

## 한국형수치예보모델 KIM의 폭염 예측 성능 검증

정지영 · 이은희\* · 박혜진

(재)차세대수치예보모델개발사업단

(접수일: 2022년 7월 6일, 수정일: 2022년 9월 2일, 게재확정일: 2022년 9월 26일)

### Evaluation of Heat Waves Predictability of Korean Integrated Model

Jiyoung Jung, Eun-Hee Lee\*, and Hye-Jin Park

*Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, Seoul, Korea*

(Manuscript received 6 July 2022; revised 2 September 2022; accepted 26 September 2022)

**Abstract** The global weather prediction model, Korean Integrated Model (KIM), has been in operation since April 2020 by the Korea Meteorological Administration. This study assessed the performance of heat waves (HWs) in Korea in 2020. Case experiments during 2018–2020 were conducted to support the reliability of assessment, and the factors which affect predictability of the HWs were analyzed. Simulated expansion and retreat of the Tibetan High and North Pacific High during the 2020 HW had a good agreement with the analysis. However, the model showed significant cold biases in the maximum surface temperature. It was found that the temperature bias was highly related to underestimation of downward shortwave radiation at surface, which was linked to cloudiness. KIM tended to overestimate nighttime clouds that delayed the dissipation of cloud in the morning, which affected the shortage of downward solar radiation. The vertical profiles of temperature and moisture showed that cold bias and trapped moisture in the lower atmosphere produce favorable conditions for cloud formation over the Yellow Sea, which affected overestimation of cloud in downwind land. Sensitivity test was performed to reduce model bias, which was done by modulating moisture mixing parameter in the boundary layer scheme. Results indicated that the daytime temperature errors were reduced by increase in surface solar irradiance with enhanced cloud dissipation. This study suggested that not only the synoptic features but also the accuracy of low-level temperature and moisture condition played an important role in predicting the maximum temperature during the HWs in medium-range forecasts.

**Keywords:** Heat wave, Korean Integrated Model, Cold bias of surface temperature, Moisture bias in the lower atmosphere, Low level cloud

## 1. 서 론

폭염은 비정상적인 고온다습 조건이 지속되는 기상 현상으로, 경우에 따라 광범위한 지역에 수일간 지속되

며, 극심한 피해를 입히는 재해 현상이다. 폭염에 의한 인명 피해는 매년 전세계적으로 발생하고 있으며, 1998~2017년 통계에 따르면 폭염에 따른 전세계 사망자수는 166,000명 이상인 것으로 나타났다(WHO, 2017). 우리나라의 경우, 국내 발생한 재해 중 폭염이 가장 많은 사망 피해를 가져온 것으로 조사되었다(Kysely and Kim, 2009). 1994년 발생한 폭염으로 인해 3,384명의 사망자가 발생하였으며, 2018년에는 기상관측사상 111년 만에 가장 강하고 긴 폭염으로 인해 44,000명의 온열질환자

\*Corresponding Author: Eun-Hee Lee, Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, 4F, 35, Boramae-ro 5-gil, Dongjak-gu, Seoul 07071, Korea.  
Phone: +82-2-6480-6400, Fax: +82-2-6480-6498  
E-mail: ehlee@kiaps.org

와 929명의 사망자가 발생하였다(Ha et al., 2020; Lee et al., 2020; Min et al., 2020; Park and Chae, 2020). 이러한 폭염 사례로 인해 폭염에 대한 경각심은 더욱 높아졌으며, 국내 폭염 관련 연구도 함께 증가하였다(Back and Kwon, 2021).

폭염의 위험성은 기후변화와 함께 미래에 더욱 높아질 것으로 전망되었다. 최근 연구에서는 지구 평균 기온의 상승과 함께 폭염의 빈도, 강도, 주기가 증가할 것이며(Meehl et al., 2000; Coumou et al., 2013; USGCRP, 2017; IPCC, 2022), 그에 따른 피해가 커질 것으로 예측했다(Yoon et al., 2021; IPCC, 2022). 세계보건기구에 따르면 전 세계적으로 2030년에는 90,000명 이상, 2050년에는 255,000명 이상 온열질환 사망자 수가 나올 것으로 추정되었다(WHO, 2014).

이러한 배경하에 향후 가중될 수 있는 폭염 피해를 최소화하기 위해서 정확한 사전 예측의 중요성이 더욱 대두되고 있다. 현재 기상청의 폭염 예측은 두 측면으로 이루어진다. 장기예측 관점에서 1개월 또는 3개월 전망을 제공하거나, 단기적인 측면에서 매일의 기상예보를 통해 폭염의 시작과 종료, 각 일의 최고기온 예측 정보 및 이를 기반으로 한 예경보를 발행한다. 이때 수치모델의 예측정보는 각 예보에서 핵심적인 부분을 차지하고 있으나, 현재 수치모델에서 극한 기온을 모의하는 것에는 한계가 있음이 일반적으로 알려져 있다(Flato et al., 2013). 예를 들어 Kharin et al. (2007)과 Kharin et al. (2013)은 CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 3)와 CMIP5 모델의 기온과 강수 성능 평가를 통해 모델의 극한 기온 모의에서 지역별 오차가 상이함을 제시하였다. 또한, Sillmann et al. (2013)은 CMIP5 모델의 기온과 강수로 구한 다양한 극한 지수 모의 성능을 평가하였고, 이를 통해 극한 기온 모의의 불확실성을 확인하였다. 한편, 현업기관의 기상예측에서는 이러한 모델의 불확실성을 보정하기 위하여 중기예측모델 결과를 후처리하여 폭염시 기온예측에 활용하고 있다. 기상청에서 사용하는 Model Output Statistics는 기후값을 기초로 하여 통계적인 방식으로 재예측하는 모델로써 수치모델의 불확실성을 보정하고 있으나, 이러한 방식에서도 기후값에서 크게 벗어나는 극한기온의 예측성은 보장하기 어렵다(KMA, 2019). 종합적으로 폭염의 예측성 향상을 위해서는 수치모델의 성능향상과 이를 예보산출물로 활용하는 기술의 양방향으로의 개선이 요구된다.

본 연구에서는 중기예측모델의 예측성에 중점을 두어 현재 기상청에서 현업 예측에 사용하는 전지구예보모델의 우리나라 폭염 예측 성능을 평가하고, 예측 오차의 관련 요인을 파악하고자 한다. 특히 우리나라 여름철 기상기후와 밀접하게 관련된 고기압시스템인 티베트고기압과 북태평양고기압의 예측성 여부와 폭염 발생시

지상 최고기온의 정확도에 대한 평가를 통해서 모델 예측에 대한 정보 활용과 향후 모델의 정확도 향상을 위한 근거를 확보하는 것을 목적으로 하였다.

한국형수치예보모델 KIM (Korean Integrated Model)은 2011년부터 2019년까지 9년간 국내 기술로 개발된 전지구모델로(Hong et al., 2018), 2020년 4월부터 기상청에서 현업 운영되고 있다(KMA NMC, 2022). 본 연구에서는 2020년 기간 동안 모의한 KIM의 현업 운영 결과로부터 폭염 사례에 대한 성능을 평가하고자 하였으며, 모델 예측 성능의 현 수준을 파악하고, 예측 오차의 주요 요인에 대하여 논의하고자 한다. 또한, 평가의 신뢰성을 확보하기 위하여 추가적으로 최근 3년(2018~2020년) 간의 폭염 사례들에 대한 수치실험을 통해서 예측 오차의 경향과 관련 요인을 분석하였으며, 원인 분석을 위한 민감도 실험을 수행하였다.

본 연구의 2장에서는 분석장을 통해 2018~2020년 폭염 사례에 대하여 기술하였고, 3장에서는 KIM 모델에 대한 설명과 실험 방법, 검증자료에 대해 설명하였다. 4장에서는 현업의 폭염 모의 성능을 평가하였으며, 5장에서는 추가 실험 결과를 분석하고, 오차 원인에 대해 진단하였다. 마지막으로 6장에서는 요약 및 토의를 제시하였다.

## 2. 2018~2020년 폭염 사례

우리나라의 폭염은 일반적으로 여름철 대표 고기압인 북태평양고기압과 티베트고기압의 영향으로 하강기류에 의한 대기의 단열압축과 일사량의 증가에 의해 발생한다. 또한 한반도 주변 기압 배치에 따라 한반도로 남풍이 유입되거나, 한반도 남쪽에 위치한 열대저기압, 태풍에 의해 동풍이 불면서 썬 현상으로 작용해 국지적인 폭염이 발생하기도 한다. 본 연구에서는 여름철 한반도 상층에 중첩된 티베트고기압과 북태평양고기압 영향하에 전국적으로 발생한 폭염을 중심으로 분석을 진행하였다. 2018~2020년 여름에는 모두 장마 종료 이후 한반도가 티베트고기압과 북태평양고기압의 영향권에 놓이면서 전국적으로 폭염이 관측되었다. 6~8월 기간 동안 발생한 전국적 폭염일수는 2018년에는 32일, 2019년에는 10일, 2020년에는 4일로 확인되었다. 이 때 전국 폭염의 기준은 전국 평균 일최고기온이 33°C가 넘는 날로 선택하였으며, 사용된 기온자료는 기상청의 기상자료 개방포털(<https://data.kma.go.kr/cmnm/main.do>)에서 제공하는 종관기상관측자료(Automated Synoptic Observing System, ASOS)를 사용하였다. 같은 방법으로 산출한 30년(1991~2020년) 평균 전국 폭염 발생일인 10일과 비교하였을 때 2018년에는 매우 이례적으로 장기간 폭염이 관측되었으며, 2019년은 평년과 유사하고, 2020년은 상

대적으로 폭염일이 적다.

각 해의 폭염 사례의 특성을 파악하기 위하여 여름철 지위고도의 변화와 폭염조건에서의 종관장 분포를 분석하였다. Figure 1은 한반도 주변을 평균한 200 hPa 및 500 hPa 지위고도의 7~8월 기간 동안의 시계열과 폭염 기간에 한반도 주변 기압계 및 하층 바람장의 분포를 나타낸 것이다. 200 hPa 및 500 hPa 기압면은 티베트고기압과 북태평양고기압 분석의 기준 기압면으로, 일반적으로 티베트고기압은 200 hPa 기압면의 12,480 gpm 고도선과 그 경계가 일치하고, 북태평양고기압은 500 hPa 기압면의 5,880 gpm 고도선과 그 경계가 일치한다고 알려져 있다(KMA, 2019). 본 연구에서도 이 두 기준선을 바탕으로 두 고기압의 진행을 분석하였다.

2018년은 평년보다 빨리 장마가 종료되었으며, 7월 초반부터 중층과 상층 지위고도가 급격히 상승하였다. 우리나라는 7월 10일경 북태평양고기압과 티베트고기압의 영향권에 들어갔으며, 14일부터 전국적 폭염이 관측되었다. 이후 고기압의 지속적인 영향으로 8월 중순까지 공기 흐름이 장기간 정체되면서 이례적으로 길고 극심한 무더위가 나타났으며, 이러한 폭염은 8월 15일까지 지속되었다(Fig. 1a).

2019년에는 7월 중순부터 상층 지위고도가 빠르게 증가하여 19일에 티베트고기압이 한반도에 영향을 미치기 시작했다. 반면, 중층 지위고도는 비교적 서서히 증가하였으며, 한반도는 장마가 종료되는 7월 후반에서 북태평양고기압의 영향권 안에 들어섰다. 이후 8월 1일부터 5일간 전국적인 폭염이 관측되었다. 8월 중 나타나는 지위고도의 급격한 변화들은 기간 중 몇 차례의 태풍의 영향이 있었기 때문이다. 그러나 태풍으로 인해 하층에 따뜻하고 습한 바람이 유입되면서 8월 중반까지 간헐적으로 폭염이 발생하기도 하였다(Fig. 1c).

2020년은 폭염이 상대적으로 짧게 관측된 해이다. 이는 7월 북태평양고기압이 북쪽으로 충분히 확장하지 못하면서 우리나라 주변으로 기압골이 자주 내려왔기 때문으로 판단된다. 지위고도의 변화를 살펴보면 7월에 상층과 중층 고기압이 다른 해보다 느리게 성장하는데, 이는 여러 차례 기압골이 한반도를 지나가며 영향을 준 것으로 확인되었다. 8월에서야 한반도는 티베트고기압의 영향권 아래 들어왔으며, 장마전선의 늦은 북상으로 인해 8월 중순에서야 북태평양고기압 영향권 안에 들어왔다. 이후 두 고기압의 영향으로 맑은 날씨와 함께 일사량이 증가하여 기온이 상승하였고 폭염이 관측되었다. 전국적 폭염은 8월 18일부터 3일 동안과 25일에 관측되었다(Fig. 1e).

