

# Tropical cyclone surface wind retrieval using geostationary infrared satellite imagery and the pix2pix GAN algorithm

Bokyung Kong<sup>1</sup>, Chang-Hoi Ho<sup>1,2</sup>, Jinwon Kim<sup>2</sup>, Dasol Kim<sup>3</sup>, Seong-Hee Won<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Climate and Energy Engineering, Ewha Womans University

<sup>3</sup>Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology

<sup>4</sup>National Typhoon Center, Korea Meteorological Administration

An artificial intelligence (AI) model based on the image-to-image translation with conditional generative adversarial network (pix2pix GAN) algorithm was developed to estimate the surface wind speed of tropical cyclones (TCs) over the western North Pacific on the basis of infrared channel imagery from a geostationary satellite. Brightness temperatures from three infrared (IR) channels as well as their differences, a total of five variables, from the Japan Aerospace Exploration Agency Himawari-8 and 9 satellites were used as input data for training, validation, and test for 194 TCs during the period 2016–2023. Surface wind distributions from two polar-orbiting satellites, Soil Moisture and Ocean Salinity and Soil Moisture Active Passive, were used as the ground truth. Since the surface winds of TCs are largely influenced by their moving speed, the AI model was trained after standardizing the direction of movement of the TCs to the north (azimuth 0 degrees) to eliminate directional differences. This study demonstrates the potential of using only geostationary satellite data to accurately estimate the surface wind speed of TCs, providing a valuable technology that can be utilized in operational weather forecasting.

Key words: tropical cyclone, surface wind speed, geostationary satellite, pix2pix GAN, Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS), Soil Moisture Active Passive (SMAP)

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

## Ontogeny of dwarf tropical cyclones in the western North Pacific

Seungwoo Yoo<sup>1</sup>, Chang-Hoi Ho<sup>1,2</sup>, Minhee Chang<sup>3</sup>, Jinwon Kim<sup>2</sup>, and Chang-Hyun Yoo<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Climate and Energy Systems Engineering, Ewha Womans University

<sup>3</sup>Environmental Planning Institute, Seoul National University

Tropical cyclones (TCs) typically form under weak environmental deep-layer wind shear (200–850 hPa) of less than  $10 \text{ m s}^{-1}$ ; it has been observed that some TCs develop in the presence of much stronger vertical shear. This study has investigated the statistical and dynamical properties of dwarf (i.e., shallow) TCs formed in conditions of strong shear at the time of genesis, by analyzing 444 TCs over the western North Pacific for the period 2003–2022. Compared to TCs generated in weak-shear environments, dwarf TCs generally had shorter lifetimes and weaker peak intensities, and neither the underlying sea surface temperatures nor their geographical locations compensated for the strong shear. The dynamics governing the genesis of dwarf and non-dwarf TCs were compared by analyzing the terms in the azimuthally-averaged tangential wind tendency equation. The shallow structure of dwarf TCs is induced by the suppressed mean upward transport of tangential winds in the upper troposphere and the enhanced mean outward transport of vorticity in the mid-troposphere. Reduced vertical motion near the center above 500 hPa and radial outward motion near 500 hPa in the former and latter terms, respectively, limit the height of the secondary TC circulation to  $\sim 500$  hPa. However, for the dwarf TCs, the counterpart eddy terms constitute a larger portion of the tendency equation than for the others. The present results indicate the importance of both axisymmetric and asymmetric forces in the genesis of TCs, despite high wind shear. Further work to clarify the dynamical aspects of the pre-genesis evolution of dwarf TCs is underway.

