

## 특별세션 4 / 국립기상과학원 우수성과 2-1

## 대류권계면 접힘을 동반한 영동지역 극저기압 폭설사례 분석

김예지<sup>1</sup>, 김병곤<sup>1</sup>, 박석우<sup>1</sup>, 하현재<sup>1</sup>, 김지혜<sup>1</sup>, 김희영<sup>1</sup>, 박준철<sup>2</sup><sup>1</sup>국립강릉원주대학교 대기환경과학과<sup>2</sup>국립강릉원주대학교 산업경영공학과

강원 영동지역의 강설은 전형적으로 겨울철 차가운 북동풍이 동해상을 통과하며 형성되는 강한 해기차에 기인하지만(동해효과), 지형적인 영향으로 장벽 바람, 한기 축적 그리고 Seeder-Feeder (SF) 효과 등에 의해 강설의 시공간적인 변동성이 크게 증가한다. 이 밖에도 이러한 전형적 중규모 강설 메커니즘으로 설명되지 않는 강한 폭설이 두 차례 발생한 바 있다(2017년 1월 20일, EP1; 2025년 3월 17일, EP2). 두 사례에서는 극저기압(Polar Low) 남하에 따른 하층 경압 불안정 강화로 인해 3시간 신적설 17-19cm의 폭설이 관측되었다. 본 연구는 두 사례를 비교하여 대류권계면 접힘을 동반한 극저기압 발달 메커니즘을 규명하고, 저기압 발달 및 폭설 강화에 기여한 주요 요인을 정략적으로 분석하고자 한다. 분석에는 기상청 지상 및 500hPa 일기도, 북강릉 ASOS, 북강릉과 강릉원주대학교 라디오존데, 그리고 ERA5 재분석 자료 중 등압면 자료를 활용하였다. 역학적 대류권계면은 WMO의 정의에 따라 위치 소용돌이도가 1.6 PVU인 고도로 정의하였다. EP1에서는 강설 약 15시간 전 300hPa에서 500hPa까지 약 200hPa의 급격한 대류권계면 하강이 나타났고, EP2는 대류권계면 하강 속도가 상대적으로 완만했으나 폭설 정점(03KST) 직전 500hPa까지 하강 후 단시간 내 회복하였다. 두 사례 모두 상층 양의 PV 편차(anomaly)가 제트 스트리크 좌측 입구 영역에 위치하면서 상층 발산-하층 수렴 구조를 강화하였고, 이는 지상 저기압의 급격한 발달에 영향을 미쳤다. 하층(925hPa) 소용돌이도 수지 분석 결과, 두 사례 모두 늘림 항(stretching term)이 지배적으로 작용하였으며, 특히 EP1에서의 절댓값이 EP2보다 크게 나타났다. 이는 EP1에서 상대적으로 강한 하층 수렴과 불안정 구조가 형성되면서 응결 및 잠열 방출이 촉진되어 강설 강도가 크게 강화되었을 것으로 추정된다. 결론적으로, 영동 지역 폭설 사례에서 상층 PV 증가와 대류권계면 하강은 저기압 발달과 폭설 강화의 핵심 메커니즘인 것으로 파악되었다. 향후 이러한 과정을 종합하여 극저기압에 의한 폭설 발생 메커니즘을 판단할 수 있는 정량적인 흐름도를 제시할 계획이다.

**Keywords:** 폭설, 대류권계면 접힘, 극저기압, 소용돌이도, 수지 분석

※ 이 연구는 강원영동 복잡지형이 반영된 대설 및 강풍 개념모델 개발·개선(Ⅱ)의 지원으로 수행되었습니다.

