

Operational tropical depression detection using deep learning and geostationary satellites

Ingyu Park¹, Chang-Hoi Ho^{1,2}

¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

²Department of Climate and Energy Systems Engineering, Ewha Womans University

As tropical depressions (TDs) have the potential to develop into tropical cyclones, it is crucial to rapidly detect and accurately identify their center location. However, operational forecasters face difficulties due to the disorganized and unclear cloud structures of TDs. This study presents a deep learning model that can automatically detect TDs and estimate their center locations at 10-minute intervals using geostationary satellite imagery over the western North Pacific. The model's ground truth data consists of two-dimensional Gaussian density maps based on the center locations of TDs, obtained from best track data from the Korea Meteorological Administration (KMA), the Joint Typhoon Warning Center, and the Regional Specialized Meteorological Centre Tokyo, along with KMA real-time analysis data. Multi-channel infrared (8.6, 10.4, 11.2, and 12.4 μm) and water vapor (6.2, 6.9, and 7.3 μm) imagery from Himawari-8/9 and GEO-KOMPSAT-2A satellites were used as model inputs. A deep learning model with a U-Net architecture, which incorporates inception modules, was trained to generate density maps. The maximum value of the density map indicates the location of the TD center, and TD occurrence is determined by comparing this value with a specific threshold (0.24). The 2015–2024 dataset was divided into 7 years for training (2015–2021), 2 years for validation (2022–2023), and 1 year for testing (2024). During the testing period, the model demonstrated excellent detection performance with 100% precision and 88.9% recall. Center position errors for detected cases were evaluated using the Haversine formula, with the results of 11.1, 24.1, 39.6, 64.8, and 95.7 km at the 10th, 25th, 50th, 75th, and 90th percentiles, respectively. This model demonstrates excellent performance in TD detection and position estimation, and is anticipated to be a valuable tool in enhancing operational real-time TD monitoring systems by providing rapid information at 10-minute intervals.

Keywords: Tropical depressions, tropical cyclone, detection, geostationary satellite, deep learning

※ This work was funded by the Korea Meteorological Administration Research and Development Program under Grant RS-2023-00236880.

관측 및 예보 분과 / 관측 및 예보 3-2

천리안위성 2A호 적외채널을 활용한 머신러닝 기반 하층 수증기량 및 수증기 수송량 산출

이윤진, 김정훈

지구환경과학부

여름철 한반도 집중호우의 발달과 강화에는 남서풍 또는 서풍 하층제트에 의해 수송되는 하층 수증기가 중요한 역할을 한다. 그러나 해양에서의 하층 수증기 수송을 관측하는 데 있어 지상 기반 및 고층 관측은 낮은 시공간 해상도로 인해 실시간 모니터링과 예보 활용에 한계가 있다. 본 연구에서는 높은 공간해상도로 실시간 모니터링이 가능한 천리안위성 2A호의 적외 채널 자료를 사용하여 하층 수증기량과 수송량을 산출하였다. 천리안위성 2A호의 세 수증기 채널(6.3, 6.9, 7.3 μm)은 주로 대기 중층 이상의 수증기에 민감하기 때문에 대기 경계층 내의 수증기량을 관측하는데 어려움이 있는 반면, 대기의 창 영역의 두 적외 채널(10.5 μm , 12.3 μm)의 밝기온도 차이(Split window difference; SWD)는 하층 수증기량과의 밀접한 관련이 있다. 이를 바탕으로 천리안위성 2A호 적외 채널 밝기온도 자료, SWD, 태양 천정각, 고도, 지표면 온도 등을 입력자료로, ERA5 재분석자료의 하층 가강수량(1000-850 hPa)을 출력자료로 사용하여 다층 퍼셉트론(Multilayer perceptron) 기반 머신러닝 모델을 개발하였다. 모델은 육지와 해양을 구분하여 모델을 학습하였으며, 추론 단계에서는 두 모델의 결과를 통합하여 동아시아 전역의 하층 수증기량을 산출하였다. 이후 Global Data Assimilation and Prediction System(GDAPS) 모델 바람장을 이용하여 하층 수증기 수송량을 추가로 산출하였다. 산출된 하층 수증기량과 하층 수증기 수송량은 ERA5 재분석자료로 검증하였으며, 기존 마이크로파 채널 기반 산출물인 Advected Layer Precipitable Water(ALPW)와 비교·분석하였다. 또한 집중호우 사례를 대상으로 집중호우 발생 전후의 하층 수증기량 및 수송량의 변화를 살펴봄으로써, 적외 채널 기반 산출물의 예보 활용 가능성과 마이크로파 채널 기반의 산출물과의 상호보완적 활용 방안을 제시한다.