Key words: Tropical cyclone, dwarf tropical cyclone, tropical cyclogenesis, vertical wind shear, tangential wind tendency equation

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

## 2024년 여름철 강수 특성 분석 및 시사점

김영준, 우재훈, 공상민, 이창재, 강혜미, 이매향, 이상진, 임윤진, 김성목, 인희진

기상청 예보국

2024년 여름철은 전국 평균 강수량 602.7mm로 평년(727.3mm)보다 적은 강수량을 보인 반면, 장마철 기간으로 한정하면 전국 평균 강수량 474.8mm를 기록하며 평년(356.7mm)의 약 132.5%를 기록하며 짧은 기간에 비가 집중되는 특징을 보였다. 또한 고수온 영향 등 수증기량이 많아 1시간 최대강수량이 100mm 넘는 사례가 많이 발생하였고, 폭염기에 발생하는 국지적인 소나기에도 구름대가 강하게 발달하여 호우특보가 자주 발표되었다. 즉 좁은 구역에 매우 강한 비가 내린 것이 이번 여름철 강수의 특징 중 하나였다고 분석된다. 태풍의 직접영향으로는 제 9호 태풍 “종다리”가 북상하며 8월 20~21일 남부지방 해안가와 중부지방 중심의 강수가 있었던 것으로 요약될 수 있겠다. 본 발표에서는 2024년 여름철 주요 강수 사례를 리뷰하고 주요 사례별로 예보 현업 관점에서의 시사점을 도출해 보고자 한다.

먼저, 장마 기간 동안에는 북태평양고기압의 서쪽 가장자리로부터 수증기가 지속적으로 유입되는 가운데, 북쪽에서 남하한 차고 건조한 공기가 주기적으로 영향을 주며 중규모 저기압을 형성해 강수에 영향을 미쳤다. 차고 건조한 공기가 단파골 형태로 내려왔기 때문에 저기압 규모가 크지 않아 중규모저기압 혹은 중규모대류계 형태로 영향을 주었다. 특히, 7월 7일부터 10일 사이 중규모 저기압 통과 후 좁은 폭의 집중호우가 발생하며 인접 지역 간 강수량 편차가 극대화되었는데, 이러한 meso 베타 이하 규모의 대류셀들은 고해상도 및 앙상블 모델의 결과로도 일관된 예측성을 얻기 어려웠다. 또한, 7월 10일 새벽에는 군산 어청도에서 시간당 146mm를 기록하였는데, 이는 기후변화로 인한 대기 중 수증기 변화가 여름철 강수 패턴에 미치는 영향을 재고할 필요성을 시사한다.

다른 특징으로는 강한 중규모 대류계에 의해 발생한 현상이 주변에 연쇄반응을 일으켜 우리나라에 영향을 주기도 했다는 점이다. 첫 번째 사례는 7월 17일 수도권 부근에서 북상하던 강수 구름대에서 강한불안정이 더해지며 활모양의 Bow echo가 발생하였고 이로 인하여 수렴대의 위치와 지속성이 수치모델 예상과 달라지며 서울지역에 시간당 84mm의 집중호우를 내렸던 사례이다. 두 번째는, 장마철 이후 폭염이 기승을 부리던 시기인 8월 5일, 전남내륙에서 발생한 소나기 강수의 다운버스트는 해륙풍 순환과 충돌하여 전남 무안 지역에 시간당 102mm의 예측하기 어려운 기록적인 강수가 발생한 사례인데, 이러한 현상들로 인해 여름철 국지적 기상 현상에 대한 심화 연구의 필요성 검토 및 현업예보에서 보완할 부분들을 생각해 볼 수 있는 계기가 되었다.

