

위성 관측을 통한 북극 해빙 변화에 따른
복사강제력 산출 및 분석

Estimation and Analysis of Sea Ice changes caused
Radiative Forcing over Arctic Using Satellite data



국립부경대학교

위성관측을 통한 북극해빙변화에 따른 북사강제력 산출 및 분석

부경대학교



제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구” 과제의 위탁연구 “위성관측을 통한 북극 해빙 변화에 따른 복사강제력 산출 및 분석” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 김 현 철

위탁연구기관명 : 부 경 대

위탁연구책임자 : 한 경 수

위탁참여연구원 : 박 성 우

“ : 정 대 성

“ : 심 수 영

“ : 우 종 호

“ : 김 승 원

“ : 이 승 규

보고서 초록

위탁연구과제명		위성관측을 통한 북극 해빙 변화에 따른 복사강제력 산출 및 분석			
위탁연구책임자	한경수	해당 단계 참여연구원수	12	해당 단계 연구비	90,000,000
연구기관명 및 소속부서명	국립부경대학교		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	97
■ AutoML 기반 해빙표면온도(IST) 산출 - TPOT 기반 자동 기계학습으로 K-최근접이웃(KNN) 알고리즘 선정, Beaufort Sea 독립 검증에서 $R = 0.9837$, $RMSE = 2.113$ K 달성 - 현장 부이 검증 결과 $R = 0.86$, $RMSE = 4.33$ K로 ERA5($R = 0.83$, $RMSE = 4.73$ K)보다 우수한 성능 확인 - 극야 기간 포함 1988-2023년 연중 연속 IST 자료 생산으로 겨울철 Temperature-SIRF 정량화 가능 ■ 해빙 복사강제력(SIRF) 변화 - AutoML-SIRF 경향 $+0.29$ $W/m^2/year$로 ERA5-SIRF($+0.21$)보다 38% 강하며, Albedo-SIRF($+0.13$)의 2배 이상으로 온도 되먹임의 지배적 역할 확인 - 계절별로 여름 Albedo-SIRF 지배(5월 최대 -97.38 W/m^2), 겨울 Temperature-SIRF 지배(2월 최대 -57.66 W/m^2)로 뚜렷한 이분화 확인 - 지역별로 Kara Sea 최강 경향(0.54 $W/m^2/year$), Laptev(0.41), Chukchi(0.42 $W/m^2/year$)로 시베리아 대륙붕 해역이 증폭 핫스팟 역할 ■ 복사 Feedback 및 체제 전환 - 2004년 통계적 유의한 체제 전환 식별($p = 1.3 \times 10^{-5}$)로 진동 패턴($-7 \sim +2$ W/m^2)에서 지속적 양의 이상($+1 \sim +7$ W/m^2)으로 근본적 전환 - 되먹임의 공간 재배치 발생: 2005년 이전 중앙 북극 중심($6-8$ $W/m^2/K$) → 2005년 이후 주변 해역 이동, 대서양 부문 강화($+2 \sim +4$ $W/m^2/K$), 태평양 부문 약화($-3 \sim -4$ $W/m^2/K$) - 대기 순환 제어 능력 약화: Chukchi-Beaufort seas의 β^*가 영 근처로 중립화되어 대기 제어 소멸, 되먹임 지배 체제로 전환 확인					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	복사강제력, 해빙표면온도, 자동 기계학습, 복사 피드백, 대기 순환			
	영 어	Radiative Forcing, Ice Surface Temperature, Automated Machine Learning, Radiative Feedback, Atmospheric Circulation			

요 약 문

I. 제 목

위성관측을 통한 북극 해빙 변화에 따른 복사강제력 산출 및 분석

II. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 북극은 다른 지역에 비해 대기온도의 상승폭이 크게 나타나는 북극 증폭 현상이 발생하고 있다. 이는 다양한 기후 피드백 및 북극의 지리적 특성과 밀접한 연관이 있다. 특히 북극의 해빙 손실이 크게 나타난 지역에서 북극 증폭의 경향이 더욱 크게 나타난다. 이러한 경향을 설명하고자 복사강제력이 활용된다. 해빙이 감소하게 되면 표면의 알베도가 감소하게 되고 그로 인해 복사강제력이 증가하는 현상이 나타나게 된다. 현재 해빙 변화에 따른 알베도 기반의 복사강제력 산출에 관한 많은 연구가 수행되고 있다. 하지만 북극 증폭에 관련하여 알베도 보다 온도의 영향력이 크다는 연구 또한 존재한다. 따라서 본 연구에서는 알베도 뿐만 아니라 표면온도를 함께 고려한 해빙 표면에 따른 복사강제력을 산출한다. 이를 바탕으로 북극 해역의 표면변화에 의한 즉각적인 에너지 균형의 변화를 평가하고자 한다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 북극 지역의 복사강제력 산출 기준 제시
- 장기간 북극 지역의 복사강제력 산출 관련한 자료 수집 및 전처리
- 해빙 변화에 따른 북극 지역의 복사강제력 시공간 특성 분석
- DNN 기반 해빙표면온도 산출
- AutoML 기반 해빙표면온도 산출 및 비교
- AI기반 IST를 활용한 해빙 복사강제력 산출 및 분석

IV. 연구개발결과

- 북극 지역의 복사강제력 산출 기준 제시
 - radiative kernel을 활용하여 두 가지 요인(surface albedo, skin temperature)를 모두 고려한 해빙 변화에 따른 복사강제력(Sea Ice Radiative Forcing, SIRF) 산출
 - : 해빙 변화가 대기 상단의 에너지 균형에 미치는 순간적인 영향력(W/m²)
- 장기간 북극 지역의 복사강제력 산출 관련한 자료 수집 및 전처리
 - 5가지 기후모델의 두가지 요인에 대한 radiative kernel 확보
 - 수집된 자료의 시공간 평균 및 re-mapping
- 해빙 변화에 따른 북극 지역의 복사강제력 시공간 특성 분석

- 연, 월별 해빙 변화에 따른 복사강제력 특성 분석
 - 계절에 따른 주도적 요인 파악
 - Warming에 대해 주도적 역할 하는 해역 분석

 - DNN 기반 해빙표면온도 산출
 - IST 산출을 위한 입력자료 평가 및 선정
 - hyperparameter 분석을 통한 최적의 DNN 모델 생성
 - 타 위성 및 In-situ 자료를 활용한 DNN 기반 IST 모델 평가

 - 표면온도 자료에 따른 복사강제력 차이 분석
 - 재분석 자료 및 DNN 기반 IST에 따른 표면온도 기반 복사강제력 특징 분석
 - 표면온도 자료에 따른 변화경향 비교

 - AutoML 기반 해빙표면 온도 산출
 - Gap-Filling 정확도 평가
 - IST Inter-Comparison

 - AutoML IST 기반 해빙 복사강제력
 - 복사강제력 변화 경향 분석
 - 대기 순환과 복사강제력의 장기 상관성 분석
- V. 연구개발결과의 활용계획
- 선행 연구 및 본 과제와의 연계 분석
 - 기후 모델의 기초자료로 활용

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Estimation and Analysis of Sea Ice changes caused Radiative Forcing over Arctic Using Satellite data

II. Purpose and Necessity of R&D

In recent decades, the near-surface air temperature of the Arctic has increased two fold relative to the global average, which is called Arctic amplification. This is closely related to various climate feedbacks and geographic characteristics of the Arctic. In particular, the trend of Arctic amplification is more pronounced in regions where Arctic sea ice loss has been significant. The instantaneous perturbation to Earth's TOA energy balance induced by sea ice changes is known as sea ice radiative forcing (SIRF) and is used to measure the feedback of surface cryospheric components to Earth's radiation budget. Some studies have shown that Arctic amplification is strong in winter when surface albedo is not observed. In this study, as well as surface albedo-based radiative forcing according to sea ice changes, skin temperature-based radiative forcing was also calculated. The purpose of this study was to estimate the SIRF, to evaluate changes in the energy balance directly caused by surface changes of the Arctic Ocean.

III. Contents and Extent of R&D

- Suggestion of criteria for calculating radiative forcing in the Arctic region
- Collection and pre-processing of data related to long-term calculation of radiative forcing in the Arctic region
- Analysis of spatial and temporal characteristics of radiative forcing in the Arctic region according to sea ice changes
- Calculation of sea ice surface temperature based on DNN
- Analysis of radiative forcing differences according to surface temperature data

IV. R&D Results

- Suggestion of criteria for calculating radiative forcing in the Arctic region
 - Calculation of Sea Ice Radiative Forcing (SIRF) due to sea ice change considering both factors (surface albedo and skin temperature) using a radiative kernel
 - : The instantaneous perturbation to Earth's TOA energy balance induced by sea ice changes (W/m²)
- Collection and pre-processing of data related to long-term calculation of radiative forcing in the Arctic region
 - Collection of radiative kernels for two factors of five climate models
 - Pre-processing of the radiative flux data
- Analysis of spatial and temporal characteristics of radiative forcing in the Arctic region according to sea ice changes
 - Annual, Monthly Characteristic of SIRFs in the Arctic
 - Analysis of leading factors according to season and region
- Calculation of sea ice surface temperature based on DNN
 - Evaluation and selection of input data for IST calculation
 - Optimal DNN model creation through hyperparameter analysis
- Analysis of radiative forcing differences according to skin temperature data
 - Analysis of skin temperature-based radiative forcing characteristics according to reanalysis data and DNN-based IST
 - Evaluation of DNN-based IST model using other satellites and in-situ data
- AutoML-based Sea Ice Surface Temperature
 - Gap-Filling Accuracy Evaluation
 - IST Inter-Comparison
- AutoML IST based Sea Ice Radiative Forcing
 - Analysis of Radiative Forcing Trends
 - Analysis of Long-Term Correlations between Atmospheric Circulation and Radiative Forcing

V. Application Plans of R&D Results

- Study on correlation of previous study and main research with result of this

study over Arctic

- Application for study on correlation of the climatic changes in previous researches with result of this study



목 차

제 1 장 서론	14
제 1 절 목적	14
제 2 절 필요성	14
제 3 절 연구개발 내용	17
제 4 절 기대효과	17
1. 학술적 파급효과	17
2. 경제적 파급효과	18
제 2 장 국내외 기술개발 현황	20
제 1 절 지표와 관련된 복사강제력	20
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과	26
제 1 절 연구자료	26
제 2 절 연구방법	30
1. 목표 달성을 위한 연구 수행 방법	32
제 3 절 북극지역의 해빙에 따른 복사강제력 시공간 특성 분석	36
1. SIRFs의 연간 특성	37
2. SIRFs의 계절에 따른 특성	42
3. SIRFs의 월별 따른 특성	48
제 4 절 DNN기반 해빙표면온도 산출 및 복사강제력 비교	51
1. DNN기반 해빙표면온도 산출	53
2. DNN 기반 IST를 활용한 복사강제력 산출 및 평가	61
제 5 절 AutoML 기반 해빙표면 온도 산출	63
1. IST Validation & Inter Comparison	64
제 6 절 AutoML IST 기반 해빙 복사강제력	66
1. 복사강제력 변화 경향	66
2. 복사강제력 아노말리 비교 결과	69
3. 대기순환과 복사강제력	72
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	78
제 1 절 연구개발목표의 달성도	78
1. 연구 성과목표 및 달성도	78
2. 연구 성과목표 및 평가의 착안점	81
제 2 절 대외기여도	83
1. 학술 분야	83

2. 경제 분야	83
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	85
제 1 절 추가연구의 필요성	85
제 2 절 타 연구에의 응용	85
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	87
제 7 장 참고문헌	89



표 목차

표 1. Surface Shortwave Radiative Forcing 관련 연구 동향	22
표 2. Cloud Radiative Forcing 관련 연구 동향	23
표 3. Cryosphere Radiative Forcing 관련 연구 동향	24
표 4. 연구 자료 목록	29
표 5. 연구 수행 방법	32
표 6. 지역에 따른 SIRF 들의 연간 변화량(W/m ²)	39
표 7. 지역별 계절 SIRF의 변화량	46
표 8. 본 연구에 적용한 DNN 하이퍼파라미터	55
표 9. 연구개발 목표 및 달성도	78
표 10. 성과 목표 및 착안점	81



그림 목차

그림 1. 1982~2020년 동안 기온 변화량	14
그림 2. 2020년 기준 sea ice extent.	14
그림 3. 본 과제와의 연계성	16
그림 4. MODIS IST 지도 (2016년 4월 2일, 2016년 11월 2일)	26
그림 5. GCM에 따른 surface albedo 복사 커널들의 월평균 시계열 분포	28
그림 6. GCM에 따른 surface temperature 복사 커널들의 월평균 시계열 분포	28
그림 7. Automated Machine Learning 스키마	30
그림 8. 결측 보완 성능을 평가하기 위해 의도적으로 학습에서 제외한 Beaufort sea.	31
그림 9. 북극 영역의 지역명 지도	37
그림 10. 북극에서의 1982년부터 2015년까지 기후 모델에 따른 연평균 SIRF 들의 시계열 분포, (a) net-SIRF, (b) albedo-SIRF, (c) temperature-SIRF.	38
그림 11. 기후 모델들의 평균값을 이용한 연간 SIRF 변화량의 공간적 분포, (a) net-SIRF, (b) albedo-SIRF, (c) temperature-SIRF.	41
그림 12. 기후모델에 따른 평균 계절별 SIRF. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON	43
그림 13. 각 기후모델의 평균 커널값을 활용한 계절별 평균 SIRFs 공간적 분포, 가로축 : 계절, 세로축 : 각 요소별 SIRF	45
그림 14. 5개 커널 평균값을 이용한 월별 net-SIRF 시계열 분포	49
그림 15. 1982년부터 2015년 동안 각 요소별 SIRF 월별 변화량	49
그림 16. net-SIRF 월별 변화량의 공간적 분포	50
그림 17. 2000-2015년 기준 6월 평균 ERA5 및 MODIS의 표면온도 분포 특성	52
그림 18. 2000-2015년 기준 12월 평균 ERA5 및 MODIS의 표면온도 분포 특성	52
그림 19. 본 연구에 적용한 DNN 구조	55
그림 20. MODIS IST 및 IMB bouy 데이터를 통해 DNN 기반 IST 검증 결과. (a) DNN기반 IST와 MODIS IST의 분포. (b) DNN 기반 IST 및 MODIS IST와 IMB buoy IST와 비교.	57
그림 21. MODIS IST(a, b, c, d)와 DNN 기반 IST와(a', b', c', d')의 공간적 분포.	58
그림 22. Case 별 MODIS IST와의 검증 결과	59
그림 23. SHAP를 활용한 Case에 따른 변수 중요도 평가 결과	60
그림 24. ERA5-SIRF와 DNN-SIRF의 연평균 시계열 분포.	61
그림 25. ERA5-SIRF와 DNN-SIRF의 계절별 평균 공간적 분포.	62
그림 26. 2단계 IST 산출 모델 및 하이퍼파라미터와 정확도	63

그림 27. 1단계 IST 산출 모델 및 하이퍼파라미터와 정확도	63
그림 28. AutoML IST와 MODIS IST 시계열 비교	64
그림 29. IMB Buoy와 검증 결과, (좌) AutoML vs IMB Buoy, (우) ERA5 vs IMB Buoy	65
그림 30. MODIS IST가 존재하는 지점에서의 Histogram matching 결과	66
그림 31. 복사강제력 연 변화 경향 시계열 분석 결과	67
그림 32. 월별 복사강제력 평균 비교	68
그림 33. 월별 복사강제력 변화 경향 분석	69
그림 34. AutoML IST 기반 복사강제력 아노말리 시계열 분석 결과	71
그림 35. 복사강제력, 대기온도, 표면기압 아노말리 매핑	72
그림 36. 표면 기압 EOF 분석 결과	73
그림 37. 표면기압-복사강제력 다중회귀분석 mapping 결과	74
그림 38. Albedo & Temperature Feedback 분석 (2005년 전,후)	76





서 론

제 1 장 서론

제 1 절 목적

본 연구의 목적은 위성관측을 통한 북극 해빙 변화에 따른 복사강제력 산출 및 분석 연구에 있다.

제 2 절 필요성

해빙은 GCOS(Global Climate Observing System)에서 선정한 핵심기후변수(Essential Climate Variables, ECVs) 중 하나로써, 북극 지역의 기후 변동성과 변화를 나타내는 핵심 지표이다. 북극의 해빙은 고위도에서 지표면의 에너지 균형에 큰 영향을 미치고 있으며, 이는 해당 지역 및 전 지구의 기후시스템의 균형에 큰 역할을 하고 있다(Ledley, 1988). 그림 1은 1982년부터 2020년 까지 전지구의 기온 변화량을 나타낸다. 최근 발표된 IPCC 5차 평가보고서(AR5, 2013)에 의하면, 지구온난화로 인해 지난 112년간(1901~2012년) 지구의 평균기온(near-surface air temperature)이 0.89°C ($0.69\sim 1.08^{\circ}\text{C}$) 상승하였으며, 전지구 평균기온의 증가추세는 지속되고 있다고 평가하였다. 그 중 북극은 평균 대비 2배 이상으로 증가폭이 크게 나타나는데 이를 북극 증폭(Arctic Amplification, AA)이라 부른다(Manabe and Wetherald, 1975; Serrez et al., 2009; Screen and Simmonds, 2010; Cowtan and Way, 2014). 북극 증폭은 태풍의 경로, 제트기류, 로스비 파동의 변화를 일으켜 북반구 중의도의 날씨에 직간접적으로 영향을 미친다(Cohen et al., 2014). 현재 북극의 급격한 온난화는 광범위한 지역에서 해빙 손실을 발생시키고 있다(Screen and Simmonds, 2010). 이것은 고기후 데이터(Hoffert et al., 1992; Miller et al., 2010), 관측자료(Bekryaev et al., 2010; Wang et al., 2016; Blunden et al., 2019), 기후 모델(IPCC, 2013; Davy et al., 2020) 등 다양한 지표에서 그 결과가 뚜렷하게 나타나고 있다.

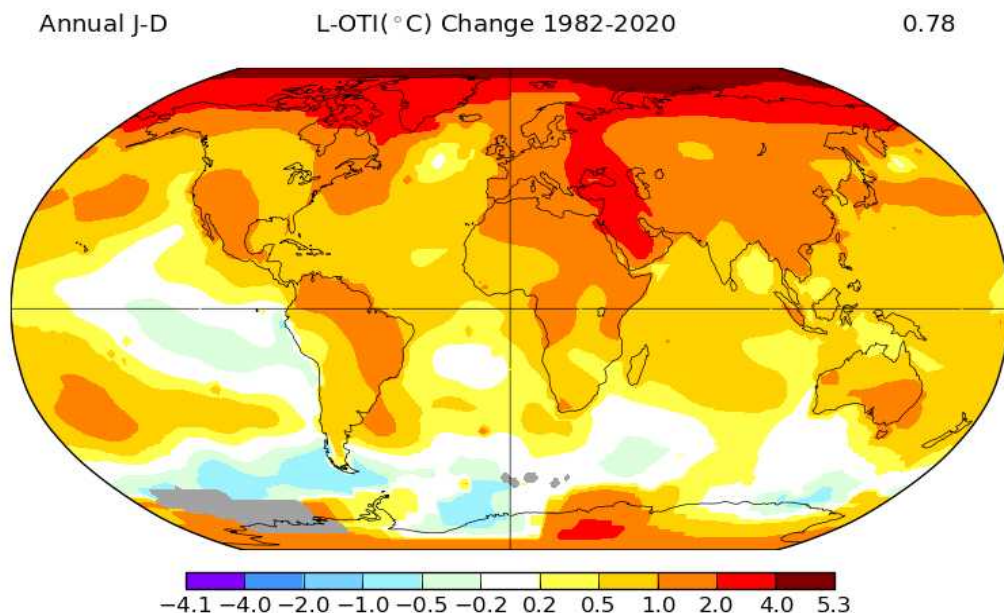


그림 1. 1982~2020년 동안 기온 변화량
(NASA, <https://data.giss.nasa.gov/>)

NSIDC(National Snow and Ice Data Center)에 따르면 그림 2와 같이 2012년에 sea ice extent가 가장 낮은 값이 관측되었으며 현재 10년간 약 13%의 비율로 감소하고 있다(Nature, 2022). 이는 다양한 기후 피드백 및 북극의 지리적 특성과 밀접한 연관이 있다(Taylor et al., 2013; Sejaset al., 2014; Boeke and Taylor 2016; Malte al., 2018). 특히 해빙의 손실이 크게 일어나는 지역에서 북극 증폭의 값 또한 크게 나타나는 결과가 있다(Aiguo et al, 2019). 이처럼 다양한 이유로 인하여 해빙은 북극 증폭은 영향을 받고 있으며, 해빙의 감소는 앞으로도 계속 지속할 것으로 전망되고 있다(Nature, 2022).