Keywords: 천리안위성 2A호, 하층 수증기, 하층 수증기 수송, 머신러닝, Split window difference

※ 이 연구는 기상청 「기상위성 융합 활용 기술개발 사업」(RS-2025-02219688)의 지원과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2025-00519412)을 받아 수행되었습니다.

레이더 3차원 바람장 기반 저기압 회전중심 탐지 기술개발

박소연, 예보영, 석미경

기상청 기상레이더센터

한반도에서 발생하는 강풍과 호우와 같은 위험기상의 주요 원인 중 하나는 중위도 저기압으로, 전선과 결합해 중규모에서 중관규모에 이르는 대기 소용돌이를 형성한다. 일반적으로 기상예보관은 레이더 에코를 통해 강수 강도 및 이동 변화로 저기압을 실시간으로 감시하지만, 주관적인 분석에 의존한다는 한계가 있다. 저기압에 동반된 위험기상을 효과적으로 감시하기 위해서는 보다 객관적인 저기압 중심탐지 및 분석 기법이 필요하다. 이에 본 연구에서는 레이더 3차원 바람장을 활용하여 중위도 저기압의 회전중심을 탐지하는 기술을 개발하였다.

저기압 회전중심 탐지에는 기상청 레이더 관측망으로부터 산출된 고해상도 3차원 바람장 자료인 WISSDOM (WInd Synthesis System using Doppler Measurements, Liou 2012)을 활용하였다. WISSDOM 바람장의 운동학적 특성변수인 풍향, 풍속, 와도(Vorticity)를 종합적으로 분석하여 저기압성 회전중심을 식별하였다. 탐지 알고리즘은 1) 풍속 및 와도 기반의 순환 중심 후보 격자점 추출, 2) 풍향 패턴을 이용한 저기압성 와도 영역 판별, 3) 최종 저기압 회전 중심 결정의 3단계로 구성된다. 2023년부터 2024년까지 발생한 50개의 중위도 저기압 사례에 적용한 결과, 46개 사례에서 저기압의 중심을 성공적으로 탐지하였다(탐지율 92%). 또한, 탐지된 중심의 연직 구조 분석을 통해 저기압의 발달 단계, 강도 변화 및 이동 경로를 시공간적으로 추적할 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 중위도 저기압에 동반된 위험기상의 실시간 변동 감시 및 분석에 활용될 것이며, 향후 열대저기압, 작은 규모의 요란 등 저기압성 회전과 관련된 강수시스템에도 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords: 중위도 저기압, 저기압성 회전, 3차원 레이더 바람장, 기상레이더 관측망, 위험기상

※ 이 연구는 기상청 기상레이더센터 R&D “국가레이더 통합 활용기술 개발 사업”의 “레이더 기반 위험기상 감시기술 개발(KMA2021-03121)”과제의 지원으로 수행되었습니다.

