

## Neural Implicit Network를 이용한 연속자료동화체계 개발

이용희, 이은희, 이근희

기상청 수치모델링센터 수치자료응용과

수치예보에서 자료동화과정은 관측자료를 수치모델이 소화할 수 있도록 요리하여 예측의 정확도를 높이는 핵심 기술이다. 전통적으로 사용되는 4차원 변분자료동화(4DVAR)기법은 초기 조건의 최적화를 통해 모델과 관측 간의 차이를 최소화하지만 수반모델의 개발과정이 복잡하고 계산 비용이 높다는 단점이 있다. 이 연구에서는 Neural Implicit Flow(NIF)를 바탕으로 4DVAR의 기본 개념을 포함하는 새로운 4차원 연속자료동화시스템(Continuous Data Assimilation and Fusion System, CDAFS)을 제안한다.

CDAFS는 암시적 인공신경망의 일종인 NIF 구조를 바탕으로 관측자료와 수치모델을 동화하도록 구성되었다. NIF는 Shape 신경망과 Parameter 신경망으로 구성되며, 이 2개의 신경망은 잠재공간(Latent space)를 통해 서로 정보를 교환하도록 연결되는 구조이다. Shape 신경망은 연속좌표계를 다루며, Parameter 신경망은 각종 변수 및 모수를 다룬다. 이 신경망 구조 내에서 4DVAR의 수반모델 기능을 자동미분(auto-differentiation)이 대신하게 되며 비용 함수의 기울기 계산을 수행한다. NIF의 손실 함수는 4DVAR의 비용함수와 수학적인 일치성을 유지하기 위하여 가우시안 분포를 가정한 Kullback-Leibler 발산항을 사용하였다. 또한 학습과정에서 과적합을 방지하고 관측자료와 수치모델 배경장의 적절한 균형을 유지하며 자료동화과정의 일반화 성능을 높이기 위해 L2 정규화를 적용하였다. CDAFS의 Shape 신경망은 암시적으로 연속좌표계를 표현(implicit representation)하고 있어서 시간 연속적으로 관측자료를 처리하거나, 4DVAR와 같이 자료동화 구간을 설정할 수 있는 장점이 있다.

이 연구에서는 최대우도추정(MLE) 기반의 신경망시스템인 CDAFS를 개발하여 Lorenz 63, Lorenz 96 등 이상화된 비선형 시스템을 사용하여 관측시스템을 모사하고, 4DVAR와 자료동화 성능을 비교하였다. 또한 학습 과정에서 불확실성 모델링을 통해 예측 결과의 신뢰성을 확보할 수 있는지를 조사하였다. 향후 비정규분포에 대한 자료동화로 확장하여 보다 유연하고 일반화된 자료동화체계를 구축할 예정이다.

Key words: 연속자료동화체계, Neural Implicit Flow, 4차원변분자료동화

※ 이 연구는 수치모델링센터 『수치예보 및 자료응용 기술개발』 과제(KMA2018-00721)의 하나로 수행되었다.

## A study on the predictability of dual polarized radar data assimilation

Ji-Won Lee<sup>1</sup> and Ki-Hong Min<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Atmospheric Sciences and Center for Atmospheric REmote sensing, Kyungpook National University

<sup>2</sup>BK21 Weather Extremes Education & Research Team, Kyungpook National University

Dual-polarization (dual-pol) radar variables, such as differential reflectivity ( $Z_{DR}$ ) and specific differential phase ( $K_{DP}$ ), provide additional information on hydrometeor types, sizes, and water content. A dual-pol radar operator that employs scattering calculations using the T-matrix method for rain and the Rayleigh scattering approximation for ice can more accurately convert model variables to observed variables. Assimilating dual-pol radar variables into numerical weather prediction models enhances the forecast accuracy of rapidly evolving mesoscale precipitation events. Consequently, there is a need to develop advanced radar observation operators capable of calculating dual-pol radar variables using the microphysical variables.