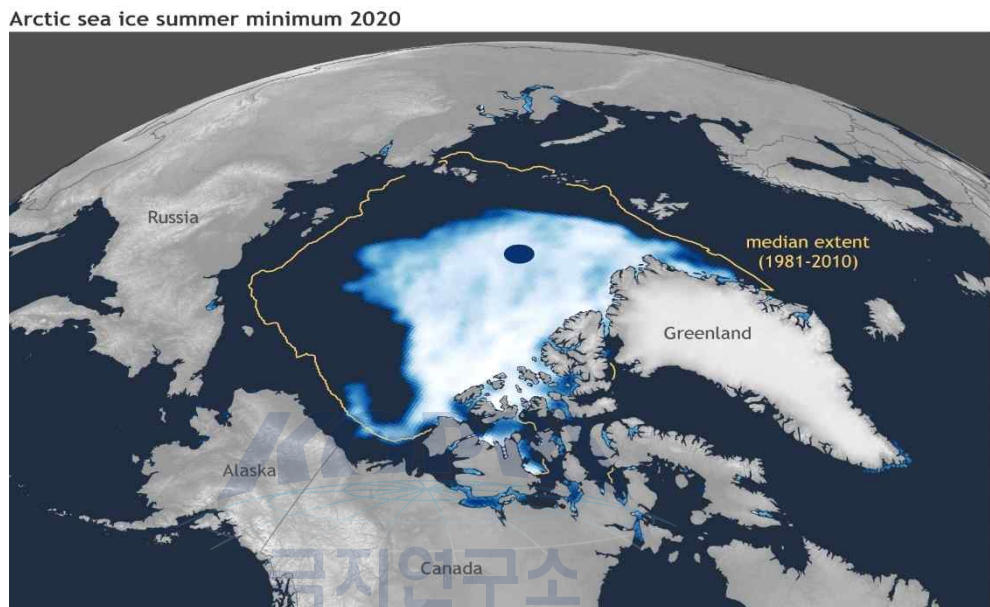


그림 2. 2020년 여름 기준 sea ice extent.
(Michonscott, 2020, <https://www.climate.gov/>)

이러한 현상을 복사강제력 관점에서 연구 및 평가를 진행하고 있다. 복사강제력(Radiative Forcing)이란 어떤 인자가 갖는 지구-대기 시스템에 영향을 주어 에너지 평형 유지 및 변화시키는 영향력의 척도이며, 잠재적인 기후변동 메커니즘의 지표이다. 복사강제력은 지구가 흡수하는 에너지와 그 중 다시 우주로 방출되는 에너지의 차이로 계산되어 진다. 복사강제력이 양일 경우, 지구가 흡수하는 에너지가 증가하여 지구의 온도 상승을 유발하며 음일 경우 지구가 방출하는 에너지가 증가하여 지구의 온도가 하강한다는 것을 뜻한다. 이는 대기나 구름 또는 빙하 등에서 반사, 온실가스 및 지표에서 흡수, 기타 지표 물질들에 의한 열 발산 등 여러 요소에 의해 영향을 받는다. 북극의 경우, 해빙 변화에 따른 알베도의 관점에서 언급되고 있다. 급격히 줄어드는 해빙으로 인하여 북극 표면의 알베도는 감소하게 되며 더 많은 태양에너지를 표면에서 흡수한다. 이러한 과정이 반복되며 북극의 온난화를 증폭시키고 해빙이 녹는 속도를 가속화한다(Hall, 2004; Bony et al., 2006; Goosse et al., 2018; Thackeray and Hall 2019). 해빙변화에 따른 지구의 TOA(Top Of Atmosphere) 에너지 균형에 대한 순간적인 섭동(perturbation)을 해빙 복사강제력(Sea Ice Radiative Forcing, SIRF)라 하며, 이는 빙권의 지표 구성요소에 따른 지구복사에너지의 피드백을 측정하는데 사용된다. 해빙 변화

로 인한 SIRF를 산출하기 위하여 다양한 시공간 범위 및 자료를 바탕으로 여러 연구들이 진행되고 있다(Flanner et al., 2011; Cao et al., 2015; Cao et al., 2016; Pistone et al., 2014; Marcianesi et al., 2021; Wang and Key. 2005).

하지만 일부 연구에서는 북극 증폭이 지표면 알베도가 관측되지 않는 겨울철에 더욱 강하게 나타난다는 결과를 제시하였다(Kumar et al., 2010; Serreze and Barry, 2011; Haine and Martin, 2017). 해빙이 변화하면 표면의 알베도 뿐만 아니라 표면의 온도 또한 변화한다. 표면온도(Skin Temperature)는 표면과 대기 사이에 수증기와 에너지 교환을 정량화 할 수 있는 중요한 매개변수다(Tsuang et al., 2009). 북극은 지역 특성 상 지표면 알베도는 3월부터 9월까지 관측되는 반면, 표면온도의 경우 12개월 모두 북극 기후에 직접적인 영향을 끼친다. Screen et al.(2005)는 강한 양의 해빙-온도 피드백이 북극 전역에 나타나 해빙 손실과 급격한 온난화의 가능성을 증가시킨다고 제시하였다. Pithanet et al.(2014)는 온도 피드백 메커니즘이 표면으로부터의 알베도 피드백보다 북극 증폭에 더 많이 기여한다는 것을 보여주었다. 그러나 알베도 기반의 해빙 복사강제력과 같은 radiative kernel을 이용한 표면온도 기반의 복사강제력과 관련된 연구는 수행되지 않았다. 현재 다양한 기후 모델은 표면 변화에 따른 표면 온도와 알베도 커널을 제공하고 있다(Shell et al., 2008; Pendergrass et al., 2018; Smith et al., 2018; Smith et al., 2020; Soden et al., 2008 Stevens et al., 2013). 따라서 해빙 변화에 따른 알베도 기반의 복사강제력 뿐만 아니라 온도 기반의 복사강제력 산출이 필요하다.

또한, 본 연구는 ‘북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구’의 결과를 바탕으로 활용할 수 있다. 본 과제에서 해빙 형태, 해빙 두께, 해빙 이동, 연안해빙 분포, 해빙 강도 등 다양한 해빙의 변화 탐지를 수행한다. 본 연구에서는 이러한 해빙의 변화로 인하여 발생하는 표면의 복사강제력을 산출하게 된다. 이것을 바탕으로 해빙 변화에 따른 북극권의 에너지 변화를 정량화 한다는데 의의가 있다. 최종적으로는 북극 빙권 변화를 바탕으로 복사강제력을 활용하여 온난화 영향에 대한 정량적 평가가 가능하다.

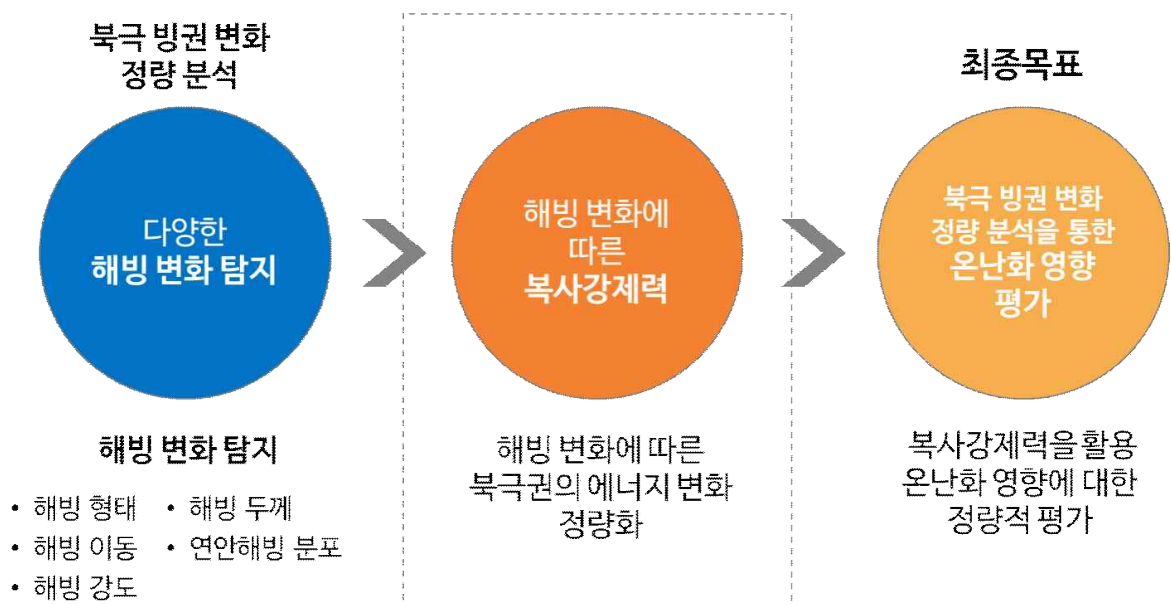


그림 3. 본 과제와의 연계성

제 3 절 연구개발 내용

본 위탁연구는 북극 빙권변화 정량 분석을 위한 원격탐사 연구를 위한 협력 연구로써 북극의 해빙 변화에 따른 복사강제력 산출 및 분석을 목표로 한다. 전체적인 과정은 표 1과 같다.

1단계 1차년도는 북극 지역에서의 복사강제력을 산출하였다. 복사강제력을 산출하기 위하여 선진기관 및 선행연구를 바탕으로 북극지역의 복사강제력 산출의 기준을 제시하고, 복사강제력 산출을 위한 장기간의 위성기반 자료를 수집하였다. 그리고 수집한 자료를 바탕으로 동일한시·공간 해상도로 일치시켜주고 이를 종합하여 북극지역에서의 복사강제력 산출을 수행하였다.

1단계 2차년도는 복사강제력 특성 분석 및 해빙 유무에 따른 복사강제력 특성 분석을 목표로 한다. 북극권 지역을 중심으로 우선 분석을 수행하여 북극 전역의 복사강제력 특성 분석을 수행한다. 이후 위성기반 해빙농도 자료를 수집하여 북극 해빙-개빙지역을 구분하고 해빙 유무에 따라 복사강제력의 변화 및 특성 분석하였다.

1단계 3차년도에는 복사강제력 기반으로 해빙변화에 따른 피드백을 정량적으로 평가하였다. 1단계 2차년도 연구에서 확인된 재분석자료 및 기존 위성기반의 해빙표면온도 자료의 한계를 극복하고자 DNN 기반의 해빙표면온도를 생산하고, 이를 바탕으로 2차년도 복사강제력 결과와 비교 및 평가를 진행하였다. 마지막으로 이를 바탕으로 북극지역의 복사강제력 특성을 종합하여 북극 기온의 정량적인 변화와 연계성 분석을 수행할 계획이다.

2단계에서는 고품질 북극 AI기반 해빙표면온도 자료를 생성하여, 복사강제력 산출 및 평가를 통해 해빙표면 변화에 따른 온난화에 미치는 영향을 정량화 하였다.

2단계 1차년도에서는 해빙 및 표면온도와 관련있는 입력변수를 기반으로 해빙표면온도 산출 모델을 구축하였다. 1단계 3차년도에서 사용한 입력변수 결과와 선행 연구 기반으로 문헌고찰을 통해 해빙·대기·해양의 열교환에 관련된 변수를 정확도 지표를 기반으로 최적화하여 사용하였다.

2단계 2차년도에서는 장기간 산출 및 최적화를 진행하였으며, Ice Mass Balance Buoy 해빙표면온도 자료를 기반으로 정확도 평가를 진행하였다. 또한 해빙표면온도의 장기간 시공간 변화 특성 분석을 진행하였다.

2단계 3차년도에서는 결측 없는 해빙표면온도 자료를 기반으로 복사강제력 산출 및 평가를 진행하였으며, 계절 및 지역별 복사강제력 평가를 진행함에 따라 Feedback 평가를 진행하였다.

제 4 절 기대효과

1 학술적 파급효과

북극 지역과 같은 극 지역은 기후 변화에 민감하게 반응하면서도 영향을 주는 복합적인 지역이다. 그래서 다른 지역에 비해 기후 변화와 관련하여 다양한 연계 연구가 필요하다. 특히 북극 지역의 경우 지구 온난화로 인하여 해빙의 감소가 두드러지는 지역으로 이 지역의 북극 환경변화 요인 분석은 중요하다. 그중에서도 복사강제력의 경우 실제 에너지가 북극 빙권 요소에 미치는 영향을 정량화할 수 있는 수치로써 기후 변화 연구에서 다양한 reference 자료로 활용 가능성이 크며, 북극 환경변화 요인 분석

에 절대적인 자료로 활용할 수 있다. 또한, 에너지 자료의 품질 분석을 통하여 연구지역의 최적화된 자료의 분류 및 이용에 도움을 줌으로써 해빙 관측망 설립 및 기후 변화 모델의 정확성을 향상하는 데 도움을 줄 수 있다. 또한, 대부분의 복사강제력 연구는 모델 기반으로 2.5° ~ 3° 의 낮은 공간 해상도로 산출되지만 본 연구는 복사강제력의 경우 위성 기반 자료를 활용하여 비교적 높은 공간 해상도를 제공할 수 있다. 이는 모델 자료보다 높은 공간 해상도를 가지고 있어서 지역적인 규모의 기후 연구에서 있어서 적합한 입력자료로 제공 가능하다는 것을 의미한다. 그뿐만 아니라 대부분의 연구가 Albedo의 관점에서 수행되고 있지만, 본 연구의 경우 Surface Temperature를 고려한 연구로서 종합적으로 해빙 변화에 따른 영향을 평가할 수 있다.

2 경제적 파급효과

선진기관에서 수행하고 있는 기후 변화 대응, 극지 관측망 확충과 관련한 연구에 일조하여 향후, 선진기관과의 협력 연구 및 선진 연구 자료로 활용할 수 있다. 또한, 위성 자료를 활용함으로써, 극한 기후에서 현장관측 자료와 비교하면 위성 기반 자료의 사용 및 취득이 용이한 이점을 가지고 있다. 이는 실측 시 발생하는 기회비용에 비해 고효율의 자료를 이용 가능함을 의미한다. 또한, 북극 지역의 변동 예측 자료로써 활용할 수 있으므로 해당 연구결과를 활용하여 극 지역의 변화에 따른 중위도 지역의 기후 예측이 가능하며, 이는 실제 많은 인구 생활권의 기후 변화 관측 및 예측에도 큰 도움이 될 수 있다. 위성 기반 에너지 수지 변화의 경우, 북극 지역의 변동 예측 자료로써 활용 가능성이 크고 이는 실제 이상기후 대비를 위한 기반 자료로 활용할 수 있다. 그리고 극지 기후를 정확하게 이해할 수 있는 기반 자료로 이용될 수 있으며, 이는 국가 기후 변화 대응 전략 수립에 과학적 근거 제공함으로써 국제기구와의 협력을 위한 전략 자료로 활용할 수 있다.



국내외 기술개발 현황

극지연구소

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 지표와 관련된 복사강제력

복사강제력 (Radiative Forcing, RF)이란 어떤 인자가 갖는 지구-대기 시스템에 영향을 주어 에너지 평형을 유지 및 변화시키는 영향력의 척도이다. 이러한 복사강제력은 잠재적인 기후변동 메커니즘의 중요한 지표이다. 양의 복사강제력을 가지면 지구가 흡수하는 에너지가 지표면 온도의 상승을 유발하며, 음의 강제력을 가지면 반대로 온도를 하강시키는 역할을 한다. IPCC 5차 보고서에 의하면 인간의 활동으로 변화된 인위적인 복사강제력은 $+2.29\text{W/m}^2$ 로 산출되었다. 이러한 경향은 2000년대에 이르러 더욱 가속화되고 있다. 그 인간의 활동과 밀접한 연관이 지표의 변화는 꾸준히 일어나고 있으며, 산업화 이전부터 현재까지의 지표의 변화는 지표면 알베도가 증가시켜 -0.2W/m^2 의 복사강제력으로 나타나고 있다.

전 세계적으로 지표의 변화에 따른 복사강제력에 관한 연구는 활발히 진행되고 있다. Campra et al.(2008)은 스페인 동남부 지역의 원예 산업의 확장으로 인한 지표면 Albedo 변화 및 그에 따른 Radiation Forcing 영향 분석하였으며, Forster P. et al.(2007)과 Matthews, et al. 2003의 연구에서는 산업화 이전부터 현재까지 토지 피복 변화에 따른 지표 Albedo 변화로 인한 전 지구 Radiative Forcing 변화 분석을 수행하였다. Jun et al.(2014)는 990-2010년까지 중국의 토지 피복 변화에 의한 지표면 Albedo 및 Radiative Forcing 변화 분석을 하였다. 지표면 Albedo 변화에 따른 토지 피복 변화 유발 메커니즘에 대한 Radiative Forcing 영향 평가 또한 진행되었다. (Pitman et al. 2009).

위 연구들에서 사용되는 단파 영역의 지표 복사강제력(Surface Shortwave Radiative Forcing, SSRF)의 산출식은 다음과 같다(Huang et al. 2014; Jin et al. 2012; Jin and Roy, 2005; López-Saldaña et al. 2014).

$$SSRF = R_s \times (a_1 - a_2)$$

여기서 R_s 는 surface incoming solar radiation이며, a_1 는 해당 지표의 변화가 일어나기 전의 알베도, a_2 는 지표의 변화가 일어난 이후의 알베도 값을 의미한다. 대부분의 연구에서 알베도 값은 월평균 자료를 사용하였다. 연구의 특성 및 목표에 따라 a_1 자료의 기준이 다양하였다. 산불 등 급격한 변화가 일어나는 지역은 그 시점 전의 자료를 활용하였다. 산업화 및 사막화와 같이 장기간에 걸쳐 지표의 변화가 일어나는 지역에서는 모델 기반의 Potential Natural Vegetation(PNV)에 해당하는 식생 상태의 알베도 자료를 사용하거나 해당 연구에서 확보 가능한 알베도 자료의 가장 과거의 자료를 사용하였다.