머신러닝을 활용한 하계 수도권 지역 뇌우인자 특성 분석

이태오, 양성일

공군기상단

불안정한 대기와 충분한 수증기 등으로 발생하는 뇌우는 안전한 항공 운항에 치명적인 기상요소이다. 특히 공항 관제권 내에서 발생하는 뇌우로 인해 무선통신시설과 항행안전시설 고장이 발생하고, 운항하는 항공기에 직접적인 손상이 가해지는 등 심각한 비행안전 위험 상황이 발생할 수 있다. 공군기상단은 자체 수치모델인 Korea Air Force-Weather and Research Forecasting(이하 KAF-WRF) v.4.4의 뇌우지수(Lightning Potential Index 등)를 활용하고, KI와 CAPE 등 불안정지수(Instability Index)로 대표되는 뇌우인자를 복합적으로 고려하여 뇌우를 예보한다. 하지만 수치모델 및 뇌우인자별 모의 수준이 상이한 경우 뇌우 예보 정확도의 한계가 뚜렷하며, 이에 본 연구는 하계 수도권 지역 뇌우인자 특성을 머신러닝 기법을 통해 객관적으로 분석한다. 수도권 지역에 특화된 분석을 위해 03~22년 하계(6~9월) 오산 레윈존데 데이터를 사용하였고, 계산한 뇌우인자는 다음과 같다: KI, LI, SSI, TT, CT, CAPE, TPW, SRH, 850EQT. 뇌우 발생일자는 서울, 수원, 오산 공군기지 지상관측표를 기준으로 하여 ERA5 재분석 자료 활용, 자기조직화지도(SOM: Self Organizing Map)를 통해 6가지로 군집화하였다. 이를 발생일 밀도 분포 기준 3개 Group으로 재분류하고 Group별 뇌우인자 우선순위를 Random Forest를 통해 분석하였다. 상·하위 우선순위를 도출한 결과, 초여름 KI / 한여름 TPW / 늦여름 CAPE가 각각 1순위로 선정되었고, TT와 SSI는 모든 Group에서 하위 1, 2순위를 차지하였다. 나아가 머신러닝 기반 뇌우 예측체계 활용 가능성 검증을 위해 F1 Score를 사용하였고, 검증 결과 확률 기준 40%에서 Score가 극대화되었다. 하계 수도권 지역 뇌우인자 특성 분석을 통해 강수 유형·기간별 뇌우인자 우선순위를 도출하여 기상예보 현업에 활용할 수 있을 것이다. 나아가 광주 레윈존데 데이터 등을 활용하여 한반도 남부에 특화된 뇌우인자 분석도 가능할 것이라 기대한다.

Keywords: 뇌우, 불안정지수, SOM Clustering, Random Forest, F1 Score

지상 우박관측자료를 활용한 대기수상체 분류 개선

최희정, 권수현, 석미경

기상청 기상레이더센터 레이더분석과

이중편파레이더 관측변수는 강수 입자의 크기, 모양, 수농도 등 미세물리 정보를 포함하고 있어 이를 이용하여 대기수상체 분류 정보를 산출할 수 있다. 특히, 레이더 관측 특성상 발생하는 지형에 의한 빗차폐, 레이더 장비의 시스템 오차 및 강우에 의한 감쇠 등의 영향으로 인해 일부 영역에서 대기수상체 분류 정보의 균질성이 다소 낮아지거나 강한 강수가 우박 등으로 분류되기도 한다.

본 연구에서는 이중편파레이더 관측변수의 품질을 향상하고, 지상 우박관측자료를 활용하여 대기수상체 분류 기술의 정확도를 개선하고자 하였다. 첫째로 이중편파레이더 반사도 및 차등반사도의 시스템 오차 보정량을 적용하여 관측변수의 품질을 개선하였다. 두 번째로 지상의 우박 관측 사례와 미관측 사례를 이용하여 강한 강수와 우박/싸락 분류에 대한 비차등위상차의 소속함수를 개발하고 적용하였으며 차등반사도 및 비차등위상을 이용한 강우 감쇠식을 우박과 강우의 구분에 활용하였다. 마지막으로 대기수상체 분류 결과의 균질성을 높이기 위해 관측변수의 공간적 거리 및 강도를 사용하는 양방향 필터를 적용하여 강수 에코 가장자리에 나타난 관측변수의 이상값 제거하고 최빈값 필터 적용을 통해 대기수상체 분류 결과의 균질성을 확보하였다.

