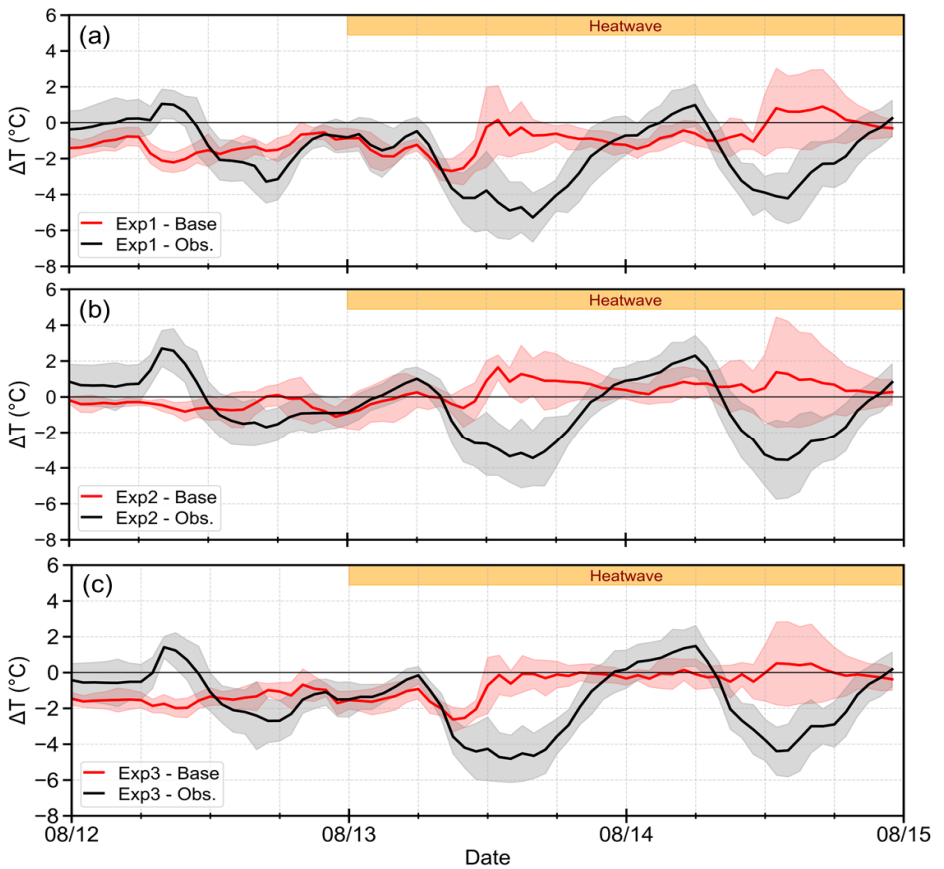


Fig. 7. Mean temperature differences (⊿T) during August 12–14, 2018 for 10 sites ($URB_{coastal}$ and URB_{inland}) in the southeastern part of South Korea, out of a total of 12 such sites. ⊿T is defined as Experiment − Base (red) or Experiment − Obs. (black), with shaded areas representing ±1 standard deviation.

다. RMSE의 경우 SUB는 대부분 지점에서 2℃ 미만이었으나, $URB_{coastal}$의 대부분 지점은 2℃ 이상을 보여, SUB에 비해 $URB_{coastal}$의 기온 예측 오차가 상대적으로 크게 나타났다.

또한 모델의 과소 모의가 뚜렷하게 나타난 낮 시간대(09–18 KST)를 중심으로 폭염일과 비폭염일로 구분하여 $URB_{coastal}$과 SUB 지점들의 모델 결과 오차(관측 − 모델)를 분석하였다. 이와 함께 남동권의 $URB_{coastal}$ 지점 중 인구 밀집도가 높고 대도시로 분류되는 부산, 울산, 창원을 대상으로 세부 분석을 수행하여, 도심 지점 간 격차를 확인하였다(Fig. 5).