북극의 대기는 다른 저위도, 중위도 지역보다 상대적으로 건조하다. 이러한 상황에서 구름은 surface heat budget에서의 핵심 요소인 복사 에너지에 큰 영향을 미친다. 겨울철의 경우, 구름은 incoming longwave radiation을 증가시켜 지표면을 따뜻하게 한다. 여름에는 incoming shortwave radiation을 감소시키고, incoming longwave radiation을 증가시키는 두가지 역할을 모두 진행한다. 이러한 경향을 구름의 종류, 태양의 입사각(Minnett, 1999), 지표면의 알베도 등에 따라 달라진다. 이러한 구름에 의한

장파와 장파의 복사에너지의 영향을 Cloud Radiative Forcing (CRF)라 한다. 양의 CRF는 구름에 의해 표면을 따뜻하게 하는 것을 의미하며, 음의 CRF는 구름이 표면을 냉각시킨다는 것을 나타낸다. CRF를 활용하여 많은 연구(Shupe et al. 2003; Zhao et al. 2015; Miller et al. 2015; Sedlar et al. 2011)가 진행중에 있으며, 산출식은 다음과 같다(Ramanathan et al. (1989)).

$$CRF = F(A_{cf}) - F(0)$$

여기서 A_{cf} 는 구름 비율이 100% 상태를 의미하며 0은 구름 없는 상태를 의미한다. CRF는 두 상황에서 복사량의 차이를 나타낸다. 구체적으로 지표면에 대한 단파 CRF, 장파 CRF, 순 CRF는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} CRF_{LW} &= F_{LW}^{\downarrow}(A_{cf}) - F_{LW}^{\uparrow}(A_{cf}) - F_{LW}^{\downarrow}(0) + F_{LW}^{\uparrow}(0), \\ CRF_{SW} &= F_{SW}^{\downarrow}(A_{cf}) - F_{SW}^{\uparrow}(A_{cf}) - F_{SW}^{\downarrow}(0) + F_{SW}^{\uparrow}(0), \\ CRF_{\neq t} &= CRF_{LW} + CRF_{SW} \end{aligned}$$

F_{SW} 와 F_{LW} 는 각각 장파와 단파의 복사 에너지를 의미하며, $\uparrow$ 와 $\downarrow$ 는 각각 상향 및 하향을 의미한다. 여기서 CRF는 복사 에너지가 아래를 향하는 것을 양으로 지표면에서 표현된다.

북극 지역은 다른 지역과 달리 대부분 눈 또는 얼음으로 뒤덮인 지역이다. 따라서 해당 지표의 변화는 눈 또는 얼음의 변화로 설명되며 이것의 변화에 따른 복사강제력 연구 또한 진행되고 있다. Flanner et al.,(2011)은 radiative kernel을 활용하여 빙권에서의 눈과 얼음의 변화에 따른 알베도 변화가 복사강제력으로 어떻게 표현되는지 연구를 진행하였다. Xiao et al.,(2017)는 위성기반 자료, 재분석 기반 자료를 이용하여 radiative kernel 기반의 눈에서의 알베도 피드백을 정량화하고 snow albedo radiative forcing을 산출하였다. 위 논문에서 사용된 빙권 복사강제력(Cryosphere Radiative Forcing, CrRF) 산출식은 다음과 같다.

$$CrRF(t, R) = \frac{1}{A(R)} \int_R S_x(t, r) \frac{\partial \alpha}{\partial S_x} \frac{\partial F}{\partial \alpha} dA(r)$$

여기서 $CrRF(t, R)$ 는 시간 t 에 따른 해당 지역 R 의 빙권 또는 눈에서의 알베도가 대기 상단에 영향을 미치는 radiative forcing을 나타낸다. $A(R)$ 은 전체 지역을 의미하며, S_x 는 해당 지역의 눈 또는 얼음 비율을 나타낸다. $\frac{\partial \alpha}{\partial S_x}$ 는 눈 또는 얼음 비율 변화에 따른 알베도 변화, $\frac{\partial F}{\partial \alpha}$ 는 지표면 알베도 변화에 따른 대기 상단의 flux를 나타낸다. 해당 연구들에서 $\frac{\partial \alpha}{\partial S_x}$ 는 연구에서 활용된 자료의 평균값을 사용했으며, $\frac{\partial F}{\partial \alpha}$ 는 radiative kernel을 사용하여 산출하였다.

표 1. Surface Shortwave Radiative Forcing 관련 연구 동향

저자	연도	제목	내용
Richard et al.	2001	Biogeophysical impacts of land use on present-day climate: near-surface temperature change and radiative forcing	◆ 1860 ~ 1999년까지의 토지 변화에 따른 및 복사강제력(RF) 분석 ◆ HadAM3 모델을 이용하여 분석 진행 : surface shortwave radiation budget 및 vegetation-dependent 활용 ◆ 산림감소로 인하여 전지구적으로 감소 추세 ◆ 유럽, 북미, 아시아 지역에서 -5 W/m^2 경향
Andrews et al.	2017	Effective radiative forcing from historical land use change	◆ 1860 ~ 2005년까지의 토지 변화에 따른 유효복사강제력 분석 ◆ HadGEM2-ES 모델 사용하여 지표의 변화 - 지표면 알베도변화 ◆ 유효복사강제력 변화 관계-산림감소로 인한 전지구적으로 감소경향 (-0.4 W/m^2)
Campra et al.	2008	Surface temperature cooling trends and negative radiative forcing due to land use change toward greenhouse farming in southeastern Spain	◆ 2001~2005년 스페인 동남부 지역의 인위적 개발로 인한 지표면 Albedo 변화 및 그에 따른 RF 영향 분석 ◆ MODIS-albedo, POTRAD 모델-solar insolation 자료 사용 ◆ 목장 지역에서 원예사업지역으로 변화 → 알베도증가 → 연 평균 RF -19.8 W/m^2 감소
Jin et al.	2005	Fire-induced albedo change and its radiative forcing at the surface in northern Australia	◆ 2003년 호주지역의 산불에 따른 알베도 및 복사강제력 변화 분석 ◆ MODIS : Reflectance, Albedo, ECMWF :surface incoming solar radiation ◆ 화재로 인한 알베도감소 → 복사강제력 0.52 W/m^2 증가
Myhre and Myhre	2003	Fire-induced albedo change and its radiative forcing at the surface in northern Australia	◆ 지표 변화에 의한 지표면 알베도변화에 따른 복사 강제력 추정의 불확실성 ◆ 5가지 Vegetation dataset / 3가지 Albedo dataset 구성 ◆ DISORT Radiative transfer model 이용하여 복사강제력 추정 ◆ Vegetation 및 Albedo 구성에 따라 추정되는 복사강제력 값 다름

표 2. Cloud Radiative Forcing 관련 연구 동향

저자	연도	제목	내용
Shupe <i>et al.</i>	2004	Cloud radiative forcing of the Arctic surface: The influence of cloud properties, surface albedo, and solar zenith angle	- 장파 구름 강제력(CFLW) 구성요소 : 구름 온도, 높이 및 방사율 - 단파 구름 강제력(CFSW) 구성요소 : 구름 투과율, 지표 알베도 및 태양 천정각 - 구름 복사강제력의 주요 인자 : low-level stratiform liquid and mixed-phase clouds
Zhao <i>et al.</i>	2015	Effects of Arctic haze on surface cloud radiative forcing	- 구름은 여름철을 제외하고 Alaska, Barrow 지역에서 에서 표면 온난화 - 에어로졸 연무는 겨울에는 구름 온난화, 여름에는 구름 냉각 강화 - 증가된 liquid water path로 인하여 liquid clouds에서 30-50% 표면강제력 증가
Miller <i>et al.</i>	2015	Cloud radiative forcing at Summit, Greenland	- 연평균 CRF는 33W/m^2로 그린란드 지역에서 실질적으로 구름에 의한 온난화 발생 - 다른 북극 지역과 달리 구름은 여름 동안 표면 온난화 - 그린란드에서 전체 CRF는 모든 달에 구름 장파 온난화 효과에 의해 결정
Sedlar <i>et al.</i>	2011	A transitioning Arctic surface energy budget: the impacts of solar zenith angle, surface albedo and cloud radiative forcing	- 단파 구름 강제력 : $-50\text{ W/m}^2 \sim 0\text{ W/m}^2$: surface albedo, solar zenith angle, cloud liquid water.에 따라 크게 영향 - 장파 구름 강제력 : $65\text{ W/m}^2 \sim 85\text{ W/m}^2$ - 구름의 순 효과는 표면의 온난화 가속

표 3. Cryosphere Radiative Forcing 관련 연구 동향

저자	연도	제목	내용
Flanner <i>et al.</i>	2011	Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008	◆ 1979년부터 2008년까지 북극을 포함한 북극권의 영역에서 빙권 변화에 의한 복사강제력을 산출 ◆ land albedo : MODIS MCD43C3 collection 5 ◆ sea ice albedo : AVHRR APP, surface albedo radiative kernel : CAM3 ◆ 빙권의 냉각효과가 $0.15 \sim 0.32 \text{ W/m}^2$ 감소
Cao <i>et al.</i>	2015	Assessment of sea ice albedo radiative forcing and feedback over the Northern Hemisphere from 1982 to 2009 using satellite and reanalysis data	◆ 1982년부터 2009년까지 북극권에 대한 SIRF 연구를 수행 ◆ surface albedo 총 3가지 사용 : CLARA-A1, ERA-Interim, MERRA ◆ 해빙 감소로 인하여 $0.20 \pm 0.05 \text{ W/m}^2$ 증가 경향 ◆ surface albedo 자료에 따라 SIRF는 최대 26 W/m^2 차이가 발생
Pistone <i>et al.</i>	2014	Observational determination of albedo decrease caused by vanishing Arctic sea ice	◆ 60도 이상인 북극 해역에 대해 albedo-SIRF를 산출 ◆ CERES planetary albedo 자료 활용 ◆ 북반구에서 해빙 감소로 인하여 0.43 의 $\text{SIRF} \pm 0.07 \text{ W/m}^2$ 변화
Marcianesi <i>et al.</i>	2014	Arctic sea ice and snow cover albedo variability and trends during the last three decades	◆ 북위 48.5도 이상인 지역에 한하여 CERES EBAF 자료 활용 ◆ 1982년부터 2015년까지 북극 해역에 연간 $1.82 \pm 0.07 \text{ W/m}^2$ 의 일사량이 증가하여 sea ice albedo의 변화 발생

연구개발 수행 내용 및 결과

극지연구소

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1 절 연구자료

본 연구는 위성 관측, 재분석 자료, 현장 관측 자료를 통합하여 활용하였다(Table 1). 주요 데이터는 결측치 보완 대상인 MODIS IST, 기상 및 복사 입력 자료인 ERA5 재분석 자료 및 CLARA-A3 자료, 그리고 SIRF 계산을 위한 전지구 기후모델(GCM) 복사 커널을 포함한다. 모든 데이터셋은 북극 지역을 대상으로 25 km 해상도로 재투영되었다.

빙면 온도 산출물은 NASA와 NSIDC에서 제공하는 MODIS Terra MOD29E1D 제품(4 km EASE-GRID 일별 합성 자료)을 기준으로 하였다. 이 알고리즘은 11 - 12 μm 대기창에서의 차등 흡수를 활용하는 분할창 기법을 적용하여 청천 조건에서 3.7 K의 정확도를 달성한다 (Hall et al., 2001). 입증된 정확도에도 불구하고, 열적외 관측은 구름 조건 하에서 제한되기 때문에 시간적 연속성을 확보하기 위한 결측치 보완 방법론이 필수적이다.

대기 강제력 변수는 위성 관측, 현장 측정, 수치 모델링을 통합한 ECMWF의 5세대 재분석 자료인 ERA5로부터 도출되었다 (Hersbach et al., 2020). 재분석 데이터셋은 원격탐사 관측, 현장 측정, 모델 결과를 결합하여 북극 지역의 기후 변화를 이해하는 중요한 자료로 활용된다 (Lindsay et al., 2014).

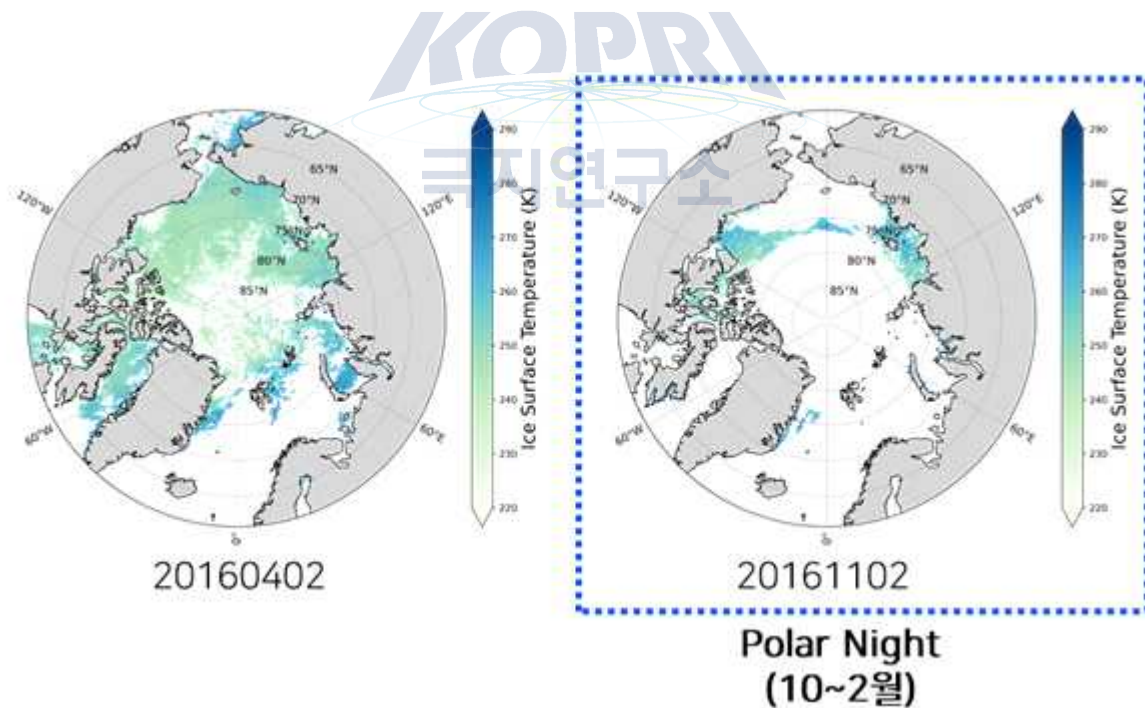


그림 4. MODIS IST 지도 (2016년 4월 2일, 2016년 11월 2일)

지표 알베도와 외향 장파 복사장은 1982년부터 현재까지를 포함하는 CM SAF CLARA-A3 기후 데이터 기록으로부터 도출되었다 (Karlsson et al., 2023). 이 AVHRR 기반 산출물은 얼음-알베도 되먹임 정량화에 필수적인 흑천공 지표 알베도와 대기 방출 제약을 위한 TOA OLR을 제공한다. CLARA-A3는 북극 환경의 전형적인 높은 태양천정각 조건에서 편향이 감소하여 극지방에서 우수한 성능을 보인다 (Batrak

et al., 2024). 빙면 온도와 마찬가지로, 해빙 알베도는 알베도 되먹임 메커니즘을 통해 지표 에너지 수지에 강한 영향을 미치는 중요한 매개변수이다: 알베도 감소는 더 많은 복사 흡수로 이어지며, 이는 다시 지표 온도 상승과 해빙 손실을 초래한다 (Riihela et al., 2021; Pistone et al., 2014; Curry et al., 1995).

ECMWF의 5세대 재분석 자료인 ERA5는 원격탐사 관측, 현장 측정, 모델 결과를 결합하여 북극 기후 변화 이해를 위한 중요한 자원 역할을 한다 (Lindsay et al., 2014). 2미터 기온(T2m)은 IST와 강한 결합($r > 0.85$)을 보이며, 대기 온난화에 대한 빙면의 민감도를 증폭시킨다 (Sim et al., 2022; Shuman et al., 2014; Tetzlaff et al., 2013). 전체 기둥 수증기량(TCWV)은 T2m-IST 관계에 결정적인 조절 효과를 나타내며, TCWV 값 증가는 T2m과 IST 간 차이 감소와 대응된다 (Shuman et al., 2014). 평균 해면 기압(MSLP)은 대기 순환 패턴을 변화시켜 해빙의 이동과 분포를 조절한다 (Choi et al., 2019; Ogi et al., 2013). 지표 하향 단파 복사는 3월부터 8월까지 주요 에너지 입력원이며, 직접적인 에너지 전달 및 얼음-알베도 되먹임 메커니즘을 통해 빙면 온도와 강한 상관관계($r = 0.66-0.86$)를 나타낸다 (Lubin et al., 2011; Wang et al., 2005).

NOAA 기후 데이터 기록(CDR) 프로그램 및 NSIDC에 따라 생산된 일별 해빙 농도 자료를 사용하였다. SIC CDR 알고리즘의 출력은 두 가지 확립된 SIC 알고리즘인 NASA Team(NT) 알고리즘 (Cavalieri et al., 1984)과 NASA Bootstrap(BT) 알고리즘 (Comiso et al., 1986)의 규칙 기반 조합으로 구성된다. 알고리즘의 정밀도와 정확도는 다수의 연구에서 평가되었다 (Cavalieri et al., 1991; Comiso et al., 1997; Kwok et al., 2002; Andersen et al., 2006, 2007; Ivanova et al., 2014). 일별 북반구 SIC 자료는 25×25 km 공간 해상도로 제공되었다 (Meier et al., 2017).

NOAA OISST (Reynolds et al., 2007; Huang et al., 2021)는 0.25° 해상도의 보완적 SST 장을 제공한다. 얼음으로 덮인 지역($SIC > 0.35$)의 경우, 알고리즘은 기후학적 해수면 염분을 사용한 물리 기반 빙점 조절을 구현하여 해양과 빙면 온도 간의 열역학적 일관성을 보장한다 (Banzon et al., 2020). 대리 SST 계산은 서로 다른 시간대에 대한 별도의 매개변수화를 적용하여 28개 북극 지역에 대한 선형 회귀를 사용한다.

복사 커널은 지표 특성 섭동에 대한 TOA 플럭스 민감도를 정량화하여 알베도 및 온도 변화에 대한 단파 및 장파 반응의 분해를 가능하게 한다 (Soden et al., 2006). 개별 모델 불확실성을 최소화하기 위해 전천 조건에서 5개 CMIP급 GCM(CAM5 (Pendergrass et al., 2018), HadGEM2 (Smith et al., 2018), HadGEM3 (Smith et al., 2020), GFDL (Soden et al., 2008), ECHAM6 (Stevens et al., 2013))의 지표 알베도 및 온도 커널을 활용하였다 (Seong et al., 2022).

surface albedo 복사 커널은 표면의 albedo가 1% 변화할 때, radiative flux에 미치는 에너지양 (W/m^2)을 의미한다. GCM에 따른 surface albedo 복사 커널들의 월평균 시계열 분포를 나타낸다. 전체적으로 유사한 분포특성이 나타나지만, 5~6월에는 GCM에 따라 다른 특성이 나타난다. CAM5 model은 여름철에 알베도의 영향을 가장 크게 받는 것으로 나타나며, 반대로 GFDL는 상대적으로 albedo 영향이 다른 모델에 비해 낮게 나타난다. surface albedo 복사커널의 차이가 가장 크게 발생하는 6월 기준 CAM5와 GFDL의 차이의 공간적 분포를 나타낸다. 대부분의 지역에서 CAM5 surface albedo 복사커널이 낮은 값이 산출되며, Chukchi, Laptev, East Siberian seas 해역에서 약 $2 W/m^2$ 의 차이가 발생한다.