특별세션 4 / 국립기상과학원 우수성과 2-2

## SkySearch: 대규모 위성 영상 검색

최민영, 이건, 신기정

한국과학기술원 김재철AI대학원

기후 예측과 재난 대응을 위해서는 방대한 위성 영상을 활용한 효율적이고 신뢰 가능한 유사 장면 검색이 필요하다. 그러나 위성 영상 검색은 데이터 규모, 라벨 부재, 실시간성 요구에 더해 일반 사진에 최적화된 범용 비전 모델을 그대로 적용하기 어려운 도메인 차이(적외선, 수증기 채널, 밝기온도, 장시계열)까지 난제로 안고 있다. 본 연구에서는 이러한 한계를 해결하기 위해 SkySearch라는 대규모 위성 영상 검색 시스템을 제안하였다. SkySearch는 시간적으로 가까운 장면과 먼 장면을 양성 신호와 음성 신호로 삼는 자기지도학습을 통해 라벨 없이 학습하고, 각 영상을 256차원 임베딩으로 압축하여 공간 정보와 시간 정보를 보존하면서 저장과 검색 비용을 줄인다. 또한 SimVP 기반 예측 모듈에 적대적 학습을 결합해 질의 시점의 가까운 미래 프레임을 생성하고 이를 질의에 보강함으로써 단기 유사성뿐 아니라 이후 전개까지 반영한다. 검색 단계에서는 다중 블록 인덱싱 기반의 k-최근접 이웃 그래프 탐색을 도입해 시간 제약 하에서 후보 탐색을 가속화하고, 1차 임베딩 거리 정렬 뒤 응답 시간 여유가 있을 때 LPIPS, FSIM, SSIM과 같은 시각적 유사도 지표로 상위 후보만 재정렬하여 속도와 정확도의 균형을 제공한다.

실험은 COMS와 GK2A 위성에서 수집한 총 113만 장의 영상으로 수행하였다. SkySearch는 기존 딥러닝 기반 모델 대비 LPIPS는 더 낮고 FSIM과 SSIM은 더 높게 나타나 더 유사한 과거 장면을 일관되게 반환하였다. 또한 예측 보강을 적용했을 때 이전 12시간과 이후 12시간을 합친 24시간 시퀀스로 비교하는 장기 검색에서 성능 향상이 두드러졌다. 그래프 기반 탐색에서는 기존 근접 검색 기법(PyNNDescent, BSBF) 대비 최대 943배 빠른 질의 처리 속도를 보였으며, 대규모 임베딩 데이터셋에서도 고속 검색을 안정적으로 유지하여 확장성을 입증하였다. 향후 연구로는 다중 채널 통합을 통한 대기 표현력 강화, 예측 불확실도 가중을 활용한 보강과 재정렬을 통한 견고성 향상, 산불 등 환경 재난 모니터링으로의 응용 확대를 계획한다.

**Keywords:** 위성 영상 검색, 자기지도학습, 그래프 검색, 영상 예측

## 특별세션 4 / 국립기상과학원 우수성과 2-3

## Data-driven forecasts of extreme weather in East Asia: Multi-model approach and sensitivity to initial conditions

Seok-Geun Oh<sup>1</sup>, Young-Jun Bae<sup>1,2</sup>, Seok-Woo Son<sup>1,3</sup>, Jin-Ho Yoon<sup>4</sup>, Dong-Chan Hong<sup>1</sup>,  
Joon-Yong Kim<sup>1</sup>, Hyesook Lee<sup>5</sup>

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

<sup>2</sup>Torpedo Co., Ltd.,

<sup>3</sup>Interdisciplinary Program of Artificial Intelligence, Seoul National University

<sup>4</sup>School of Environment and Energy Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology

<sup>5</sup>National Institute of Meteorological Sciences

Accurate medium-range weather forecasts are essential for disaster preparedness and resource management, yet numerical weather prediction (NWP) models remain limited by imperfect representation of atmospheric process and high computational costs. Machine-learning-based weather prediction (MLWP) offers a promising alternative, though skill in forecasting extreme events in East Asia remains challenging. This study evaluates four state-of-the-art MLWP models—FengWu, FuXi, GraphCast, and PanguWeather—and their ensemble mean (MLWP-EM), against the Korea Integrated Model (KIM). Results show that MLWP-EM consistently outperforms KIM forecasts across lead times, particularly for 500-hPa geopotential height and 2-m temperature. Forecasts initialized with ERA5 reanalysis yield higher accuracy than those initialized with KIM, highlighting the importance of initial conditions, although KIM-initialized MLWP-EM forecasts still rival or exceed operational KIM performance. Case studies demonstrate improved simulation of heat wave and cold spell temperature anomalies, while heavy rainfall and typhoon precipitation is qualitatively captured but underestimated in magnitude. These findings underscore the potential of MLWP-EM to improve medium-range forecasts in East Asia.

