

## 수도권 도시화에 따른 해풍 특성 변화와 도심항공교통 운항 영향

정민혁<sup>1</sup>, 김정훈<sup>1</sup>, 유영희<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부

<sup>2</sup>연세대학교 대기과학과

해풍은 연안 지역에서 해양과 육지 간의 열적 차이에 의해 유도되는 열적 순환이며, 차고 습한 공기가 내륙으로 유입되는 현상이다. 해풍 전선(Sea Breeze Front, SBF)에서는 강한 수평 온도 경도와 상승 운동이 나타나며, 이로 인한 흐름 변형은 저고도 난류를 유발하여 항공기 운항에 영향을 미칠 수 있다. 수도권 지역은 도시화로 인해 지면 상태의 큰 변화를 겪은 지역이며, 이는 이 지역의 해풍 특성에도 변화를 초래할 수 있다. 본 연구에서는 장기간의 지상 및 해양 관측 자료를 이용해 해풍 사례를 선정하고, 도시화로 인한 수도권 해풍 특성 변화를 분석하였다. 분석 결과, 해풍의 발생 시각은 앞당겨졌고, 지속 시간은 길어졌으며, 내륙으로의 영향 시간대가 확대된 것으로 나타났다. 이러한 변화의 원인을 규명하기 위해, 무강수 해풍 사례를 대상으로 고해상도 수치실험을 수행하였다. 실험에는 WRF(Weather Research and Forecasting) 모형을 사용하였으며, 도시 지역을 정확히 반영하기 위해 단일층 도시 캐노피 모형(Urban Canopy Model, UCM)을 적용하였다. 또한, 과거와 현재의 지표 조건을 재현하기 위해 환경부에서 제공하는 토지이용/피복 자료를 처리하여 처방하였다. 도시화의 영향을 비교하기 위해 과거 토지 피복을 적용한 OLD 실험과 최신 토지 피복을 적용한 CTL 실험을 수행하였다. 도시화가 진행된 CTL 실험에서는 연안 및 도시 지역의 지표 기온 상승이 해양과 육지 간 수평 온도 경도를 강화시켰다. 해풍의 발생 시각에는 큰 차이가 없었으나, SBF의 내륙 침투 속도가 빨라졌고, 전선 주변의 풍속과 연직 속도도 더 강하게 나타났다. 수도권 지역의 주간 대기경계층 고도와 난류운동에너지 역시 증가하였는데, 이는 더 높은 도시 기온에 따른 부력 생산량의 증가와 강화된 해풍 순환과 연관된 시어 생성량의 증가가 복합적으로 작용한 결과이다. 특히, 해풍 순환에 의해 유도된 연직 시어는 약 500 m 고도에서 뚜렷하게 증가하였으며, 이는 도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM) 운항 고도와 밀접히 관련된다. 이러한 결과는 도시화가 진행된 지역에서 도심항공교통에 대한 해풍 순환의 영향이 더욱 강화될 수 있음을 시사한다.

**Keywords:** 해풍, 도시화, 저고도 난류, 도심항공교통

※ 이 연구는 기상청 「위험기상 선제대응 기술개발사업」 (RS-2023-00233640)의 지원으로 수행되었습니다.

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 5-2

# 도심항공교통(UAM) 운항 지원을 위한 WRF-LES 모델의 위험 기상 예측 성능 평가

김은령<sup>1</sup>, 신지훈<sup>2</sup>, 차동현<sup>3</sup>, 송창근<sup>1,3,4</sup>

<sup>1</sup>울산과학기술원 탄소중립대학원

<sup>2</sup>부경대학교 지구환경시스템과학부

<sup>3</sup>울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

<sup>4</sup>동남권 미세먼지연구·관리센터

최근 도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM) 산업이 빠르게 발달하면서, 도심 환경에서의 안전한 운항을 위해 정밀 기상예측의 중요성이 더욱 커지고 있다. 도시 지역은 복잡한 지형지물로 인해 대기의 흐름이 불규칙하게 나타나기 때문에 국지적인 기상 현상 예측을 위해 고해상도 모의가 필요하다. 그러나, 중규모 수치예보모델은 난류 효과를 반영하지 못해 고해상도 위험 기상 정보를 제공하는 데 한계가 있다. 이를 위해 대기경계층 내 난류를 고려할 수 있는 고해상도 수치예보모델 WRF-LES가 활용될 수 있다. WRF-LES 모델은 대규모 와류를 직접 모의하고 소규모 와류는 Deardorff의 3차원 1.5차 난류운동에너지(TKE) 폐쇄로 표현한다.