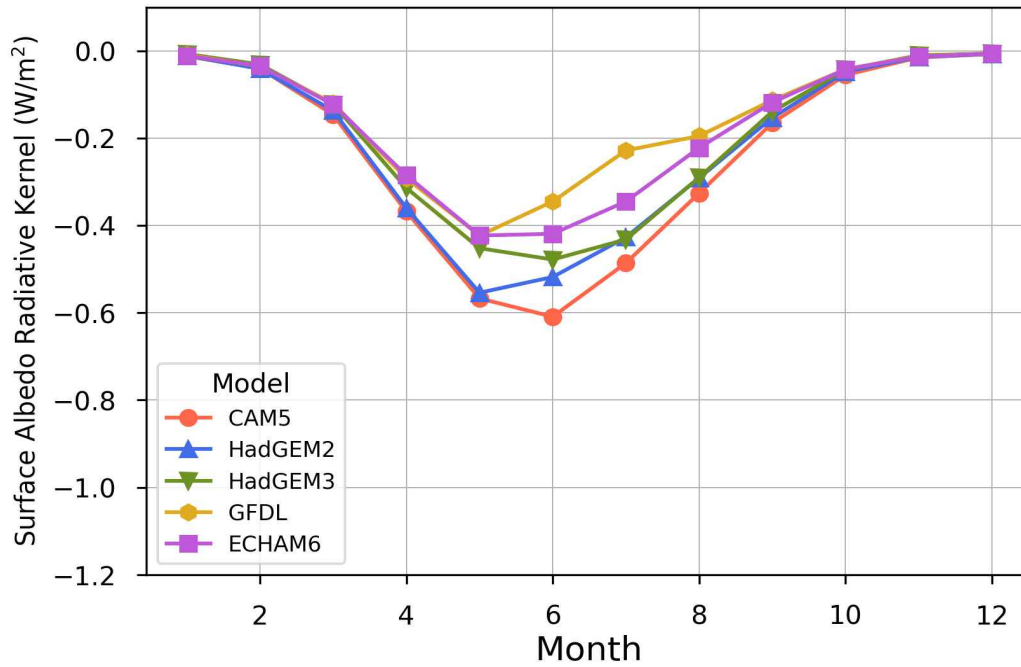


그림 5. GCM에 따른 surface albedo 복사 커널들의 월평균 시계열 분포

surface temperature 복사 커널은 표면 온도가 1K 변화할 때, radiative flux에 미치는 에너지양 (W/m^2)을 의미한다. surface temperature 커널은 surface albedo 커널에 비해 전체적으로 더 큰 영향력을 가지지만, 계절별 변동성은 작게 나타난다. 그 중에서도 CAM5와 GFDL의 경우 계절에 따른 변동성이 더욱 자게 나타난다. HadGEM2, HadGEM3, ECHAM6는 비슷한 양상을 띈다.

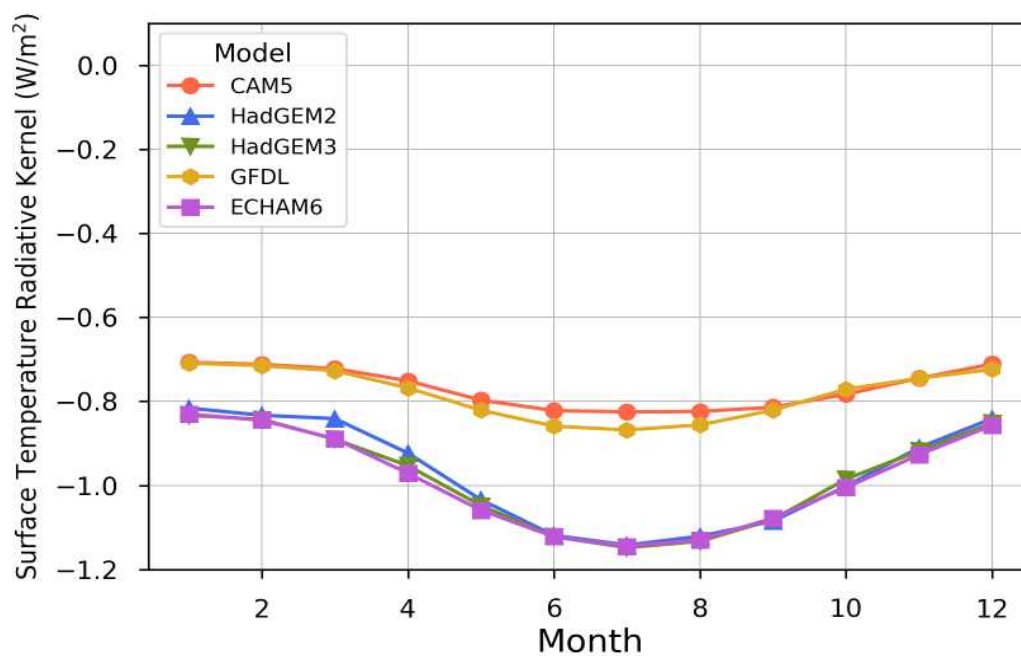


그림 6 GCM에 따른 surface temperature 복사 커널들의 월평균 시계열 분포

표 4. 연구 자료 목록

Dataset	Variables	Spatial Resolution	Temporal Resolution	Period	Purpose
MODIS/Terra (MOD29E1D)	IST	4 km	Daily	2002.20~2023.12	Gap-filling target
CLARA-A3	Surface Albedo, TOA OLR	0.25°	Daily	1979-present	Albedo-SIRF Gap-filling Input
ERA5	T2m, TCWV, MLSP, SW↓	0.25°	Daily	1940-present	Gap-filling Input
	Skin temperature				IST-Comparsi on
OISST	SST	0.25°	Daily	1981-present	SIRF-calculati on
NSIDC CDR	SIC	25 km	Daily	1978-present	sea ice mask SIRF calculation
Radiative Kernels	All Sky Radiative Kernel	-	Monthly	-	SIRF calculation (5 GCMs)
Geometry data	Local solar noon angle, Latitude, Longitude	0.25°	Daily	1988-2023	Gap-filling Input
IMB Buoy	IST	Point data	Hourly	2002-2016	IST Validation

제 2 절 연구방법

본 연구는 북극 영역($60^{\circ}\text{N} - 90^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ} - 360^{\circ}\text{E}$)을 대상으로 1988년 1월부터 2023년 12월까지 36년간의 자료를 분석하였다. NSIDC 프로토콜에 따라 해빙 농도(SIC) ≥ 0.15 인 격자만을 분석에 포함하였으며, 모든 데이터셋은 25 km 공간 해상도로 재투영하여 통일하였다. 위성 관측 자료로는 해빙표면온도(IST) 산출의 기준 자료인 MODIS Terra MOD29E1D (4 km 해상도, 2002년현재)와 지표 알베도 및 외향 장파 복사 산출을 위한 CLARA-A3 (0.25° 해상도, 1982년현재)를 활용하였다. 재분석 자료로는 2m 기온(T2m), 전체 기둥 수증기량(TCWV), 평균 해면 기압(MSLP), 지표 하향 단파 복사 등 대기 변수를 제공하는 ERA5 (0.25° 해상도), 해수면 온도(SST) 자료인 OISST (0.25° 해상도, 1988 - 2023), 그리고 일별 해빙 농도 자료인 NSIDC CDR (25 km 해상도, 1978년~현재)을 사용하였다. 복사강제력 산출을 위해서는 5개 CMIP급 전지구 기후 모델(CAM5, HadGEM2, HadGEM3, GFDL, ECHAM6)의 전천 조건 지표 알베도 및 온도 커널을 활용하여 개별 모델 불확실성을 최소화하였으며, AutoML IST 검증을 위해 CRREL Ice Mass Balance(IMB) 부이 현장 자료(2004 - 2015)를 사용하였다. MODIS IST의 구름 조건 하 결측치를 보완하기 위해 TPOT(Tree-based Pipeline Optimization Tool) 기반 자동 기계학습을 적용하였으며, 입력 변수로는 2m 기온, 평균 해면 기압, 전체 기둥 수증기량, 지표 하향 단파 복사, 외향 장파 복사, 위도, 경도, 태양 정오각을 사용하였다. 모델링은 6:2:2 훈련-검증-테스트 비율로 분할하였으며, 5겹 교차검증을 통해 과적합을 방지하였고, TPOT는 유전 프로그래밍을 통해 최적의 알고리즘과 하이퍼파라미터를 자동으로 탐색하여 최종적으로 K-최근접이웃(KNN) 알고리즘을 선정하였다.

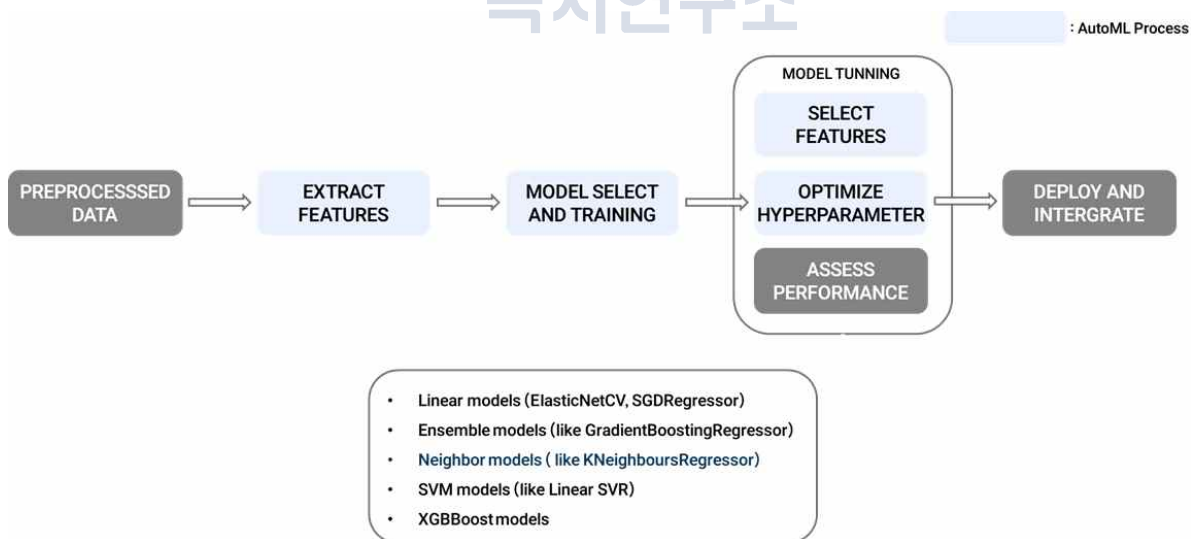


그림 7. Automated Machine Learning 스키마

공간적 일반화 성능 평가를 위해 Beaufort Sea 지역을 훈련 단계에서 의도적으로 제외하고 독립 검증을 수행하였다.



그림 8. 결측 보완 성능을
평가하기 위해 의도적으로
학습에서 제외한 Beaufort sea.

해빙 복사강제력(SIRF)은 해빙으로 덮인 지역과 개방 해역 간 지표 특성(알베도 및 온도) 차이로 인한 대기 상단(TOA) 에너지 수지 섭동을 정량화하는 것으로, 시간(t)과 북극 해빙 영역(R)에 대한 SIRF는 $SIRF(t, R) = (1/A(R)) \int_R S(t, r) \times (\partial \alpha / \partial S) \times (\partial F / \partial \alpha) dA(r)$ 식으로 계산되었으며, 여기서 $\partial \alpha / \partial S$ 는 해빙 변화에 따른 지표 특성 변화를 나타내고 해빙 조건과 개방 해역 조건의 차이로 단순화하였다. 개방 해역 알베도는 0.0676으로 설정하였고, 해수면 온도는 OISST 자료를 사용하였으며, 복사 커널($\partial F / \partial \alpha$)은 5개 GCM의 앙상블 평균을 적용하여 모델 의존성을 완화하였다. 북극 대기 순환과 복사강제력 간 관계를 정량화하기 위해 경험적 직교함수(EOF) 분석을 수행하였으며, 2005년 체제 전환(regime shift)을 기준으로 1988 - 2004년과 2005 - 2023년 두 기간을 분리하여 가을(SON)과 겨울(DJF) 해면 기압(SLP) 장에 대해 EOF 분석을 적용하여 주요 대기 순환 모드를 추출하였다. 추출된 EOF 주성분(PC)과 AutoML-SIRF 이상 간의 관계는 다중회귀분석으로 정량화하였으며, 표준화된 회귀계수(β^*)는 다른 모드를 고정했을 때 PC의 1 표준편차 변화에 따른 복사강제력 변화($W m^{-2}$)를 나타낸다. 장기 경향 분석에는 선형 회귀를 사용하였으며 95% 신뢰구간을 제시하였고, 체제 전환 시점은 Pettitt 검정으로 식별하였으며, 계절별 이상값은 1988 - 2023 기후평균 대비 편차로 계산하였고, 모든 통계적 유의성은 $p < 0.05$ 수준에서 검정하였다.

1 목표 달성을 위한 연구 수행 방법

각 세부목표를 달성하기 위한 연구 수행 방법은 아래의 표와 같으며, 목표별 접근방법 및 구체적으로 적용된 사례를 정리하였다(표 3.2.1).

표 5. 연구 수행 방법

성과목표	세부목표	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
위성/ 재분석자료를 활용한 북극 복사강제력 산출	북극 지역의 복사강제력의 산출 기준 제시	지표 관련 복사강제력 산출 연구 동향 파악	- 지표 관련하여 다양한 복사강제력 산출기법 존재 (SSRF, CRF, CrRF 등) - 해빙의 영향에 따른 복사강제력 산출 기법 제시 - 장파 영역에 대한 복사강제력 산출 기법 제시
	북극 복사강제력 산출을 위한 자료 수집 및 전처리	위성/재분석자료/radiative kernel 자료	위성기반 - SIC, SST, Surface Albedo 재분석자료 - IST Radiative kernel - CAM5 (Pendergrass et al. (2018)) - HadGEM2 Smith et al.(2018) - HadGEM3 Smith et al.(2020)
		Re-mapping (Nearest Neighbor 방법)	geographic projection인 자료를 nearest neighbor 방법을 사용하여 EASE-2 grid 변환
	북극 지역의 복사강제력 산출	단파 영역 복사강제력 산출	- surface albedo kernel 및 Albedo 적용하여 해빙에 따른 지표의 복사강제력 산출 - 연평균 및 월평균 복사강제력 시공간적 비교 분석
		장파 영역 복사강제력 산출	- surface temperature kernel 및 SST, IST 적용하여 해빙에 따른 지표의 복사강제력 산출 - 연평균 및 월평균 복사강제력 시공간적 비교 분석
관측자료를 바탕으로 Radiative Kernel 평가	Radiative Kernel 추가 확보 및 특성 비교	자료 확보 및 차이 분석	- 총 5개의 기후모델의 Radiative Kernel 자료 확보 (CAM5, ECHAM6, HadGEM2, HadGEM3,

			GFLD) - Kernel(Albedo & Tempearture)에 따른 모델 별 특징 비교 : 공간 및 월에 따른 특징 분석
	관측자료와 Raditive Kernel 자료 평가	경향 및 상관관계 분석	- Kernel을 이용하여 표면변화에 따른 TOA Flux의 변화량 산출 - CERES TOA radation 자료 확보 - 두 자료간 상관관계 분석 : 정량적인 값의 차이는 어느정도 발생하나 기후모델에 따른 경향의 차이는 존재하지 않음
북극 지역의 해빙에 따른 복사강제력 시공간 특성 분석	Albedo, Surface Temperature 기반 복사강제력 통합 및 분석	복사강제력 산출 및 시계열 및 공간적분포 분석	- 연평균(1982 ~ 2015) 복사강제력 (SIRF, Cryosphere Radiative Forcing) 산출 및 시계열 분석 - 연평균(1982 ~ 2015) 복사강제력 (SIRF, Cryosphere Radiative Forcing) 변화량 공간적 분포 파악
	계절에 따른 주도적(Albedo, Surface Temperature) 요인 분석	시계열 및 공간적분포 분석	- 월별 복사강제력 시계열 분포(Net SIRF) 비교 - 기후모델에 따른 월별 복사강제력 변화량(Net SIRF) 산출 - 월별 복사강제력 변화량 공간적 분포 분석 - 기후모델에 따른 계절적 평균 복사강제력 산출
	지역에 따른 복사강제력 특성 파악	시계열 및 공간적분포 분석	- 해역에 따른 복사강제력 연간 변화량 분석 - 해역에 따른 계절별 평균 변화량 분석
DNN기반 해빙표면온도 산출	IST 산출을 위한 입력자료 선정	문헌 조사 및 자료 확보	- Total Column Water Vapor (TCWV), ERA5 - 2m air temperature (Ta), ERA5 - Sea Ice Concentration (SIC), OISST_v2 - Solar Zentih Angle (SZA) - Ta Climatology - Latitude - Ice Surface Temperature

			(IST), MODIS
	DNN기반 모델 구축	딥러닝 모델 구현	- Keras 2.8.0 (Colab) 활용 : Loss function MAE : optimizer - Adam : Earlystopping 적용 : Keras MinMaxScaler를 사용하여 입력자료 정규화 : Hyperparameter 선정 - scikit-learn의 GridSearchCv library 활용
	타 위성 / In-situ 자료를 활용한 모델 평가	경향 및 분포특성 분석	- MODIS IST (MOD29E1D) 자료와 IMB Buoy 자료를 활용하여 검증 및 분포 특성 비교
DNN기반 IST를 활용한 복사강제력 산출 및 평가	DNN기반 IST를 바탕으로 복사강제력 산출	복사강제력 산출	- 기존 ERA5 Skin Temperature 대신 본 연구에서 개발한 DNN기반 IST를 적용하여 Temperature-SIRF 계산
	표면온도(ERA5, DNN기반 IST) 자료에 따른 복사강제력 차이 분석	시계열 및 공간적 분포 분석	- 표면온도 자료에 따른 연평균, 월별 SIRF 변화량 시계열 분석 - 계절별 SIRF 분포특성 분석
위성/ 재분석자료를 활용한 북극 해빙표면 온도 산출	북극 해빙표면온도 산출을 위한 기상인자 수집	북극 해빙의 범위, 이동에 관한 연구 및 IST 산출 연구 동향 파악	Radaiton, air Temperature 와 같은 열과 관련된 인자, pressure, wind, water vapor 와 같은 열 교환에 관련된 변수 수집
	북극 해빙표면온도 산출을 위한 자료 수집 및 전처리	위성/재분석자료	위성기반 - IST, SIC, SIA, Radiation, Cloud 재분석자료 - Era5(Ta, wind, TCWV, MSL)
		Re-mapping (Nearest Neighbor 방법)	geographic projection인 자료를 nearest neighbor 방법을 사용하여 EASE-2 grid 변환
	AI기반 해빙표면온도 산출	AI 모델 선정 - AutoML	AutoML - 자체적으로 최 적의 알고리즘 탐색 및 하이 퍼파라미터 튜닝
		AI 기반 해빙표면온도산출 및 검증	MODIS IST & Buoy 검증 및 타 기관 IST와 비교

