

## Lagrangian Stochastic Modeling of Unstable Atmospheric Surface Layer

Jihoon Shin<sup>1</sup>, Jong-Jin Baik<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University

<sup>2</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

This study evaluates the performance of a recently developed Lagrangian stochastic model (LSM), which solves the transport equations for turbulence probability density functions (PDFs), for simulating the unstable atmospheric surface layer (ASL). The simulated statistics are compared with the Monin–Obukhov Similarity Theory (MOST) predictions for mean gradients, standard deviations, turbulent Prandtl number, turbulence kinetic energy (TKE) budgets, and turbulence PDFs. The LSM successfully captures many aspects of ASL structure and turbulence characteristics, particularly the mean gradients and standard deviations of potential temperature, specific humidity, and vertical velocity, which align closely with MOST predictions. However, the model shows limitations in reproducing the stability dependency of mean gradients of horizontal wind speed. Additionally, the model underestimates the probability of high vertical velocity fluctuations, leading to underprediction of turbulent transport and thermal convection initiation. The simulated turbulent Prandtl number showed dependency on stability but was generally weaker than MOST predictions. The study identifies that the parameterizations of dissipation, pressure redistribution, and pressure transport need to be enhanced to ensure that they have correct stability dependency, in order to improve the model's accuracy in simulating ASL dynamics.

Key words: Atmospheric surface layer, Lagrangian stochastic modeling, Monin–Obukhov similarity theory

## 도시 지역 고해상도 기상장 모의에서 도시 비율 자료 효과

김석철<sup>1</sup>, 박문수<sup>2</sup>, 지준범<sup>3</sup>, 백기태<sup>1</sup>, 강민수<sup>1</sup>

<sup>1</sup>세종대학교 기후환경융합센터

<sup>2</sup>세종대학교 기후환경융합학과

<sup>3</sup>한국외국어대학교 대기환경연구센터

최근 국소 지역 특성을 고려한 도시 기상 현상에 대하여 수치모델 활용 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 토지 이용도 자료 기반의 도시 특성을 반영한 모델링이 다수 수행되었다. 도시 비율은 수치 모의에서 잠열 플러스와 유의미한 관계가 있어 도시의 미기후에 영향을 주므로, 최근에는 이를 사용한 인공 열 추정에 활용된다. 미국, 독일, 스페인에서 도시 비율 자료를 수치 모의에 활용하여 모의한 결과 기온, 강수 예측 정확도가 개선되는 것을 확인했다. 본 연구는 수치 모의에서 도시 비율 자료 사용에 따른 긍정적인 결과를 주목하여 해상도별 토지이용도와 지형고도 자료 입력에 따른 도시 비율 자료의 효과를 확인하였다.

2023년 세종대학교 BBMEX-Wind 캠페인 기간 중 3일을 대상으로 수치 모의를 실시하였다. 모델 수행에는 WRF v4.4.2에 NCEP의 FNL 0.25° 를 사용하였으며, 총 4개 도메인에 최종 도메인은 수평 격자 크기 100m로 서울 강남역 사거리를 중심인 15.1km×15.1km 크기로 설정하였다. 모델 수행 결과 검증은 모의 영역 8개 AWS에서 관측된 기온, 상대습도, 바람 자료를 비교 변수로 사용하고, RMSE, 상관계수, 평균편차를 활용하였다. 토지이용도와 지형고도 자료는 NCAR에서 제공하는 30초 기본 자료와 환경부 토지피복도 자료 기반의 토지이용도 및 SRTM 자료 기반 지형고도 1초 자료를 사용하였다. 도시 비율 자료는 기본 자료인 NUDAPT과 ESA(European Space Agency) WorldCover 기반의 100m 해상도 자료를 사용하였다.