Key words: 2024년 여름철 강수 사례, 중규모저기압, MCS, 보우에코

## 중층 기압골에 의한 중층 강수 분석

한광희, 김백민, 노남규, 성현준, 최지은

부경대학교 지구환경시스템과학부

우리나라의 강수 현상은 대부분 중관 저기압의 영향으로 발생하며, 이러한 저기압은 대기 하층에서 중상층까지 이어지는 기압골을 동반한다. 기압골의 배치와 연직 구조는 저기압의 발달 과정에서 중요한 역할을 한다. 중층 기압골에 의한 중층 강수 현상(이하 중층 강수)은 하층에서 상층까지 발달하는 일반적인 기압골과 달리, 중층에서 상층으로 발달한 기압골에 의해 강수가 발생하는 현상이다. 중층 강수가 발생한 지역의 지상 기압계는 저기압이 멀리 있거나, 존재하지 않을 수 있으며, 때로는 고기압이 위치하기도 한다. 이때 구름층은 중층에서 상층으로 발달하여 상대적으로 얇으며, 강수량은 적게 나타나는 특징을 보인다. 이러한 특징은 중층 강수를 예측하거나 발생 여부를 판단하기에 어려움을 준다. 또한, 예기치 않은 소량의 강수는 상황에 따라 위험한 기상이 될 수 있으며, 특히 겨울철 기온 조건에 따라 어는비로 내릴 가능성이 있다. 도로에 내린 어는비는 블랙아이스로 불리며 큰 사고의 원인이 된다. 그러나 하층 시스템이 뚜렷하지 않고, 강수량이 적어 상대적으로 관심을 덜 받았기 때문에 중층 강수에 대한 연구는 아직도 부족한 실정이다. 이에 따라, 중층 강수에 대한 명확한 분석 기준과 예측 방법의 마련이 시급하다. 따라서 본 연구에서는 중층 강수의 기본적인 기압계 구조와 발생과정을 파악하기 위해 서울 및 수도권에서 발생한 중층 강수 사례를 분석하였다. 이를 통해 중층 강수 발생 시 기압계의 구조적 특징과 이동 양상을 분석하고, 일반적인 패턴을 도출하였다. 또한, 연직 습수( $T-T_0$ )를 기준으로 중층 강수 발생에 대한 임계값을 설정하고, 이를 바탕으로 과거 중층 강수 사례를 추정하였다. 추정된 중층 강수 사례 중 지상에서 강수가 관측된 경우와 그렇지 않은 경우를 구분하여, 중층 강수에서 강수량에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하였다.

Key words: 중층 강수, 예측, 일기 분석

## 중관규모 유형에 따른 봄철 영동 풍하측 강풍 사례의 중규모 메커니즘 기반 예측 인자 개발

신예원, 김정훈

서울대학교 지구환경과학부

봄철 영동 지역에서 발생하는 풍하측 강풍은 시설물을 파괴할 뿐만 아니라 대형 산불을 일으킬 수 있으므로 정확히 예보하는 것이 중요하며, 이때 중관규모 유형에 따른 특성을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 선행연구에서 구분한 서로 다른 중관규모 환경에서 발생한 두 가지 봄철 영동 풍하측 강풍 사례의 중규모 메커니즘과 주요 예측 인자를 분석하였다. 사례 1은 2019년 4월 4일에 남고북저형 해면기압 배치에서 강한 남서풍이 유입될 때, 사례 2는 2023년 4월 11일에 저기압이 한반도 북부를 통과하며 전선 전면에서 강한 남서풍이 유입될 때 발생하였으며, 두 사례 모두 영동 지역에서 발생한 대형 산불과 관련되어 있다. 중규모 산악파를 분해하여 풍하측 강풍 메커니즘을 분석하기 위해, WRF 모델을 이용하여 수치실험을 수행하였다. ERA5 자료를 초기 및 경계조건으로 사용하였고, 가장 안쪽 영역의 수평 격자 간격은 1 km이며, 성층권 산악파 파괴가 풍하측 강풍에 미치는 영향을 알아보기 위해 가장 높은 고도가 각각 10 hPa, 50 hPa, 100 hPa인 실험을 수행하였다. 산악파의 전파 조건을 결정하는 풍상측 흐름을 분석한 결과, 태백산맥에 수직인 방향의 바람 성분(U)은 사례 1보다 2에서 더 컸으며, 대류권 중상부에서 정적 안정도( $N^2$ )는 사례 1보다 2에서 작았다. 이로부터 산악파의 연직 파수( $m^2$ )가 0보다 작아 산악파의 진폭을 감쇠시키는 층은 사례 1보다 2에서 두꺼웠다. 수치모델이 모의한 산악파 특성 및 풍하측 강풍 메커니즘 분석 결과, 사례 1에서는 풍하측 대류권 하부에서 유입되는 흐름이 지상의 바람이 가속되는 층과 그 위의 난류가 있는 층으로 분리되며 풍하측 강풍이 발생하였다. 또한 연직으로 전파하는 산악파가 고도 약 16 km에서 파괴되어 산악파의 임계고도를 형성하였으며, 산악파의 임계고도 반사로 인해 풍하측 강풍이 강화되었다. 수치모델의 가장 높은 고도를 낮춰 성층권 산악파 파괴 효과를 없애면 10 m 풍속이 작아지는 것을 확인하였다. 사례 2에서는 산악파가 대류권 하부에 갇혀 풍하측으로 전파하였으며, 이를 따라 강풍도 풍하측으로 전파하였다. 풍상측 및 풍하측 흐름으로부터 두 사례에서 주요 예측 인자를 분석한 결과, 사례 1에서는 하강기류 강도와 대류권 및 성층권 파동 파괴가, 사례 2에서는 하강기류 강도와 풍상측 파동 감쇠층( $m^2 < 0$ ) 두께가 강풍 발생, 강화, 약화를 설명할 수 있었다.