AI 기반 장기간 해빙표면온도 산출	AI기반 장기간 IST 산출 알고리즘 구축	AutoML 기반 장기간 산출 test	10년 이상의 모델을 생성했음에도 Target과 유사한 결과를 보기 위해 통계적 기법 활용
		다양한 입력자료 조합 test	Passive Microwave 자료 조합 및 해빙-대기에 관련된 변수 조합을 test
	산출 정확도 및 Validation을 통한 정확도 제시	타 기관의 IST 자료와 함께 장기간 IST의 분포 비교 및 Buoy 자료를 통한 정확도 비교 및 평가 진행	ERA5 skin temperature, Copernicus Level 4 IST, AutoML IST를 히스토그램 분석을 통해 정성적인 분포 비교 및 Buoy 자료와 일치하는 지점 매칭을 통한 통계 기반의 정량적 평가 수행
	북극 지역의 IST 시공간 특성 분석	월별 Anomaly Trend 및 계절별 해역별 정량적 정성적 분석 수행	월별 장기간 Anomaly 자료 생성 및 NSIDC에서 제공하는 Sea_mask를 사용하여 해역 구분과 계절별 평균 자료를 기반으로 분석 수행
AI기반 해빙표면온도를 활용한 복사강제력 산출 및 Feedback 평가	북극 해빙표면(온도+ 알베도) 변화에 따른 복사강제력 산출	Radiative Kernel을 활용한 장기간 Shortwave/Longwave Radiative Forcing 산출	월별 Radiative Kernel 평균(5개의 GCM)을 통한 월평균/연평균 복사강제력 산출 및 시계열/매핑 분석을 통한 1단계 연구결과 비교
	해역 및 계절에 따른 복사강제력 분석	계절 및 해역에 따른 복사강제력 특징 및 주도적인 해역과 계절 탐색	- NSIDC에서 제공하는 해역 구분에 따른 연별 변화 경향 파악 - 계절 및 해역에 따라 복사강제력의 변화경향 분석을 통해 기존 1단계 Longwave Radiative Forcing과 비교
	복사강제력과 대기온도 변화에 따른 Feedback 평가	Shorwave RF, Longwave RF, Net RF 3가지 복사강제력을 활용한 Feedback 산출 및 선행연구와 비교	선행연구를 기반으로 Albedo & Temperature 모두 고려 가능한 적절한 연구 지역을 선정하여 Surface Air Temperature의 1도 상승에 따른 표면요소 변화에 의한 복사강제력의 변화 정량화

제 3 절 북극지역의 해빙에 따른 복사강제력 시공간 특성 분석

복사 커널을 이용한 여구는 기후 요소 변화에 의한 복사강제력을 산출하는 연구에 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 북극의 해빙 변화에 따른 복사강제력을 산출하기 위하여 복사 커널을 이용하는 방법을 적용하였다. 본 연구에서 사용하는 해빙 복사강제력(Sea Ice Radiative Forcing, SIRF)는 해빙 변화가 대기 상단의 복사 수지에 즉각적으로 미치는 영향(W/m^2)을 의미한다. 본 연구에서는 두가지 타입의 복사강제력(albedo-SIRF, temperature-SIRF)을 계산하였다. grid cell r 로 구성된 영역 A 내 전체 연구영역 R 에 대해 시간(t)에 종속되는 SIRF는 다음과 같이 표현된다.

$$SIRF(t, R) = \frac{1}{A(R)} \int_R S_x(t, r) \frac{\partial \alpha}{\partial S_x} \frac{\partial F}{\partial \alpha} dA(r)$$

여기서 $S(t, r)$ 은 북반구에서의 해빙 농도를 의미하며, $\frac{\partial \alpha}{\partial S_x}(t, r)$ 는 해빙변화에 따른 $\partial \alpha$ (surface albedo 또는 skin temperature)의 변화율을 나타낸다. $\frac{\partial F}{\partial \alpha}(t, r)$ 는 surface albedo 변화에 따른 TOA 단과 복사량 또는 skin temperature 변화에 따른 longwave 복사량을 뜻한다. Flannet et al.(2011)에 의하면, $\frac{\partial \alpha}{\partial S_x}$ 와 $\frac{\partial F}{\partial \alpha}$ 의 시공간적 변화가 각각 해빙 농도 S 와 $\partial \alpha$ 에 일치한다고 가정하였다. $\frac{\partial \alpha}{\partial S_x}$ 는 해빙 변화에 따른 surface albedo(또는 skin temperature) 변화이며, 이는 간단하게 해빙 유무에 따른 surface albedo(또는 skin temperature)의 차이로 설명된다. 해빙이 존재하지 않는 개빙 환경에 대해서, surface albedo의 경우 이전 연구(Cao et al., 2015)를 참조하였으며, skin temperature는 Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) 자료를 활용하였다. OISST 자료는 해빙이 존재하는 지역에 대해서도 해빙 농도와 sea surface temperature의 선형 관계식을 통하여 sea surface temperature를 제공한다(Reynolds et al., 2007). $\frac{\partial F}{\partial \alpha}$ 는 surface albedo(또는 skin temperature) 복사 커널의 값을 적용하였다. surface albedo 복사 커널의 값이 +일 경우 에너지 flux의 방향은 위를 향하며, skin temperature 복사 커널은 그와 반대를 의미한다(Soden et al., 2008). 따라서 본 연구에서는 albedo와 temperature를 결합하여 그 영향력을 평가하고자 temperature kernel에 -을 곱하여 SIRF를 계산하였다. 변화량을 표현하기 위하여 본 연구에서는 기울기에 시간 간격을 곱하여 계산하였다. 모든 상황에서 p-value는 0.05 이하로 산출되었다.

추가로 지역에 따른 SIRF의 특징을 분석하기 위하여 본 연구에서는 National Centers for Environmental Information (NCEI)에서 제공하는 북극 지도를 바탕으로 지역에 따른 SIRF를 각각 계산하였다.

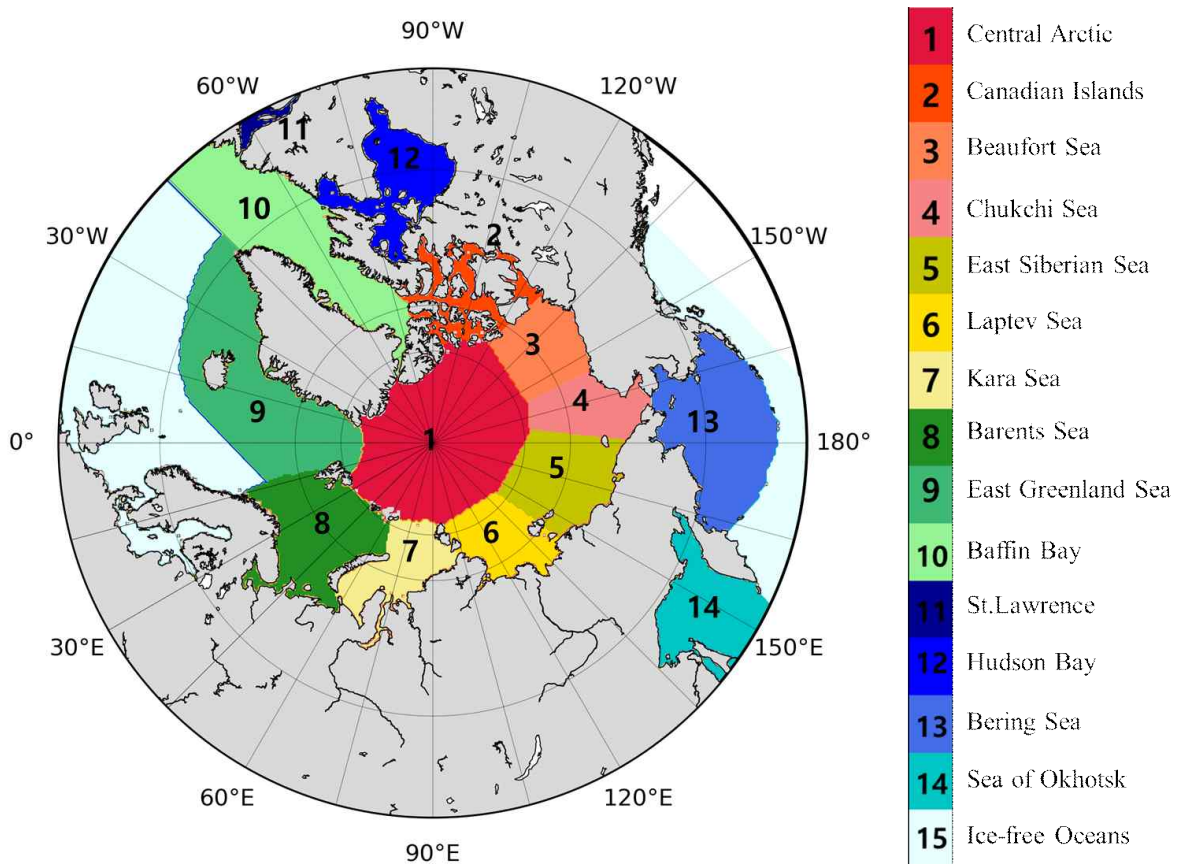


그림 9. 북극 영역의 지역명 지도

1 SIRFs의 연간 특성

본 연구에서는 복사 커널을 이용하여 albedo-SIRF, temperature-SIRF를 산출하였으며, 이 두 SIRF의 합을 net-SIRF로 표현하였다. 그림 10은 1982년부터 2015년까지 기후 모델에 따른 연평균 SIRF를 나타낸다.

기후모델에 관계없이 net-SIRF는 증가하는 경향이 나타난다. 사용하는 GCM에 따라 값의 차이는 발생하나 전체적인 경향을 모두 동일하게 산출되었다. net-SIRF는 GFDL, ECHAM6, HadGEM3, HadGEM2, CAM5 순으로 높은 값이 나타났다. 모든 기후모델의 복사커널의 평균값을 사용하였을 때, 평균 net-SIRF는 $-54.57 \pm 3.84 \text{ W/m}^2$ 로 계산되었다. 평균 net-SIRF는 기후 모델에 따라 최대 12.64 W/m^2 차이가 발생했다. 다른 기후 모델 기반의 SIRF들과 달리 GFDL의 net-SIRF는 상대적으로 큰 차이가 나타났다. albedo-SIRF와 temperature-SIRF 역시 사용하는 기후모델에 관계없이 모두 증가 경향이 나타났다. 두 SIRF들은 약 $-30 \sim -20 \text{ W/m}^2$ 로 산출되었다. 평균 albedo-SIRF는 기후모델에 따라 최대 12.94 W/m^2 의 차이가 나타났으며, CAM5 기반의 albedo-SIRF가 $-35.14 \pm 1.88 \text{ W/m}^2$ 로 가장 낮은 값이 산출되었고, GFDL 기반의 albedo-SIRF는 $-22.17 \pm 1.09 \text{ W/m}^2$ 로 가장 높은 값이 산출되었다. 평균 temperature-SIRF는 기후모델에 따라 최대 4.41 W/m^2 차이 발생했으며 HadGEM3 기반의 temperature-SIRF가 $-28.60 \pm 2.75 \text{ W/m}^2$ 으로 가장 낮은 값, CAM5 기반의 temperature-SIRF가 $-24.19 \pm 2.29 \text{ W/m}^2$ 로 가장 높은 값이 계산되었다. temperature-SIRF는 연간 $0.22 \pm 0.14 \text{ W/m}^2$ 씩 변화하고 있는데 이는 albedo-SIRF의 연간 변화량($0.12 \pm 0.12 \text{ W/m}^2$)에 거의 2배에 해당되는 수치이다.

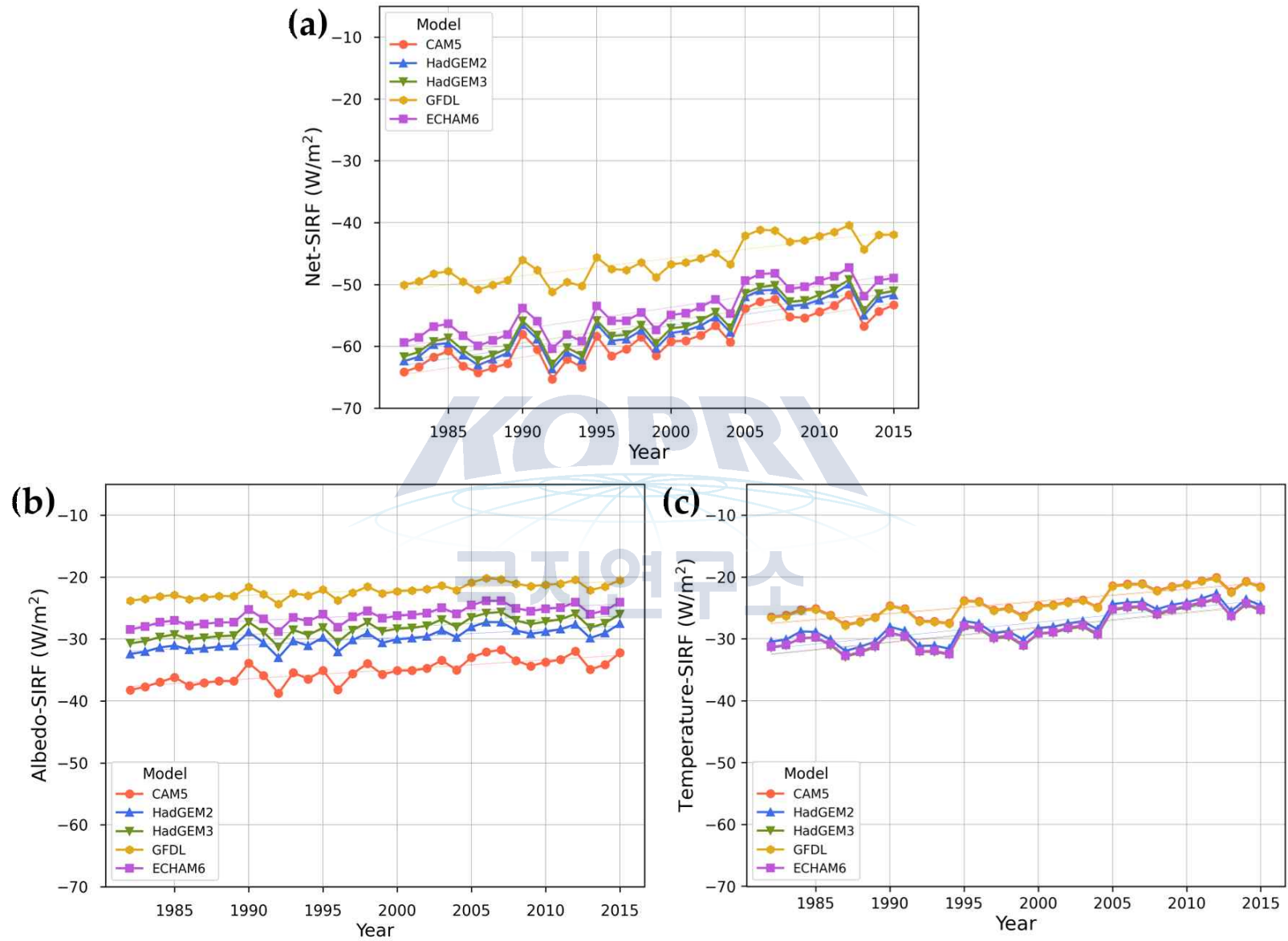


그림 10. 북극에서의 1982년부터 2015년까지 기후 모델에 따른 연평균 SIRF 들의 시계열 분포, (a) net-SIRF, (b) albedo-SIRF, (c) temperature-SIRF.

사용하는 GCM에 관계없이 SIRF들은 전반적으로 변화 경향이 모두 유사하게 나타났기 때문에 본 연구에서는 지역에 따른 SIRF들의 변화를 분석하기 위하여 각 요소별로 GCM 기반의 복사커널을 평균하여 SIRF를 산출 및 평가하였다. 그림 17은 각 요소에 따른 SIRF의 연간 변화량의 공간적 분포를 나타낸다. 해역에 따른 변화 경향은 모든 SIRF에서 유사하게 나타났다. 그림 10에서 나타난 것과 마찬가지로 temperature-SIRF가 albedo-SIRF에 비해 상대적으로 급격한 변화 경향이 나타나고 있다. Kara 해역에서 net-SIRF $0.62 \pm 0.25 \text{ W/m}^2$, albedo-SIRF $0.24 \pm 0.14 \text{ W/m}^2$, temperature-SIRF $0.38 \pm 0.11 \text{ W/m}^2$ 로 계산되었다(표 6). 이 지역은 모든 해역 중에서 가장 급격한 증가 경향의 net-SIRF 변화가 발생하는 곳이다. Temperature-SIRF 또한 이 해역에서 가장 높은 영향력을 끼치고 있다. 선행 연구(Kumar et al., 2020; Parkinson et al., 2008; Smedsrud et al., 2013; Boisvert et al., 2016)에서도 북극의 다른 지역에 비해 Barents와 Kara 해역에서 급격한 변화가 발생한다고 하였다. Kumar et al.(2020)의 연구에서는 이 지역에서 급격한 변화가 발생하는 것에 대해 해양에서 대기로 향상된 열 전달로 인해 발생하는 outgoing longwave radiation (OLR)의 증가 때문이라서 설명하였다. Baffin, Chukchi, Beaufort, Laptev 해역에서도 북극 평균 net-SIRF의 변화량 보다 급격하게 변화가 발생하고 있다. 이러한 결과는 albedo-SIRF 기반의 선행 연구에서도 동일하게 나타났다.

표 6. 지역에 따른 SIRF 들의 연간 변화량(W/m²)

	Net	Albedo	Temperature
Arctic Ocean(All)	0.34 ± 0.24	0.12 ± 0.12	0.22 ± 0.14
Baffin	0.41 ± 0.17	0.14 ± 0.10	0.27 ± 0.12
Barents	0.58 ± 0.36	0.24 ± 0.17	0.35 ± 0.21
Kara	0.62 ± 0.25	0.24 ± 0.14	0.38 ± 0.11
Laptev	0.50 ± 0.10	0.18 ± 0.08	0.31 ± 0.04
Beaufort	0.42 ± 0.12	0.19 ± 0.09	0.24 ± 0.05
Chukchi	0.49 ± 0.14	0.21 ± 0.07	0.28 ± 0.07

북극 지역의 대부분에서 SIF 값들은 모두 증가 경향이 나타나는 반면에, Baring 해역과 East Greenland 해역의 일부 지역에서는 감소 경향이 나타나고 있다. 이것은 해빙이 존재하는 Baring 및 East Greenland 지역의 surface albedo 및 skin temperature의 값이 해빙이 존재하지 않는 개빙 환경의 값과 크게 차이가 나지 않기 때문이다. 본 연구에서는 해빙 농도의 값이 존재하는 모든 지역에 대하여 SIF를 계산 하였다. 하지만 NSIDC에서는 해빙 농도가 15% 이상인 지역에 대해서만 해빙 지역 지역이라 표현한다. 이 지역은 다른지역에 비해 1년 내내 해빙이 존재하는 다년빙이 아닌, 계절에 따라 생성과 소멸이 반복되는 계절성 해빙이 주로 구성되어 있는 지역이다. 계절성 해빙은 다년빙에 비해 surface albedo의 값이 일관적으로 낮다(). 뿐만 아니라 계절성 해빙과 다년빙은 skin temperature와 아주 밀접한 관계가 있는 방출율, microwave backscattering에서도 큰 차이가 나타난다. 이러한 특징 때문에 북극의 다른 지역과 달리 Baring 해역과 East Greenland 해역에서는 다른 변화 경향이 산출되고 있다.



