

## 한국항공우주연구원 비행체의 안전을 위한 관측자료 기반 난류의 객관적 강도 정보 지원 시스템 개발

김정훈<sup>1</sup>, 김주섭<sup>1</sup>, 이주현<sup>1</sup>, 이단비<sup>1</sup>, 최은호<sup>2</sup>, 서성호<sup>2</sup>, 김홍일<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울대학교, 지구환경과학부

<sup>2</sup>한국항공우주연구원, 나로우주센터

대기 중 연직 시어(wind shear)등에 의한 난류는 비행체의 정밀 목표 고도 및 위치로의 비행에 영향을 주는 중요한 기상 요소이다. 대류권 및 안정한 성층권에서의 연직 시어 등으로 인한 난류는 발사체 비행 초기의 선수각(heading angle)의 미세한 뒤틀림은 목표로 설정한 궤도로의 발사체 안착에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 나로 우주센터 발사체 궤적 주변의 대류권계면에서 발생하는 연직 시어에 의한 난류 파악은 나로우주센터에서 발사하게 될 비행체의 비행 안정성 확보 및 한국형 발사체 신뢰성 확보 측면에서 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 나로우주센터에서 윈드라이다와 라디오존데로 관측한 바람 자료를 로그정규맵핑기술을 통해 대기 중 객관적 난류 강도인 에디소산율(eddy dissipation rate; EDR)로 변환하는 관계식을 도출하였다. 먼저, 윈드라이다와 라디오존데로 관측된 바람 자료의 신뢰도를 판단하기 위해 ERA5 재분석 자료의 바람 자료와 비교한 결과, 통계적으로 높은 상관도를 보였음을 확인하였다. 로그정규맵핑기술에 필요한 관측기반 난류진단변수로는 연직속도의 절댓값(윈드라이다)과 연직 윈드시어(윈드라이다, 라디오존데)가 활용됐다. 계절별(봄, 여름, 가을, 겨울), 고도별(하층, 중층, 상층, 고층)로 관측된 난류진단변수들을 나누어 각각 확률밀도함수를 산출하였고, 각 확률밀도함수로부터 평균제곱근 오차의 합이 가장 작은 로그정규분포 곡선을 산출하였다. 산출한 곡선의 평균과 표준편차를 통해 관측된 난류진단변수별, 계절별, 고도별 관계식을 도출하였다. 본 연구를 통해 나로우주센터에 설치된 윈드라이다와 라디오존데에서 관측된 바람 자료를 활용한 계절별, 고도별 대기 중 객관적 난류 강도인 EDR 정보를 획득하였다. 이는 현재 개발 중인 다중모델 기반 한국항공우주연구원의 윈드시어 예측 시스템의 객관적 검증에 활용될 예정이다. 궁극적으로 발사체 하중 변화 예측을 통한 비행체 안전성 확보에 큰 도움이 될 것으로 기대된다.

Key words: 연직윈드시어, 난류소산율, 로그정규맵핑기술, 라디오존데, 윈드라이다

※ 이 연구는 한국항공우주연구원의 2024년 기본사업인 ‘우주센터 선진화사업’의 재원으로 지원을 받아 수행되었습니다.

## 한국형 발사체 지원을 위한 항공기 관측 자료 기반의 윈드시어예측모듈 검증에 관한 연구

이주현<sup>1</sup>, 김정훈<sup>1</sup>, 김수현<sup>2</sup>, 최은호<sup>3</sup>, 서성호<sup>3</sup>, 김홍일<sup>3</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부