비폭염일인 8월 12일 오전에는 대부분의 지역에서 모델의 과대 모의(오차 〈 0℃)가 나타났으며(Fig. 5(a)), 폭염이 본격화된 13–14일에는 뚜렷한 과소 모의 경향이 확인되었다. 특히 13일의 경우 부산, 울산, 창원은 모의 기온이 관측보다 낮아 오차가 지속적으로 0℃보다 크게 나타났고, 12–13시에는 약 2–6℃의 큰 오차를 보였다(Fig. 5(b)). 12일에는 $URB_{coastal}$과 SUB 사이의 차이가 뚜렷하지 않았으나, 13일에는 모든 $URB_{coastal}$ 지점에서 SUB에 비해 과소모의 경향이 크게 나타났으며, 최대 오차가 5℃ 이상으로 확인되었다. 14일에는 이러한 SUB와 $URB_{coastal}$ 간 오차 차이가 줄었지만, 여전히 대부분의 지점에서 SUB보다 오차가 크게 나타났다(Fig. 5(c)).

통계분석과 모델-관측 시계열 비교를 통해 대부분의 SUB 지점보다 $URB_{coastal}$ 지점에서 편차가 크며 불확도

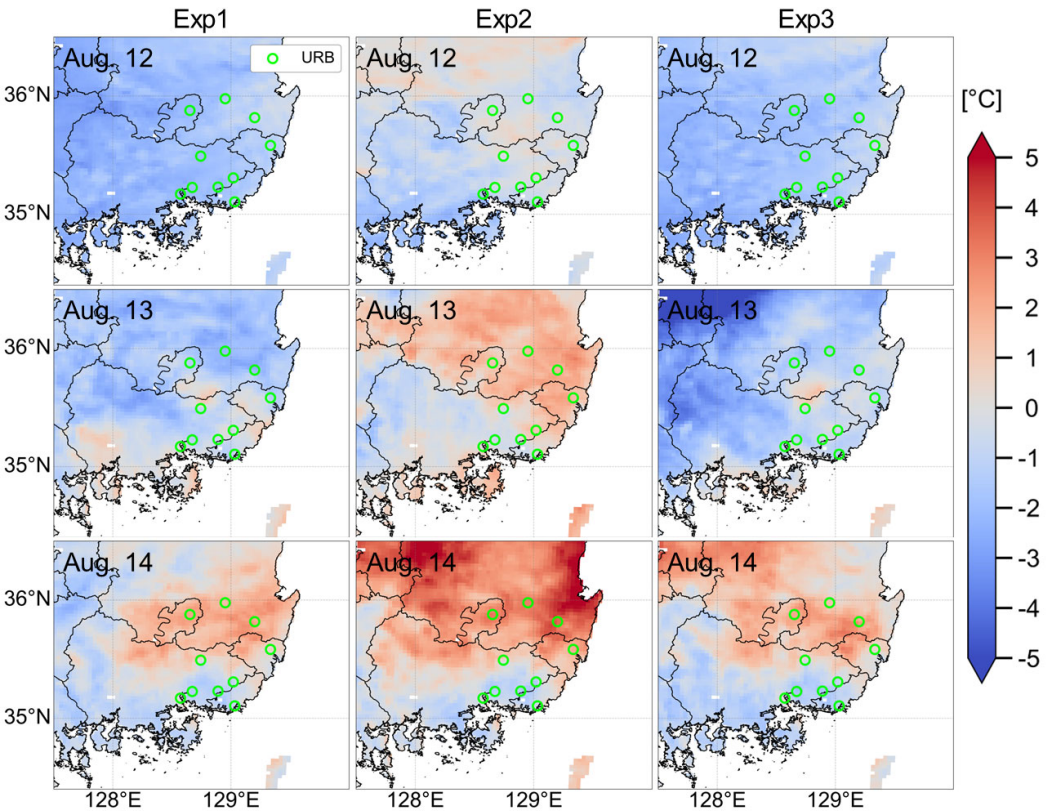


Fig. 8. Spatial distribution of temperature differences (Experiment − Base), averaged over the daytime period (09:00–18:00 KST) during August 12–14, 2018 for three sensitivity experiments (Exp1–3). Green circles indicate URB sites, representing 10 locations ($URB_{coastal}$ and URB_{inland}) in the southeastern part of South Korea, out of a total of 12 such sites.