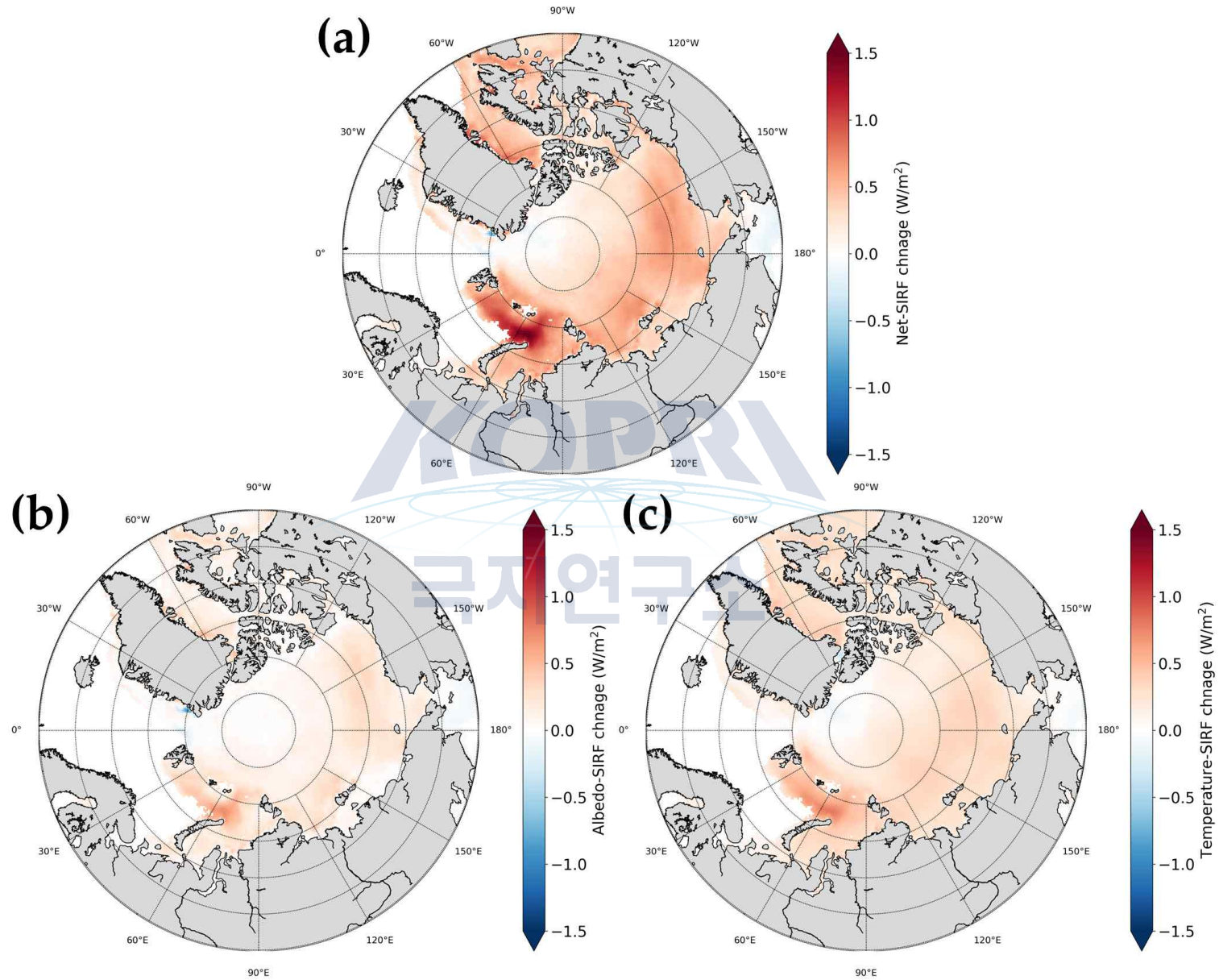


그림 11. 기후 모델들의 평균값을 이용한 연간 SIRC 변화량의 공간적 분포, (a) net-SIRC, (b) albedo-SIRC, (c) temperature-SIRC.

2 SIRFs의 계절에 따른 특성

북극의 경우 극야 현상으로 인하여 선행 연구(29,34-37)에서는 3월부터 9월까지만 surface albedo 기반의 복사강제력을 산출하였으며, 다른 월의 경우 surface albedo radiative kernel은 모두 0이 계산된다. 하지만 일부 연구(39-41)에서는 북극 증폭이 알베도가 관측되지 않는 겨울철에 더욱 증폭된다는 결과를 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 계절에 따른 SIRF 경향을 분석하고, 이를 위하여 계절별 SIRF 산출에 사용되는 모든 변수는 계절 평균값을 적용하였다.

연구기간 동안 각 기후 모델에 따른 계절별 평균 SIRF는 그림 12과 같다. December-January-February (DJF) 기간에는 평균 net-SIRF가 -12.57 W/m^2 이 계산되었으며 각 기후모델에 따라 0.83 W/m^2 정도 차이가 발생하였다. 이러한 차이가 발생하는 것은 모두 temperature-SIRF의 영향 때문이다. 이 시기에는 대부분의 북극 영역에서 surface albedo가 관측되지 않기 때문에 albedo-SIRF의 영향력은 거의 존재하지 않는다. HadGEM3 기반의 net-SIRF가 가장 큰 영향력을 가지고 있으며 그 값은 평균 $-13.37 \pm 10.65 \text{ W/m}^2$ 이며, CAM5 기반의 net-SIRF가 가장 작은 영향을 끼쳤으며 그 값은 평균 $-11.68 \pm 9.26 \text{ W/m}^2$ 으로 산출되었다.

March-April-May (MAM) 기간에는 평균 net-SIRF가 -24.34 W/m^2 로 계산되었으며, 기후모델에 따라 평균 1.92 W/m^2 차이가 발생한다. 전체 계절중에 MAM 기간은 가장 낮은 평균 net-SIRF가 산출되었다. 이 시기는 albedo가 관측되기 시작하는 시기이다. 전체 기후모델에 대해, 평균 albedo-SIRF ($-16.09 \pm 1.92 \text{ W/m}^2$)가 temperature-SIRF ($-8.27 \pm 0.83 \text{ W/m}^2$)보다 낮게 계산되었다. CAM5 기반의 net-SIRF ($-25.83 \pm 19.64 \text{ W/m}^2$)와 HadGEM2 기반의 net-SIRF ($-26.00 \pm 19.64 \text{ W/m}^2$)가 유사하게 산출되었으며, GFDL 기반의 net-SIRF ($-21.27 \pm 16.48 \text{ W/m}^2$)가 가장 높은 값이 나타났다. CAM5의 경우, albedo-SIRF는 $-18.54 \pm 14.28 \text{ W/m}^2$ 로 전체 기후모델 중 가장 낮은 값이 계산되었으나, temperature-SIRF는 $-7.32 \pm 5.80 \text{ W/m}^2$ 로 가장 높은 값이 나타났다.

June-July-August (JJA) 기간에는 평균 net-SIRF가 -10.86 W/m^2 로 계산되었으며, 기후모델에 따라 평균 3.09 W/m^2 차이가 발생한다. 이 시기에는 기후 모델에 따라 net-SIRF의 차이가 가장 크게 발생하는 계절이다. 이는 albedo-SIRF (평균 $-11.53 \pm 3.07 \text{ W/m}^2$)에 의한 영향이다. CAM5 기반의 albedo-SIRF가 $-16.04 \pm 15.62 \text{ W/m}^2$ 로 가장 낮은 값이 나타났으며, GFDL 기반 albedo-SIRF가 $-7.47 \pm 7.41 \text{ W/m}^2$ 로 가장 높은 값이 산출되었다. 두 SIRF들의 차이는 8.57 W/m^2 로써 본 연구에서 계산된 기후모델의 차이 중 가장 큰 값이다. temperature-SIRF는 평균 $0.67 \pm 0.10 \text{ W/m}^2$ 로 albedo-SIRF에 비해 매우 작은 영향력이 나타났다. 모든 temperature-SIRF는 본 연구에서 사용한 자료의 특성으로 인하여 이 시기에 양의 값이 산출되었다. 이 시기에 해빙은 급격하게 녹는다. 본 연구에서 활용한 ERA5 skin temperature는 얼음이 녹는 시기에 해빙위에 존재하는 물을 표현하기 위하여 그 값을 0도에 가깝게 계산한다. 이것은 해빙이 존재함에도 불구하고, 해빙이 존재하지 않는 개빙 환경에서의 skin temperature가 더 낮게 산출되는 현상을 야기한다. 따라서 이 시기에 모든 temperature-SIRF는 양의 값이 나타난다.

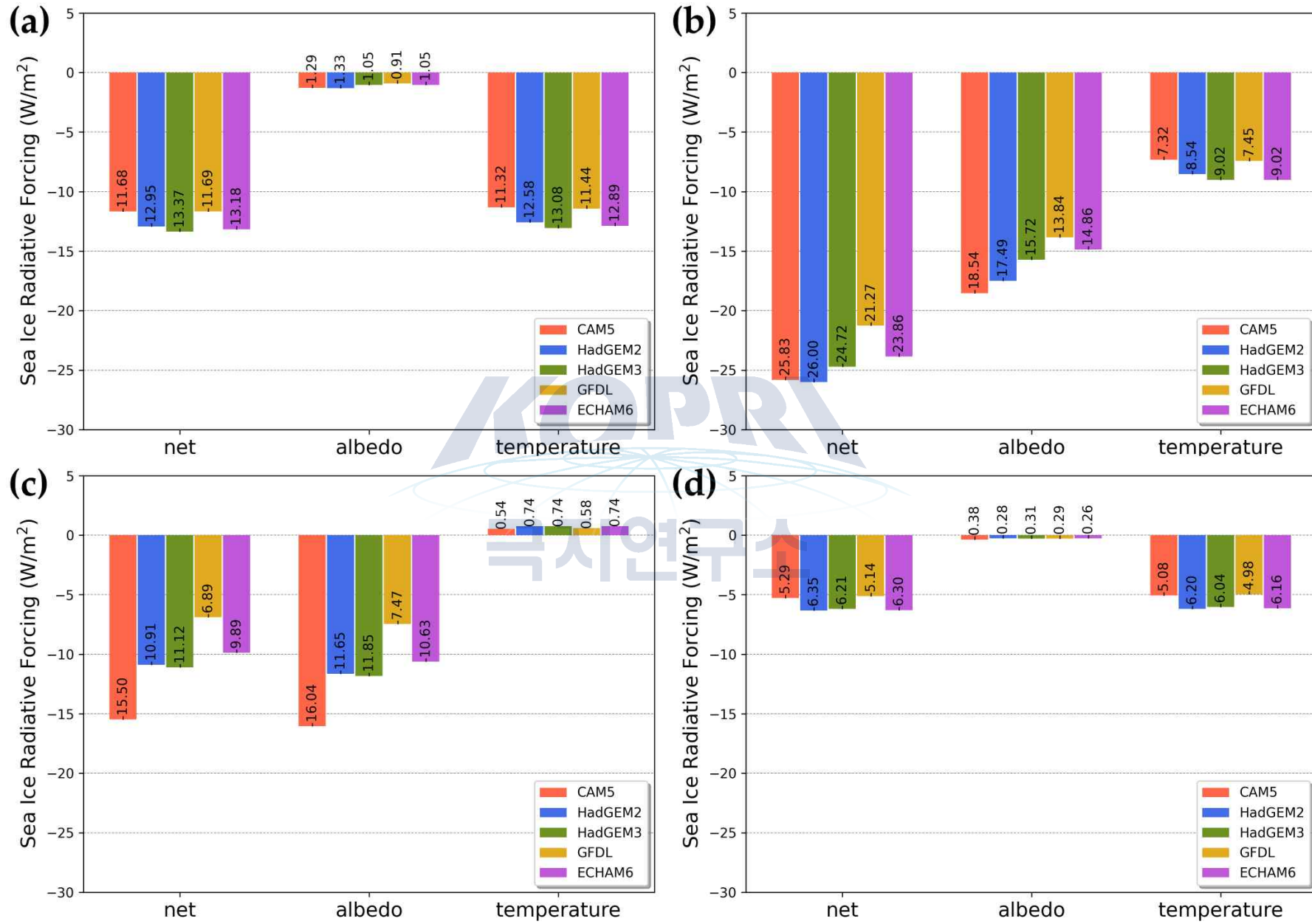


그림 12. 기후모델에 따른 평균 계절별 SIRF. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON

September-October-November (SON) 기간에는 평균 net-SIRF가 -5.86 W/m^2 로 계산되었으며, 기후모델에 따라 평균 0.59 W/m^2 차이가 발생한다. 이 시기는 net-SIRF가 가장 높게 산출되는 계절이다. SON 기간에는 surface albedo가 관측되지 않기 때문에 평균 albedo-SIRF가 평균 $-0.30 \pm 0.05 \text{ W/m}^2$ 으로 그 영향력이 매우 낮다. GFDL 기반의 net-SIRF가 $-5.14 \pm 4.72 \text{ W/m}^2$ 으로 가장 높은 값, HadGEM2 기반 net-SIRF가 $-6.35 \pm 5.79 \text{ W/m}^2$ 으로 가장 낮은 값이 산출되었다. 다른 계절과 비교하여 SON 기간은 기후모델에 따른 SIRF들의 차이가 가장 작게 발생한 기간이다.

SIRF는 계절에 따른 차이에 비해 기후모델에 따른 차이는 상대적으로 작게 발생하였다. 각 SIRF들의 계절에 따른 패턴은 모든 기후모델에서 동일하게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 각 요인별 SIRF를 산출할 때 기후모델의 커널을 평균하여 계절별 SIRF를 계산하였으며 공간적 분포는 그림 13와 같다. MAM 및 JJA 기간에는 net-SIRF와 albedo-SIRF에서 북극 중앙 해역에 원형 패턴으로 다른 지역과 구분되는 현상이 발생하였다. 이는 이 시기에 일부 기간동안 albedo-SIRF가 관측되지 않기 때문이다. 그리고 albedo-SIRF는 DJF와 SON 기간 동안 surface-albedo가 전혀 관측되지 않기 때문에 albedo-SIRF를 0으로 계산하였다. 그림 19(c)와 같이 temperature-SIRF는 JJA 기간동안 모든 지역에서 양의 값이 산출되었다. 이는 앞서 설명한 것과 마찬가지로 ERA5 skin temperature의 특성 때문이다. 이러한 현상을 제외하고 전체 연구 기간동안 계절에 따른 SIRF는 지역적 특징이 나타나지 않았다.

표 7은 앞서 분석한 해역과 동일한 지역을 대상으로 해역별 계절에 따른 SIRF 변화량을 나타낸 것이다. 선정된 해역들의 연간 SIRF 변화량은 북극 전체 평균보다 높게 나타났다. 그림 19와 같이 계절 평균 SIRF에서는 지역적 특징이 거의 나타나지 않았으나, SIRF의 계절에 따른 변화량은 지역에 따라 다른 양상을 띠었다. 먼저 본 연구에서는 DJF 기간과 SON 기간에 albedo-SIRF에 대하여 계절에 따른 변화량을 산출하지 않았다. 이는 이 시기에 대부분의 해역에서 albedo-SIRF가 산출되지 않기 때문이다. 그러므로 해당 시기에 net-SIRF와 albedo-SIRF는 동일한 값을 가진다. DJF 기간동안 net-SIRF는 $0.34 \pm 0.28 \text{ W/m}^2$ 의 변화량이 산출되었다. Barents 해역에서 temperature-SIRF가 $0.78 \pm 0.42 \text{ W/m}^2$ 로 가장 높은 값이 나타났으며 Beaufort 지역이 $0.24 \pm 0.07 \text{ W/m}^2$ 으로 북극 전역에서 가장 낮은 변화량이 계산되었다.

MAM 기간에는 net-SIRF가 $0.41 \pm 0.39 \text{ W/m}^2$, albedo-SIRF $0.16 \pm 0.26 \text{ W/m}^2$, temperature-SIRF가 $0.25 \pm 0.19 \text{ W/m}^2$ 으로 계산되었다. 전체 net-SIRF 변화량 계산에 있어서 temperature-SIRF는 albedo-SIRF보다 높은 기여를 했다. 하지만 이러한 경향은 지역에 따라 다르게 나타났다. albedo-SIRF는 Baffin 지역(net-SIRF $0.61 \pm 0.37 \text{ W/m}^2$, albedo-SIRF $0.32 \pm 0.29 \text{ W/m}^2$, temperature-SIRF $0.30 \pm 0.14 \text{ W/m}^2$)과 Barents 지역(net-SIRF $0.96 \pm 0.66 \text{ W/m}^2$, albedo-SIRF $0.59 \pm 0.41 \text{ W/m}^2$, temperature-SIRF $0.38 \pm 0.27 \text{ W/m}^2$)에서 다른해역에 비해 급격하게 변화하고 있었다. Barents 지역의 net-SIRF 변화량은 모든 연구기간 및 지역을 통틀어 가장 급격하게 변화하는 지역이다. 반대로 Beaufort 지역은 net-SIRF $0.33 \pm 0.13 \text{ W/m}^2$ 으로 가장 낮은 값이 산출되었으며, 이 시기에 albedo-SIRF 변화량도($0.11 \pm 0.12 \text{ W/m}^2$) 가장 작았다. 전체적으로 지역에 따른 평균 albedo-SIRF (0.16 W/m^2)의 차이는 temperature-SIRF (0.08 W/m^2)의 차이보다 크게 나타났다.

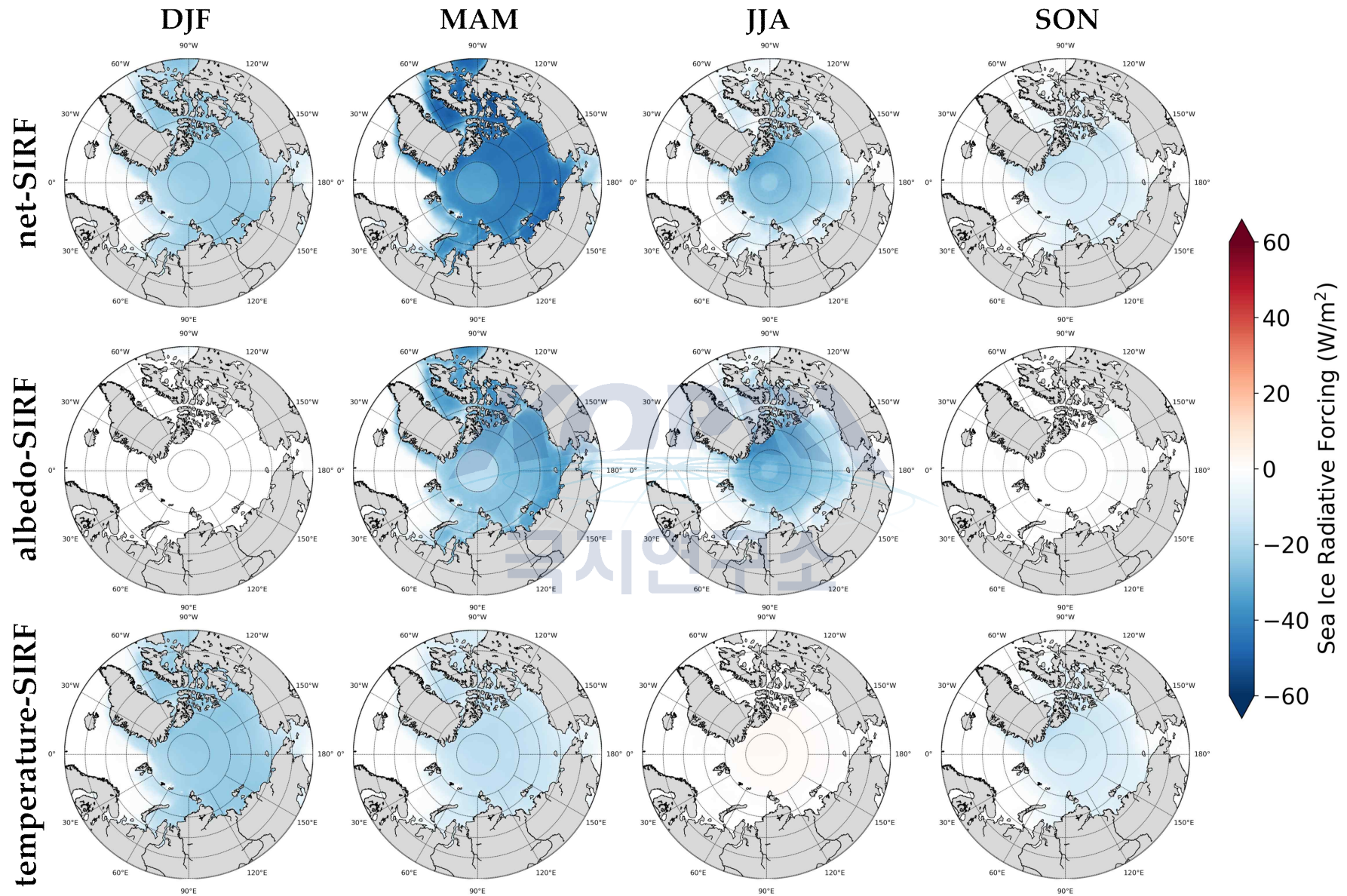


그림 13. 각 기후모델의 평균 커널값을 활용한 계절별 평균 SIRFs 공간적 분포, 가로축 : 계절, 세로축 : 각 요소별 SIRF

표 7. 지역별 계절 SIRF의 변화량

Period		Arctic Ocean (All)	Baffin	Barents	Kara	Laptev	Beaufort	Chukchi
DJF *	Net	0.34 ± 0.28	0.62 ± 0.28	0.78 ± 0.42	0.60 ± 0.29	0.28 ± 0.06	0.24 ± 0.07	0.27 ± 0.06
	Albedo	-	-	-	-	-	-	-
	Temperature	0.34 ± 0.28	0.62 ± 0.28	0.78 ± 0.42	0.60 ± 0.29	0.28 ± 0.06	0.24 ± 0.07	0.27 ± 0.06
MAM *	Net	0.41 ± 0.39	0.61 ± 0.37	0.96 ± 0.66	0.78 ± 0.36	0.61 ± 0.15	0.33 ± 0.13	0.48 ± 0.12
	Albedo	0.16 ± 0.26	0.32 ± 0.29	0.59 ± 0.41	0.34 ± 0.26	0.20 ± 0.17	0.11 ± 0.12	0.17 ± 0.13
	Temperature	0.25 ± 0.19	0.30 ± 0.14	0.38 ± 0.27	0.45 ± 0.06	0.41 ± 0.04	0.23 ± 0.06	0.30 ± 0.06
JJA *	Net	0.35 ± 0.28	0.41 ± 0.27	0.48 ± 0.36	0.63 ± 0.34	0.51 ± 0.23	0.51 ± 0.22	0.56 ± 0.20
	Albedo	0.35 ± 0.31	0.41 ± 0.28	0.49 ± 0.39	0.63 ± 0.40	0.51 ± 0.26	0.55 ± 0.24	0.60 ± 0.23
	Temperature	0.00 ± 0.05	0.00 ± 0.02	0.00 ± 0.04	-0.01 ± 0.07	0.00 ± 0.04	-0.04 ± 0.03	-0.04 ± 0.03
SON *	Net	0.41 ± 0.22	0.32 ± 0.11	0.38 ± 0.24	0.51 ± 0.21	0.56 ± 0.1	0.51 ± 0.16	0.73 ± 0.22
	Albedo	-	-	-	-	-	-	-
	Temperature	0.41 ± 0.22	0.32 ± 0.11	0.38 ± 0.24	0.51 ± 0.21	0.56 ± 0.1	0.51 ± 0.16	0.73 ± 0.22