<sup>2</sup>NASA Ames Research Center

<sup>3</sup>한국항공우주연구원 나로우주센터

나로우주센터에서 발사되는 나로 및 누리호와 같은 한국형 발사체 지원을 위해 한국항공우주연구원은 기상 발사 기준을 제시하고 있다. 특히 나로우주센터는 북반구 내 세기가 가장 강한 동아시아 제트 지역에 위치하고 있어, 대류권 상부와 성층권 하부에서의 강한 연직 윈드시어에 의한 난류가 목표 궤도로의 비행체의 성공적인 안착에 지대한 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 미국 해양대기청에서 제공하고 있는 Global Forecast System (GFS)과 기상청에서 제공하고 있는 Global Data Assimilation and Prediction System (GDAPS) 수치 예보 모델 자료를 이용하여 다중 모델 기반의 윈드시어예측모듈 (Multi-Model-based Diagnostic Ensemble Wind Shear Guidance Module, 이하 MMDE-WSGM)을 개발하였다. WSGM은 동아시아 제트 근처에서 수평 및 수직 윈드시어로 발생하는 자유 대기 중 난류의 객관적 강도 지표를 산출하기 위한 알고리즘이다. 총 32개의 난류 지수를 로그정규맵핑 방법을 이용하여 에너지소산률(Energy Dissipation Rate, 이하 EDR) 규모로 변환한 후, 관측자료와의 검증을 통해 산출된 가중치를 개별지수에 적용하고, 각 모델에서의 WSGM 예측값을 계산한 뒤 최종적으로 모델 앙상블을 취한다. 이때 발사체 지점을 포함한 동아시아 및 한반도 중심의 MMDE-WSGM 예측값 최적화를 위해 본 연구에서는 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)에서 제공하는 Aircraft Meteorological Data Relay (AMDAR) EDR 자료와 국립기상과학원에서 제공하는 나라호 항공기 관측 자료를 이용하여 32개 개별 난류 지수에 대한 검증을 실행하였다. 나라호 자료의 경우 1초 간격의 3차원 바람 정보를 제공하고 있어 2차 구조 함수와 파워스펙트럼 방법론을 이용하여 EDR 값을 계산하였다. 이후 AMDAR EDR과 나라호 EDR 중 최대값을 산출하여 Area under the ROC curve (AUC) 검증 기법을 활용하여 모듈 예측값과의 검증을 실행하였다. 중위도, 동아시아, 한반도 세 영역에서 고도 5-18 km에 대하여 검증을 수행하였다. 그 결과, 중위도 및 동아시아 지역과 같이 대류권 상부에서의 관측된 자료가 많이 존재하는 곳에서는 AUC 값이 0.8 이상으로 높게 나타난 반면, 한반도 지역의 경우 대류권 중층 및 하층의 복잡한 난류 기작에 기인한 관측자료로 인해 그 값이 0.61 정도로 나타났다. 계절별, 고도별 난류 발생 특성과 중·저고도 중심의 나라호 관측 자료 특성을 고려한 MMDE-WSGM 최적화를 위해 추가적으로 계절별, 고도별 검증을 수행하였다.

Key words: 한국항공우주연구원, 윈드시어예측모듈(WSGM), 다중 모델 기반 진단 앙상블(MMDE)

※ 이 연구는 한국항공우주연구원의 2024년 기본사업인 ‘우주센터 선진화사업’의 재원으로 지원을 받아 수행되었습니다.

