

Deep learning-based Seasonal Prediction of Antarctic Sea Ice

Gyeongmin Baek¹, Jiho Ko² and Jong-Seong Kug^{1,2}

¹School of Earth and Environmental Sciences, Seoul National University

²Interdisciplinary Program in Artificial Intelligence, Seoul National University

Arctic sea ice has steadily declined under global warming, whereas Antarctic sea ice had slightly increased until a sharp downturn began in 2016, reaching a record minimum in February 2023. Given the critical role of the Antarctic sea ice in our climate system, making accurate predictions of future Antarctic sea ice change is essential. Here, we developed a model to predict seasonal sea ice extent based on a deep learning approach, employing U-Net. The model not only learned the persistence of sea ice but also captured its interactions with the atmosphere and ocean based on their patterns, which enabled seasonal prediction. It is shown that the present deep learning-based model show superior performance of seasonal sea-ice predictability compared to numerical models. Additionally, to assess the impact of each variable within the model, we applied a contribution map and observed the changes in the evaluation metrics to determine their importance using XAI methods. In summer, the influence of meridional wind was more pronounced, whereas in spring, the downward shortwave radiation had a greater impact. These research findings are anticipated to significantly contribute to more accurate predictions of Antarctic sea-ice change and to improved understanding of future Antarctic sea-ice variability.

Keywords: Antarctic, Sea ice, Deep learning

특별세션 3 / 해빙 예측 2

Impact of assimilating CryoSat-2 and SMOS winter Arctic sea ice thickness on summer sea ice area

Jeong-Gil Lee¹, Yoo-Geun Ham^{1,2}, and Daehyun Kang³

¹Environmental Planning Institute, Seoul National University

²Department of Environmental Management, Graduate School of Environmental Studies,
Seoul National University

³Center for Climate and Carbon Cycle Research, Korea Institute of Science and Technology

This study investigates how assimilating CryoSat-2 (CS2) and Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) sea ice thickness (SIT) data into the CICE5 model influences Arctic summer sea ice area (SIA) simulations. Assimilation of CS2 data (CS2_DA) reduces negative SIT biases in the central Arctic Ocean, thereby mitigating the underestimation of summer SIA and sea ice volume (SIV). By contrast, SMOS data assimilation (SMOS_DA) corrects positive SIT biases in the marginal ice zones through ice thinning but amplifies pan-Arctic negative biases, worsening the underestimation of summer SIA.

Changes in the summer mean state also affected the interannual variability of summer SIA, an effect closely tied to differing seasonal links between winter SIV and summer SIA. CS2_DA, with a weak link, degraded the simulation of summer SIA variability, while SMOS_DA, with a stronger link, improved it. A case study for summer 2020 further demonstrated that CS2_DA, due to thicker SIT, produced weaker negative SIT and sea ice concentration (SIC) anomalies in the Siberian Arctic Ocean, while SMOS_DA generated clearer SIC anomalies and a more realistic seasonal evolution.

Summer SIC variability was found to be inversely related to winter SIT, with the mean winter SIV strongly constraining summer SIA and SIC through thermodynamic melting processes. This suggests a threshold-like behavior, whereby excessively thick winter SIT suppresses interannual variability while thinner winter SIT amplifies it. These findings underscore the importance of balancing SIT bias correction and variability representation in assimilation strategies. Moreover, they highlight that accurate initialization of winter SIT is critical for enhancing the skill of seasonal sea ice predictions.

Keywords: Arctic sea ice, Data assimilation, CryoSat-2, SMOS, Seasonal prediction

특별세션 3 / 해빙 예측 3

위성 산출 및 모델 모의에 나타난 북극 해빙 상 융빙호 비율의 불확실성 분석

이수봉, 김주홍

극지연구소 해양대기연구본부

융빙호(melt pond)는 극지역 여름철 해빙 표면에 눈과 얼음이 녹아 생기는 물웅덩이로, 극지역 여름철 표면 에너지 균형에 중요한 역할을 한다. 그러나 극지역 융빙호 분포의 직접 관측은 제한적이기 때문에, 원격 탐사가 융빙호 비율(melt pond fraction) 추정의 주요 수단으로 활용된다. 본 연구에서는 동일 해상도의 극평사도법(polar stereographic)으로 표현된 위성 기반 북극 융빙호 비율 추정 자료 4종(MERISv1.7, MODIS ANN, MODIS DNN, MODIS GA-BPNN)의 시공간적 불확실성을 분석하였다. 그 결과 융빙호의 계절적 변동 패턴은 유사하나 지역별 분포 및 최대값 발생 시기에는 차이가 존재하였다. 특히 융빙호 생성부터 소멸과 재결빙 단계로 갈수록 자료 간 불일치가 증가하였다. 또한, 분석 기간(2002-2018) 동안 정도의 차이는 있으나 태평양 방향 북극해에서 6월에 공통적으로 융빙호 비율이 감소하는 경향이 나타났다. 이와 동시에 Los Alamos National Lab에서 개발된 독립형 해빙 모델 CICE5를 사용하여 모델이 제공하는 3종의 복잡성이 다른 융빙호 모수화 방안(CESM, topo, level-ice)에 따른 불확실성을 살펴보았다. 모델은 위성 추정 융빙호 비율의 계절적 및 공간적 특성과 전반적으로 유사하지만, 모수화 방안에 따라 융빙호의 지역적 분포와 지속 기간 등에서 차이를 보였다. 특히, 위성 추정 융빙호 비율과 유사하게 6월 태평양 방향 북극해에서의 융빙호 감소 경향이 모의되었으나 그 강도는 모수화 방안에 따라 상이하였다. 본 연구에서 살펴본 위성 산출과 모델 모의에 내재된 융빙호 비율의 불확실성에 대한 분석 결과는 해빙 상 융빙호 비율의 변화에 대한 이해도를 높이고 해빙 모델 개선에 기여할 수 있을 것이다.