폭염 발생시의 한반도 주변의 기상조건을 확인하기 위하여 전국 발생 폭염일의 시작일로부터 3일간 평균한 종관장 분포를 함께 제시하였다. 제시한 것은 200 hPa

과 500 hPa 지위고도와 850 hPa 바람장이다. 3개의 사례 모두 티베트고기압과 북태평양고기압이 한반도에 자리잡고, 우리나라 남부지방에 기압경도가 0인 선이 지나가고 있음이 확인되었다. 이는 대류권 상층까지 키, 큰 고기압이 존재하고, 고기압의 중심이 우리나라 남부지방에 위치하고 있음을 보여준다. 850 hPa 바람장 분포에서는 서해상에서 남서 또는 남풍계열의 바람이 습하고 따뜻한 공기를 한반도에 공급하고 있는 것으로 보이는 반면, 내륙과 동안 지역은 상대적으로 바람이 약한 것으로 나타났다(Figs. 1b, d, and f).

폭염 사례별로 고기압의 확장 후퇴 시기 및 크기가 다르나, 공통적으로 폭염 시기에 하층부터 상층까지 키 큰 고기압이 자리잡고 있으며, 하층에 주로 남풍계열의 바람이 유입되고 있음을 알 수 있다.

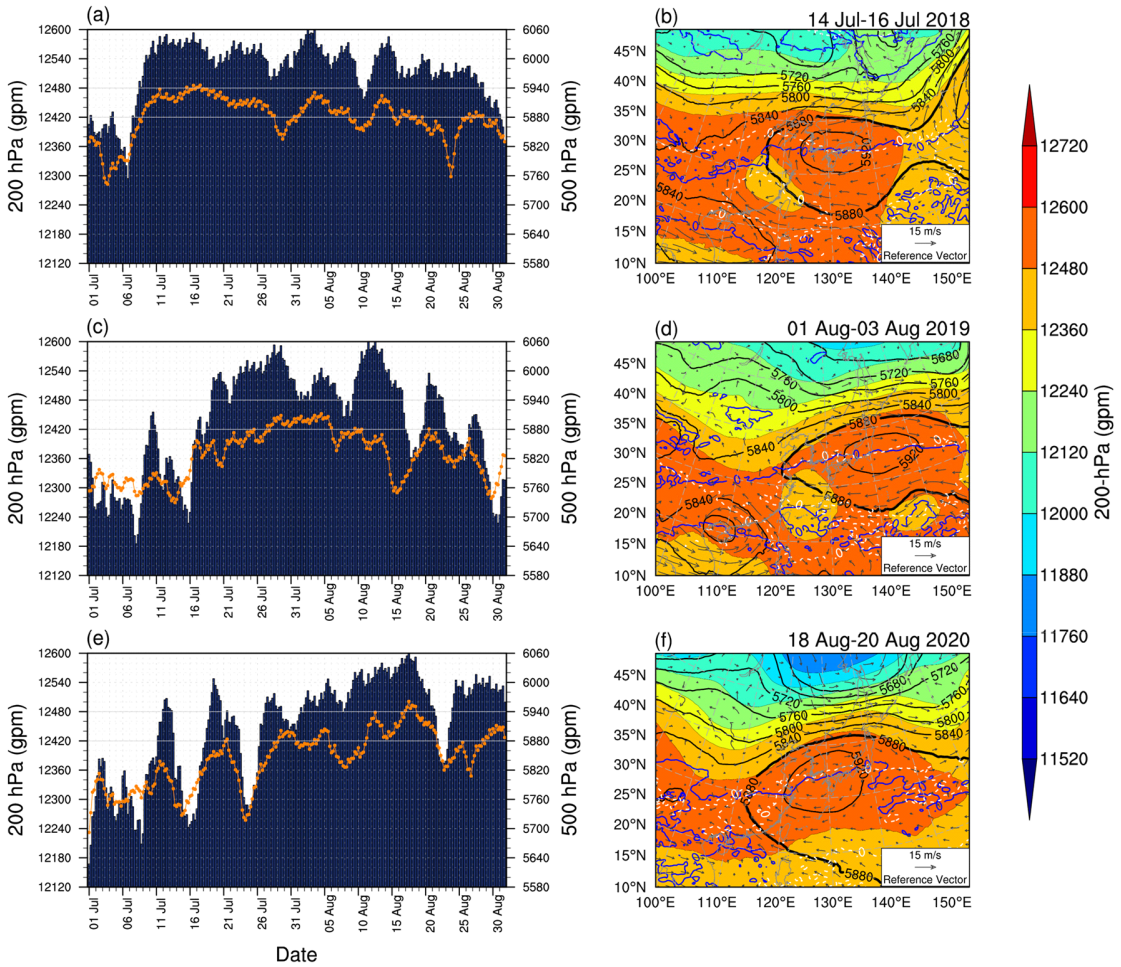
### 3. 실험 설계 및 분석 방법

#### 3.1 Korean Integrated Model (KIM)

KIM은 중기 현업 예측을 위해 개발된 한국형 전지구 수치예보시스템이다. KIM은 육면체구 및 하이브리드 시그마 연직격자 좌표계를 사용하고 있으며, 비정역학 역학코어(Choi and Hong, 2016)와 물리패키지가 결합된 예측모델과 자료동화를 위한 관측 전처리(Kang et al., 2018) 및 하이브리드 4차원 변분자료동화의 자료동화 체계를 갖춘 예측시스템이다(Hong et al., 2018). KIM의 물리과정에는 RRTMK (Rapid Radiative Transfer Model for GCMs revised for KIM) 복사 과정(Baek, 2017), 개선된 Noah 지면 모델(Koo et al., 2017) 및 해양혼합층 과정, 격자적응이 고려된 YSU (Yonsei University) 경계층 물리과정(Shin and Hong, 2015), 산악 및 비산악 중력과 과정(Choi and Hong, 2015; Koo et al., 2018), KSAS (KIM Simplified Arakawa-Shubert) 적운대류 과정(Han et al., 2020), GFS (Global Forecasting System) 얽은대류 과정, WSM5 (WRF Single-Moment 5-Class) 미세물리과정 및 구름예단과정(Park and Kwon, 2018)을 사용한다. 2019년에 완성된 KIM은 현업화 과정을 거쳐 현재 기상청 현업에 운영되고 있다.

#### 3.2 KIM 현업 예측

2020년 4월부터 기상청 현업에 적용된 KIM은 초기에 version 3.5에서 시작하여 현재 version 3.7까지 개선되어 운영 중이다. KIM의 해상도는 NE360L91로써, 수평해상도는 약 12 km이며, 연직해상도는 91층이다(KMA NMC, 2022). KIM 예측시스템은 6시간 간격으로 순환 예측하며, 매 0000, 1200 UTC에는 12일 예측을 수행한다. 지면 경계장은 GFS 지면분석장을 사용하고, 해수면 온도 및 해빙정보는 OSTIA (Operational Sea Surface



**Fig. 1.** (Left panel) Time series of 200 hPa (shading) and 500 hPa (orange line) geopotential height analysis averaged over the South Korean region (34–38.5°N, 126–129.5°E) during July–August in (a) 2018, (c) 2019, and (e) 2020. (Right panel) Horizontal distributions of 200 hPa (shading) and 500 hPa (black contour) geopotential height (m) with 850 hPa wind vectors ( $m s^{-1}$ ) over East Asia averaged during three heat wave days each year. The white (blue) line indicates zero gradient of 200 hPa (500 hPa) meridional gradient. Analysis is obtained from IFS.

Temperature and Sea Ice Analysis)로부터 제공된다. 본 연구에서는 KIM 현업에서 예측한 2020년 8월 한 달 기간에 대한 폭염 예측성을 평가하였으며, 해당 사례 기간의 KIM 버전은 version 3.5a이다. 현업에서 예측한 KIM 결과와 비순환 실험 결과를 구분하기 위해 현업에 쓰인 KIM을 KIM-OP로 하겠다.

### 3.3 비순환 예측 실험

KIM을 이용한 추가적인 사례 실험에서는 비순환 예측 체계를 이용하여 자료동화 없이 실험을 수행하였다. 사용한 버전은 KIM3.6으로 KIM3.5a에서 자료동화 부

분이 개선된 버전이며 비순환 체계 실험에서의 차이는 없다. 실험에 필요한 대기초기장은 유럽중기예보센터 (European Centre for Medium-range Weather Forecast, ECMWF)의 ERA5 재분석자료를 사용하였다. 지면분석장은 미 국립환경예측센터(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)에서 운영하는 전국예측모델 GFS의 분석장을 사용하였는데, 이는 KIM과 유사한 지면과정으로 설계되어 있어 예측 초기안정성에 적합한 선택으로 판단된다. 모델의 해상도는 NE360L91로 현업과 동일한 수평·연직 해상도를 사용하였다.

2018~2020년의 3년간 발생한 폭염 사례 중 2018년 7

월 15일, 2019년 8월 2일, 2020년 8월 19일 사례를 선정하여 실험하였다. 선정 기준은 전국형 폭염이 관측되기 시작한 날의 두 번째이다. 중기예측 성능을 평가하기 위하여 실험의 선행시간을 5일로 하였으며, 각 분석일의 120시간 이전인 2018년 7월 10일, 2019년 7월 28일, 2020년 8월 14일 0000 UTC를 초기장으로 하여 예측 실험을 수행하였다(Table 1). 현업 실험과의 구분을 위해 비순환 실험 모형을 KIM-cold, 2018~2020년 각 사례는 HW18, HW19, HW20이라 하겠다.

### 3.4 검증 자료 및 방법

KIM의 대기예측성 검증은 분석장을 기준으로 하였다. 사용한 자료는 ECMWF에서 제공하는 IFS (Integrated forecast system) 분석장이다. 사용된 IFS 분석장의 버전은 2018년과 2019년 여름철 기간에서 cy45r1이고, 2020년 여름철 기간에서 cy47r1이다(ECMWF, 2018; 2020). 자료의 해상도는 수평 0.25° × 0.25° 연직 25층이며, 1,000 hPa부터 1 hPa까지의 기압면 자료이다.

복사 및 구름 검증을 위해 CERES-SYN (Clouds and the Earth Radiant Energy System Synoptic) Edition 4.1A 일 평균 자료를 이용하였다. 해당 자료는 Terra, Aqua-MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), GEO (geostationary satellite) 위성 자료를 기반으로 만들어졌으며(Doelling et al., 2016; Kato et al., 2018), 수평해상도는 1° × 1°이고, CERES data 페이지(<https://ceres-tool.larc.nasa.gov/sv/ord-tool/jsp/SYN1degEd41Selection.jsp>)에서 수집할 수 있다. CERES 자료에는 복사 플럭스, 구름, 에어로졸과 관련된 변수들이 있으며, 본 연구에서는 지면복사플럭스(하향단파복사, 상향단파복사, 하향장파복사, 상향장파복사)와 전운량(total cloud cover)에 대해 분석하였다.

구름과 관련된 추가분석을 위해 ECMWF의 ERA5 재분석에서 산출된 구름물량(cloud liquid water content) 자료를 사용하였다. 이 자료는 2016년 ECMWF 현업에 사용되었던 IFS cy41r2를 바탕으로 4차원 변분자료동화를 적용하여 생산되며(Hersbach et al., 2020), 수평공간 해상도는 0.25° × 0.25°이고, CDS (Climate Data Store;

<https://cds.climate.copernicus.eu#!/home>)에서 수집 가능하다.

KIM 모델과 검증자료 간에 해상도 차이가 존재하므로 공간 및 시간에 대한 해상도 변환이 필요하다. 각 분석시 비교 자료의 해상도 즉 저해상도로 내삽을 수행하였고, 이 때 이중선형보간법(bilinear interpolation)을 사용하였다. 또한 복사량 비교에서는 관측과 동일하게 모델의 일복사를 산출하였다. KIM의 각 출력시간별 누적 복사량 산출물을 이용하여 해당일의 24시간 평균 일복사량을 계산하였다.