## 기상레이더 기반 대류에 의한 난류 강도 및 발생 특성 분석

김주섭<sup>1</sup>, 김정훈<sup>1</sup>, 이단비<sup>2</sup>, 이규원<sup>3</sup>

<sup>1</sup>서울대학교 지구환경과학부

<sup>2</sup>서울대학교 기초과학연구원

<sup>3</sup>경북대학교 지구시스템과학부

대기에서 발생하는 난류는 크게 제트류 근처 청천난류, 산악에 의한 산악파 난류, 대류에 의한 난류로 구분할 수 있다. 특히 대류에 의한 난류는 대류운 내부에서 연직속도의 큰 변화로 인해 발생하기도 하고 구름 밖 비교적 맑은 대기에서 대류운 주변 기류변형 및 대류운이 유도하는 파동파괴에 의해 발생하기도 한다. 단시간에 급격히 발달하고 소멸할 수 있는 대류운의 발생은 현업 수치모델로 예측하기 어렵다. 반면 기상레이더 관측망은 시공간적으로 해상도가 높아 대류운 발생 및 발달 파악에 용이하기 때문에 레이더를 대류운 내부 난류 탐지에 활용하면 이점이 있을 것으로 예상된다. 본 연구에서는 기상청에서 운영하는 S-밴드 이중편파 도플러 레이더로 관측된 스펙트럼 폭(spectrum width; SW)을 로그정규맵핑기술을 통해 난류소산율(eddy dissipation rate; EDR)로 변환하고, 대류 유형에 따른 난류의 객관적 강도 및 발생 특성을 파악하였다. 대류 영역에 해당할 가능성이 높은 SW 자료를 선별하기 위해, 2021년 레이더 관측자료 중 30분 간격으로 반사도가 15 dBZ 이상인 영역에 해당되는 SW 자료를 수집하였다. 다음으로 수집된 SW 자료의 확률밀도함수로부터 평균제곱근 오차의 합이 가장 작은 로그정규분포 곡선을 산출하였다. 산출한 곡선의 평균과 표준편차를 통해 SW를 EDR 규모로 변환하는 관계식을 도출하였다. 또한 연직최대(column-maximum) 반사도 자료를 기반으로 한 알고리즘을 통해 대류계의 대류영역과 층상영역을 구분하였다. 구름무리, 고립된 뇌우 유형에 속하는 대류 사례를 각각 하나씩 선정하고 SW 기반 EDR(이하 SW-EDR) 자료를 바탕으로 난류 강도 및 발생 특성 분석을 실시하였다. 분석 결과, 두 사례에서 공통적으로 대류 영역에서 같은 강도의 난류의 발생 비율이 층상 영역보다 높게 나타나고, 반사도가 상대적으로 낮은 대류운의 상단부와 모루운 부근에서 강한 강도의 난류가 분포하였음을 확인하였다. 본 연구 결과를 통해서 대류운에 의한 난류를 회피하기 위해선 반사도 기반의 일반적 정보보단 SW-EDR 정보를 활용하고, 대류운의 상단부와 모루운을 회피하여 운항하는 것이 안전한 항공기 운항에 도움이 될 것으로 기대된다.

Key words: 난류, 난류소산율, 로그정규맵핑기술, 기상레이더, 스펙트럼 폭

※ 이 연구는 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」(KMI2022-00310)의 지원으로 수행되었습니다.

## Weather-related social acceptance for Advanced Air Mobility (AAM) Operations

Wan-Sik Won, Dooyoung Kwon, Yoonjeong Choi

Department of Advanced Air Transportation, Korea Aerospace University

Advanced air mobility (AAM) operates at low altitudes of 300 to 600 meters. Therefore, it is expected to be more affected by weather variables such as wind and visibility in the lower atmosphere compared to existing aircraft operations. Meteorological factors are known to impact not only the safety of AAM operations but also their social acceptability.

In this study, a survey was conducted to investigate the social acceptability of AAM operations under various weather conditions, and the frequency of AAM operation restrictions was analyzed by examining weather factors in Seoul and Jeju, representative mega city and tourist destinations in Korea. The survey also explored the willingness-to-fly (WTF) based on weather factors and aircraft scale.

The results showed that the WTF varied depending on aircraft types and weather impacts. In particular, anxiety about wind, fog and snow was found to be significant. Small aircraft boarding experience does not influence the intention to board AAMs, but among respondents who expressed an intention to board AAMs in initial operations stage, it appears that boarding experience may slightly moderate this intention in relation to rainy weather factors.

However, the weather-related barriers for AAM were found to be higher than for other air transportations. Meteorological analysis of Seoul and Jeju in Korea showed that the main limiting conditions were low cloud levels associated with rain conditions in Seoul and low cloud ceiling during the rainy season and strong winds that occur throughout the year in Jeju. These results suggest that it is necessary to secure trust in the stability of AAM operations under adverse weather conditions in the future.

Key words: AAM, UAM, weather impact, willingness-to-fly, social acceptance

※ This research was supported by 2024 Korea Aerospace University Faculty Research Grant and the KMITI grants funded by the Korea Meteorological Administration (KMA) Research and Development Program (RS-2024-00404042 & RS-2024-00403421).

## Advancing the rain and snow determination method during CAD events on the East Coast of South Korea by using Froude number

JungJin Kim, JaeHun Sung

Republic of Korea Air Force 18<sup>th</sup> Fighter Wing 18<sup>th</sup> Weather Squadron