In this study, a dual-pol radar operator is developed specifically for a numerical forecast model specializing in the Korean Peninsula. Traditional dual-pol radar operators have been found to overestimate radar variables around the 0°C level. To address these issues, the modified observation operator assumes that wet-snow and wet-graupel do not exist in regions with strong updrafts and downdrafts. Furthermore, by incorporating the axis ratio of snow derived from ICE-POP 2018 data, the calculation of  $Z_{DR}$  and  $K_{DP}$  as constant values in subzero regions is improved, allowing for a more accurate representation of dual-pol variables for solid hydrometeors. Applying this improved observation operator in DA addresses the underestimation of the mixing ratio of solid hydrometeors. Overall, the results suggest that the improved operator enhances precipitation forecasting accuracy.

Key words: Dual-polarization radar operator, Radar data assimilation, Observation operator, Precipitation forecasting.

※ This work was supported by the National Research Foundation (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT)(No. 2021R1A4A1032646), the Korea Meteorological Administration Research and Development Program under Grant RS-2023-00237740 and the Brain Korea 21 program.

## 고해상도 자료 기반 historical OSSE를 활용한 정지궤도 위성 초분광적외센서의 집중호우 예측 잠재적 영향 평가

황지원, 차동현, 김경민

울산과학기술원 지구환경도시건설공학과

위성 관측 기술의 발달은 수치예보 모델의 정확도를 높이는데 핵심적인 역할을 한다. 특히 초분광적외탐측기는 수치모델 성능을 크게 향상시켜 전 세계적으로 초분광적외탐측기를 탑재한 극궤도 위성 개발에 관심과 투자가 꾸준히 증가하고 있다. 최근에는 극궤도 위성의 공간 및 시간 해상도의 한계를 극복하려는 노력의 일환으로 정지궤도 위성에 초분광적외탐측기를 탑재하고자 하는 시도가 주목을 받고 있으며, 이와 관련된 후속 위성을 개발 및 확보하고 있다. 이때, 이러한 후속 위성의 수치예보 활용에 대한 잠재적 영향을 평가하기 위해 historical Observing System Simulation Experiment (OSSE)를 통한 수치실험이 주로 활용되고 있다. 특히, 다수의 연구에서 재분석장 기반의 OSSE (RA-OSSE)가 수행되었으며, 단순내삽을 통해 고해상도 위성자료를 생성한 후 OSSE를 수행하여 초분광적외탐측기의 긍정적인 영향을 확인한 바 있다. 그러나, 이러한 접근 방식에는 두 가지 주요 한계가 있다. 첫째, 단순 내삽 자료는 모델이 분해할 수 없는 소규모의 해상도에서 역학적인 의미를 담기 어렵기 때문에 불확실성이 클 수 있다. 둘째, 재분석장의 낮은 해상도(0.25° ~)는 정지궤도 위성의 고해상도를 충분히 대변하기 어렵다. 이러한 이유로 본 연구에서는 Weather Research and Forecasting (WRF) 모델을 활용한 고해상도의 예측장(4 km)을 기반으로 OSSE를 수행하여 더 현실적인 실험 체계를 구축하였다. 국내에서도 천리안 1, 2호에 이어 초분광적외탐측기가 탑재된 정지궤도의 후속위성을 가까운 미래에 확보하는 것을 목표로 하고 있으며, 이 위성의 집중호우 사례에 대한 잠재적 영향을 평가하는 것은 위성 개발에 소요되는 막대한 예산을 효과적으로 환수할 수단이 될 수 있다.