**Keywords:** machine learning, medium-range forecast, Korea Integrated Model, East Asia, extreme events

※ This study was supported by the Korea Meteorological Administration (KMA) Research and Development Program “Development of AI-based Medium-range Weather Forecasting Technology” under Grant KMA2021-00121.

특별세션 4 / 국립기상과학원 우수성과 2-4

# 현업화를 위한 관측자료 융합 활용 전 지역 구간 강수 예측 기술 개선

강신환, 고지훈, 신기정

한국과학기술원 김재철AI대학원

전 세계적으로 자연재해로 인한 피해가 증가하는 가운데, 특히 호우로 인한 피해 규모는 가장 크며, 한반도는 기후변화의 가속화와 국지적, 돌발성 강수의 빈번화로 인해 사회·경제적 손실이 더욱 심화되고 있다. 이러한 상황에서 손실을 최소화하기 위해서는 무엇보다도 정확한 강수 예측이 필요하다. 그러나 한반도는 산악과 해안이 복잡하게 분포한 지형적 특수성과 다양한 호우 발생 유형으로 인해 기존의 수치모델과 관측 기반 예측만으로는 한계가 분명하다. 따라서 한반도의 특수한 기상 조건을 반영할 수 있는 한반도 특화형 초단기 강수 예측 모델 개발이 요구된다. 본 연구에서는 최근 다양한 분야에서 탁월한 성능을 입증하고 있는 인공지능 기술을 접목하여, 기존 예측 기법의 한계를 극복하고자 하였다. 특히 레이더, 위성, 지상관측, 지형정보 등 다양한 관측자료를 인공지능 학습 입력자료로 융합하여, 자료 간 상호 보완성을 최대화하고 예측 성능을 향상시키는 데 중점을 두었다. 연구는 4년에 걸쳐 단계적으로 진행되었으며, 1~3차년도에는 수치 성능 향상 중심의 개발을 통해 예측 정확도와 공간, 시간 해상도를 지속적으로 개선하였다. 1차년도에는 U-Net 기반 강수 예측 모델을 개발하여 기본 초단기 예측 성능을 확보하였고, 2차년도에는 GK-2A 위성 및 지상관측자료를 융합하여 성능을 개선하였다. 이어 3차년도에는 영상 예측(Video Prediction) 모델인 SimVP와 생성적 적대 신경망(Generative Adversarial Network, GAN)을 도입하여 시각적 정확도를 크게 개선하고, 예측 간격을 기존 1시간에서 10분으로 세분화하며 강수 구간을 3개에서 8개로 확대하였다. 4차년도에는 실제 현업 적용을 위한 사례 중심 개발을 수행하였다. 다양한 강수 사례를 통해 강수 예측 모델의 약점을 분석하고, 예측 시 발생하는 격자무늬 현상과 호우셀 붕괴 현상을 해결하기 위해 강수량 기반 가중치 손실 함수와 GAN의 학습을 안정화하였다. 이로써 6시간 전 10mm/h 이상 강수 예측에서 CSI(Critical Success Index) 성능이 112.3% 향상(0.057→0.121) 되었으며, 예측 결과의 시각적 정확도 또한 향상되었다. 본 연구를 통해 확보된 성과는 한반도에 특화된 정밀하고 안정적인 초단기 강수 예측 체계 구축으로 이어질 것이며, 이는 강수 예보 정확성 향상과 국민 안전 강화에 크게 기여할 것으로 예상된다.