* DJF: December–January–February; MAM: March–April–May; JJA: June–July–August; SON: September–October–November.

JJA 기간에는 net-SIRF $0.35 \pm 0.28 \text{ W/m}^2$, albedo-SIRF $0.35 \pm 0.31 \text{ W/m}^2$, temperature-SIRF $0.00 \pm 0.05 \text{ W/m}^2$ 로 변화량이 산출되었다. ERA5 skin temperature의 특징 때문에 temperature-SIRF는 그림 15와 같이 변화량이 거의 나타나지 않았다. 다른 계절과는 달리 이 시기에는 선정된 개별 지역들이 북극 전체 평균에 비해 net-SIRF의 변화량이 크게 나타났다. Kara 지역에서 net-SIRF의 변화량이 $0.63 \pm 0.34 \text{ W/m}^2$ 로 가장 크게 나타났으며, Baffin 지역에는 상대적으로 $0.41 \pm 0.27 \text{ W/m}^2$ 로 적은 변화량이 관찰되었다.

SON 기간에는 net-SIRF가 북극 평균 $0.41 \pm 0.22 \text{ W/m}^2$ 로 계산되었다. 연간 net-SIRF의 가장 큰 변화는 Barents 지역에서 나타났으며, 다른 계절에는 이 지역이 북극의 다른 지역보다 항상 더 큰 net-SIRF 변화를 보였다. 그러나 SON 기간에는 net-SIRF의 변화량이 $0.38 \pm 0.24 \text{ W/m}^2$ 로 북극 평균에 비해 낮은 변화량이 나타났다. 이는 전체 연구 기간 중 2번째로 낮은 변화량이다. 가장 높은 변화량은 Chukchi 해역으로 net-SIRF의 변화량이 $0.73 \pm 0.22 \text{ W/m}^2$ 으로 계산되었다.



3 SIRFs의 월별 따른 특성

본 연구에서는 그림 14과 같이 전체 연구기간에 대해 5개의 복사 커널의 평균값을 이용하여 월별 net-SIRF를 산출하였다. 월에 따라 변화하는 경향을 다르게 나타났으나 전반적으로 모두 증가 추세를 보였다. 4~6월은 해빙이 급속도로 녹기 시작하는 시기로 이 시기에는 albedo-SIRF가 net-SIRF에 큰 영향을 미쳤다. 대조적으로 가장 높은 net-SIRF는 9월로 계산되었다. 본 연구에서는 해빙이 존재하는 지역에 한하여 SIRF를 산출하였는데 이 시기는 북극에서 해빙의 범위가 가장 작은 시기이다. ERA5 skin temperature의 특성 때문에 이 기간에는 temperature-SIRF는 거의 산출되지 않았다.

그림 15은 34년 동안의 북극 전역을 대상으로 산출된 net-SIRF의 월별 변화량을 나타낸다. 이 때 복사커널은 5개 기후모델의 평균값을 사용하여 선형 변화량을 산출하였다. 모든 결과는 0.05 이하의 유의성을 만족하였다. 본 연구의 albedo-SIRF의 월별 변화량은 선행 연구와 비슷하게 산출되었다. 그러나 net-SIRF와 albedo-SIRF를 함께 비교할 때, 본 연구의 결과는 선행 연구와 차이가 발생하였다. 선행 연구에는 SIRF의 가장 큰 변화가 5~6월에 발생한 반면, 본 연구에는 5~6월 뿐만 아니라 10~11월에도 큰 변화가 발생하였다. 5월의 net-SIRF는 albedo-SIRF($0.37 \pm 0.07 \text{ W/m}^2$)과 temperature-SIRF($0.13 \pm 0.05 \text{ W/m}^2$) 두 SIRF의 영향을 모두 받았다. 6월은 대부분 albedo-SIRF의 변화량에 기인한다. 10월과 11월은 temperature-SIRF(각각 $0.50 \pm 0.08 \text{ W/m}^2$, $0.51 \pm 0.10 \text{ W/m}^2$)의 영향으로 5~6월의 net-SIRF 변화량과 유사한 분포를 나타낸다. 가장 변화가 적은 기간은 9월이다. 표 10과 같이 6월부터 8월까지 temperature-SIRF의 변화는 거의 나타나지 않는다 ($0.37 \pm 0.07 \text{ W/m}^2$, p-value ≥ 0.3). 이러한 특성으로 인하여 temperature-SIRF의 값의 분포가($0.03 \sim 0.51 \text{ W/m}^2$) albedo-SIRF 값의 분포 ($0.05 \sim 0.49 \text{ W/m}^2$)보다 넓게 나타났다.

그림 16는 5개 기후모델의 평균 복사커널 값을 바탕으로 산출된 net-SIRF의 월별 변화량에 대한 공간적 분포를 나타낸다. albedo-SIRF의 변화가 크게 나타나는 6~8월의 경우 다른 월에 비해 지역에 따른 차이가 크게 발생하였다. 이 기간동안 net-SIRF의 변화량은 Barents, Laptev, Kara 지역 뿐만 아니라 Baffin Bay의 일부 지역에서 1.5 W/m^2 이상으로 계산되었다. 반대로 4월의 East Greenland와 Arctic Central 해역의 일부 지역에서는 net-SIRF가 감소하는 경향이 나타났다. 8월 Arctic Central 해역에서도 감소 경향이 관찰되었다.

그림 15에서 보인 것과 같이 10월과 11월은 temperature-SIRF의 영향으로 인해 net-SIRF의 변화량이 크게 나타난다. 이때 net-SIRF의 변화량은 4~6월과 유사하나 4~6월의 비해 지역적인 차이가 작게 발생한다. 이러한 결과는 Bintanja and Krikken (2016) 연구에서도 나타나는 지역적 특징이다. 하지만 본 연구와 동일한 방법을 적용하여 복사강제력을 산출하지는 않았다.

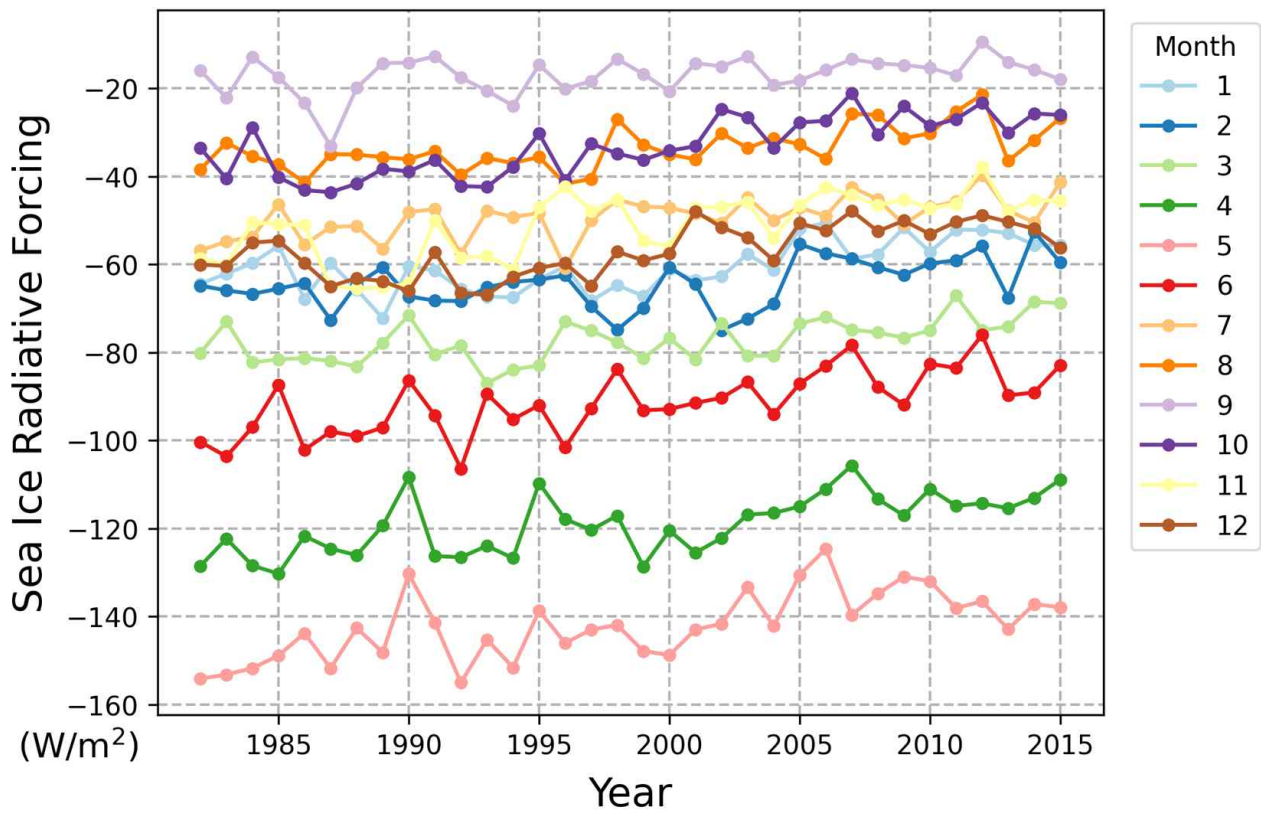


그림 14. 5개 커널 평균값을 이용한 월별 net-SIRF 시계열 분포

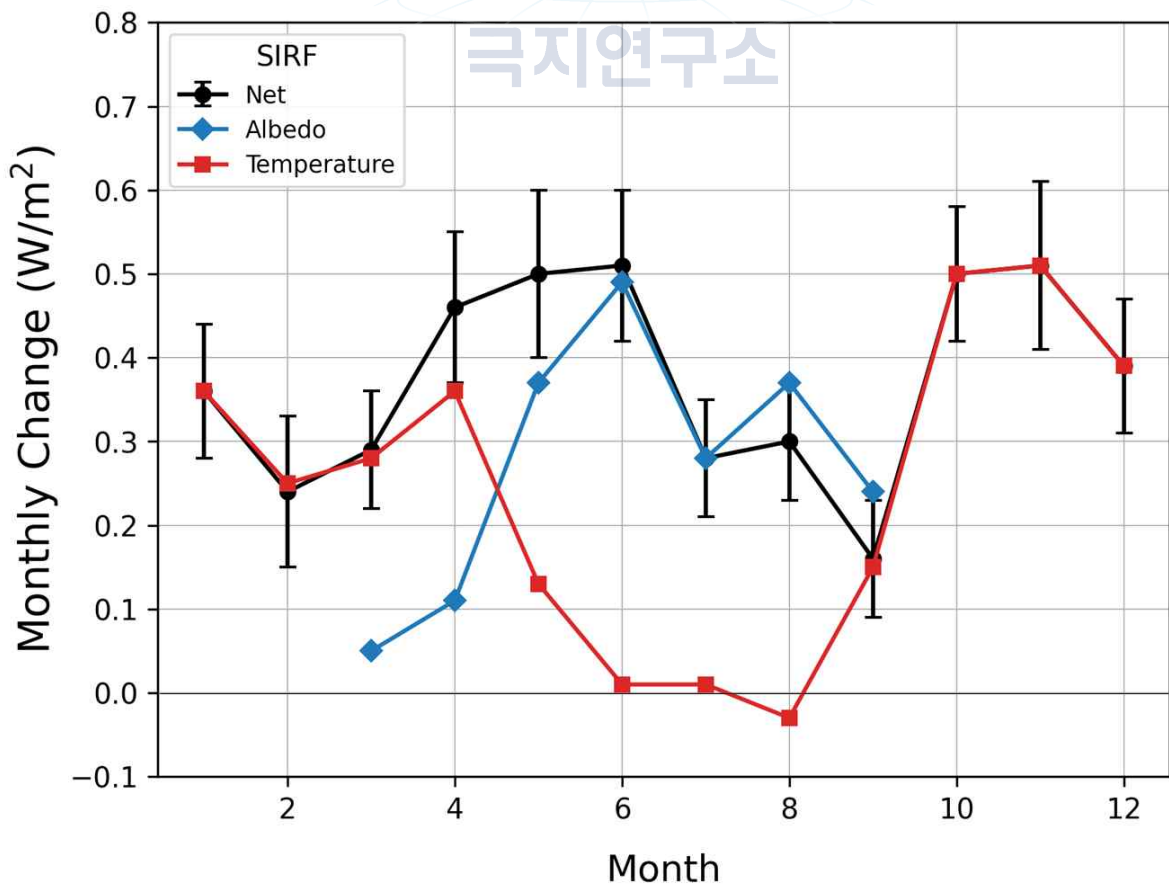


그림 15. 1982년부터 2015년 동안 각 요소별 SIRF 월별 변화량

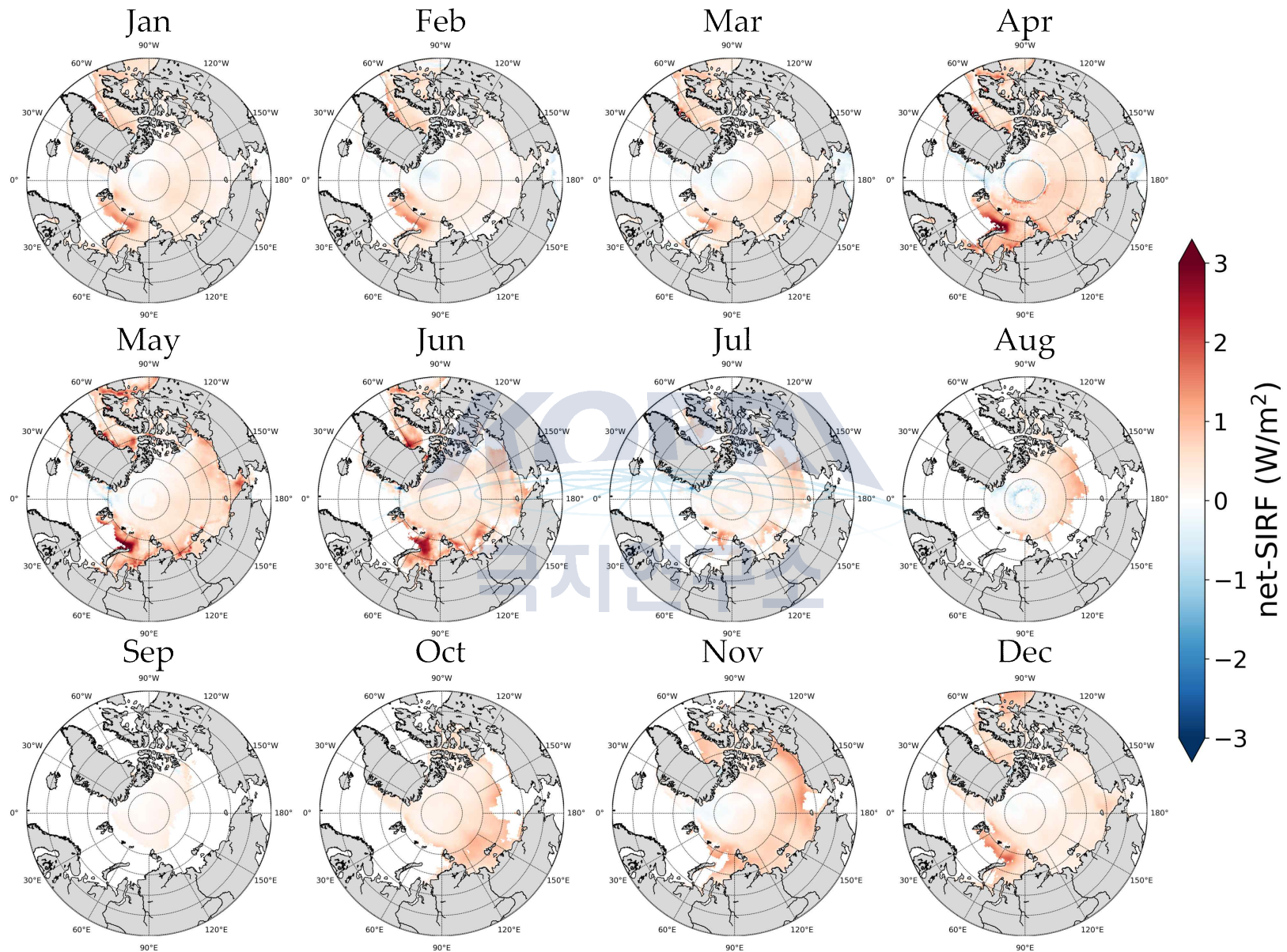


그림 16. net-SIRF 월별 변화량의 공간적 분포

제 4 절 DNN기반 해빙표면온도 산출 및 복사강제력 비교

3절의 SIRF 산출 및 분석 결과에 따르면 temperature-SIRF는 해빙이 녹는 시기에 그 지역의 표면온도를 0도에 가깝게 산출하는 ERA5 skin temperature의 특징으로 인하여 여름철 temperature-SIRF의 값이 0에 가깝게 산출되는 경향이 있었다. 그림 17은 2000년부터 2015년까지 6월 평균 ERA5와 MODIS의 표면온도의 분포를 나타낸다. 왼쪽 위는 ERA5 skin temperature의 6월 평균값이며, 오른쪽 위 그림은 MODIS IST의 평균값을 나타낸다. 왼쪽 아래는 MODIS IST에 대해 6월 기준 평균적으로 확보되는 pixel의 퍼센트를 나타낸다. 총 16년 동안 모두 존재하였으면 100%, 존재하지 않았을 경우에는 0%로 표기하였다. 오른쪽 아래 그림은 해빙의 어는점(영하 1.8도) 기준으로 ERA5와 MODIS의 분포를 히스토그램으로 표현하였다. ERA5의 경우 해빙이 존재함에도 불구하고 위에서 언급한 것과 마찬가지로 약 0도 정도의 높은 표면온도 값이 산출되고 있으나, MODIS의 경우에는 ERA5에 비해 평균 4도 낮은 값의 분포를 나타내고 있다. 하지만 ERA5와는 달리 모든 영역에 대하여 자료가 존재하지 않고 약 50%정도만 확보 가능하다. 겨울철의 경우 그림 18와 같이 나타난다. 여름철과 다르게 전체적인 분포특성의 차이는 있지만 여름철보다는 유사한 분포를 띈다. 하지만 MODIS의 경우 Brightness Temperature 기반으로 IST를 산출하는데 이 때, 위성의 궤도 및 구름의 영향으로 결측이 발생하게 된다.