대기수상체 분류의 개선 결과를 검증하기 위해 기상 관측소에서 지상 우박 관측 사례를 이용하여 대기수상체의 우박 분류의 정확도 개선을 확인하였고, 지상 우박 미관측 사례를 통해서 우박/싸락으로 분류되었던 자료가 강한 강우로 분류되어 정확도가 개선되는 것을 확인하였다.

Keywords: 이중편파레이더, 대기수상체 분류, 우박, 강한 강수

※ 이 연구는 기상청 기상레이더센터 R&D "국가레이더 통합 활용기술 개발 사업"의 "레이더 기반 위험기상 감시 기술 개발 (KMA2021-03121)"과제의 지원으로 수행되었습니다.

관측 및 예보 분과 / 관측 및 예보 3-6

2024년 7월 18일 충남 집중호우 사례를 통한 Cold Pool에 의한 연속적인 집중호우 발생 과정 분석

박이준¹, 김정훈¹, 이희춘², 강현석², 이규원³

¹서울대학교 지구환경과학부

²국립기상과학원 예보연구부

³경북대학교 지구시스템과학부, 대기원격탐사연구소

강수의 증발 냉각으로 형성된 지면의 찬 유출류(cold pool)는 대류시스템 전면에서 새로운 대류를 발생·강화시키는 Back-building 과정을 통해 대류시스템 유지에 핵심적인 역할을 한다. 따라서 기존 강수로 유도된 cold pool은 호우를 발생시킬 뿐만 아니라, 그 세력이 지속될 경우 연속적인 호우를 유발할 수 있다. 본 연구에서는 2024년 7월 18일 충남 집중호우 사례를 대상으로, cold pool에 의한 연속적인 집중호우의 발생 기작을 다종의 관측 자료와 레이더 기반 3차원 바람장(WISSDOM)을 통해 분석하였다.

분석 결과, 18일 05시 준-선형 대류시스템의 증상 영역에서 강수 증발 냉각으로 지면 기온이 급격하게 하강하고, 북풍 계열의 돌풍과 함께 cold pool이 형성되었다. 이로 인해 기존 선형 대류시스템은 활-에코(bow echo) 구조로 발달하였다. WISSDOM 바람장에서 후방 유입류가 뚜렷하게 나타났으며, 그 전면에서 강한 수렴과 함께 상승 운동이 강화되어 충남 지역에 최대 60 mm/h의 집중호우가 발생하였다. 이후 cold pool은 남-북 방향으로 세력을 유지한 채 내륙으로 동진하였고, 하층제트를 따라 유입된 온난, 습윤한 공기와의 경계에서 새로운 대류 셀을 연속적으로 발생시켰다. 특히 10시에는 서해상에서 유입된 새로운 선형 대류시스템이 내륙 cold pool과 상호작용하면서 강한 하층 수렴과 함께 국지적으로 시간당 88 mm/h의 집중호우가 연속적으로 발생하였다.

본 연구는 한반도에서 cold pool에 의해 연속적인 집중호우가 발생한 사례를 다종의 관측 자료와 WISSDOM을 활용하여 분석하였다. 이를 통해 cold pool과 주변 환경과의 상호작용이 국지적인 집중호우의 연속적인 발생에 핵심적인 역할을 할 수 있음을 제시하였다. 이러한 결과는 한반도 집중호우 예측에 있어서 cold pool 진단의 중요성을 시사한다.

Keywords: Cold pool, WISSDOM, 집중호우

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「위험기상 분석 및 예보기술 고도화」 (KMA2018-00121)와 기상청 「위험기상 선제대응 기술개발사업」 (RS-2023-00233640) 지원으로 수행되었습니다.