고해상도 토지이용도 자료를 사용하는 경우에는 도시 비율 자료의 사용 여부와 관계없이 주간 도시 지역 모의 결과는 큰 차이가 없으나, 야간은 도시 비율 자료를 사용하는 경우에 도시 지역의 기온을 더욱 높게 모의하였다. 저해상도 토지이용도 자료를 사용할 때 도시 비율 자료를 사용하지 않는 경우는 지형 자료의 해상도와 관계없이 실제 공간 특성을 반영하지 못하는 모의 결과를 나타내었으며, 상대습도 역시 비슷한 결과를 나타내었다. 기온과 상대습도 모의에서 고해상도 토지이용도와 지형고도 자료에 도시 비율 자료를 사용하는 방법의 정확도가 가장 좋았다. 풍속은 기온과 상대습도와 비교하여 큰 차이는 없으나 고해상도 토지이용도 자료에 도시 비율 자료를 사용하면 모의 정확도가 개선되는 것을 확인하였다.

Key words: 도시 비율, 고해상도, 기상장 모의, BBMEX-Wind, 도시 기상

※ 이 연구는 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받은 기초연구사업(No. 2021R1I1A2052562)으로 수행되었습니다.

## Impacts of changes in soil moisture on urban heat islands and urban breeze circulations: Idealized ensemble simulations

Abeda Tabassum, Seong-Ho, Kyeongjoo Park, Jong-Jin Baik

School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

Soil moisture plays important roles in land surface and hydrological processes, and its changes can greatly affect weather and climate. In this study, we examine how changes in soil moisture impact the urban heat island (UHI) and urban breeze circulation (UBC) through idealized ensemble simulations. As soil moisture increases, the latent heat flux increases considerably in the rural area. Hence, in the rural area, the sensible heat flux and surface temperature decrease, which decreases the rural air temperature. The decrease in rural air temperature leads to increases in UHI intensity and thus UBC intensity. The urban air temperature also decreases with increasing soil moisture since the cooler rural air is advected to the urban area by the enhanced low-level convergent flow of the UBC. However, the decrease in air temperature is smaller in the urban area than in the rural area. As the UBC intensity increases, the sensible heat flux in the urban area increases. The increase in sensible heat flux in the urban area further increases the UHI intensity. The positive feedback between the UHI intensity and the UBC intensity is revealed when soil moisture increases. The decrease in air temperature in both the urban and rural areas leads to the decrease in planetary boundary layer (PBL) height. As a result, the vertical size of the UBC decreases with increasing soil moisture. As the UBC intensity increases with increasing soil moisture, the advection of water vapor from the rural area to the urban area increases. Combined with the decrease in PBL height, this reduces the water vapor deficit or even leads to the water vapor excess in the urban area depending on soil moisture content.

Keywords: soil moisture, urban heat island, urban breeze circulation, ensemble simulations

## 대류허용모델을 이용한 동아시아 여름철 중규모 대류계의 특성 모의 검증 및 장기변동성 분석

문태호, 차동현

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

중규모 대류계(Mesoscale Convective System; MCS)는 극한 강수 현상의 주요 원인 중 하나이다. 동아시아에서는 전선이나 열대 저기압과 같은 종관 규모의 강제력이 MCS를 생성할 만큼 강한 상승 운동을 유발할 수 있으며, 약한 종관 환경에서도 MCS가 발생할 수 있다. MCS는 시공간 규모가 종관 규모보다 작아 발생 시간 및 지속 시간, 강도 등을 예측하기 어렵고, 국지적으로 많은 강수량을 기록해 규모에 비해 피해가 크다. 또한, 지역별로 종관 환경에 따른 MCS의 발생 비율이 다르기 때문에 레이더, 위성, 재분석 자료 등을 이용해 동아시아 및 한반도에서 발생하는 MCS의 특성을 이해하고 장기적인 추세와 변동성을 조사할 필요가 있다. 최근 미국과 유럽 등에서 대류 모수화 방안을 적용하지 않은 초고해상도 대류허용모델(Convection-Permitting Model; CPM)을 이용하여 MCS를 모의하고 특성을 파악하려는 다양한 시도가 이루어지고 있지만, 동아시아와 한반도에서는 관련 연구가 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 CPM 실험을 수행해 동아시아 MCS의 특성에 대한 모의 성능을 검증하고, 장기적인 시공간적 변동성(강도, 빈도, 지속 시간 및 강수 셀 크기 등)을 분석한다.