## 4. 2020년 KIM-OP 폭염 예측성

KIM-OP의 2020년 폭염 예측 성능을 종관장과 기상기온의 예측성의 두 측면으로 분석하였다. 2020년 폭염은 8월에만 발생하였으므로 본 분석은 8월에 국한하였다. Figure 2는 지위고도의 시간경도단면도(Hovmöller diagram)로 8월 한 달 동안 KIM-OP가 예측한 한반도 주변의 지위고도 변화를 IFS 분석장과 비교한 것이다. 남한지역의 지위고도 변화를 파악하기 위하여 위도 34~38.5°N를 평균하였으며, 경도 110~140°E 범위를 분석하였다. 남한의 육지지역은 약 125~130°E 범위 내에 위치한다.

IFS 분석장에서 볼 때 우리나라는 8월의 초반부터 티베트고기압의 영향권에 점차 들어옴을 알 수 있다. 8월 1일의 경우 티베트고기압의 가장자리가 130°E 부근까지 영향을 미치고 있으며, 이후 점차 동쪽으로 확장하면서 발달하였다. 티베트고기압이 더 강해짐에 따라 한반도 전 지역이 고기압권에 놓여 있으며, 이는 8월 20일경까지 유지되었다. 한반도 영역에서 고기압이 가장 강할 때는 17~18일 경으로 이 시기는 우리나라에 전국적인 폭염이 나타났을 때와 일치한다. 20일에는 서쪽의 기압골이 한반도를 지나가고, 26일에는 한반도 인근으로 북상한 8호 태풍 바비에 의해 북서쪽에 기압골의 남하하였다. 이는 8월 말 한반도 주변 상층 고기압 환경을 약하게 만들었다(Fig. 2a).

KIM-OP의 200 hPa 지위고도장을 예측 +3일, +5일,

**Table 1.** Selected heat waves date and experiment setup.

	Initial time	Target time	Forecast length (h)	Initial condition	Resolution	
					Horizontal	Vertical
HW18	10 Jul 2018	15 Jul 2018		ERA5 (atm) + GFS (sfc)	NE360NP3 (12 km)	L91
HW19	28 Jul 2019	2 Aug 2019	240			
HW20	14 Aug 2020	19 Aug 2020				

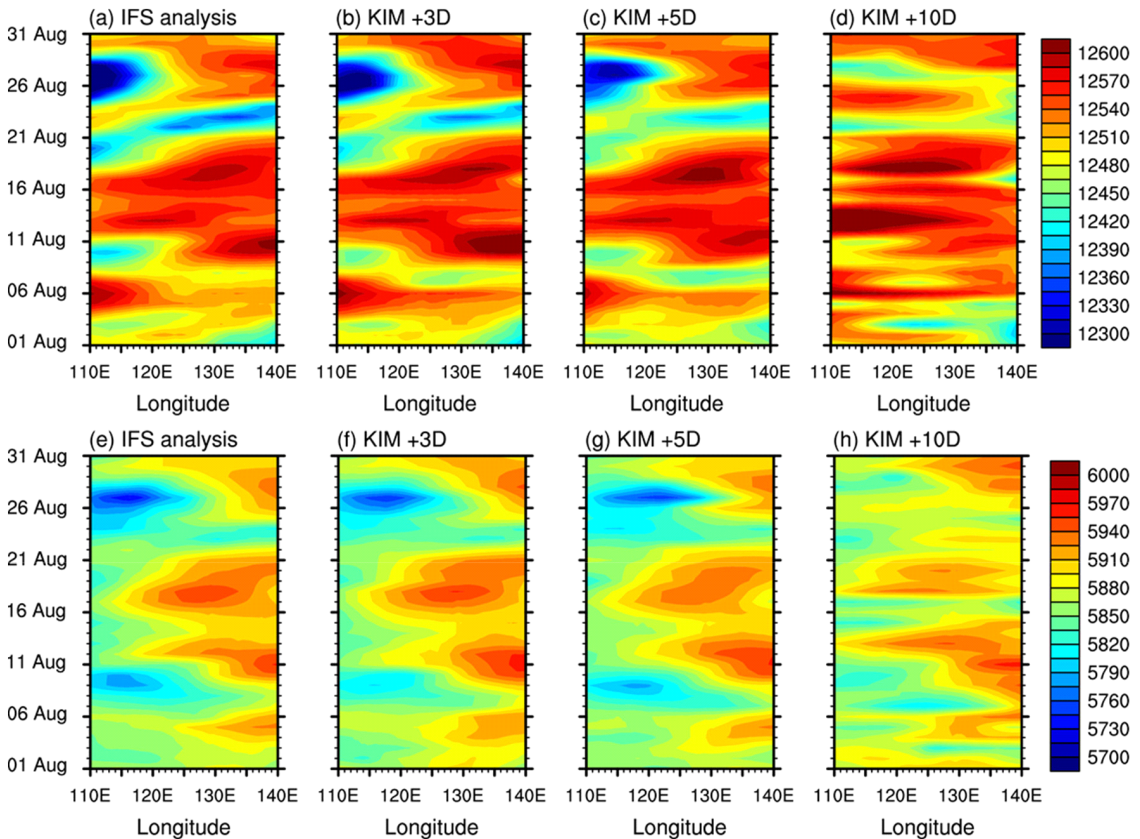


+10일에 대하여 각각 IFS 분석과 비교하였다(Figs. 2b-d). 3일과 5일의 예측장에서는 한반도에 영향을 미치는 티베트고기압의 확장과 후퇴 시점이 분석장과 거의 유사하며, 저기압 및 기압골의 이동도 대체로 유사하게 모의하고 있다(Figs. 2b, c). 3일 예측의 경우, 분석장에 비해 지위고도를 더 높게 모의하는 경향이 있으며, 이러한 경향은 5일 예측에서 더 심화되는 것으로 나타났다. 반면 10일 예측의 경우 분석장과 다른 양상을 띄며, 기압 분포가 동서 방향으로 늘어진 형태를 갖는 것으로 확인되었다(Fig. 2d).

IFS 분석장의 500 hPa 지위고도의 시간경도단면도에서 5,880 gpm 기준으로 북태평양고기압의 확장과 후퇴를 확인하였을 때 한반도가 북태평양고기압 영향권 안에 놓인 것은 8월 중순경이다. 8월 초 서쪽으로 확장하며 발달하던 북태평양고기압은 한반도 주변에 위치한 기압골과 5호 태풍 장미의 영향으로 축소되었고, 12일에서야 한반도까지 확장하였다. 이후 북태평양고기압은

더욱 발달하여 한반도 영역에서 17~18일에 가장 강하게 나타났다. 이 시기는 티베트고기압이 강하게 나타난 기간과 동일하며, 대류권 하층부터 상층까지 큰 고기압이 한반도 상공에 존재하였다. 8월 후반에는 한반도 서쪽에서 발달한 기압골과 태풍의 영향으로 한반도 주변 기압이 낮게 나타났고, 북태평양고기압은 동쪽으로 후퇴하였다(Fig. 2e).

200 hPa과 마찬가지로 500 hPa 지위고도에서도 KIM-OP의 3일과 5일 예측장은 분석장과 유사하게 나타났으며, 10일 예측장에서 차이를 보였다. 즉 3일과 5일 예측장에서 북태평양고기압의 확장과 후퇴시기가 분석장과 유사하였고, 공간 규모도 잘 모의하였다. 고기압의 강도는 분석장에 비해 약하게 모의하였으나, 고기압이 가장 강하게 나타난 시기는 분석장과 일치하였다. 반면 10일 예측장은 동서방향으로 기압패턴이 길게 나타났고, 기압골과 태풍시기의 기압장을 잘 모의하지 못했다(Figs. 2f-h).



**Fig. 2.** Hovmöller plots of 200 hPa (top) and 500 hPa (bottom) geopotential height (m) in IFS analysis, and KIM-OP +3, 5, 10 days predictions averaged over the South Korea domain (34–38.5°N).

전반적으로 KIM-OP의 여름철 고기압 모의 성능은 5일 예측까지 IFS 분석장과 유사하다고 판단된다. 두 주요 고기압의 확장과 후퇴 양상을 분석장과 유사하게 모의하고 있으며, 두 고기압의 최성기 시기가 일치하고, 한반도 상공에서 대류권 상층까지 나타나는 키 큰 고기압을 적절히 잘 모의한다. 한편, 고기압의 강도 예측에서는 예측시간이 길어질수록 200 hPa에서는 강하고, 500 hPa에서는 약하게 모의하는 경향이 있다.

Figure 3은 KIM-OP에서 예측한 한반도 영역 평균의 지상 최고 기온과 IFS 분석장을 비교한 시계열이다. 여기서 최고기온은 모델의 출력 시간 간격을 고려하여 0600 UTC (1500 KST) 기온으로 분석하였다. 평균 영역은 34~38.5°N, 126~129.5°E이며, 육지만을 고려하였다. IFS 분석을 살펴보면, 2020년 8월 기온은 1일부터 7일까지 기온이 감소하여 8일 24°C의 최저값을 기록한 후 다시 급격히 기온이 증가하였다. 8월 10일부터 20일까지는 지속적인 기온 상승을 보였고, 이 기간 중 8월 18~20일에는 폭염기준을 넘는 무더위가 발생하였다. 강수로 인해 22일에 낮은 기온이 관측되었으나, 이후 기온이 상승하여 8월 25일에 다시 한번 폭염이 발생하였다. KIM-OP의 3, 5, 10일 예측은 전반적으로 IFS 분석에서 보인 8월 기온의 증감 양상을 잘 보여주었다. 그러나 기온이 서서히 증가하는 시점을 지나 급격히 상승하는 8월 중반의 기온을 뚜렷히 과소모의하는 특성이 있는 것으로 나타났다. 이러한 과소모의 특징은 특히 폭염 기간에 두드러지며(음영), 18~20일 최고기온 계통오차는 3일 예측의 경우 약 -1.5°C 수준으로 나타났으며, 5일과

10일 예측에서 더 크게 나타났다. 8월 전반에 걸쳐 모델이 예측한 기온의 일별 변동폭은 IFS 분석에 비해 크고, 특히 예측시간이 길어질수록 이러한 경향이 증가하는 것으로 보이나, 폭염기간 중에는 각 일의 한랭오차가 일관적으로 나타났다.

폭염 발생기간의 지위고도와 기온의 예측성을 정량적으로 평가하기 위하여 8월 한 달(All, 총 31일) 동안 폭염이 발생한 날짜(HW, 총 4일)와 그렇지 않은 날짜(Non-HW, 총 27일)로 구분하여 오차를 비교하였다. Figure 4는 0600 UTC (15 KST) 기준 예측시간별 200 hPa와 500 hPa 지위고도와 최고기온의 평균 편차(Bias)와 평균제곱근오차(Root Mean Standard Error, RMSE)를 나타낸 것이다. 평균 영역은 앞선 기온 시계열 분석(Fig. 3)과 동일하다.