The topography of the East Coast of South Korea is complicated due to mountain chains in the west side and the ocean in the east side. On the top of that the elevation distribution is also irregular on the East Coast of South Korea, which makes the weather forecast more difficult, especially anticipating the precipitation form, such as rain or snow. In general, westerlies is common in Korea Peninsula due to the thermal wind. However, during the late winter, the wind occasionally blow from the opposite direction, which refers to easterly, due to the upper cold air move to northeast side of the East Asia. When the easterly containing the cold and dense air approaches to the East Coast of Korea, the Cold Air Damming(CAD) could occurs due to the blocking caused by the west side of mountain chains. In this study, we endeavored to determine the threshold value of the rain and snow transition during CAD events by using Froude number. Three case studies (24/01/20, 24/02/15, 24/02/21) were used to examine the vertical and horizontal differences in the rain and snow transition, and the statistical method, such as Student's t-test, Welch's t-test, f-test were also employed to verify the statistical significance of the threshold value of the rain and snow transition. In this study, we tried to advance the determination method of the rain and snow forecast by using Froude number to separate the day with CAD events and the day with no CAD events. After separating the day with CAD or No CAD by using Froude number, we used composite analysis to identify the threshold value of the rain and snow transition on 925 hPa and 850 hPa level temperature. We found the critical difference in the temperature on 925 hPa and 850 hPa level in the moments of the rain and snow transition depends on the existence of the CAD.

Key words: East Coast, CAD, Cold Air Damming, Froude number, rain and snow transition, case study

## 대전광역시 살수차 최적 운행지역 선정과 정책활용 방안

한진영, 김성민, 김현우, 이재준, 방철한

한국기상산업기술원 산업성장본부 기상기후빅데이터센터

최근 급격한 기후변화로 폭염일수는 과거 30년 평균 10.5일에서 2024년 22.7일로 약 2.2배 증가하였으며, 2018년, 1994년과 더불어 3번째로 긴 폭염일수를 기록하였다. 이러한 환경 변화에 민첩하게 대응하고 국민을 보호하기 위해서 여름철 폭염 방재 대책의 일환으로 정부는 다양한 정책들을 시도하고 있다. 대표적으로 도시의 열섬 현상과 도로 변형을 방지하기 위한 여름철 폭염 방재 대책으로서 행정안전부 주관 하에 지자체별로 살수차 운행 정책이 시행되고 있으며, 기후변화를 고려했을 때 이러한 시책의 중요성은 더욱 확대될 것으로 예상할 수 있다. 그러나 대다수 지자체의 경우 살수차 운행경로 설정단계에서 지역 행정 처리의 편의성, 업무 담당자의 경험적 측면에 따르는 경향이 있기 때문에 효과적인 운영 관점에서는 현실적으로 아직 부족한 면이 있는 것이 사실이다.

이에 한국기상산업기술원에서는 디지털플랫폼정부의 데이터기반행정 활성화를 위해 대전광역시와 협업하여 기상기후 데이터를 활용한 살수차 최적 운영 지역 분석 방법론을 제안하였으며, 기상기후데이터와 유관데이터 자체 분석을 통한 살수차 운행경로 최적 운영 방안을 제시하였다. 데이터분석에는 고해상도 격자자료와 GK-2A 위성 자료, 인구·교통 데이터(행정동별 인구 현황, 교통 시설 정보, 역별 승하차 인원, 교통량 등)를 융합하여 대전광역시 82개 행정동과 여름철 폭염 방재 기간인 5~8월 14주를 대상으로 AutoML의 방법 중 하나인 Tree-based Pipeline Optimization Tool(TPOT) 라이브러리를 활용하였으며, 제안된 방법론에 인구와 기온의 영향을 종합적으로 반영하고자 최고기온과 행정동 면적별 단위 인구의 결합 값을 종속변수로 사용하였다. 현행 살수차 운행경로를 바탕으로 추가적인 살수차 입지 선정에서 최적의 지역을 산출하였으며 이를 행정동 별로 시각화하여 정책 활용 의사 결정 자료를 도출할 수 있었다.

본 연구는 대전광역시의 살수차 운영에 관한 현 정책과 분석결과 간 정합성을 점검하여 시민 체감 정책 개발 및 효율성 개선을 위한 근거를 마련했다는 데 의의가 있다. 이번 발표에서는 해당 성과 공유와 더불어 지자체별 활용 및 협력 방안을 심도 있게 논의하고, 실무 적용 가능성을 타진해 보고자 한다.

Key words: 폭염대응, 살수차, 고해상도격자자료, AutoML, 이상기후

※ 이 연구는 한국기상산업기술원의 기상산업활성화 사업과 연계하여 수행되었습니다.

\* Corresponding author : Sung-Min Kim, Weather & Climate Big Data Center, Korea Meteorological Institute, e-mail : sungmin27@gmail.com