**Keywords:** 초단기 강수 예측 모델, 인공지능 기반 기상 예측, 다중 관측자료 융합, 한반도 특화형 강수 예측

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「AI기상예측기술개발」 (KMA2021-00121) 의 지원으로 수행되었습니다.

1) 본 연구는 한국과학기술원 김재철AI대학원 소속 시절에 수행되었으며, 저자 고지훈의 현재 소속은 몰로코(Moloco)임.

특별세션 4 / 국립기상과학원 우수성과 2-5

# 마이크로웨이브 링크를 이용한 차세대 강우량 산출기술 개발

서지우, 권병혁

국립부경대학교 지구환경시스템과학부 환경대기과학전공

최근 한반도에서 단기간 고강도의 국지성 호우가 증가하면서 정밀한 강우 관측의 필요성이 커지고 있으나, 기존 우량계는 공간 대표성이 낮고, 레이더는 지형 차폐 등 관측 사각 지역 강우 관측에 한계가 있다. 통신망 기반 상업용 마이크로웨이브 링크(CML: Commercial Microwave Link)는 경로 평균 감쇠를 활용해 저층 강우를 직접 관측할 수 있어, 우량계·레이더 한계를 보완할 실용적 대안이 될 수 있다. 본 연구는 마이크로웨이브 링크(ML: Microwave Link)의 감쇠 신호를 활용한 강우 감지 및 정량적 강우량 산출 기술을 개발하고, 현업화 가능성을 평가한다. 24 GHz ML 신호 수집기를 개발하고, 보성표준기상관측소에 3개의 링크(Link1: 297m, Link2: 365m, Link3: 444m)를 구축하였다. 2025년 6월 13일부터 8월 17일까지 수집한 신호 자료와 파시벨(Parsivel) 관측 강우 자료를 기준으로 강우 감지 알고리즘을 최적화하였다. 이동 창( $w_t$ )과 임계값( $\sigma_0$ ) 조합에 대한 민감도 분석 결과 Link1은  $w_t=40$ ,  $\sigma_0=0.1$ 에서 85%, Link2는  $w_t=30$ ,  $\sigma_0=0.1$ 에서 80%, Link3은  $w_t=80$ ,  $\sigma_0=0.1$ 에서 86%의 강우 감지율을 보였다. 감쇠량(k)과 강우강도(R) 간의 R-k 관계식을 링크별로 도출하여 각 링크의 특성을 반영한 강우량 산출식을 제시하였고, ML 기반 강우량 산출값을 파시벨 관측값과 비교하였다. Link3에서 Bias 0.05 mm, MAE 0.07 mm, RMSE 0.13 mm의 우수한 성능을 확인하였다. 국내에 시설치된 약 5,400개(2015년 기준)의 CML을 활용하여 레이더와 같은 조밀한 강우 관측망 구축에 기여할 것으로 기대된다. 강우 외에도 노이즈가 적고 지속적인 큰 감쇠로 나타나는 안개 신호를 감지할 수 있어서 90% 이상의 강우 감지 성능과 조합하여 도로 기상 감시에 유용한 센서로 제안된다. 또한, ML 감쇠 신호와 지상 관측 자료 기반의 증발산량의 상관성 분석을 진행 중이며, 수문·대기 상호작용 진단 지표로의 가능성을 연구하고 있다. 본 연구 과제 수행의 성과로 ML 기반 강우 감지 및 정량적 강우량 산출의 실용 가능성을 시사하며, 향후 CML과 연계하여 관측 사각지대 보완과 저층 강우 산출에 기여할 것으로 기대된다. 더불어 안개 감지와 증발산량 산출 등으로 응용 범위를 확장한다면, 도시·산악 지역에서의 기상 상황 감시 역량을 한층 강화할 것이다.

**Keywords:** 마이크로웨이브 링크, 상업용 마이크로웨이브 링크, 강우 감지, 강우량 산출, 증발산량

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「국가 기상관측장비 및 관측자료 표준화」(KMA2018-00221)의 지원으로 수행되었습니다.