우선 KIM-OP의 지위고도 예측 특성을 예측시간별 Bias를 통해 파악하였다. 200 hPa 지위고도의 예측시간별 Bias를 살펴보면, KIM-OP는 한반도 영역의 지위고도를 과대모의하는 특성을 보이며, 이러한 특성은 예측시간 전반에 걸쳐 나타났다. 과대모의 특성은 예측 5일 이내에서 All, Non-HW, HW 모두 10 m 이내 정도로 나타났으며, 이때 HW 편차가 가장 작았다. 예측시간 5일 이후부터는 All과 Non-HW에 비해 HW 사례에서 상대적으로 뚜렷한 양의 편차를 보이는 것이 확인되었다(Fig. 4a). 한편 500 hPa 지위고도에서는 All 및 Non-HW와 HW의 예측 편차가 반대의 양상이 나타났다. All과 Non-HW의 경우에는 예측시간 전반적으로 양의 편차를 보이며, 지위고도를 과대모의 하는 특성을 갖는 반면,

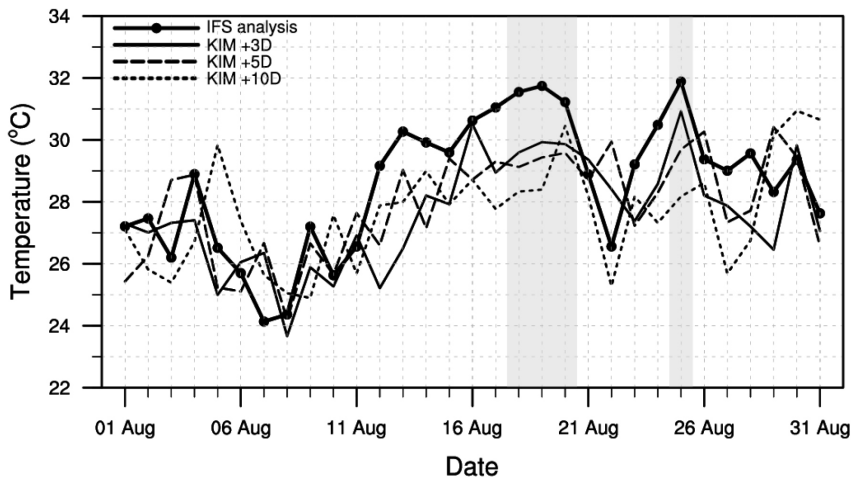
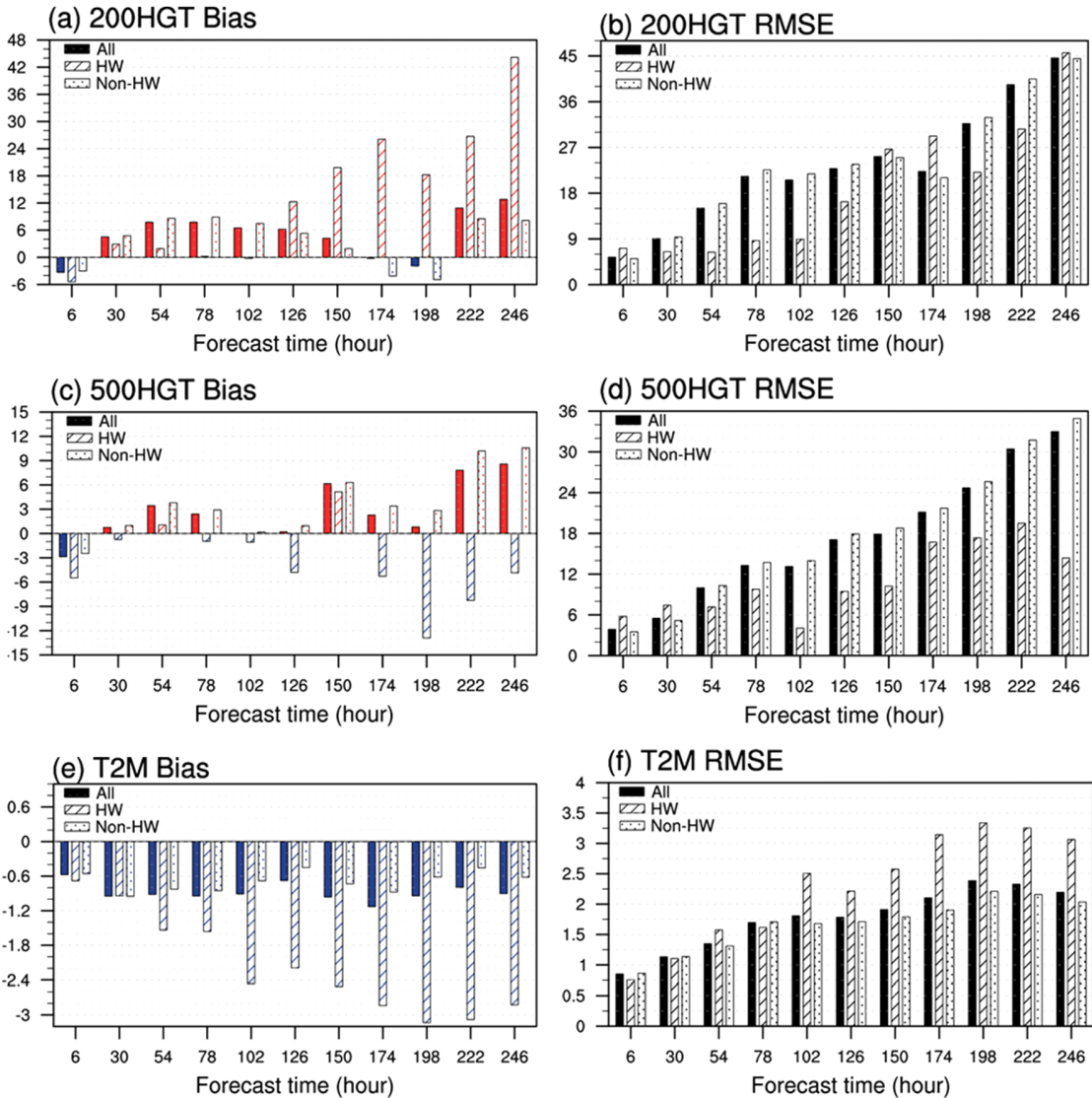


Fig. 3. Time series of maximum temperature (°C) at the surface level in 3, 5, 10-day predictions by KIM-OP and IFS analysis averaged over the South Korea in August 2020. Gray shading represents the heat wave period according to ASOS observation. Here, surface temperature at 0600 UTC (1500 KST) are regarded as the maximum temperature.

HW의 경우에는 과소모의하는 특성을 보여주었다(Fig. 4c). 전반적으로 지위고도의 편차는 예측 5일 이내에서 적은 수준을 보였으며, 예측 5일 이후에 두드러짐을 알 수 있다.

지위고도의 예측 오차의 크기는 RMSE 비교를 통해 파악할 수 있다. 200 hPa와 500 hPa 지위고도 오차는 예측시간이 길어질수록 증가하는 특성이 나타난다. 그러나 All과 Non-HW의 오차에 비해 HW의 오차가 전 예측

시간에 걸쳐 가장 적은 것을 알 수 있다. 특히 예측 5일 이내에서 HW의 RMSE는 예측시간이 길어지더라도 거의 증가하지 않았다. 200 hPa 지위고도의 경우 예측 3일째(54 h 예측) HW의 RMSE는 Non-HW의 40% 수준이었고, 5일 예측에서(102 h 예측) HW의 RMSE는 Non-HW의 41% 수준을 보였다(Fig. 4b). 500 hPa 지위고도의 경우, Non-HW와 비교하여 HW의 RMSE는 예측 3일째 69%, 예측 5일째 29% 수준이었다(Fig. 4d).



**Fig. 4.** Forecast bias (left) and RMSE (right) in 200 hPa and 500 hPa geopotential height, and surface maximum temperature with forecast lead times averaged for heat wave days (HW), Non-heat wave days (Non-HW), and in August 2020 (All). Number of heat wave and Non-heat wave days are 4 and 27 days.



KIM-OP의 지상기온에 대해서는 모든 예측시간에 대해 한랭오차가 확인되었는데, 8월 한 달 평균 약  $-0.6^{\circ}\text{C}$ 에서  $-1.2^{\circ}\text{C}$  수준의 한랭오차가 있는 것으로 나타났다. 그러나 HW 기간에 대한 한랭오차는 예측 1일째부터(6 h 예측) 약  $-0.6^{\circ}\text{C}$  수준으로 출발하여 예측 3일은  $-1.5^{\circ}\text{C}$  이상, 그리고 예측 8일 이상에서는 약  $-3^{\circ}\text{C}$  수준으로 점점 증가하는 경향이 나타났다(Fig. 4e). 또한 기온의 RMSE는 5일 예측부터 HW의 오차가 All과 Non-HW의 오차보다 더 크고 뚜렷하게 나타났다(Fig. 4f). 즉, 폭염 기간에 한랭오차는 일반적인 여름철 계통오차에 비해 더 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

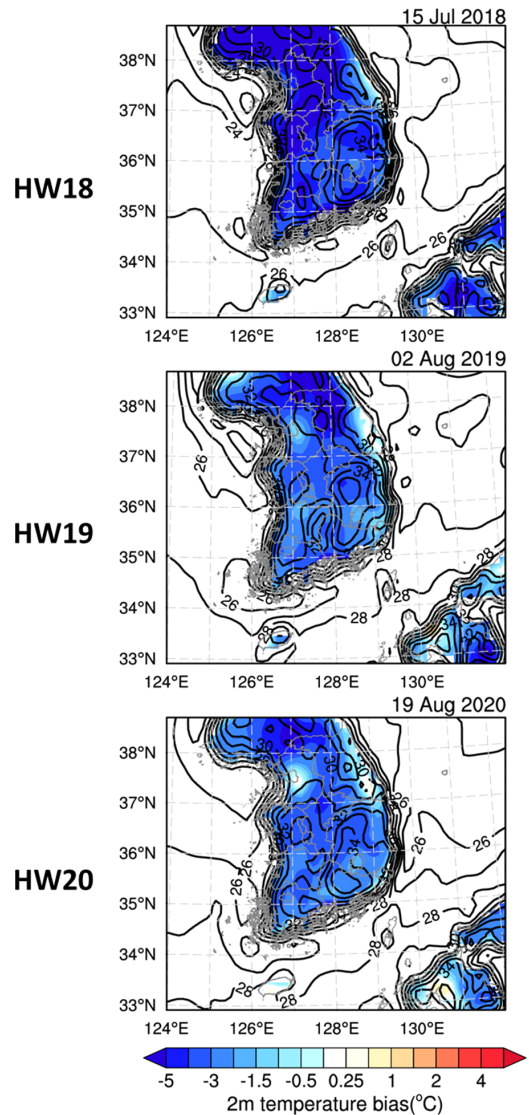
지금까지 우리나라 영역에서 KIM-OP의 2020년 폭염 예측 특성을 지위고도와 기온의 예측성으로 분석하였다. 폭염에 영향을 미치는 주요 기압계의 모의에 있어서는 KIM-OP의 5일 이내의 예측에서는 우수하게 예측하였으며, 예측 후반에서는 티베트고기압을 다소 강하게, 북태평양고기압을 약하게 모의하는 경향이 확인되었다. 한편, 예측시간 5일 이내에서 지위고도의 예측성이 높음에도 불구하고, KIM-OP의 기온 예측 특성은 전반적으로 과소모의가 나타났으며, 폭염 발생시 한랭오차는 더 두드러졌다. 이는 고기압 환경의 예측 정확성 이외에도 기온 예측성에 영향을 주는 다른 요인이 있음을 나타낸다.

## 5. KIM 폭염 예측의 한랭오차 원인 분석

### 5.1 2018~2020년 폭염 사례에 대한 KIM 예측 검증

2020년 폭염 사례에서 나타난 KIM-OP의 한랭오차 원인을 파악하기 위해서, 관련된 다양한 예측 및 진단 변수의 모의 특성을 분석하였다. 현업에서는 예측에 필수적인 변수만을 산출하므로 본 연구에서는 이러한 분석을 위해 폭염 사례의 예측 실험을 재수행하였으며, 이때 필요한 초기장은 ERA5 재분석으로부터 제공함으로써 비순환 예측 실험(KIM-cold)을 진행하였다. 폭염 사례의 계통적 예측 오차 및 관련 요인을 확인하기 위하여 2018년과 2019년의 사례를 추가하여 총 3년의 폭염 사례를 분석하였다. 각 사례 및 실험 설계에 대한 정의는 2~3장에 기술하였다.

Figure 5는 각 사례별 한반도 지역에서 예측된 폭염 최고기온에 대한 예측 오차의 수평 분포로 IFS 분석장 대비 편차를 나타내며 육지만을 제시하였다. 그림에서 실선은 최고기온에 대한 IFS 분석값으로 세 폭염 사례 모두 해당 일자에서 남부지방을 중심으로 한 전국적 폭염이 나타나고 있음을 알 수 있다. 모든 폭염 사례의 KIM-cold 예측은 뚜렷한 한랭오차를 보여준다. 이러한 한랭오차는 육지지역 전반에 걸쳐 나타나며, 한반도뿐만 아니라, 일본 규슈 지역에서도 확인된다. 각 사례별 폭염 예측 오차의 정도는 다소 차이가 있었는데, 가장 폭



**Fig. 5.** The horizontal distributions of maximum surface temperature biases ( $^{\circ}\text{C}$ , shading) against IFS analysis for HW18 (top), HW19 (middle), and HW20 (bottom). The contour lines represent the value of IFS analysis.