가 높게 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 모의 불확도는 특히 폭염 발생일에 두드러졌으며, $URB_{coastal}$과 SUB의 토지피복 유형 차이를 고려했을 때, 이는 도시 특유의 열저장 특성, 인공열, 불투수면 및 복잡한 지면 특성이 모델에 적절하게 반영되지 못했기 때문으로 판단된다 (Phelan et al., 2015; Salim et al., 2020). 또한, $URB_{coastal}$ 지점 간 모의 결과 차이는 도시화 특성과 공간적 불균일성이 모델에서 충분히 반영되지 못한 데 기인한 것으로 추론되며, 향후 도시 지역을 정밀하게 모사하기 위해 도시 특성을 고려한 접근이 필요함을 보여준다.

3.3. 대기 복사 모수화 방안에 따른 모의 정확도 차이

앞서 확인한 인공열 및 도시 고유 특성 미반영의 한계점을 보완하기 위해, 이전 분석과 동일하게 비폭염 사례일인 12일과 폭염이 발생한 13–14일에 대해 서로 다른 복사 모수화 방안을 활용한 실험들(Exp1, Exp2, Exp3)을 수행하고 결과의 차이를 평가하였다. Fig. 6은 $URB_{coastal}$과 URB_{inland} 중 남동권 지점의 ASOS 관측 기온을 이용해 계산한 일 최고기온의 오차(모델 − 관측)를 보여준다. 모든 실험에서 대부분 지점의 오차는 음의 값을 나타내며, 모델의 최고기온 과소 모의 경향이 뚜렷하게 나타났다. 양산시는 Exp1–3에서 −5℃ 이상의 오차를, 밀양, 창원, 김해시 등은 −4℃ 가량의 오차를 보였다. 또한 울산과 경주시를 제외한 모든 지역에서 Base 실험보다 더 큰 오차가 나타났다. 최고기온 발생 시점에는 차이가 존재할 수 있으나, 실험 간 복사 모수화 방안의 변경에 따른 오차의 개선 정도는 지점별로 상이하게 나타나며, 이와 같은 복사 모수화 방안의

변경은 일부 도시에서 최고기온 모의 개선에 기여할 수 있으나, 일관적인 개선 효과를 보이지 않고, 지역별 특성에 따라 민감도 실험 효과가 제한적일 수 있음을 시사한다.

복사 모수화 방안에 따른 모의 결과가 일별·시간별 기온 모의에 미치는 영향을 확인하기 위해, $URB_{coastal}$과 URB_{inland} 중 남동권 지점의 실험별 편차(Exp - Base)와 관측 대비 오차(Exp - 관측)를 평균하여 시계열로 나타냈다(Fig. 7). 비폭염일인 12일에는 세 실험 모두 Base 대비 편차가 음의 값을 보이거나 거의 없었다. 폭염 발생일인 13일 낮 시간에는 Exp2에서 Base와의 편차가 양의 값을 보였고, 14일에는 모든 실험에서 Base 대비 편차가 양의 값을 나타냈다. 이는 기온이 높은 폭염일의 낮 시간에 복사 과정의 영향력이 증가하며 복사 모수화 방안 차이가 모델 결과에 영향을 미친 것으로 해석된다. 그러나 Base 대비 평균 편차 크기는 약 2℃ 정도에 그쳤으며, 이는 관측 대비 평균 오차 크기인 약 4-5℃보다 작아, 앞선 최고기온 분석(Fig. 6)에서 확인된 모델의 전반적인 과소 모의 경향을 상쇄하기에 부족하였다.