Keywords: 북극 해빙, 융빙호, 위성 산출물, 해빙 모델

※ 이 연구는 2025년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원(20210605, Korea-Arctic Ocean Warming and Response of Ecosystem, KOPRI)으로 수행되었습니다.

특별세션 3 / 해빙 예측 4

Landsat-8 위성을 활용한 남극 웨델 해역의 해빙/해수 구분 (2020-2024)

임민정¹, 이상무^{1,2}

¹서울대학교 지구환경과학부

²서울대학교 과학데이터혁신연구소

지구온난화로 인한 극지 해빙의 변화는 지면 알베도의 변화, 해양/대기 사이 에너지 교환, 그리고 대기 및 해양 순환의 변화를 유도하고, 이는 전지구 기상 및 기후시스템에 지대한 변화를 초래한다. 따라서, 극지 해빙에 대한 정밀한 모니터링과 예측은 기상 및 기후과학 연구의 핵심 과제이다. 지난 40여 년 동안 위성 기반 수동 마이크로파 관측은 극지 해빙의 시공간적 변화를 성공적으로 모니터링 해왔으며, 이를 통해 특정 그리드에 해빙이 차지하는 면적의 비율인 해빙점유율(Sea Ice Concentration (SIC)) 및 해빙 면적의 장기 경향을 파악하는데 큰 기여를 하였다. 그러나 대부분의 수동 마이크로파 해빙 점유율 산출에 활용되는 tie-point 기반 알고리즘은 중간 범위의 해빙 점유율을 재현하는 데 한계가 있다. 또한, 북극 지역은 선박 관측, 광학 위성영상, ice chart 등 다양한 관측 자료를 활용한 위성기반 해빙점유율 검증 연구들이 축적되어 있는 반면에 남극에서는 참값으로 활용되는 참조표준 SIC 자료와 검증 연구가 상대적으로 부족하다. 따라서 본 연구에서는 고해상도 광학 위성 Landsat-8을 활용하여 참조표준 해빙점유율 자료를 생산하기 전 단계인 해빙과 해수를 구분하는 방법론을 개발하고자 한다.

본 연구에서는 5년간(2020-2024) 남극 웨델 해역(Weddell Sea)을 대상으로 Landsat-8 위성 영상을 수집하였다. 영상 전처리 과정에서는 Quality Assessment (QA) 정보에 포함된 C Function of Mask (CFMask) 알고리즘을 이용하여 구름 탐지 픽셀을 제거하였으며, radiometric saturation 및 terrain occlusion의 영향을 받은 픽셀도 함께 제거하였다. 하지만 구름과 눈, 빙설 지형 모두 가시광선 및 근적외선 영역에서 비슷한 광학특성을 보이기 때문에, 기존의 구름 감지 알고리즘(CFMask)으로 구름을 정확히 구분하는 데 어려움이 있다. 따라서 CFMask로 감지 된 구름 제거 Landsat-8 장면과 true color 이미지에서 수동으로 식별한 구름 영역을 대조하여 CFMask 알고리즘의 산출물 품질을 6단계로 평가하였다: (1) 구름 화소 과소탐지, (2) 구름 화소 과대 탐지, (3) 구름 그림자 과소 탐지, (4) 흐린 하늘에서의 구름 정확탐지, (5) 맑은 하늘에서의 구름 정확탐지, (6) 맑은 하늘에서의 구름 과대 탐지

모든 장면에 대해서, 가시광선 및 근적외선 밴드의 반사도를 이용한 Normalized Difference Snow Index (NDSI)와 가시광선 및 근적외선 밴드의 반사도 임계값을 적용하여 해빙과 해수를 구분하였다. 해빙과 해수를 효과적으로 구분할 수 있는 최적의 NDSI 및 가시광선 및 근적외선 밴드의 반사도 임계값은 newly formed ice, congelation ice, refrozen ice와 grase/brash ice 등 다양한 해빙 유형을 고려하여 민감도 실험을 수행하여 결정하였다. 또한, Landsat-8 밴드-2 (blue), 3 (green) 와 4 (red) 로 직접 생성한 true color 이미지의 디지털 값의 분포와 NDSI 값의 분포를 비교하여, 해빙과 해수를 구분하기 위한 임계값을 반복적으로 조정하고 검증하였다.