염이 강했던 HW18 사례의 경우, 전국 평균 약  $-4.3^{\circ}\text{C}$  수준의 한랭오차가 나타났다. HW18보다는 폭염의 강도가 약했던 HW19와 HW20의 경우는 각각  $-3.0^{\circ}\text{C}$ ,  $-2.8^{\circ}\text{C}$  수준의 한랭오차를 보였다. KIM-OP의 경우, 2020년 사례에서 동일시점에 예측한 기온 편차  $-2.1^{\circ}\text{C}$ 로 나타났다. 이는 순환실험인 KIM-OP의 초기장과 KIM-cold 비순환 실험의 초기장(ERA5)의 차이에 기인

한다. 한편, HW19와 HW20 사례에서 공통적으로 수도권 지역에서 한랭오차가 작게 나타난 것은 모델에서 도심지 피복에 대한 지면 반응이 상이하기 때문으로 여겨진다. 추가적인 분석을 통해 해당지역의 현열이 매우 크게 모의된 것을 확인하였다.

## 5.2 폭염 강도 과소모의와 관련한 요인 분석

폭염 기간 두드러지는 지상기온 과소모의의 원인을 파악하기 위해, 주요 관련 요인들을 분석하였다. 먼저 북태평양고기압과 티베트고기압의 예측성을 확인했을 때, 모든 사례에서 한반도 주변의 기압장의 예측성은 양호하였으며, 폭염 사례 시점에서 한반도에 자리잡은 북태평양고기압과 티베트고기압을 관측과 유사하게 모의하고 있음을 확인하였다. HW20 사례에서는 분석 대비 고기압이 다소 강하게 모의되는 양상이 있었으나, 그 차이는 크지 않았다. 또한 기상청에서 제공하는 AWS (Automatic Weather Station) 관측을 이용한 강수지도를 통해 각 폭염 사례 해당일에는 강수가 없음을 확인하였다. 이와 달리 모델에서는 지역적으로 약한 강수를 모의한 것이 확인되었는데, 이는 주로 경기 및 전라북도에서 나타났으며, 1 mm 이내 수준이었다(그림 생략). 강수 모의는 지면 조건에 영향을 주는데, 지표면 에너지 균형을 이루며, 지표온도 및 플럭스를 통해 대기 온도 모의에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 이에 지면의 습윤 조건을 확인하기 위하여 지표면 현열과 잠열의 비로 정의되는 보웬비(Bowen ratio)를 분석장과 비교하였다. 그 결과, 약한 강수 현상을 모의했음에도 불구하고, KIM-cold의 지면조건에서는 IFS 분석보다 건조한 특성이 확인되었고, 따라서 KIM-cold의 지면 모의 특성은 한랭오차의 직접적인 원인이 아닌 것으로 생각된다.

지상기온 과소모의와 관련된 또다른 요인으로 구름과 지면에 도달하는 복사 모의 특성을 분석하였다. Figure 6은 CERES 관측에 대비한 KIM-cold의 하향단파복사(downward shortwave radiation)와 전운량(total cloud cover)의 예측 편차를 나타낸 것이다. 각 그림에서 실선은 CERES의 관측값이다. KIM-cold가 예측한 하향단파복사 편차 분포(음영)에서는 한반도 남서해상부터 한반도에 걸쳐 과소모의가 확인된다. 이와 달리 발해만 북쪽과 중국 지역에서는 과대모의가 나타난다. 이러한 복사의 예측 편차는 구름 모의 특성과 관련이 깊은 것으로 보인다. 관측에서 한반도는 고기압 영역 내에 속해 있으며, 주변보다 구름이 적게 나타났지만, KIM-cold에서는 한반도 및 주변 해상에서 구름의 과대모의가 나타났다. 한편, 구름 과대모의와 복사의 과소모의의 정도는 각 사례별로 상이하지만 구름의 과대모의 및 복사 과소모의 경향은 공간적으로 일치하게 나타났다. HW18 사례의 경우, 남한 지역 육상을 기준으로 약 50% 이상의

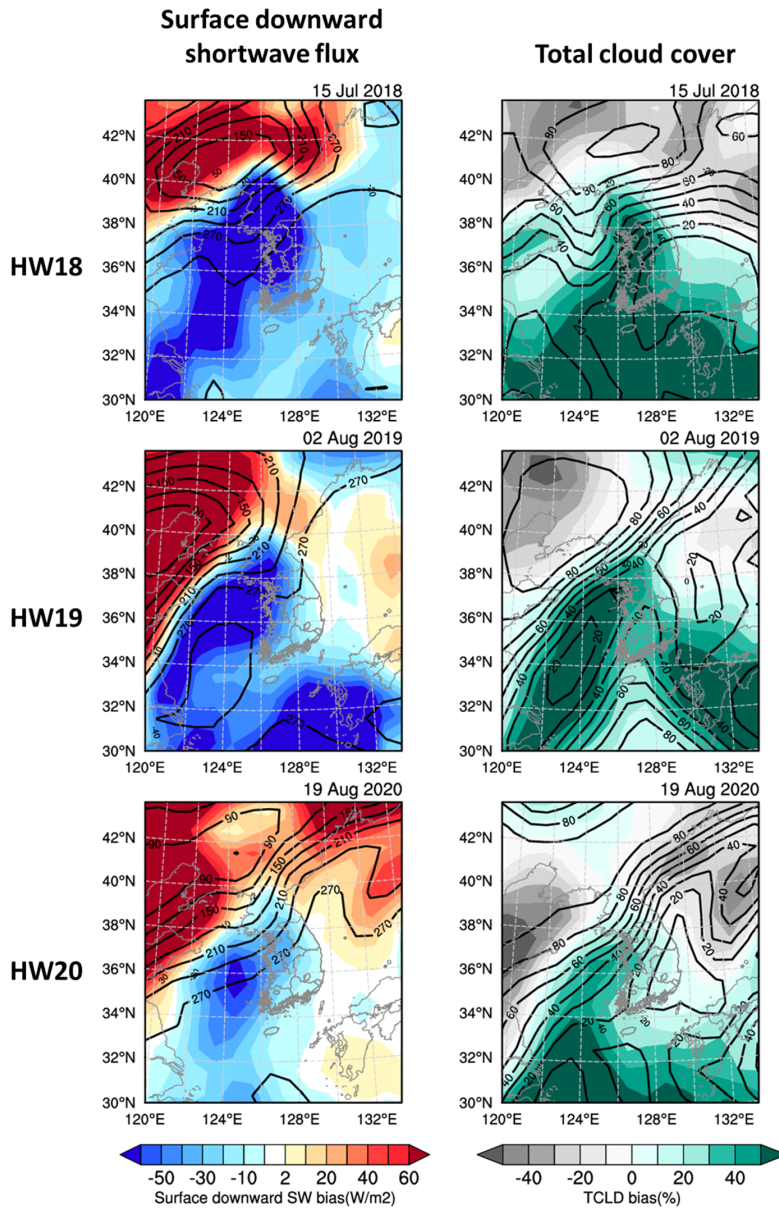
구름 과대모의와  $60 \text{ W m}^{-2}$ 의 복사 과소모의가 나타났으며, HW19에서는 약 30% 이상의 구름 과대모의와 약  $30 \text{ W m}^{-2}$  이상 하향단파복사를 과소모의하였다. HW20은 최소 5% 이상 구름을 더 많이 모의하고, 약  $20 \text{ W m}^{-2}$  이상 하향단파복사가 적게 들어오는 것으로 확인되었다. 이렇게 각 사례에서 서해안을 중심으로 한반도에 존재하는 구름 과대모의는 KIM-OP의 2020년 사례에서도 나타남을 확인하였고, 이는 폭염 환경에 대한 KIM 모의에서 계통적으로 나타나는 특징인 것으로 판단된다.

## 5.3 구름 과대모의 원인 및 하층 조건 분석

모델의 구름 과대모의의 원인을 진단하기 위하여 우리나라 주변에 모의된 구름의 공간적 구조와 시간변화 양상을 파악하고 발생 조건을 분석하였다. 이 분석에는 모델이 예측한 구름수분함량(cloud liquid water content; 이후 구름물량으로 표기)을 사용하였다. 구름물량은 모델의 강수물리과정을 통해 예단되는 대기 수상체 중 하나인 응결물의 양이며, 구름, 특히 중·하층운의 3차원 분포 파악이 가능하다. IFS 분석장에서는 해당 변수가 생산되지 않으므로 ERA5 재분석 자료와 비교 분석하였다.

Figure 7은 KIM-cold의 2020년 8월 폭염 실험(HW20)에서 나타난 구름물량과 동서 바람의 동-서 방향 단면도를 ERA5와 비교한 것으로  $34\sim 38.5^\circ\text{N}$ 의 평균이다. 매 6시간 간격으로 서해상과 한반도 육지 영역에 걸쳐 구름과 동-서 바람장의 연직 분포를 보여주고 있다. 한반도는 약  $126\sim 129.5^\circ\text{E}$ 에 위치하며, 그 외 지역은 해상이다. ERA5 재분석의 경우, 1200 UTC (2100 KST)에는 서해상에 구름이 거의 존재하지 않으며, 1800 UTC (0300 KST)에 육지의 지상부근에 복사안개로 보이는 구름층과 해상의 약한 구름층을 모의한다. 이후 오전 및 주간에 걸쳐 상층으로 확산되어 사라지는 양상을 띈다. 이는 야간의 지면 냉각에 의해 인접 대기가 포화되면서 안개 또는 하층운이 형성되었다가 지면 가열에 의한 경계층 발달에 따라 확산되는 것으로, 습한 여름철에 빈번하게 나타나는 현상이다.

KIM-cold의 구름 모의는 재분석과 차이를 보인다. 가장 큰 차이는 야간 시각(1200, 1800 UTC)에 해상을 중심으로 구름층을 모의하고 있다는 점으로, 이 구름층은 약 950 hPa 고도를 중심으로 해상 전반에 걸쳐 나타나고 있다. 이후 1800 UTC에는 해상의 구름물량은 증가하였고, 고도는 낮게 위치하고 있으며, 육상에서 구름층이 모의되기 시작하여 경도  $124\sim 129^\circ\text{E}$ 에 걸쳐 해상과 육상에 연결된 넓은 구름 영역이 나타난다. 이때 육상의 구름층은 연직으로 확장된 모습으로 약 900 hPa까지 나타나는데, 재분석에서 구름물량의 최댓값이 지면에 인접하여 나타남과 달리 모델의 구름은 950 hPa 부근에 집중된 형태를 띄고 있다. 이로부터 KIM-cold에서 모의

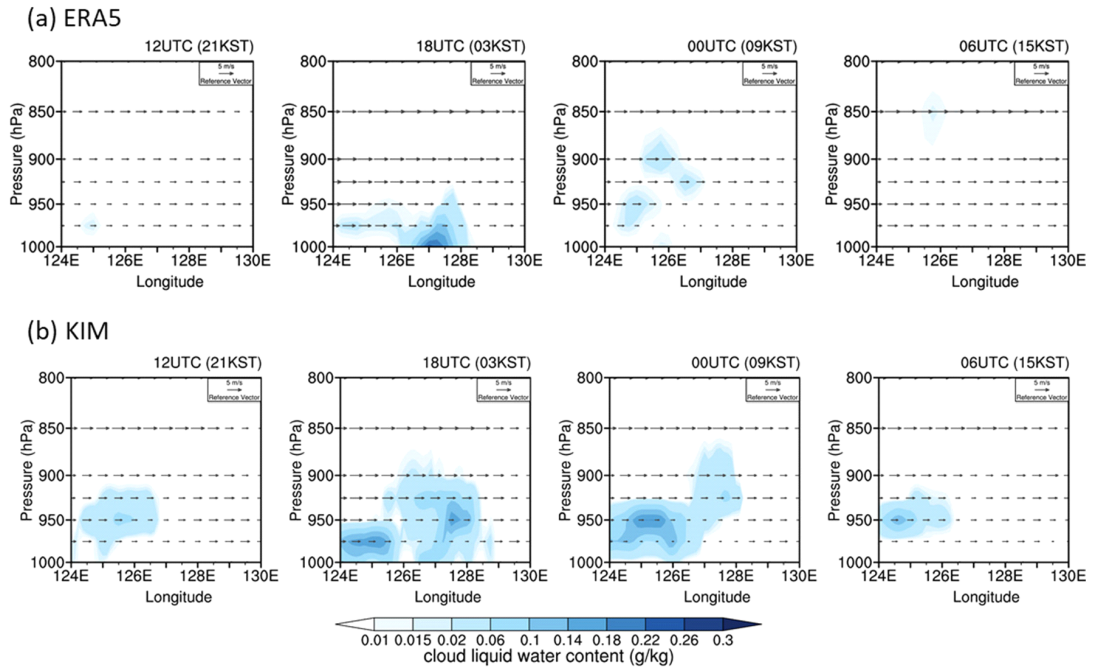


**Fig. 6.** The horizontal distributions of KIM biases in downward surface shortwave radiation flux (left,  $W\ m^{-2}$ ) and total cloud cover (right, %) against CERES observations. The contour lines represent the observations.