상대적으로 개선 효과가 두드러졌던 고온 환경에서의 모수화 방안 변경 영향을 확인하기 위해, 12-14일 낮 시간대(09-18 KST)의 각 실험별 차이를 평균한 공간분포(Fig. 8)를 살펴보았다. Exp2는 다른 실험에 비해 상대적으로 높은 기온 차이를 보이며 개선 효과가 크게 나타났다. Exp2에 적용된 RRTMG-Goddard 복사 모수화 조합은 구름 겹침(MCICA), 에어로졸-복사 상호작용, 그리고 다중 산란에 대한 처리를 통해 복사 계산의 물리 기반을 강화하였으며, 이러한 특성이 기온 모의 개선에 기여한 것으로 해석된다. 그러나 공간적으로는 일부 지역에서만 뚜렷한 양의 편차가 나타났고, 남북 방향으로 편차가 뚜렷하게 구분되는 지역적 불균일성이 존재하였다. 이는 복사 모수화 방안의 적절한 활용이 폭염의 고온 조건에서 일부 지역의 과소 모의 문제점을 개선하는 효과가 있으나, 남동권 도시 지역 전반에 걸친 기온 과소 모의 문제를 해결하기에는 한계가 있음을 의미한다.

결과적으로 인공열뿐만 아니라 도시 지표면 특성, 고해상도 토지피복 자료의 불확실성, 건물 형태 및 배치 정보의 부족 등은 자료 수집과 이를 모델 입력 자료로 적용하는 과정에서 다양한 문제점을 야기하나, 이러한 요소의 직접적인 반영은 모델의 기온 모의 개선에 필수적임을 시사한다.

4. 결 론

본 연구는 2018년 8월 폭염 사례를 대상으로, 도시 지역의 기온 특성과 WRF 모델의 모의 성능을 분석하고, 복사 모수화 방안 설정이 기온 모의에 미치는 영향을 평가하였다. 연구 지역은 해안·내륙 특성 및 토지피복에 따른 영향을 모두 반영할 수 있도록 $URB_{coastal}$, URB_{inland}와 SUB로 구분하였으며, 이를 바탕으로 수치 모델의 구조적 오차 요인을 진단하였다. 관측 분석 결과, 내륙 지역(URB_{inland})은 해안 지역($URB_{coastal}$)보다 일 최고기온이 높고, 기온의 일변화 폭도 컸으며, 고온이 지속되는 시간도 더 길게 나타났다. 이는 내륙 지역의 낮은 토양 수분과 복사 에너지 축적, 지형적 특성 등이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 특히 대구와 영천에서 최고기온 이후에도 고온이 장시간 유지되는 열축적 특성이 관측되었다. 반면 해안 지역은 해풍, 해양의 열용량, 높은 수분 함량 등에 의해 기온 변동 폭이 작고 보다 완만한 변화를 보였다. 이와 같은 해안-내륙 간의 기온 특성 차이는 지형 조건이나 토지 특성에 따라 달라질 수 있으며, 수치 모델의 기온 예측에 영향을 미친다. WRF 모델은 기온의 전반적인 일변화 경향을 모의하였으나, 폭염 발생 시기에 관측값 대비 뚜렷한 과소 모의 경향이 나타났다. 특히, 도시지역($URB_{coastal}$)에서 관측값과 모델 결과 간 오차가 약 3-6℃ 수준으로, 비도시지역(SUB)보다 더 크게 나타났다. 이는 도시의 복잡한 지표 특성이 모델에 충분히 반영되지 않았기 때문으로 해석된다. 관측값과 모델 간의 오차를 개선하기 위한 복사 모수화 방안을 변경한 민감도 실험 결과, 일부 실험에서는 일 최고기온 오차가 다소 개선되었으나, 지역별로 약 2℃ 내외의 편차 수준에 머물며 전반적인 개선 효과는 제한적이었다. 8월 13-14일 고온 조건에서는 복사 과정의 영향력이 증가함에 따라 Base 대비 양의 편차가 나타났지만, 여전히 관측값과의 오차(최대 약 6℃)를 충분히 개선하지는 못하였다. 주로 낮 시간대를 중심으로 개선 효과가 있었으나, 공간적 불균일한 양상을 보였다. 이는 복사 모수화 방안의 변경이 기온 모의에 영향을 미치지만, 그 효과에는 분명한 한계가 있음을 시사한다.