WRF 모델은 다양한 미세물리방안을 제공하며, 안개나 뇌전과 같은 위험 기상 예측 시 보다 현실적인 물리과정 고려할 필요가 있다. 미세물리방안 옵션에 따른 예측 성능의 차이가 발생하지만, WRF-LES 모델에 대한 선행연구는 드물다. 따라서 본 연구에서는 WRF-LES 모델을 이용하여 3가지 미세물리방안 (WSM6, WDM6, Morrison)에 대한 위험 기상 예측 민감도 실험을 수행하였다. 대상 지역은 국토부에서 지정한 드론 특별 자유화 구역인 울산 울주군을 중심으로 설정하였으며, 관측자료 분석을 통해 대상지역의 위험 기상 사례일을 선정하였다.

WRF-LES로부터 모의된 안개 지수는 지형 효과가 잘 반영되어 산출되었다. 그러나, 동일한 초기 및 경계 조건과 모델 구성을 사용했음에도 불구하고 미세물리 방안들 간에는 시뮬레이션 결과의 차이가 나타났다. WDM6 방안의 경우 세 스킴 중 야간에 가장 높고 주간에는 가장 낮게 산출되어 일변화 경향이 가장 작았다. 본 연구에서는 WRF-LES 모델의 미세물리 방안 민감도를 제시함과 동시에, 모의된 변수로부터 산출된 위험 기상 지수의 예측 성능을 평가하고자 한다.

**Keywords:** 큰에디모사 (LES), 대기경계층, 도심항공교통(UAM), 위험기상

※ 이 연구는 기상청 <「한국형 도심항공교통(K-UAM) 안전운용체계 핵심기술 개발」>(RS-2024-00404042)의 지원으로 수행되었습니다.

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 5-3

## 빌딩군의 분포 형상에 따른 지면 복사에너지와 바람의 변동 특성에 관한 연구

김지선<sup>1</sup>, 이순환<sup>2,3</sup>, 박순영<sup>4</sup>, 유정우<sup>3</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 지구과학과

<sup>2</sup>부산대학교 지구과학교육과

<sup>3</sup>부산대학교 환경연구원

<sup>4</sup>대구교육대학교 과학교육과

도시 환경에서 바람은 오염물질이나 열 확산, 보행자 높이에서의 열쾌적성 등 도시 거주 인구의 생활에 큰 영향을 미치는 기상 요소이며, 건물의 높이 분포는 주변 바람장 패턴을 결정하는 주요 요인이다. 또한 태양 복사는 표면 가열과 그림자 효과로 인한 열적 편차에 의해 바람장에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 도시 미기상 예측을 위한 도시 모델링의 기초 연구로서 건물 높이 변화와 복사 열전달이 도시 바람 환경에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 하였다. 본 연구에서는 도시 바람 환경을 모의하기 위해 LES(large-eddy simulation) 모델인 PALM(parallelized large-eddy simulation model) 모델을 이용해 이상화(idealized)된 도시 조건에서 고층 건물 높이 분포 변화에 따른 건물 주변 바람장의 차이를 확인하고자 하였다. 복사 모듈을 적용하지 않은 조건에서 고층 건물 높이를 변화시킨 실험별 하강류와 보행자 높이에서의 바람 분포 차이를 확인하였다. 또한 동일한 건물 조건에서 복사 모듈을 적용한 결과에서는 복사에 의한 난류운동에너지의 변화가 나타났다. 향후 본 연구 결과를 바탕으로 실제 도시 환경을 모의하고자 하며, 본 연구와 같이 이상화된 조건에서 도출된 결과를 복잡한 실제 도시 환경 모델링 시 물리적 과정 해석과 결과 검증을 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords:** LES, PALM, 고층 건물, 복사, 난류운동에너지