한 육상의 구름이 전형적인 복사안개의 특징을 보이지 않으며, 해상에서 유입된 구름일 가능성이 있음을 알 수 있다. 또한 동-서 바람의 연직구조로부터 해당 지역이 서풍 계열의 바람에 영향을 받고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 해상의 안개가 육상으로 유입되는 조건에 부합한다. 오전 0000 UTC (0900 KST)에 모의에서는 전시간

에 비해 상층으로 확산된 양상을 보이지만, 야간에 생성된 구름이 충분히 사라지지 못하고 서해상과 육지 모두 과대모의되고 있다. 이후 0600 UTC (1500 KST)까지 서해상에 구름이 남아 있음을 알 수 있다.

모델에서 나타난 구름 과대모의의 원인을 파악하고자 구름 발생 환경 조건을 분석하였다. Figures 8, 9는 HW20



**Fig. 7.** Height-longitude cross sections of meridional mean (averaged over 34–38.5°N) cloud liquid water content (shading,  $\text{g kg}^{-1}$ ) and u wind (vector) of (a) ERA5 analysis and (b) KIM-cold simulation from 1200 UTC 18 August to 0600 UTC 19 August 2020 in 6 hourly intervals.

사례에서 구름이 과대모의되었던 지역 중 해상 위의 한 지점(37°N, 125°E)과 육상 위의 한 지점(37°N, 127°E)의 비습, 기온 및 이슬점 온도의 연직 프로파일이다. 환경 조건과 함께 모델이 모의한 복사물리 및 미세물리의 가열을 또는 기온 변화율(temperature tendency)과 구름양 (cloud fraction)을 제시하였다. 이러한 분석을 통해 하층 운 또는 안개 형성 과정에서의 각 물리과정의 반응과 모델의 모의 특성을 확인할 수 있다(Lee et al., 2021).

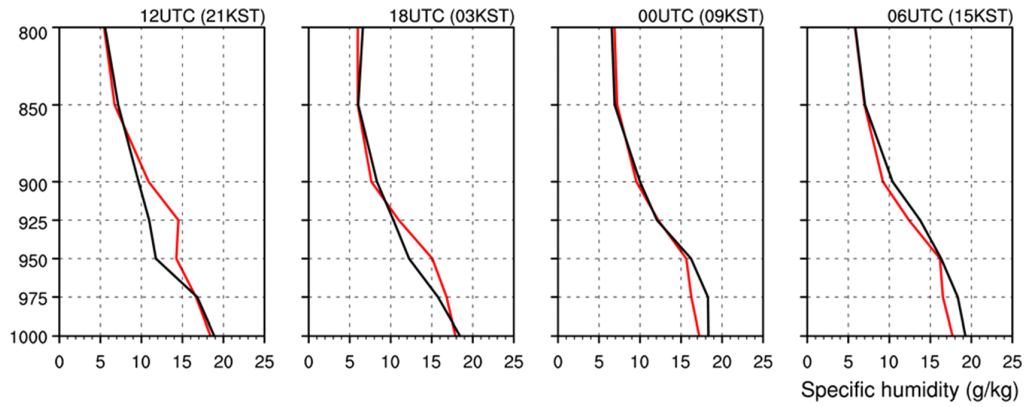
먼저 해상에서의 대기조건을 살펴보면, 재분석장에서 나타나는 비습의 연직 구조는 대체로 지면으로부터 상층으로 일정하게 감소하는 특성을 보여주고 있으며, 0000 UTC에는 지면 근처에 나타나는 비습의 혼합층 구조를 보여준다. 반면 KIM-cold는 야간 1200 UTC와 1800 UTC의 경우 하층에 비습을 과대모의하는 경향을 보이는데, 약 900 hPa 이하에서 습기가 확산되지 못하고 쌓인 구조를 모의한다(Fig. 8a). 이러한 하층 대기의 습한 조건은 대기의 포화조건에 영향을 주므로 모델은 전반적으로 재분석장에 비해 높은 포화층을 모의하는 것으로 나타난다(Fig. 8b). 재분석장에서 야간의 해면 근처, 오전 시각 975 hPa 부근까지 포화조건을 만족하는 것과 달리, 모델이 모의한 포화층의 두께는 1200 UTC의 경우 지면부터 975 hPa, 1800 UTC의 경우 약 950

hPa까지 두껍게 나타난다. 특징적인 것은 포화조건 형성에 있어서 비습의 과대모의와 함께 기온의 과소모의가 나타난다는 점이다. 모델은 재분석에 비해 하층 기온의 냉각 편차를 가지는 것으로 나타나며, 이는 해상에 존재하는 구름층의 상부에서 나타나는 적외 복사 냉각 효과 때문으로 판단된다. 이는 하층의 구름양 구조와 이에 상응하는 복사물리의 음의 기온 변화율 구조에서 확인할 수 있다(Fig. 8c). 즉, 해상의 습윤 조건은 모델의 구름 과대모의의 한 원인으로 볼 수 있으며, 하층운 과대모의에 따른 복사 냉각 반응은 포화조건 강화함으로써 구름을 지속시키는 효과를 준다.

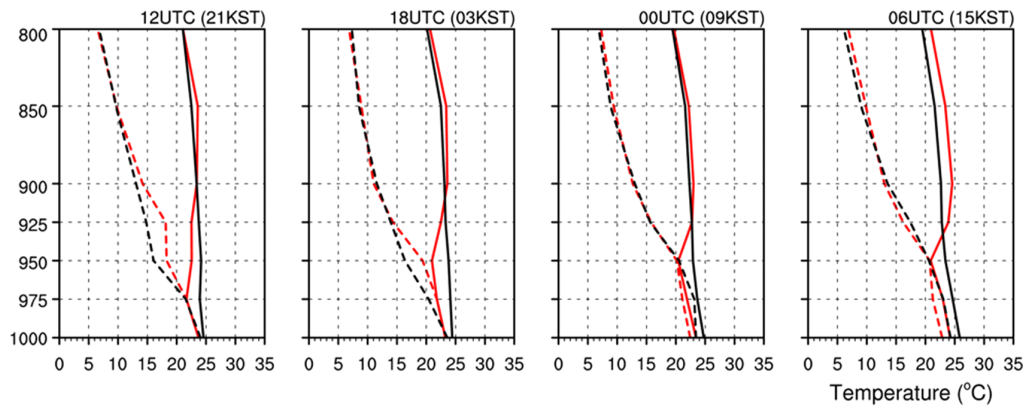
육상의 경우, 해상에 비해 비습의 과대모의 경향은 크지 않으나, 0000 UTC와 1800 UTC 사이에는 국지적인 과대모의가 확인되며, 이는 지면에서 떨어진 고도에서 나타난다(Fig. 9a). 비습 과대모의의 시점과 고도는 포화조건과 대체로 일치하는데, 이는 재분석에서 1800 UTC의 지면 근처에서만 포화조건을 모의하는 것과 대조적이다. 또한 해상에서와 마찬가지로 포화영역에서는 공통적으로 기온의 과소모의가 나타나고 있다. 전체적으로 육상에서의 포화조건 형성에는 습기의 과대모의보다는 기온 과소모의의 영향이 큰 것으로 보인다(Fig. 9b). 육상에서의 기온 과소모의는 해상에서와 마찬가지로



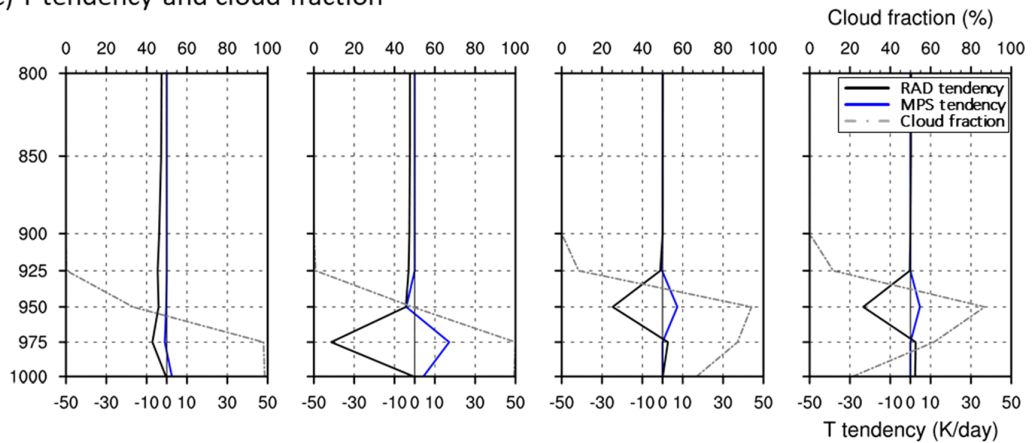
(a) Specific humidity



(b) Temperature



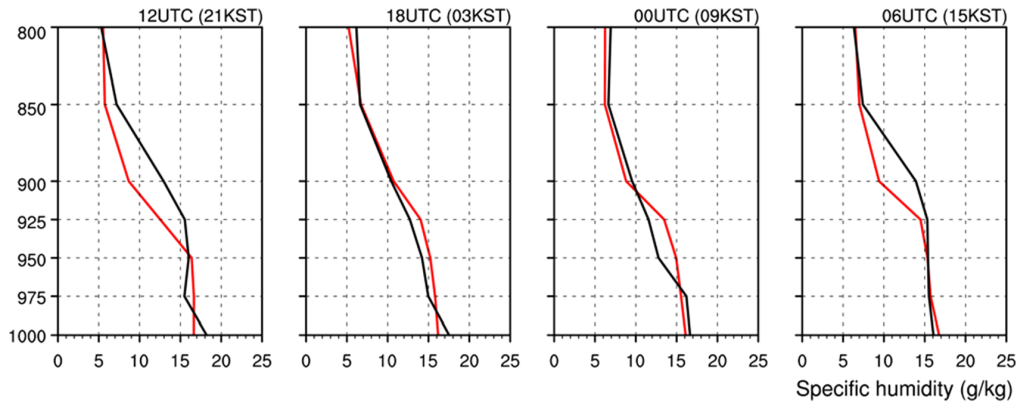
(c) T tendency and cloud fraction



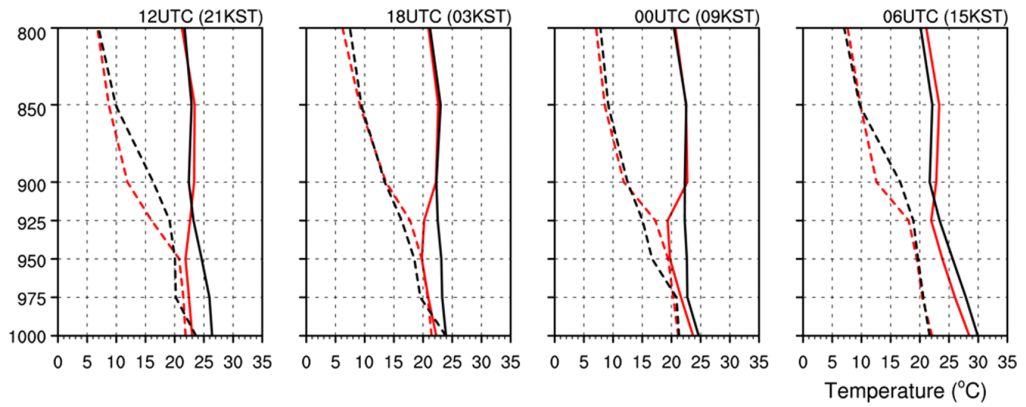
**Fig. 8.** The vertical profiles of (a) specific humidity ( $\text{g kg}^{-1}$ ), (b) dew point temperature (dashed,  $^{\circ}\text{C}$ ) and air temperature (solid,  $^{\circ}\text{C}$ ) of the KIM (red) and ERA5 analysis (black) and (c) the physics tendencies of temperature (black and blue,  $\text{K day}^{-1}$ ) and cloud fraction (gray, %) at the point in the Yellow sea ( $37^{\circ}\text{N}$ ,  $125^{\circ}\text{E}$ ) from 1200 UTC 18 August to 0600 UTC 19 August 2020 in 6 hourly intervals.