본 연구는 해안과 내륙, 지역 간 기온 특성 차이를 상

세히 파악하고, 토지 유형에 따른 차이와 WRF 모델의 복사 모수화 민감도 및 기온 예측 한계를 확인하였다는 점에서 의의가 있다. 특히 단순한 복사 모수화 변경만으로는 도시 지역의 구조적 오차를 개선하는 것에 한계가 있음을 보여주며, 수치 모델의 기온 모의에 있어 보다 복합적인 접근이 필요함을 시사한다. 향후 연구에서는 도시 지면 특성과 복사 과정에 민감하게 작용하는 Land Surface Model, Planetary Boundary Layer 모수화 등 주요 물리 옵션의 변경과 도시 물리과정(Urban Canopy Model, UCM)의 활성화, 고해상도 토지피복 반영 등을 통해 수치모델의 예측 성능 향상이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 농촌진흥청 연구사업 (과제번호 : RS-2024-00400632)과 2022학년도 부산대학교 신임교수연구 정착금 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

Blunden, J., Abdallah, A., Adler, R., Allan, R., Arce, D., Argueez, A., May, L., 2017, State of the climate in 2016, Bull. Amer. Meteor. Soc., 98(8).

Byon, J. Y., Choi, Y. J., Seo, B. G., 2010, Evaluation of urban weather forecast using WRF-UCM (Urban Canopy Model) over Seoul, Atmosphere, 20(1), 13-26.

Chen, S. H., Sun, W. Y., 2002, A One-dimensional time dependent cloud model, J. Meteorol. Soc. Japan Ser. II, 80(1), 99-118.

Clements, C. B., Whiteman, C. D., Horel, J. D., 2003, Cold-air-pool structure and evolution in a mountain basin: Peter Sinks, Utah, J. Appl. Meteorol., 42(6), 752-768.

Coumou, D., Robinson, A., 2013, Historic and future increase in the global land area affected by monthly heat extremes, Environ. Res. Lett., 8(3), 034018.

Dailidienė, I., Servaitė, I., Dailidė, R., Vasiliauskienė, E., Rapolienė, L., Povilanskas, R., Valiukas, D., 2023, Increasing trends of heat waves and tropical nights in coastal regions (The case study of Lithuania seaside cities), Sustainability, 15(19), 14281.

Fahad, M. G. R., Karimi, M., Nazari, R., Nikoo, M. R., 2025, Modeling urban microclimates for high-resolution prediction of land surface temperature using statistical models and surface characteristics, Urban Sci., 9(2), 28.

Friedl, M. A., McIver, D. K., Hodges, J. C., Zhang, X. Y., Muchoney, D., Strahler, A. H., Gray, J., Cooper, A., Justice, C., Running, S., Schaaf, C., 2002, Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results, Remote Sens. Environ., 83(1-2), 287-302.

Gogoi, P. P., Vinoj, V., Swain, D., Roberts, G., Dash, J., Tripathy, S., 2019, Land use and land cover change effect on surface temperature over Eastern India, Sci. Rep., 9(1), 8859.

Gurung, T. R., Chen, L., 2024, Understanding the influence of soil moisture on heatwave characteristics in the contiguous United States, Environ. Res. Lett., 19(6), 064070.

Hong, S. Y., Noh, Y., Dudhia, J., 2006, A New vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, Mon. Wea. Rev., 134(9), 2318-2341.

Hsu, H., Dirmeyer, P. A., Seo, E., 2024, Exploring the mechanisms of the soil moisture-air temperature hypersensitive coupling regime, Water Resour. Res., 60(7), e2023WR036490.