남극의 다양한 해빙 유형의 반사도 임계값을 고려하여 구축한 Landsat-8의 고해상도 해빙/해수 분류 자료는 향후 남극의 참조표준 해빙점유율 데이터 생산을 위한 선행 단계로서 의미를 가지며, 신뢰성 있는 SIC 산출을 위한 기초 자료로 활용될 수 있다.

Keywords: 남극 해빙, 해빙점유율, Landsat-8, 원격탐사, NDSI, 구름 마스크

※ 이 연구는 해양수산과학기술진흥원 「남극해 급격한 온난화 대응 남극 해빙 예측 기술 개발」 (RS-2025-02219198)의 지원을 받아 수행되었습니다.

Changes in atmospheric and oceanic contributions to Antarctic sea ice variability during triple-dip La Niña events

Daehyuk Kim¹, Taekyun Kim², Emilia Kyung Jin³, Sung-Ho Choo²,
Jae-Hong Moon^{1,2}, Hyeonsoo Cha¹

¹Center for Sea-Level Changes, Jeju National University

²Department of Earth and Marine Science, Jeju National University

³Department of Policy and Partnership, Korea Polar Research Institute

In recent decades, Antarctic sea ice extent (SIE) exhibited a modest increasing trend, which was abruptly interrupted in 2016/17, indicating a potential regime shift. Since then, the SIE has remained persistently below the long-term average, reaching record-low levels in 2022 and 2023. Numerous mechanisms have been proposed to explain Antarctic sea ice variability, but the Antarctic region has recently experienced unusual atmospheric and oceanic conditions, including a continuously positive SAM index, subsurface ocean warming, and a triple-dip La Niña event. These conditions have driven unprecedented changes in sea ice, highlighting the need to better understand the relative roles of atmospheric and oceanic processes in controlling variability. In this study, we use a standalone sea ice model to examine changes in the contributions of atmospheric and oceanic forcing before and after the potential regime shift. Our results show that atmospheric forcing predominantly controlled sea ice variability prior to the recent triple La Niña period (2020–2023). However, during this period, atmospheric forcing alone failed to reproduce the observed variability, particularly in the Ross and Amundsen Seas during the austral summer. Despite the onset of summer, sea ice melting remained weak due to cold air temperatures, emphasizing the growing influence of oceanic processes in driving Antarctic sea ice variability. These findings underscore the importance of considering both atmospheric and oceanic factors when assessing future changes in Antarctic sea ice.

Keywords: Antarctic sea ice variability, triple-dip La Niña events, standalone sea ice model, atmospheric and oceanic forcing

Accelerated Loss of Polar Sea Ice and its Implications: Insights from the FAST and SAFE-SEA Projects

Emilia Kyung Jin

Department of Policy & Partnership, Korea Polar Research Institute (KOPRI)

The rapid decline of sea ice in both the Arctic and Antarctic has long been a central issue in polar science, carrying profound environmental and socioeconomic implications. The shrinking sea ice cover reduces Earth's albedo, thereby accelerating global warming, while also amplifying risks such as coastal damage from extreme waves and the stranding of vessels by drifting ice. Recent studies indicate that Arctic sea ice is melting at a rate faster than projected by CMIP6 scenarios, raising the likelihood of an ice-free Arctic Ocean much earlier than anticipated. Simultaneously, the unprecedented Antarctic sea ice loss observed in recent years has emerged as one of the most immediate indicators of climate change, threatening ecosystems such as penguin habitats and fisheries, as well as the safety of scientific operations in the region.

In response, the Korea Polar Research Institute (KOPRI) has launched new initiatives to address sea ice decline in both hemispheres. In April 2025, the FAST (Forecasting Antarctic Sea ice Trend) project was initiated to establish advanced observation systems, investigate melt processes, improve sea ice model performance, and develop AI-based long-term prediction systems for Antarctic sea ice. The project aims to deliver detailed seasonal outlooks, support Korea's climate monitoring and prediction frameworks, and contribute officially to the international SIPN South program. Building upon this foundation, the SAFE-SEA (Sustainable Arctic Forecasting for Environment and Safe, Eco-friendly Navigation) project will commence in 2026 to develop and operate an observation-based Korean Arctic shipping route model. SAFE-SEA seeks to generate environmental datasets aligned with Polar Code requirements and to produce short- and long-term navigation scenarios on annual and monthly scales for Arctic shipping routes.

Keywords: Sea ice decline, Arctic, Antarctic, Climate change, AI-based prediction, Polar navigation

※ This research was supported by Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion (KIMST) funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (RS-2025-02219198; PM25010).