도심 항공 모빌리티를 위한 기계 학습 기반 도시규모 3D 바람장 에뮬레이터

배진일, 이윤형, 노주환, 강건, 김재진, 손락훈

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공

도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM)은 차세대 핵심 교통수단 중 하나의 대안으로 꼽히고 있다. UAM의 안전한 운항을 지원하기 위해서는 복잡한 도시 지형과 저고도에서 발생하는 국지적인 기상현상을 정밀하게 반영한 고해상도의 기상정보를 실시간으로 제공하는 것이 필수적이다. 현행 수치예보모델은 낮은 격자 해상도로 인해 복잡한 도시 지형의 대기경계층 난류 특성을 충분히 포착하지 못한다. 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 고해상도 기상자료 생성이 가능하나, 초단기로 고해상도 기상정보를 제공하는 데 한계가 존재한다. 본 연구에서는 초해상도 기법 중 하나인 Residual Dense Network(RDN)를 이용하여 저해상도의 수치예보모델 자료(LDAPS)를 기반으로 3차원 기상장을 생성하는 인공지능 알고리즘을 개발하였다. 다양한 바람 패턴에 대한 예측 정확도를 향상시키기 위해 풍향과 풍속을 기반으로 바람장을 군집화하고, 각 군집에 최적화된 서브모델을 구성했다. 최종적으로는 각 시간대의 풍향 확률과 풍속 분포 비율을 가중치로 적용하여 서브모델들의 예측 결과를 앙상블하는 방식을 적용했다. 학습 타깃은 CFD 시뮬레이션 결과이며, 모델 입력은 LDAPS에서 산출한 수평 바람 성분과 기온에 지형고도, 건물 비율, 건물면적밀도를 결합하여 도시 공역의 공간적 특성을 정밀 반영하도록 설계하였다. 평가 결과, 인공지능 모델은 LDAPS에 전통적인 보간법을 이용한 결과보다 전반적으로 우수한 정확도를 보였고, 입력 자료에 직접 포함되지 않는 수직 바람 성분과 풍속에 대해서도 유의미한 예측 성능을 확보하였다. 아울러 3차원 기상정보를 CFD 대비 계산 시간을 2-3분 내로 단축하여, UAM 운항을 위한 실시간 기상정보 생성의 실용적 가능성을 제시한다. 본 연구 결과는 향후 UAM 관제 시스템 및 운항 계획 수립에 핵심적인 자료로 활용될 수 있을 것이다.

Keywords: 도시기상, Urban Air Mobility(UAM), Computational Fluid Dynamics(CFD), 인공지능

※ 이 연구는 기상청 한국형 도심항공교통(K-UAM) 안전운용체계 핵심기술 개발(RS-2024-00404042), 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(RS-2024-00343921)의 지원으로 수행되었습니다.

특별세션 2 / UAM 기상 측정/예측 2-2

Effects of Multiscale Terrain Representation on Low-Level Wind Speed Time Series in High-Resolution WRF Simulations

Song-Lak Kang[1], Jung-Hee Ryu[2]

[1]Department of Atmospheric and Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University
[2]Institute for Smart Infrastructure, Gangneung-Wonju National University

Surface forcing—such as terrain elevation and surface sensible and latent heat fluxes—plays a critical role in shaping the atmospheric boundary layer (ABL), which is, by definition, directly influenced by the earth's surface. Advanced Air Mobility (AAM), including Urban Air Mobility (UAM), is expected to operate within low-altitude corridors between about 300 and 600 m above ground level (AGL), a layer strongly modulated by surface-driven boundary-layer processes, particularly the diurnal cycle associated with alternating surface heating and cooling. This study systematically examines the effects of multiscale terrain representation on wind speed time series within the AAM corridor, using idealized large-eddy simulations (LES) with the WRF model at 100-m grid spacing. Simulations were conducted over a mesoscale domain for the diurnal period from 09:00 to 21:00 local time (LT), employing terrain datasets at five horizontal resolutions—12 km, 8 km, 4 km, 1 km, and 0.1 km—together with a flat-terrain reference. Results show that regions of the top 1% wind speed variance, for an initial profile of U = 5 m s^{-1} (where U is the mean east-west wind component), were consistent in simulations using the 0.1-, 1-, and 4-km terrain datasets but diverged with the 8- and 12-km datasets. Contrary to the expectation of a monotonic increase in temporal variance with finer terrain resolution, the 4-, 1-, and 0.1-km datasets produced comparable variances, all substantially larger than those from the 8- and 12-km datasets. When focusing specifically on the top 1% variance values, however, the 4-km dataset yielded the largest variances, followed by the 1-km and 0.1-km datasets, with clear distinctions among them. These findings suggest that terrain features on scales several times greater than the daytime ABL height can exert an unexpectedly dominant influence on extreme wind variability, with important implications for UAM corridor safety and hazard prediction.