Hu, Y., Wang, Y., Wang, H., Liu, Y., Zhang, Q., Wang, Z., 2022, Observed and modeled urban heat island and sea-breeze circulation interactions: A Shanghai case study, J. Appl. Meteorol. Climatol., 61(3), 239-259.

Hui, P., Li, Y., Chen, Y., Zhang, L., Wei, F., Wang, S., Tang, J., 2019, The impact of radiation parameterization schemes on the regional climate simulations over the CORDEX-EA domain, Atmos. Res., 224, 81-98.

Im, E. S., Thanh, N. X., Kim, Y. H., Ahn, J. B., 2019, 2018 summer extreme temperatures in South Korea and their intensification under 3°C global warming, Environ. Res. Lett., 14(9), 094020.

Jiménez, P. A., Dudhia, J., González-Rouco, J. F., Navarro, J., Montávez, J. P., García-Bustamante, E., 2012, A Revised scheme for the WRF surface layer formulation, Mon. Wea. Rev., 140(3), 898-918.

Jung, H. S., Choi, Y., Oh, J. H., Lim, G. H., 2002, Recent trends in temperature and precipitation over South Korea, Int. J. Climatol., 22(11), 1327-1337.

Kain, J. S., 2004, The Kain–Fritsch convective parameterization: An Update, J. Appl. Meteorol., 43(1), 170-181.

Kim, D. H., Hong, S. O., Byon, J. Y., Park, H. S., Ha, J. C., 2019, Development and evaluation of urban canopy model based on unified model input data using urban building information data in Seoul, Atmosphere, 29(4), 417-427.

Kim, D. W., Deo, R. C., Chung, J. H., Lee, J. S., 2016, Projection of heat wave mortality related to climate change in Korea, Nat. Hazards, 80, 623-637.

Kim, H. K., Moon, B. K., Kim, M. K., Park, J. Y., Hyun, Y. K., 2021, Three distinct atmospheric circulation patterns associated with high temperature extremes in South Korea, Sci. Rep., 11(1), 12911.

Kim, Y., Choi, Y., Min, S. K., 2022, Future changes in heat wave characteristics and their impacts on the electricity demand in South Korea, Weather Clim. Extremes, 37, 100485.

Kusaka, H., Kimura, F., 2004, Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: Numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model, J. Appl. Meteorol., 43(12), 1899-1910.

Lal, P., Shekhar, A., Kumar, A., 2021, Quantifying temperature and precipitation change caused by land cover change: A Case study of India using the WRF model, Front. Environ. Sci., 9, 766328.

Lee, W., Choi, M., Bell, M. L., Kang, C., Jang, J., Song, I., Kim, Y. O., Ebi, K., Kim, H., 2022, Effects of urbanization on vulnerability to heat-related mortality in urban and rural areas in South Korea: A Nationwide district-level time-series study, Int. J. Epidemiol., 51(1), 111-121.

Liao, W., Liu, X., Li, D., Luo, M., Wang, D., Wang, S., Baldwin, J., Lin, L., Li, X., Feng, K., 2018, Stronger contributions of urbanization to heat wave trends in wet climates, Geophys. Res. Lett., 45(20), 11310-11317.

Lim, Y. H., Lee, K. S., Bae, H. J., Kim, D., Yoo, H., Park, S., Hong, Y. C., 2019, Estimation of heat-related deaths during heat wave episodes in South Korea (2006-2017), Int. J. Biometeorol., 63, 1621-1629.

Meehl, G. A., Tebaldi, C., 2004, More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century, Science, 305(5686), 994-997.

Murata, A., Sasaki, H., Hanafusa, M., Kurihara, K., 2013, Estimation of urban heat island intensity using biases in surface air temperature simulated by a nonhydrostatic regional climate model, Theor. Appl. Climatol., 112, 351-361.

Phelan, P. E., Kaloush, K., Miner, M., Golden, J., Phelan, B., Silva, H., Taylor, R. A., 2015, Urban heat island: Mechanisms, implications, and possible remedies, Annu. Rev. Environ. Resour., 40(1), 285-307.