※ 이 연구는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2020-NR049592). 또한 이 연구는 2022년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-NR070051).4

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 5-4

# 산악지역 눈 덮임 특성을 반영한 WRF 모델의 산악기상 예측 성능 개선

고원석<sup>1</sup>, 김태희<sup>2</sup>, 도현석<sup>1</sup>, 김지민<sup>1</sup>, 김용찬<sup>1</sup>, 장근창<sup>3</sup>, 송찬영<sup>3</sup>, 김인혜<sup>3</sup>, 이승재<sup>4</sup>, 곽경환<sup>1</sup>

<sup>1</sup>강원대학교 환경학과

<sup>2</sup>강원대학교 미세먼지통합관리학과

<sup>3</sup>국립산림과학원 산림재난·환경연구부 산사태연구과

<sup>4</sup>국가농림기상센터

최근 산악지역에서는 강풍에 따른 산불 및 집중호우로 인한 산사태 등 기상재해가 빈번히 발생하고 있으며, 이는 산악 지형 효과에 의해 크게 좌우된다. 특히 겨울철 눈 덮임(snow cover)은 산악 지형의 지표 알베도 상승과 단열 효과를 발생시켜 에너지 수지 및 기상현상에 비선형적 피드백을 유발한다. 따라서 겨울철 산악지역의 기상 특성을 정확히 해석하기 위해서는 눈 덮임 현상을 보다 현실적으로 모의하는 것이 필수적이다. 그러나 중규모 기상모델 WRF는 눈이 빠르게 녹는 경향과 초기 조건의 불확실성으로 인한 한계를 지닌다. 본 연구에서는 Noah-MP 지면모델의 눈 모의 특성과 파라미터(MFSNO)의 민감도를 분석하고, 눈 덮임 초기 조건을 보완하는 알고리즘을 개발·적용함으로써 WRF의 눈 덮임 모의 정확도를 향상시키는 것을 목적으로 한다. 연구 대상 기간은 2022년 3월 1일부터 31일까지로, WRF 버전 4.3을 이용하여 27 km-9 km-3 km 해상도의 동지 격자 체계로 수치 실험을 수행하였다. 지면 물리 모델은 Noah LSM과 Noah-MP를 적용하여 비교하였다. 특히 Noah-MP의 눈 녹음 곡선 계수(MFSNO)를 변화시켜 민감도 실험을 수행하였다. 초기 및 경계조건으로는 FNL 재분석장을 활용하였으며, 모의 결과는 국립산림과학원의 산악 기상관측망 자료와 비교·검증하였다. 또한 FNL 재분석장을 이용하여 연속 모의 과정에서 눈 관련 변수가 초기장에서 단절되는 문제가 나타났다. 이를 개선하기 위해 이전 모의 결과의 눈 관련 변수를 다음 초기장에 반영하였다. Noah LSM을 적용한 경우, 눈이 없는 기간의 순복사량 모의 정확도가 눈 덮임 기간 보다 높게 나타났다. 반면, Noah-MP는 눈이 없는 기간의 모의 정확도를 더욱 향상시켰다. 그러나 눈이 덮여있는 기간의 개선은 제한적이었다. 이는 WRF 모델에서 눈이 실제보다 빠르게 녹아 나타나는 현상이라고 판단된다. MFSNO 민감도 실험 결과, 기본값(1.0) 대비 0.2까지 낮출 경우 눈 녹음이 충분히 지연되었다. 개발한 눈 덮임 초기장 보정 알고리즘을 적용한 결과, 눈 덮임 기간의 모델 성능이 개선되는 경향을 확인하였다. 본 연구는 눈 덮임 기간의 WRF 모델 성능을 개선했다. 이는 산악지역 에너지 수지 및 알베도 모의의 신뢰성을 높이는 데 기여할 것으로 판단된다.