Keywords: Urban Air Mobility (UAM), Atmospheric Boundary Layer (ABL), Terrain representation, Wind variability

※ This work was supported by the Korean Meteorological Administration Research and Development Program under Grant KMI(RS-2024-00404042)

WRF-LES를 활용한 UAM 특화 고해상도 자료동화 및 예측 시스템 개발

신지훈[1], 정준식[2], 조승일[1], 강성락[3], 김재진[1]

[1]부경대학교 환경대기과학전공
[2]부산대학교 대기환경과학과
[3]강릉원주대학교 대기환경과학과

새로운 교통 개념인 도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM)은 안전하고 효율적인 운행을 위해 정밀하고 신뢰할 수 있는 도시 기상 예보가 필요하다. 이에 한국형 도심항공교통(Korean Urban Air Mobility, K-UAM) 운용 시스템의 일환으로 고해상도·초단기 도시 기상 예측 시스템이 개발되었다. 본 시스템은 Weather Research and Forecasting Large Eddy Simulation(WRF-LES) 모델을 사용하며, 3개의 중첩 도면으로 100m 해상도까지 동적으로 다운스케일링하여 도시 내 미시 규모 기상 및 난류를 고해상도로 예측할 수 있다. 또한 WRF 자료동화(WRF data assimilation) 기법이 순환(cycling) 방식으로 통합되어, 고해상도 분석장을 빠른 시간 간격(10분)으로 산출할 수 있다. 본 모델을 울산 UAM 테스트베드 및 보성 지역을 대상으로 수행하고 지상 기상 관측망과 보성 표준 기상관측소 자료와의 비교를 통해 난류 특성의 모의 성능을 평가하였다. 관측자료를 활용하여 모델 설정을 최적화하고, 중규모–미시 규모 모델 경계에서 난류가 현실적으로 생성되도록 모델 인터페이스 기술을 개발하고 검증하였다. 추가적으로 WRF 3D-VAR와 Incremental Analysis Update(IAU)을 활용한 연속적 자료동화가 도시 규모 기상 예측 개선에 미치는 영향을 평가하였다. 본 예측 시스템은 상세한 도시 기상 정보를 제공함으로써 UAM 운항의 안전성과 효율성을 지원할 수 있을 것으로 보인다.

Keywords: UAM, 고해상도 예측 시스템, 자료동화, 난류 예측, WRF-LES

특별세션 2 / UAM 기상 측정/예측 2-4

Development of a Ultra-High-Resolution Atmospheric Turbulence Modeling Framework for Urban Air Mobility

Sang-Hyun Lee[1,2], Won Jung[1,2], Ji-Hoon Shin[3]

[1]Department of Atmospheric Science, Kongju National University
[2]Particle Pollution Research and Management Center
[3]Department of Environmental Atmospheric Science, Pukyong National University

As Urban Air Mobility (UAM) systems operate at low altitudes (300-600 m), flight safety can critically be affected by the atmospheric boundary layer (ABL) turbulence driven by heterogeneous urban structures and surface thermal inhomogeneity. Therefore, accurate risk assessment due to the ABL turbulence requires high-resolution wind fields that realistically incorporate surface morphological and meteorological conditions. This study presents a UAM-targeted ultra-high-resolution (~5m) atmospheric turbulence modeling framework using the PALM large-eddy simulation model over a UAM testbed in Ulsan, South Korea. The model is configured with high-fidelity building geometry, terrain elevation, and land cover data processed from the national GIS database, and diurnal variations in surface temperatures for roofs, walls, roads, and other surfaces are prescribed from the MUSE model outputs. Test simulation results showed that the modeling system can effectively capture almost full spectrum of the daytime convective boundary layer, above several tens meters. While the WRF-LES (100 m resolution) could not resolve the small-scale turbulence crucial to UAM operations. Sensitivity simulations emphasize the importance of adding reliable inflow turbulence in predicting the small-scale turbulence. Overall, the proposed modeling framework is capable of providing the atmospheric turbulence data required for UAM hazard assessment, suggesting its potential as a foundational component for future real-time operational support systems.

Keywords: Large-Eddy Simulation (LES), PALM, Turbulence, UAM

※ This work was funded by the Korea Meteorological Administration Research and Development Program under Grant (RS-2024-00404042)