Key words: 풍하측 강풍, 영동, 산악파, WRF

※ 이 연구는 강원지역 복잡지형이 반영된 대설 및 강풍 개념모델 개발·개선 사업(2023080283)과 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」(KMI2022-00310)의 지원으로 수행되었습니다.

## 영동지역 장기간(2001~2023년) 편(Foehn) 특성 분석

김태연<sup>1</sup>, 한진현<sup>1</sup>, 박석우<sup>1</sup>, 단위후이<sup>1</sup>, 김병곤<sup>1</sup>, 임병환<sup>2</sup>

<sup>1</sup>국립강릉원주대학교 대기환경과학과

<sup>2</sup>국립기상과학원 예보연구부

영동지역의 편은 한반도의 종관장이 남고북저형 또는 서고동저형 기압배치에서 서풍계열의 바람이 태백산맥을 넘어가면서 풍하측이 고온건조해지는 현상이다. 이는 풍하측에 산불 위험을 높이며 여름철에는 폭염, 열대야가 지속되게 하여 여러 피해를 일으킬 수 있다. 따라서 영동지역 편을 분류하고 이들의 특성을 정량적으로 이해하는 것은 재해 예방을 위해 필요하다. 본 연구에서는 원주(풍상측), 대관령(산정상), 강릉(풍하측) 지점의 2001년부터 2023년까지 23년간 수집된 ASOS 10분 평균 기상자료를 이용하여 편 분류 방법을 제시하였다. 영동지역 편 분류 방법으로는 1) 강릉(GN)의 풍속이 2.5m/s 이상인 경우, 2) 강릉(GN)과 대관령(DG)의 풍향이 180° ~ 300° 인 경우, 3) 강릉(GN)과 원주(WJ)의 온위 차가 2K 이상인 경우, 4) 원주(WJ)보다 강릉(GN)의 상대습도가 10% 이상 낮은 경우, 5) 위의 조건들이 6시간 이상 지속되는 경우를 모두 만족하는 것을 편으로 정의 하였다. 편 분류 방법을 만족하는 사례가 총 1,629일(전체의 19.3%)이 편이었다. 이와 같이 1,629일의 사례를 선정하여 비지도 기계학습인 자기조직화지도(Self-Organizing Map)을 통해 종관장을 총 9개의 군집으로 분류하였으며, 대표적인 종관 패턴으로는 남고북저형과 서고동저형(남서고-북동저)이었다. 영동지역 편 메커니즘 분석을 위해 편 분류기준을 만족하는 2가지 사례를 선택하였다. 첫 번째 사례(2024.07.28)는 여름에 발생한 편에 해당하는 사례이며, 지속시간은 27시간으로 WJ와 GN의 상대습도 차가 최대 26.7%이고, GN의 일 최대풍속은 7m/s이다. 두 번째 사례(2023.04.11)는 Jeong et al. (2023)의 DW 분류 방법을 만족하는 봄에 발생한 활강강풍 사례로 지속시간은 8시간으로 WJ와 GN의 상대습도 차가 최대 39.6%이고, GN의 일 최대풍속은 17.5m/s이다. 또한 이 사례는 위성사진에 산악파의 일종의 lee wave가 잘 나타났다. 영동지역 편 분류 및 메커니즘 이해는 영동지역 편으로 인한 재해기상 예보 향상에 기여할 것이다.

Key words: 편, 자기조직화지도, LDAPS, 열대야, 활강강풍