Key words: 위성자료동화, OSSE실험, 집중호우

## 고체 수상체 포함에 따른 GK-2A 적외채널 전천복사휘도 모의 변화 및 자료동화 효과 분석

조서윤, 민기홍

경북대학교 대학원 대기과학과, BK21 위험기상 교육연구팀

천리안위성2A호(GK-2A) 전천복사휘도(All-Sky Radiance, ASR) 자료는 레이더와 같은 원격탐사자료가 관측하지 못하는 청천 및 해상 영역에 대해 시공간적으로 연속적인 대기 정보를 제공한다. 이러한 ASR의 자료동화를 통해 수치모델 초기장을 개선하여 전선을 발달시키는 실제 종관 흐름을 반영하거나 대류 발생 신호의 조기 탐지가 가능하다. 하지만 긍정적 동화효과를 위해서는, 다양한 수상체가 발달함에 따라 복사과정과 복잡하게 상호작용하는 구름 영역의 관측을 모델과 비교하는 데서 오는 불확실성을 정확히 고려하는 것이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 GK-2A 수증기채널에 대해 전 수상체종을 포함하는 데 따른 밝기온도 모의 차이 및 실제 강수 사례 자료동화 효과를 분석하였다. 위성 관측연산자로는 Community Radiative Transfer Model을 활용하였고, Weather Research and Forecasting Model (WRF) 모델 및 WRF Data Assimilation의 3차원 변분자료동화 방법을 사용하였다. 수증기를 비롯해 구름상 및 비상의 수상체만 포함하는 실험을 Qcr, 얼음, 눈, 싸라기의 고체상까지 모두 포함하는 실험을 Qcrisg로 명명하였다. ASR 관측오차는 각 채널별로 밝기온도 (Brightness Temperature, BT)의 관측-모의(Observation-Background, O-B) 표준편차 통계치를 이용해 구름영향모수에 따른 고차회귀함수로 산출하였다. 여름철 강수 사례들에 대한 자료동화 실험을 수행한 결과, Qcrisg의 분석장 및 예측장에서 기준실험인 NoDA나 Qcr 대비 관측과 더 유사한 BT 및 반사도가 산출되었다. 또한 Qcrisg에서 전선 형성 및 서해상에 발달하는 대류 신호를 더 사실에 가깝게 모의하였다. 위성 동화를 통해 수증기 분포 정보가 반영됨에 따라 강수 예측장에서도 Pattern Correlation 향상이 두드러졌고, 주요 강수 시간대의 Root Mean Square Error, Equitable Threat Score가 개선되었다. 향후 서로 다른 미세물리과정의 적용, 수상체별로 상수가 아닌 진단된 유효반경의 사용 등을 통해 GK-2A ASR 동화에 있어 수상체 효과를 심층 분석할 계획이다. 더불어, 강수 영역의 수상체 정보를 제공하는 레이더 정보를 함께 동화함으로써 불확실성이 큰 강수 구역 ASR 동화가 개선되는 효과를 살펴보고자 한다.

Key words: 천리안 2A호, 적외채널, 자료동화, 수상체, 강수 예측

※ 이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 (No. 2022R1A2C1012361)의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한 기상청 국립기상과학원 「수도권 위험기상 입체관측 및 예보활용 기술 개발」 (KMA2018-00125)의 지원으로 수행되었습니다. 또한 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 BK21 사업의 지원을 받아 연구되었습니다.

## Refining coupling strength between soil moisture and latent heat flux by modifying evapotranspiration partitioning and its effects on land - atmosphere interactions in the KIM system

Hyeon-Ju Gim, Myung-Seo Koo, Yonghwan Kwon, Wonheung Kim, and Jaeyoung Song

Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems, Seoul, South Korea

A coupled response of latent heat flux (LH) to soil moisture (SM) refers to coupling strength (CS), and it is a branch of a chain composing land - atmosphere interactions. Literatures reported that SM - LH CS tends to be over-estimated in commonly utilized land surface models (LSMs). Focusing on the regions in India, where the LSM's over-estimation of the CS is apparent, we obtain more realistic SM-LH CS by adjusting LH-related parameters in the Korean Integrated Model (KIM); specifically, soil evaporation decreases because it is strongly coupled with SM, and plant transpiration increases because it is weakly coupled with SM. As a result of the parameter adjustment, the temporal patterns of the LH variations are changed; when running LSM solely with prescribed atmospheric forcings, it is found that the temporal change in LH becomes highly correlated to that in downward shortwave flux at surface ( $SW_{down}$ ) rather than SM. This indicates that the limiting factors of the photosynthesis, including  $SW_{down}$ , are more influential on LH variations through the parameter modifications, because plant transpiration is mainly controlled by photosynthesis. In the atmosphere-land coupled model, the impact of CS reduction on  $SW_{down}$  is more pronounced. Additionally, it is found that surface temperature and planetary boundary layer height increase with reduced  $SW_{down}$  by cloudy sky, leading to reduction of LH and increase of sensible heat flux. This indicates that realization of CS of LH and SM possibly alters the atmosphere simulations contributing to more skillful weather predictions.