Pokhrel, R., Lee, H., 2011, Estimation of the effective zone of sea/land breeze in a coastal area, Atmos. Pollut. Res., 2(1), 106-115.

Ryu, Y. H., Baik, J. J., 2012, Quantitative analysis of factors contributing to urban heat island intensity, J. Appl. Meteorol. Climatol., 51(5), 842-854.

Salim, M. H., Schubert, S., Resler, J., Krč, P., Maronga, B., Kanani-Sühring, F., Sühring, M., Schneider, C., 2020, Importance of radiative transfer processes in urban climate models: A Study based on the PALM model system 6.0, Geosci. Model Dev. Discuss., 2020, 1-55.

Scheitlin, K., 2013, The maritime influence on diurnal temperature range in the Chesapeake Bay area, Earth Interact., 17(21), 1-14.

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., 2019, A Description of the advanced research WRF model version 4, NCAR Tech. Note, 145(145), 550.

Suh, M. S., Oh, S. G., Lee, Y. S., Ahn, J. B., Cha, D. H., Lee, D. K., Lee, J., Choi, Y., Kang, H. S., 2016, Projections of high resolution climate changes for South Korea using multiple-regional climate models based on four RCP scenarios, Part 1: surface air temperature, Asia-Pac. J. Atmos. Sci., 52, 151-169.

Sulla-Menashe, D., Friedl, M. A., 2018, User guide to collection 6 MODIS land cover (MCD12Q1 and MCD12C1) product, USGS, 1(1), 18.

Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., Lemone, M. A., Mitchell, K., Ek, M., Gayno, G., Wegiel, J., Cuenca, R., 2004, Implementation and verification of the unified NOAH land surface model in the WRF model, Proc. 20th Conf. Weather Anal. Forecast./16th Conf. Numer. Weather Predict., Amer. Meteor. Soc., Seattle, WA, 14.

Xu, Z., Cheng, J., Hu, W., Tong, S., 2018, Heatwave and health events: A Systematic evaluation of different temperature indicators, heatwave intensities and durations, Sci. Total Environ., 630, 679-689.

Yeh, S. W., Won, Y. J., Hong, J. S., Lee, K. J., Kwon, M., Seo, K. H., Ham, Y. G., 2018, The record-breaking heat wave in 2016 over South Korea and its physical mechanism, Mon. Wea. Rev., 146(5), 1463-1474.

Yoon, D., Cha, D. H., Lee, G., Park, C., Lee, M. I., Min, K. H., 2018, Impacts of synoptic and local factors on heat wave events over southeastern region of Korea in 2015, J. Geophys. Res. Atmos., 123(21), 12081-12099.

Yoon, D., Cha, D. H., Lee, M. I., Min, K. H., Jun, S. Y., Choi, Y., 2021, Comparison of regional climate model performances for different types of heat

waves over South Korea, J. Climate, 34(6), 2157-2174.

Zampieri, M., Ceglar, A., Dentener, F., Toreti, A., 2017, Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales, Environ. Res. Lett., 12(6), 064008.

Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J. W., Ebi, K. L., Bou-Zeid, E., Guan, K., Liu, X., 2018, Interactions between urban heat islands and heat waves, Environ. Res. Lett., 13(3), 034003.

Zhou, Y., Guan, H., Huang, C., Fan, L., Gharib, S., Batelaan, O., Simmons, C., 2019, Sea breeze cooling capacity and its influencing factors in a coastal city, Build. Environ., 166, 106408.

• Bachelor's course. Hyun-Che Park
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National university
1778hgo@pusan.ac.kr
• Doctor's course. Min-Jun Park
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National university
alswns43215@pusan.ac.kr
• Doctor's course. Seung-Hee Baek
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National university
shb0531@pusan.ac.kr
• Professor. Hyo-Jung Lee
Department of Atmospheric Sciences, Pusan National university
hyojung@pusan.ac.kr