(a) Specific humidity



(b) Temperature



(c) T tendency and cloud fraction

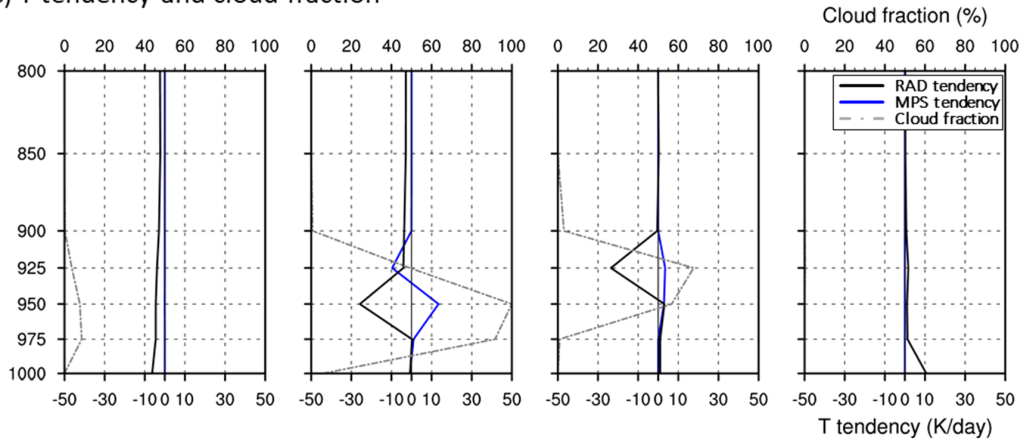


Fig. 9. The same as Fig. 8 except for the point in the Korean Peninsula (37°N, 127°E).

구름 상부에서의 복사냉각 효과가 큰 것으로 나타나며, 해당 고도에서의 구름 생성이 지속됨이 함께 확인된다 (Fig. 9c).

모델의 구름 과대모의는 해상과 육상에서 모두 나타나는 특징이며, 하층에 쌓인 습기에 따른 습윤 조건과 함께 하층운의 복사 냉각에 따른 기온 감소가 주요 원인으로 보인다. 특히 모델은 야간에 서해상에서 해면부터 하층에 집중된 습윤 오차를 보이고 있으므로 이것은 구름 과대모의의 직접적인 원인으로 보이며, 전반적인 남서풍계열의 바람이 존재하므로 풍하층에서의 영향이 나타남을 예상할 수 있다. 특히 육상에서 형성되는 구름의 고도가 지면보다는 좀더 높은 고도에 걸쳐 나타나는 것은, 해상으로부터의 이류의 가능성을 뒷받침한다. 해상, 육지 모두 하층운의 과대모의와 함께 나타나는 지속적인 복사 냉각에 따른 대기의 한랭 편향은 추가적인 구름 형성의 호조건으로 작용하여 하층운의 지속을 지원하는 것으로 보인다. 두꺼운 구름층은 주간에도 쉽게 확산 및 소멸되지 못하고 단파 복사 차단에 의해 지표면과 대기를 한랭하게 하며, 다시 되먹임하는 구조가 된다. 이러한 하층의 포화조건 차이는 HW18, HW19 사례 모의에서도 유사하게 나타난다(그림 생략).

#### 5.4 경계층 확산 조절 민감도 실험

앞선 분석에서 KIM-cold는 하층 대기의 비습 일변화 차이 및 과대모의의 특성을 가지고 있으며, 전반적인 포화조건을 과대모의함으로써 하층운을 과대모의하는 경향이 있음을 파악하였다. 또한 구름의 복사냉각에 의한 대기의 한랭한 환경이 구름 생성을 더욱 가속할 가능성이 있음을 확인하였다. 지표 부근 대기 하층의 구조는 모델의 경계층 물리과정에서 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 모델의 구름 과대모의와 물리과정이 관련이 있음을 확인하기 위하여 경계층 물리과정에 변화를 줌으로써 하층에 쌓인 습기를 확산시켜 포화상태를 완화하고자 하였다. 가장 간단한 접근으로 경계층 물리과정의 수증기 및 수상량 확산 계수(diffusion coefficient)를 조절하고자 하였으며, HW20 사례에 적용하였다.

KIM의 경계층 방안은 비국지 K 프로파일 기반의 YSU (Yousei University) 방안으로 YSU 방안에서의 예측변수  $C$ 에 대한 확산식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ K_c \left( \frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c \right) - \overline{(w'c)_h} \left( \frac{z}{h} \right)^3 \right\} \quad (1)$$

여기에서  $z$ 는 지면으로부터의 고도,  $h$ 는 경계층 높이,  $K_c$ 는 확산 계수이며,  $\gamma_c$ 는 지표플럭스로부터 계산되는 비국지향,  $\overline{(w'c)_h}$ 는 경계층 상부의 역전층에서의 플럭스이다. 본 연구에서는 확산 계수의 단순 조절로 모의의

반응만을 확인하도록 간단하게 설계하였는데, 수증기 및 수상량에 대한 확산계수  $K_c$ 의 진단 후 임의의 배수로 증가하였다. 이때 열과 운동량 확산은 영향을 주지 않았다. 확산계수의 조절은 충분히 반응을 할 수 있도록 기존 기준 실험(CTL)에 비해 5배부터(EXP) 순차적으로 실험을 수행하였으며, 이 이상의 조절에서는 유사한 결과를 얻었다.

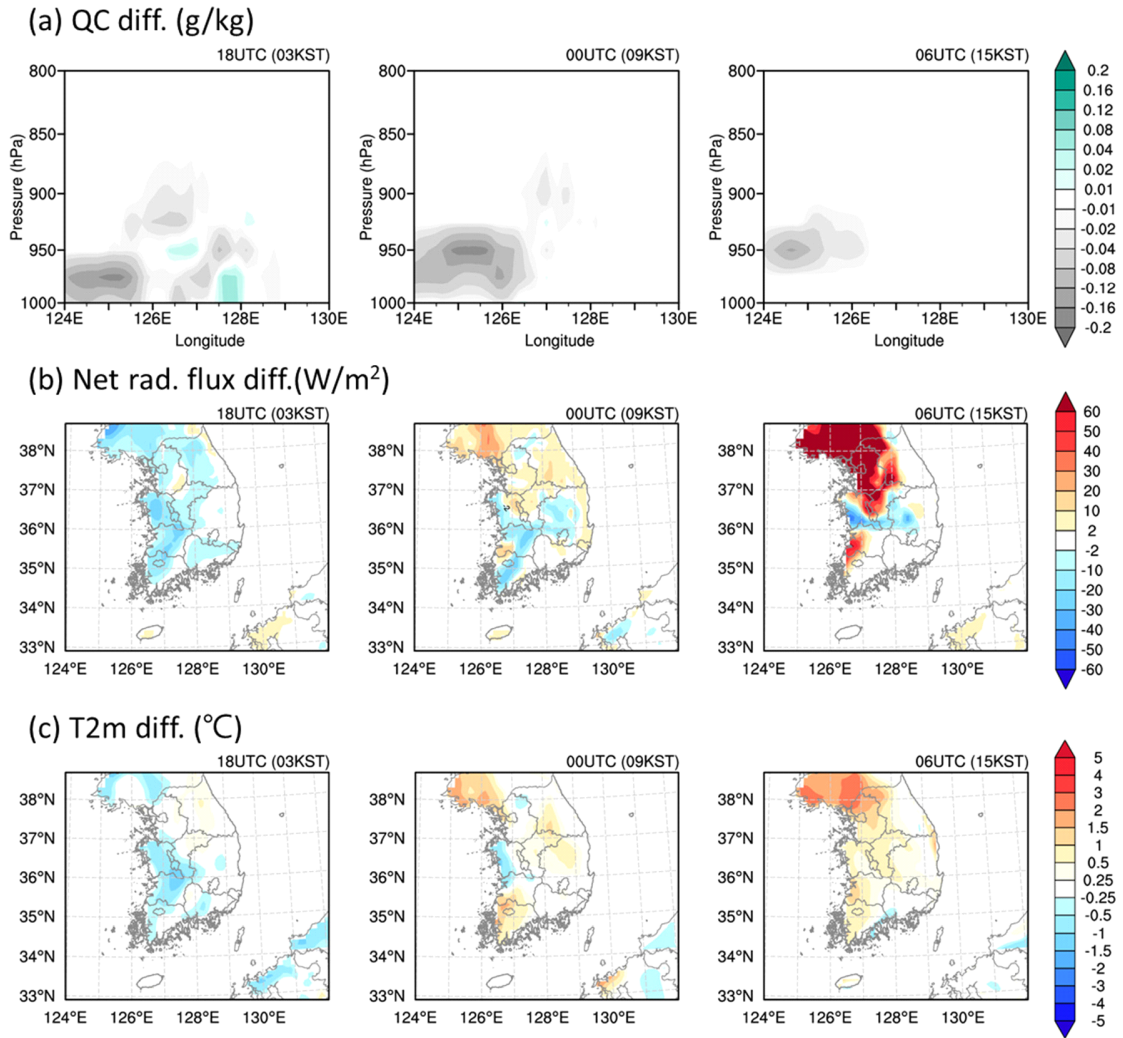
Figure 10은 민감도 실험의 결과로 CTL과 EXP의 차이를 보여준다. 각각은 연직 단면으로 제시한 구름물량의 변화, 지면에서의 순복사플럭스의 변화 그리고 지상기온 변화이다. EXP 모의에서는 주야간 구름물량이 확연히 감소하였다(Fig. 10a). 경계층 확산의 강화는 전 구름층에 걸쳐서 구름 감소효과를 보여주어 모델의 구름 과대모의를 효과적으로 개선하고 있음을 알 수 있다. 특히 서해상에서의 구름 감소는 육상으로 유입되는 구름 양에도 영향을 주었으며, 구름층 상부에서 추가로 생성되는 구름을 감소시켰다. 순복사플럭스 경우 주간(1500 KST)에 한반도 중서부 지역을 중심으로 한 뚜렷한 증가가 확인되며, 이러한 지역은 지상기온의 증가 위치와 공간적으로 일치한다(Figs. 10b, c). 한편, 순복사량과 지상기온에서 공통적으로 EXP 조절에 의한 야간 감소가 나타난다. 이는 야간에 구름이 줄어들었을 때 구름에서 지면으로 재방출되는 장파복사가 감소하면서 지표면에 도달하는 순복사량에 지배적인 영향을 미치기 때문인 것으로 판단된다.

민감도 실험을 통해 경계층 확산을 강화함으로써 대기 중 구름양을 조절할 수 있었으며, 이를 통해 주간 최고기온의 과소모의가 개선되는 효과를 얻을 수 있었다. 즉, 구름 과대모의를 개선함으로써 주간 복사량 모의 성능을 향상하는 것이 폭염 예측 개선에 긍정적인 효과를 줄 수 있다. 그러나 구름의 감소는 야간의 장파 복사에 도 영향을 주어 최고기온 오차에 반드시 개선효과를 주는 것이 아니므로, 보다 현실적인 주야간 하층 조건 및 구름 모의가 폭염 정확도 향상에 필요할 것이다.

본 민감도 실험에서는 수증기 및 수상과 관련된 확산 계수를 일괄적으로 증폭하였으며, 안정조건과 불안정조건(육지/해양, 주간/야간)을 구분하지 않으므로 경계층 물리과정에서 모델 계통오차를 유발하는 원인을 추적하기 위해서는 좀더 정교한 실험이 필요할 것으로 생각된다. 향후 다양한 사례를 활용한 조절 실험이 필요하다.

## 6. 요약 및 토의

본 연구에서는 한국형전지구모델 KIM의 폭염 모의 성능을 분석하였다. 이 때 기상청 현업에서 예측한 KIM-OP의 2020년 폭염 모의 성능을 평가하고, 2018-2020년 기간의 폭염 사례에 대한 비순환 예측 실험(KIM-cold)으



**Fig. 10.** (a) Height-longitude cross sections of cloud liquid water content ( $\text{g kg}^{-1}$ ) differences (averaged over  $34\text{--}38.5^\circ\text{N}$ ), and horizontal distributions of (b) net radiation flux ( $\text{W m}^{-2}$ ) and (c) 2 m temperature ( $^\circ\text{C}$ ) differences between EXP and CTL for the period between 1800 UTC 18 August and 0600 UTC 19 August 2020.