※ Acknowledgements. This work was carried out through the R&D project "Development of a Next-Generation Numerical Weather Prediction Model by the Korea Institute of Atmospheric Prediction Systems (KIAPS)", funded by the Korea Meteorological Administration (KMA2020-02212).

## 대기-해양 결합자료동화 및 머신러닝 기법을 활용한 연안 기상 예측 개선효과 분석

이성빈<sup>1</sup>, 송상근<sup>1,2</sup>, 손장호<sup>3</sup>, 조성빈<sup>1</sup>

<sup>1</sup>제주대학교 지구해양융합학부 지구해양전공

<sup>2</sup>제주대학교 지구해양학과

<sup>3</sup>동의대학교 환경공학과

일반적으로 연안지역에서는 해양기상(해수면온도, 해수면높이, 바람) 변동이 크게 증가하여 해안 재해를 발생시키며 해안 주민의 생명과 재산에 위협을 가하기 때문에 지속적으로 연안기상예측의 중요성이 부각되고 있다. 이와 관련하여, 우리나라 연안지역을 대상으로 지리·지형적 특징을 고려하는 기상 수치모의 연구, 자료동화를 적용한 수치모의 개선 연구 등이 수행되어 왔다. 또한 기상모델에 현실적인 해양성분(조석) 및 자료동화를 적용하여 수치모의한 연구들은 많았지만, 대기-해양 상호작용과 함께 이를 모두 고려한 수치모델링 연구는 거의 진행되지 않았다. 본 연구에서는 조석현상이 강하게 나타난 우리나라 서해안의 겨울 및 봄철을 대상으로, 대기-해양 결합모델에 조석현상과 자료동화를 모두 적용한 실험(TD)과 적용하지 않은 실험(NTD)으로 나눠 수치모의 결과를 비교하였다. 결합모델에 자료동화 적용 시, 초기장 불균형 현상을 최소화하기 위해 결합모델이 생산한 배경장을 사용하여 자료동화하는 약결합자료동화(Weakly coupled data assimilation) 방법을 이용하였으며, 이에 따른 연안기상예측의 개선효과를 분석하였다. 이 외에도 최근에는 모델의 예측 정확도를 향상시키기 위한 방법으로 빅데이터를 활용한 머신러닝(Machine learning, 기계학습)을 통하여 많은 연구가 수행되고 있으며, 본 연구 또한 다양한 머신러닝 기법을 수행하여 기상 수치모델의 결과와 비교하였다. 또한 연구지역 내 다양한 기상 관측지점들을 선정하여 주요 기상요소(기온, 풍속, 상대습도 등)의 관측값을 수치모델 및 머신러닝 결과들과 비교분석하였다. 전반적으로, 조석현상 및 자료동화를 모두 적용한 TD 실험의 주요 기상요소(SST, 기온 등) 결과가 NTD 실험에 비해 관측값에 더 가깝게 모의되었다. 또한 TD 실험결과와 머신러닝 예측 결과를 비교해보면, 기상요소 중 풍속과 상대습도에 대한 머신러닝 결과가 TD 실험 결과에 비해 더 낮은 오차를 보였으며, TD 실험에서의 과대모의를 크게 감소시켜 개선하였다.

Key words: 대기-해양 결합자료동화, 머신러닝, 서해 연안, 조석현상, 기상요소

※ 이 연구는 2020년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2020R1A2C2011081). 또한 이 연구는 기상청 국립기상과학원 기상조절 및 구름물리 연구(KMA2018-00224)의 지원을 받았음