Key words: 대류허용모델, 동아시아, 중규모 대류계, 장기변동성

## 한반도 집중호우 사례에 대한 규모적응대류모수화방안의 개선

박해린, 차동현

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

최근 고해상도 수치모델링 기술의 발전으로 그레이 존(1~10km 해상도)에서 적운대류모수화 방안(CPS)을 적용해야 할 필요성에 대한 논의가 진행되고 있다. 이에 따라, 그레이 존에서 수평 해상도에 맞춰 CPS의 유효성을 적절하게 조절할 수 있는 규모 적응형 CPS가 개발되어 왔지만, 여전히 경험적 방법에 의존하고 있다. 또한, 지역별 강수 특성(열역학 및 동적)이 다르기 때문에, 각 지역에 맞는 CPS의 조절을 위해 추가적인 연구가 필요하다. 기상청은 2020년부터 KSAS(KIAPS Simplified Arakawa-Schubert)라는 규모 적응형 CPS를 한국형 수치예보모델(KIM)에 적용하여 일기 예보를 수행하고 있다. 본 연구는 KSAS 방안의 한반도 집중호우 시 강수 모의 성능을 평가하고, 개선 방안을 제시하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 10km 해상도의 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델을 사용하여, 2011년부터 2020년까지 한반도에서 발생한 135개의 집중호우 사례에 대해 민감도 실험을 진행하였다. 규모 적응형 CPS로는 KSAS와 함께 비교를 위해 Multi-Scale Kain Fritsch (MSKF) 방안이 사용되었다. 연구 결과, KSAS 방안은 관측 및 MSKF 방안에 비해 얇은 강수에 대해서는 과다모의, 강한 강수에 대해서는 과소모의하는 특성이 나타났다. 이는 10km 해상도에서 KSAS 방안이 대류를 억제하는 임계값이 적절하게 조정되지 않았기 때문이며, 임계값을 강화하여 조정할 경우 약한 강수의 과다모의와 강한 강수의 과소모의가 개선되는 것을 확인하였다.

Key words: 적운대류모수화방안, 규모적응, 집중호우

## Changes in initiation and evolution of urban-induced precipitation with background wind speed: Roles of urban breeze circulation and cold pool

Seong-Ho Hong<sup>1</sup>, Han-Gyul Jin<sup>2,3</sup>, Ji-Young Han<sup>4</sup>, Jong-Jin Baik<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

<sup>2</sup>Department of Atmospheric Sciences, Pusan National University

<sup>3</sup>Institute for Future Earth, Pusan National University

<sup>4</sup>Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems

This study examines how the initiation and evolution of urban-induced clouds and precipitation systems change with background wind speed, to understand the role of background wind in urban-induced precipitation. Idealized ensemble large-eddy simulations with initial background wind speeds ( $U_0$ ) of 0, 1, 2, 3, 4, and 5 m s<sup>-1</sup> are conducted under a condition representative of August in Seoul. As the background wind speed increases, the urban breeze circulation (UBC) weakens and the UBC-induced cumulus clouds are advected more rapidly downwind of the UBC center where updrafts rise repeatedly. Hence, the development of the UBC-induced clouds into deep convective clouds is impeded and the onset of precipitation is delayed with increasing background wind speed. For strong background winds ( $U_0 = 4$  and 5 m s<sup>-1</sup>), the UBC-induced clouds end up dissipating without precipitation. Instead, the mechanical lifting of the warmer air of the urban boundary layer over the cooler rural boundary layer triggers a precipitation system around sunset. When the background wind is absent, the urban-induced precipitation system remains over the urban area, concentrating precipitation there. Meanwhile, when the background wind is present, the urban-induced precipitation system can be fed by the new updrafts produced from the downwind gust front of the cold pool, developing into an organized precipitation system. This feeding effect is most prominent for a moderate background wind ( $U_0 = 3$  m s<sup>-1</sup>) in which a precipitation system lives long and produces a considerable amount of precipitation over a distant downwind area. This study gives insights into large precipitation amounts observed in and downwind of several cities.

Key words: urban-induced precipitation, background wind, urban breeze circulation, cold pool, large-eddy simulation

※ 이 연구는 한국연구재단(2021R1A2C1007044, RS-2023-00301938)의 지원으로 수행되었습니다.