**Keywords:** 산악기상, WRF 모델, 에너지 수지, 눈

※ 본 연구는 산림청 국립산림과학원의 ‘산악기상 빅데이터 생산 최적화 기술 개발 및 산악기상기후시스템 고도화’ (과제번호: FE0500-2023-01-2025)의 지원으로 수행되었습니다.

환경 및 응용기상 분과 / 환경 및 응용기상 5-5

## 지표면 마찰 강제력이 서해 대설과 관련된 연직 운동량 플럭스의 변화에 미치는 영향 연구

최창환<sup>1</sup>, 유정우<sup>2</sup>, 이순환<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 지구과학과

<sup>2</sup>부산대학교 환경연구원

<sup>3</sup>부산대학교 지구과학교육과

겨울철 차고 건조한 공기가 상대적으로 따뜻한 서해를 지나올 때 대류가 발생하여 서해안 지역에 강설 현상이 빈번히 발생한다. 이때 지표면의 마찰력은 하층 풍속을 감소시켜 난류를 강화하고 결과적으로 강설의 분포 및 강도에 영향을 줄 수 있다(Xia et al., 2018; Ayumi et al., 2022). 이에 본 연구는 WRF 모델을 이용하여 서해안 지역에서 발생한 강설 사례를 대상으로 거칠기 길이에 따른 지표면 마찰력 변화가 강설에 미치는 영향을 분석하였다.

분석 결과 거칠기 길이를 증가시킨 실험에서는 지표면 마찰력이 증가하면서 하층 풍속이 감소하여 상층과의 풍속 차이가 증가하고 연직 시어에 의한 난류가 강화되었다. 이로 인해 안정도가 감소하고 결과적으로 강설량이 증가하였다. 반대로 거칠기 길이를 감소시킨 실험에서는 지표면 마찰력이 감소하면서 난류가 약화되어 안정도가 증가하고 강설량이 감소하였다. 이때 강설량의 변화는 강설이 많이 발생한 산악 지역보다 풍상측에 위치한 평야 지역에서 더 크게 나타났다. 본 연구를 통해 지표면 마찰력의 변화가 난류의 강도와 강설량에 영향을 미치는 것을 확인했다.

**Keywords:** 지표면 마찰력, 난류, 강설, WRF

※ 이 연구는 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2020-NR049592). 또한 이 연구는 2022년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-NR070051).

## Summer drought events along the East Coast of South Korea induced by the rain shadow effect during the monsoon south-westerlies

JungJin Kim, Ginam Kim, Subok Kim

Republic of Korea Air Force Weather Wing Headquarter

In the summer of 2025, the influx of southwesterly winds brought relatively sufficient precipitation to the Yeongseo(West) region of Korea, whereas in the Yeongdong(East Coast) region, a pronounced lee-side rain shadow effect due to topographic factors led to significantly lower precipitation compared to other areas, ultimately resulting in severe summer drought. This phenomenon was not limited to 2025, as similar patterns were observed in 2024, and this study addresses both the 2024 and 2025 summers.

This study utilized data from meteorological observation stations and radar measurements to quantitatively analyze the differences in precipitation distribution between the Yeongseo(West) and Yeongdong(East Coast) regions during southwesterly wind events. The analysis revealed that cumulative precipitation in Yeongdong(East Coast) was substantially below the long-term average, and precipitation disparities were especially pronounced in specific cases. These observations confirm that the interaction between topography and atmospheric flow plays a critical role in regional precipitation patterns and indicate a high likelihood of frequent summer droughts in the Yeongdong(East Coast) region.

Furthermore, this study examines representative cases with large precipitation differences between Yeongseo(West) and Yeongdong(East Coast) to quantitatively assess the vertical extent of the rain shadow effect. Conversely, cases where the western precipitation band moved eastward without experiencing a rain shadow were also analyzed. This approach aims to provide fundamental information that can improve the accuracy of precipitation probability and amount forecasts for the Yeongdong(East Coast) region in future operational forecasts.

**Keywords:** East Coast, Summer drought, rain shadow, south-westerlies