로부터 폭염 모의 성능과 예측성에 미치는 요인을 분석하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

KIM-OP는 2020년 8월 기간 한반도 주변 중관장을 비교적 잘 모의하였고, 5일 예측까지 티베트고기압과 북태평양고기압의 확장과 후퇴, 고기압의 최성기를 잘 모의하였다. 폭염 기간의 고기압의 세기는 예측시간이 길어질수록 200 hPa에서 더 강하게, 500 hPa에서 더 약하게 모의하는 경향이 있으나, 8월 한 달의 평균오차보다 대체로 정확한 수준이다. 한편, KIM-OP의 지상 최고기온 예측에서는 여름철 전반에 걸쳐 한랭오차가 존재함을

을 확인하였으며, 특히 폭염이 발생했을 때 한랭오차가 더 뚜렷하게 나타났다.

KIM의 한랭오차는 KIM-cold의 2018~2020년 폭염 사례 실험에서도 확인되었다. 지상기온 오차와 관련된 요인들 즉, 고기압 시스템, 강수와 지면 습기 상태, 구름 및 복사 등에 대해 분석한 결과, 하층 구름의 과대모의 경향과 이로 인한 지면 도달 하향단파복사의 감소를 확인하였다. 각 폭염 사례에서 지상 부근 하층운의 형성과 뚜렷한 일변화가 존재함을 확인하였으며, 이때 KIM-cold 모의에서는 야간 하층운량을 과대모의하고, 주간의 확

산이 지연되는 양상을 보여주었다. 하층 구름의 존재로 인해 주간 지면 기온 상승에 영향을 주어 한랭편향을 야기한 것으로 판단된다. KIM-cold에서 모의한 해상의 기온과 습기의 연직 프로파일은 재분석장에 비해 야간에 하층 포화조건을 과다 모의하는 경향이 있으며, 그 원인으로 하층 습기의 과대모의 특성이 확인되었다. 이와 동시에 하층 기온에서도 재분석장에 비해 한랭한 층이 형성됨이 확인되었는데, 이는 과대모의된 하층운의 상부에서 나타나는 적외 복사 냉각의 영향 때문으로 나타났다. 육상의 경우에는 서해상으로부터 유입되는 구름과 함께 구름의 상부에서의 지속적인 냉각으로 두꺼운 포화층을 모의하고 있음이 확인되었으며, 해상과 마찬가지로 구름의 적외 복사 냉각효과가 하층에 계속 나타나며, 구름 소산을 더디게 만들었다. 결과적으로 해상으로부터 이류된 구름과 육상에서 추가 생성된 구름이 주간 단파복사를 차단하는 효과를 가져오고, 지상기온의 한랭오차를 야기한 것으로 판단된다. 이 과정에서 대기의 복사 냉각은 되먹임을 통해 구름의 과대모의를 강화할 수 있음을 시사한다.

마지막으로 하층의 온·습도 모의 특성을 조절하여 구름 모의 특성의 변화가 폭염 기온 예측에 미치는 민감도를 확인하였다. 경계층 물리과정의 습기 확산 계수를 강화하는 실험을 통해 야간과 주간 모의된 구름이 감소함을 확인하였다. 구름의 감소는 해상에서 주로 이루어졌으며, 해상의 구름에 의해 영향을 받던 육상의 구름에도 나타났다. 이때 지면에서의 순복사량의 변화가 나타났다. 주간 증가한 순복사량은 지상 가열의 효과로 폭염모의의 한랭오차를 완화시켰다. 그러나 야간의 구름 감소는 지면에 도달하는 장파 복사를 감소시키므로 지상기온을 더욱 낮추는 것으로 드러나 폭염의 한랭오차 개선에는 도움이 되지 않는 것으로 나타났다. 만약 주야간 구름 모의가 더 정교하도록 모델이 개선된다면 기온 예측성도 더욱 높아질 것이며, 모델에서 나타나는 한랭오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 수치모델의 구름 모의 개선이 폭염 기간 기온 예측성을 높이는데 영향을 줄 수 있음을 확인하였다. KIM 현업의 폭염 성능에 대한 통계적 성능 평가로부터 도출된 지상 한랭오차의 원인을 추적하기 위해 설계된 비순환 실험은 현업과 다른 초기장으로 인하여 그 결과에 영향을 받을 수 있음을 언급할 필요가 있다. 그러나 2020년 사례에 대한 현업 결과와 비순환 실험 모두에서 유사한 수준의 한랭오차가 확인되었으며, 그 원인으로 추정되는 구름 과대모의 및 하향 단파복사 과소모의 경향이 나타났다. 또한 본 연구에서 분석한 5일의 예측 시간은 초기장의 영향이 점차 감소하고, 물리과정의 영향이 지배적으로 나타나는 시점임을 감안할 때 현재 도출된 결과는 모델 물리과정의 불확실성에 따

른 계통 오차인 것으로 보이고, 이는 모델의 개발단계에서 폭염 성능 개선을 위한 기초자료로 활용 가능할 것으로 보인다.

## 감사의 글

이 연구는 기상청 출연사업인 (재)차세대수치예보모델개발사업단의 가변격자체계 기반 통합형수치예보모델 개발(KMA2020-02212)의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Baek, J.-B., and Y. Kwon, 2021: Analysis of domestic heat-wave research trends. *J. Soc. Disaster Inform.*, **17**, 755-768, doi:10.15683/kosdi.2021.12.31.755 (in Korean with English abstract).
- Baek, S., 2017: A revised radiation package of G-packed McICA and two-stream approximation: Performance evaluation in a global weather forecasting model. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **9**, 1628-1640, doi:10.1002/2017MS000994.
- Choi, H.-J., and S.-Y. Hong, 2015: An updated subgrid orographic parameterization for global atmospheric forecast models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **120**, 12445-12457, doi:10.1002/2015JD024230.
- Choi, S.-J., and S.-Y. Hong, 2016: A global non-hydrostatic dynamical core using the spectral element method on a cubed-sphere grid. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, **52**, 291-307, doi:10.1007/s13143-016-0005-0.
- Coumou, D., A. Robinson, and S. Rahmstorf, 2013: Global increase in record-breaking monthly-mean temperatures. *Clim. Change*, **118**, 771-782, doi:10.1007/s10584-012-0668-1.
- Doelling, D. R., M. Sun, L. T. Nguyen, M. L. Nordeen, C. O. Haney, D. F. Keyes, and P. E. Mlynarczyk, 2016: Advances in geostationary-derived longwave fluxes for the CERES synoptic (SYN1deg) product. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, **33**, 503-521, doi:10.1175/JTECH-D-15-0147.1.
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [ECMWF], 2018: *IFS Documentation CY45R1*. ECMWF.
- \_\_\_\_\_, 2020: *IFS Documentation CY47R1*. ECMWF.
- Flato, G., and Coauthors, 2013: Evaluation of climate models. In T. F. Stocker et al. Eds., *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press, 741-866 pp.
- Ha, K.-J., J.-H. Yeo, Y.-W. Seo, E.-S. Chung, J.-Y. Moon, X. Feng, Y.-W. Lee, and C.-H. Ho, 2020: What

- caused the extraordinarily hot 2018 summer in Korea? *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, **98**, 153-167, doi:10.2151/jmsj.2020-009.
- Han, J.-Y., S.-Y. Hong, and Y. C. Kwon, 2020: The performance of a revised simplified Arakawa-Schubert (SAS) convection scheme in the medium-range forecasts of the Korean Integrated Model (KIM). *Wea. Forecasting*, **35**, 1113-1128, doi:10.1175/WAF-D-19-0219.1.
- Hersbach, H., and Coauthors, 2020: The ERA5 global reanalysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **146**, 1999-2049, <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Hong, S.-Y., and Coauthors, 2018: The Korean Integrated Model (KIM) system for global weather forecasting. *Asia Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 267-292, doi:10.1007/s13143-018-0028-9.
- IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, Cambridge University Press.
- Kang, J.-H., and Coauthors, 2018: Development of an observation processing package for data assimilation in KIAPS. *Asia Pac. J. Atmos. Sci.*, **54**, 303-318, doi:10.1007/s13143-018-0030-2.
- Kato, S., and Coauthors, 2018: Surface irradiances of edition 4.0 clouds and the Earth's radiant energy system (CERES) energy balanced and filled (EBAF) data product. *J. Clim.*, **31**, 4501-4527, doi:10.1175/JCLI-D-17-0523.1.
- Kharin, V. V., F. W. Zwiers, X. Zhang, and G. C. Hegerl, 2007: Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *J. Clim.*, **20**, 1419-1444.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and M. Wehner, 2013: Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble. *Clim. Change*, **119**, 345-357, doi:10.1007/s10584-013-0705-8.
- KMA, 2019: *Why? How! - Summer Forecast Guide*, Korea Meteorological Administration, 170 pp (in Korean).
- KMA NMC, 2022: *Verification of numerical weather forecasting system (2021)*. Korea Meteorological Administration Numerical Modeling Center, 253 pp (in Korean).
- Koo, M.-S., S. Baek, K.-H. Seol, and K. Cho, 2017: Advances in land modeling of KIAPS based on the Noah land surface model. *Asia Pac. J. Atmos. Sci.*, **53**, 361-373, doi:10.1007/s13143-017-0043-2.
- \_\_\_\_\_, H.-J. Choi, and J.-Y. Han, 2018: A parameterization of turbulent-scale and mesoscale orographic drag in a global atmospheric model. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 8400-8417, doi:10.1029/2017JD028176.
- Kysely, J., and J. Kim, 2009: Mortality during heat waves in South Korea, 1991 to 2005: How exceptional was the 1994 heat wave? *Clim. Res.*, **38**, 105-116.
- Lee, E., J.-H. Kim, K.-Y. Heo, and Y.-K. Cho, 2021: Advection fog over the eastern Yellow Sea: WRF simulation and its verification by satellite and *in situ* observations. *Remote Sens.*, **13**, 1480, doi:10.3390/rs13081480.
- Lee, H.-D., K.-H. Min, J.-H. Bae, and D.-H. Cha, 2020: Characteristics and comparison of 2016 and 2018 heat wave in Korea. *Atmosphere*, **30**, 1-15, doi:10.14191/ATMOS.2020.30.1.001 (in Korean with English abstract).
- Meehl, G. A., F. Zwiers, J. Evans, T. Knutson, L. Mearns, and P. Whetton, 2000: Trends in extreme weather and climate events: Issues related to modeling extremes in projections of future climate change. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **81**, 427-436.
- Min, S.-K., Y.-H. Kim, S.-M. Lee, S. Sparrow, S. Li, F. C. Lott, and P. A. Stott, 2020: Quantifying human impact on the 2018 summer longest heat wave in South Korea. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **101**, S103-S108, doi:10.1175/BAMS-D-19-0151.1.
- Park, J., and Y. Chae, 2020: Analysis of heat-related illness and excess mortality by heat waves in South Korea in 2018. *J. Korean Geogr. Soc.*, **55**, 391-408, doi:10.22776/kgs.2020.55.4.391 (in Korean with English abstract).
- Park, R.-S., and Y. C. Kwon, 2018: The implications for radiative cloud forcing via the link between shallow convection and planetary boundary layer mixing. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **123**, 13.203-13.218, doi:10.1029/2018JD028678.
- Shin, H. H., and S.-Y. Hong, 2015: Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *Mon. Wea. Rev.*, **143**, 250-271, doi:10.1175/MWR-D-14-00116.1.
- Sillmann, J., V. V. Kharin, X. Zhang, F. W. Zwiers, and D. Bronaugh, 2013: Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: part 1. Model evaluation in the present climate. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **118**, 1716-1733, doi:10.1002/jgrd.50203.
- WHO, 2014: *Quantitative Risk Assessment of the Effects of Climate Change on Selected Causes of Death, 2030s and 2050s*. World Health Organization.
- \_\_\_\_\_, 2017: *Protecting Health in Europe from Climate Change: 2017 Update*. World Health Organization.
- USGCRP, 2017: *Climate Science Special Report: Fourth National Climate Assessment, Volume I*, U.S. Global Change Research Program.



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

South Korea. *J. Clim.*, **34**, 2157-2174, doi:10.1175/JCLI-D-20-0422.1.