특별세션 2 / UAM 기상 측정/예측 2-5

UAM 운항 지원을 위한 위험기상 확률 예측 시스템

강태훈, 신다환, 차동현, 박상서, 이명인, 송창근

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

도시화의 심화 및 인구 집중으로 인한 교통 혼잡이 구조적 문제로 고착되면서, 도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM)이 현실적 대안으로 부상하고 있다. UAM은 도심 저고도 상공에서 사람이나 화물을 운송하는 항공교통 수단으로, 교통 혼합 완화, 신속한 물류 운송, 산악·도서 지역 응급 환자 이송 등 기존 지상 교통수단의 한계를 보완할 수 있어 현재 전 세계적으로 상용화를 위한 노력이 활발히 이루어지고 있다. 이를 위한 핵심 과업 중 하나는 UAM의 운항을 위협하는 위험기상을 정확히 예측하여 UAM의 안전 운항을 지원하는 것이다. 고고도 항공 운항에 최적화된 기존 항공기상 예보와 달리, 저고도에서 운항하는 UAM에는 특화된 예측 시스템 구축이 필요하다. UAM은 기체 규모가 작고, 복잡한 도심 지형과 경계층 대기의 직접적인 영향을 받는다. 특히, 저시정, 뇌전, 착빙은 대표적인 위험기상으로 가시성 저하, 전자장비 오작동, 기체 공력 저하를 유발하여 운항 안전을 위협하므로 이에 대한 정밀한 예측이 필수적이다.

본 연구에서는 기상청 현업 수치예보모델(UM, KIM, LDAPS, LENS 등)의 예측 결과를 통합해 뇌전, 저시정, 착빙에 대한 위험기상 확률 예측 시스템을 개발하고 자한다. 각 현상별 예단지수를 활용, 모델별 예측 성능 기반의 가중 앙상블을 구성함으로써 단일 모델 예측의 불확실성을 완화하고, 시공간적으로 신뢰 높은 확률 예측 정보를 산출한다. 그 후, 위성 관측을 활용하여 산출된 검증 자료를 통해 예측 정확도와 그 실효성을 평가한다. 현재는 해당 위험기상 예측 시스템의 구축이 진행 중이며, 그 과정을 소개하고자 한다.

Keywords: UAM, 수치모델, 뇌전, 안개, 착빙, 원격탐사

특별세션 2 / UAM 기상 측정/예측 2-6

CFD 시뮬레이션 기반 공력 해석을 통한 UAM 동적 거동 분석

이성민, 김건욱, 이현제, 신이수, 정석원, 이재화, 손홍선, 김주하

울산과학기술원 기계공학과

인구 밀도가 높은 도시 환경에서의 지상 교통 체증 문제를 완화하기 위해 도심 항공 모빌리티 (Urban Air Mobility, UAM)가 차세대 교통수단으로 주목받고 있다. UAM 운항의 상용화를 위해서는 안전성, 신뢰성, 효율성이 필수적으로 요구되며, 이를 위해 난류, 돌풍과 같은 외부 교란 상황에서 기체의 공기역학적 동적 거동을 정확히 모델링하는 것이 중요하다. 그러나 실제 비행 시험 데이터의 높은 비용과 제한된 접근성으로 인해 초기 단계의 공기역학적 모델링 및 시뮬레이션 개발에 제약이 따른다. 따라서, 본 연구에서는 UAM 기체의 초기 단계 검증을 위한 실용적이고 효율적인 플랫폼을 제공하기 위해 CFD 시뮬레이션 기반 공력 해석을 통한 고정밀 6 자유도 (6 - DOF) 비행 시뮬레이션 시스템를 제시한다. 본 연구에서 사용된 공기역학적 계수는 대표적인 전기 수직 이착륙 (eVTOL) 항공기인 Joby S4 기체에 대한 CFD 시뮬레이션을 통해 식별하였으며, 교차검증을 위해 Microsoft Flight Simulator 2024 (MSFS 2024)에서 획득한 순항 비행 데이터와 비교하였다. 또한, 동일한 절차를 고정익 항공기인 Cessna 172에 적용하여 식별된 계수를 기존에 연구되어진 값과 정량적으로 비교하여 시뮬레이션의 신뢰성을 확보하였다.

제안된 비행 시뮬레이션은 공기역학적 모델링, 제어 시스템 개발, 비행 역학 분석에 대한 추가 연구를 지원하고 도심 항공 모빌리티 (UAM) 시스템의 개념적·운영적 발전에 기여할 것으로 기대된다. 나아가, 본 연구에서는 제안된 비행 시뮬레이션에 WRF-LES로부터 산출된 실제 도심 상공의 기상 예측 데이터를 적용하여, 위험 난류가 발생하는 상황에서 UAM 동적 거동을 분석하고 난류 강도에 따른 UAM 운항 위험도를 평가하였다. 이를 통해 UAM 운항 안정성에 영향을 미치는 난류 발생 메커니즘과 지배적인 유동 성분을 규명하고, 나아가 UAM 비행에 특화된 난류 진단 지수를 개발하고자 한다.

Keywords: UAM 비행 모델링, 난류 진단, CFD 시뮬레이션, UAM 동적 거동

※ 이 연구는 기상청 〈「한국형 도심항공교통(K-UAM) 안전운용체계 핵심기술개발」〉 RS-2024-00404042의 지원으로 수행되었습니다.