따라서 제 4절에서는 계절에 관계없이 결측치가 없는 위성기반의 해빙표면온도를 산출하고 그 특성을 분석하고자 한다. 본 연구에는 최근 각광 받고있는 기계학습 모델 중에서 비선형 관계들에 대한 모델링 및 예측 정확도가 높고 위성기반 산출 연구에 많이 활용되고 있는 DNN 모델을 구축하여 해빙표면온도를 산출하고자 한다.

극지연구소

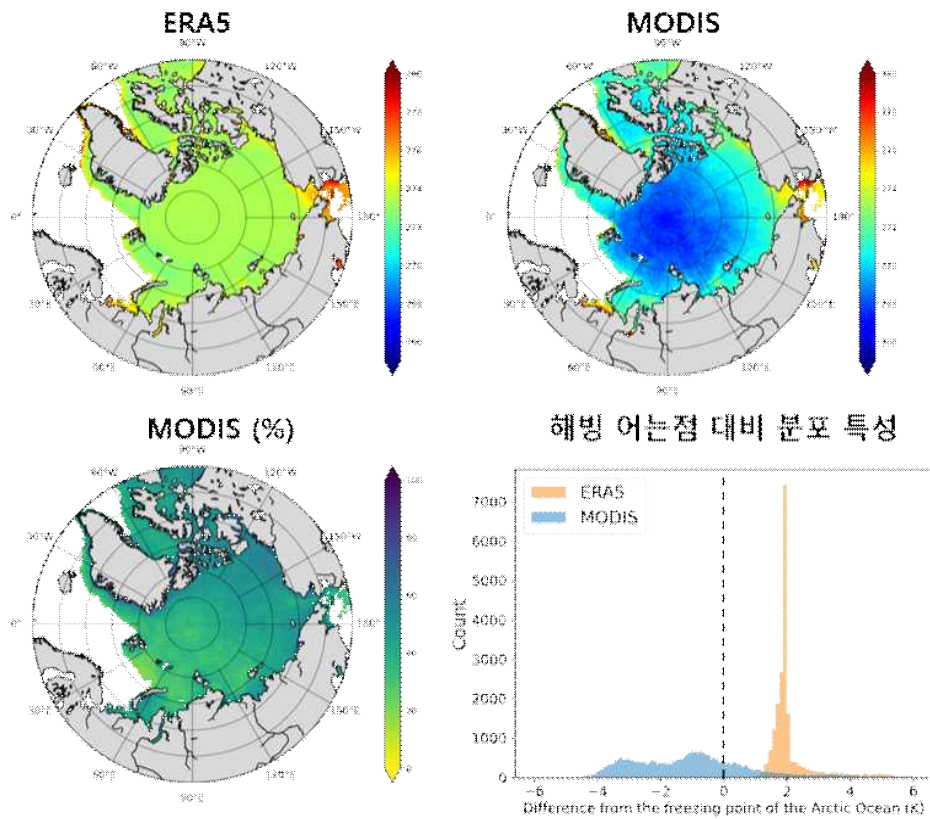


그림 17. 2000-2015년 기준 6월 평균 ERA5 및 MODIS의 표면온도 분포 특성

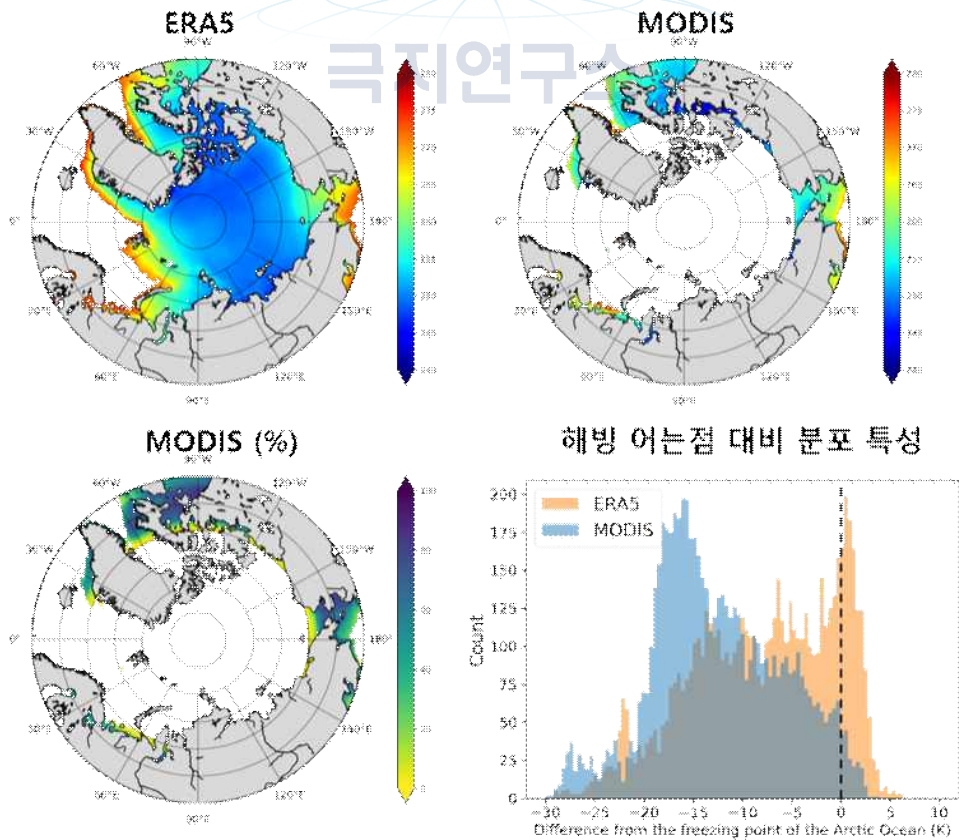


그림 18. 2000-2015년 기준 12월 평균 ERA5 및 MODIS의 표면온도 분포 특성

1 DNN기반 해빙표면온도 산출

가) DNN기반 해빙표면온도에 활용할 변수 선정

DNN 기반의 IST 산출 알고리즘을 구축하기 위하여 먼저 입력변수의 후보를 선행연구를 통하여 선정하였다. Key et al., (1997) 연구에서는 해빙표면온도 알고리즘의 정확도 향상을 위하여 전체 범위가 아닌 온도에 따라 구간을 나누어 알고리즘의 계수를 산출하는 것이 효과적이라 언급하였다. 이러한 이유는 대기 중 수증기량에 큰 영향을 받기 때문이라 설명하였다. A. Tetzlaff et al., (2013) 연구에서는 기온-IST-해빙농도의 상관성 분석을 수행하였다. 이 때 해빙 농도에 따라 다른 변화양상을 나타내는 것을 확인하였다. 다음으로 Chistopher A. et al., (2104) 연구에서는 기온이 높을수록 IST와 기온의 차이가 크게 발생한다 하였으며, 태양천정각에 따라 기온-IST 차이의 패턴 변화가 발생한다 하였다. Mäkynen, M., and Karvonen, J. (2017)의 연구에서는 MODIS IST를 기반으로 해빙두께를 산출하였다. 이러한 선행 연구를 바탕으로 아래와 같이 최종 DNN 기반 IST 산출 알고리즘의 입력 변수를 선정하였다. 모든 자료는 3절에서 생산한 복사강제력과 동일한 시공간해상도로 계산하여 사용하였다.

- Ice Surface Temperature (IST)

Terra 위성의 MODIS 센서에서 취득되는 MOD29E1D 자료로써 공간해상도 4 km, 시간해상도 daily 자료이다. 이 자료는 IST와 SST를 함께 제공하고 있으며, 해빙농도 자료를 이용하여 해빙농도가 15% 이상인 지역만 해빙지역으로 선정하여 본 연구에 활용하였다.

- Sea Ice Concentration (SIC)

NOAA에서 제공하는 OI (Optimal Interpolation) 자료를 활용하였다. 이 자료는 AMSR-E, AVHRR, Ships, Buoy 등 다양한 플랫폼을 함께 사용하여 생산한다. 공간 해상도 0.25°, 시간해상도는 daily이다.

- Sea Ice Age (SIA)

NSIDC에서 제공하는 자료로써, AMSR-E, AVHRR, Buoy 등 다양한 자료를 결합하여 생성되며 공간해상도 12.5 km, 7일 주기로 생성된다.

- 2m air Temperature (Ta), Total column Water Vapor (TCWV)

위성기반의 자료들은 북극 지역의 특성으로 인하여 많은 영역에서 결측치를 가지고 있다. 따라서 본 연구에는 이러한 문제를 해결하고자 ERA-Interim 재분석 자료를 활용하였다. 해빙 관련 많은 연구(Preußer, A., et al., 2016; Paul et al., 2020)에서 위성자료와 재분석자료를 함께 사용하고 있다. 본 연구에서는 공간해상도 0.25°, 시간해상도 daily 자료를 사용하였다.

- Solar Zenith Angle (SZA)

SZA는 태양-타겟-천정이 이루는 각도를 의미한다. 이는 태양에너지의 변화에 큰 영

향을 주는 요소 중 하나이다(Florent et al., 2016). Christopher et al.(2014)에 의하면 SZA에 따라 Ta와 IST 차의 패턴이 변화하는데, SZA가 클수록 Ta와 IST의 차이가 크게 발생한다 하였다.

- Local Solar Noon Angle (LSN)

LSN은 지구 중심-타켓-태양이 이루는 각도를 뜻한다. 로컬타임으로 정오일 때의 태양천정각은 시간 및 위도에 따라 변화하게 된다. 이 변수는 계절성을 대변할 수 있는 변수라 판단하여 입력자료로 선정하였다.

- Ta climatology

Hall et al.(2013)에 의하면 2001부터 2012년 까지 그린란드 지역에서 Ta가 $\sim 2^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 증가함에 따라 IST는 $\sim 2.51^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 증가한다고 발표하였다. 대기 온도 변화 경향을 포함하고자 입력변수로 선정하였다. 본 연구에서는 1982년부터 2015년 까지 34년 동안의 ERA-Interim Ta daily 자료를 평균하여 daily 기준 기후값을 산출하였다.

- Latitude

지표에 도달하는 태양에너지는 위도에 따라 상이하게 나타난다. Seo et al. (2020) 연구에 의하면 위도에 따라 그로 인한 온도 차이는 뚜렷하게 관측되고 있다. 특히 고위도로 갈수록 입사하는 에너지 양보다 방출하는 에너지양이 많아져 온도의 감소가 극명하게 나타난다.

나) 효과적인 IST 산출을 위한 Case 분류

현재 MODIS IST ATBD(Algorithm Theoretical Basis Document)에서는 $11\mu\text{m}$ 의 밝기온도(T_{11})를 기준으로 IST cold ($T_{11} < 240\text{ K}$), IST moderate ($240\text{ K} < T_{11} < 260\text{ K}$), IST warm ($T_{11} > 260\text{ K}$) 총 3가지 경우로 나누어 산출하고 있다. 이는 앞서 설명한 것과 마찬가지로 Key et al. (1997)에서 계절에 따른 구분보다 온도에 따른 IST를 산출하는 것이 더 효과적이라 하였다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 동일한 범위 기준을 바탕으로 Ta를 활용하여 온도범위에 따라 IST 모델을 개별적으로 구성하였다.

추가로 SIA를 활용하여 일년빙과 다년빙에 대해 개별 모델을 생성하였다. SIA는 해빙의 상태를 나타내는 주요 설명자료써 역학 및 열역학적 변화를 설명할수 있는 주용한 지표로 작용하고 있다(Korosov et al., 2018). 이 자료는 Sea Ice Thickness와도 밀접한 상관성이 있으며, 다년빙(Mult Year Ice, MYI)과 일년빙(First Year Ice, FYI)로 분류가 가능하다. 특히 다년빙은 일년빙에 비해 대기-해양의 변화에 더 탄력적으로 반응하고 있으며 해빙과 관련된 많은 연구에서 다년빙과 일년빙을 구분하여 연구를 수행하고 있다. 따라서 최종 분류된 Case는 총 6개로 다음과 같다.

- FYI & IST cold
- FYI & IST moderate
- FYI & IST warm
- MYI & IST cold
- MYI & IST moderate
- MYI & IST warm

다) DNN 모델 생성 및 정확도 평가

DNN은 입력층(input layer)과 출력층(output layer) 사이에 여러 개의 은닉층(hidden layer)들로 이뤄진 인공신경망(Artificial Neural Network, ANN)이다. 심층 신경망은 일반적인 인공신경망과 마찬가지로 복잡한 비선형 관계(non-linear relationship)들을 모델링할 수 있다. 본 연구에서는 Google Colab 환경 Keras 2.9.0 버전에서 DNN 기반 IST 알고리즘을 구축하였다. 활성화 함수는 Relu, 옵티마이저는 Adam을 적용하였다. 최종적으로 선정된 입력변수는 Ta, SZA, LSN, Ta climatology, Latitude, TCWV 이며, 모든 입력변수는 MinMaxScaler를 활용하여 0~1로 정규화하여 적용하였다. 최종 선정된 하이퍼파라미터는 GridSearchCV를 활용하여 선택하였다(표 8). GridSearchCV는 하이퍼파라미터를 순차적으로 학습시킨 후 최적의 값을 도출하는 방식이다. 또한 과적합방지를 위하여 EarlyStopping 콜백함수를 적용하였다. 훈련 및 검증데이터, 테스트데이터는 StratifiedShuffleSplit를 사용하여 동일한 월을 기준으로 각각 60%, 20%, 20%로 분류하여 사용하였다. 그림 19는 본 연구의 DNN 구조를 도식화 한 것이다.

표 8. 본 연구에 적용한 DNN 하이퍼파라미터

Hyper-parameter	Layer, Node	Batch size	Epoch	Loss Function
Setting value	(128,128,128)	32	100	Mse (Mean Squared Error)

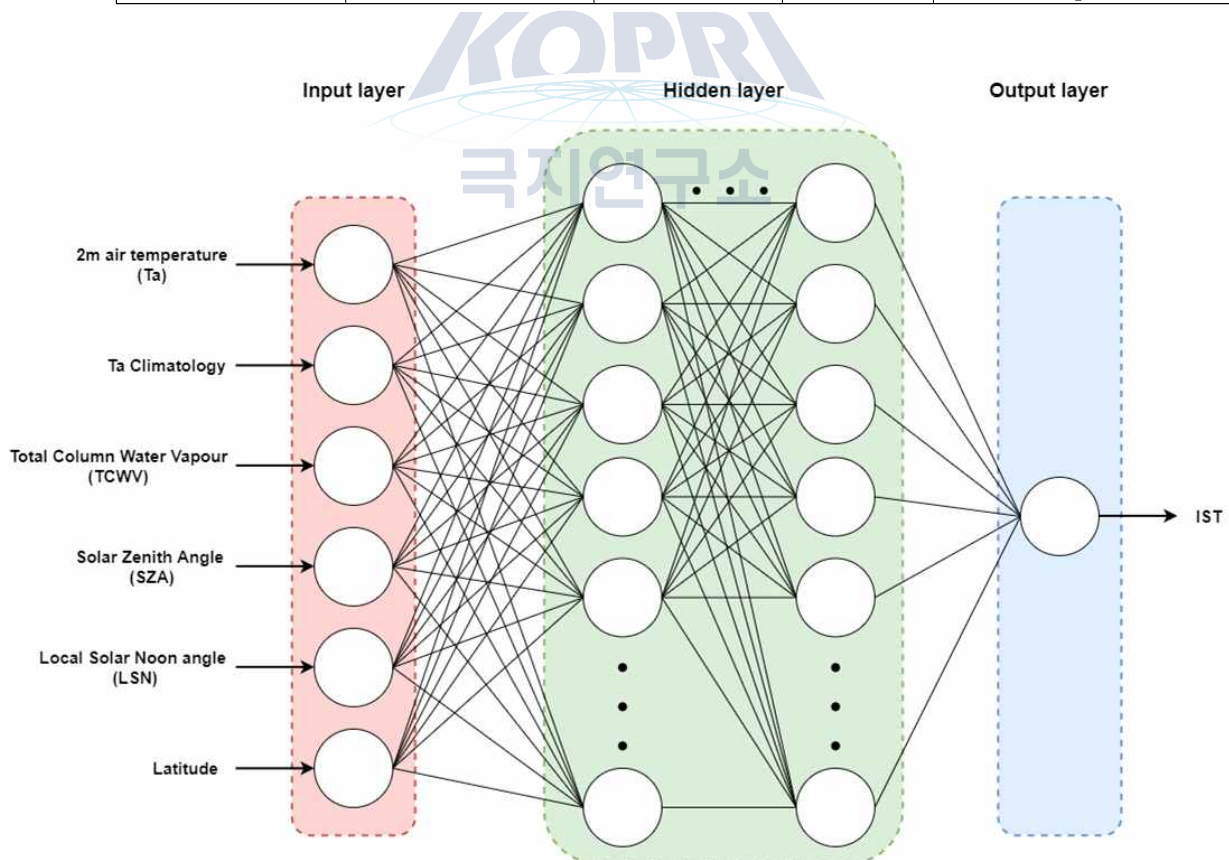


그림 19. 본 연구에 적용한 DNN 구조

본 연구에서는 결과를 평가하기 위하여 다음과 같은 평가지수를 활용하였다.

- 상관계수 (R, correlation coefficient)

두 변수 사이의 통계적 관계를 표현하기 위해 특정한 상관 관계의 정도를 수치적으로 나타낸 계수이다. 본 연구에 사용한 상관계수는 피어슨 상관 계수이며 두 변수 X와 Y 간의 선형 상관 관계를 계량화한 수치다. 피어슨 상관 계수는 코시-슈바르츠 부등식에 의해 +1과 -1 사이의 값을 가지며, +1은 완벽한 양의 선형 상관 관계, 0은 선형 상관 관계 없음, -1은 완벽한 음의 선형 상관 관계를 의미한다.

- Root Mean Square Error (RMSE)

추정 값 또는 모델이 예측한 값과 실제 환경에서 관찰되는 값의 차이를 다룰 때 흔히 사용하는 척도이다. 정밀도(precision)를 표현하는데 적합하다. 각각의 차이값은 잔차(residual)라고도 하며, 평균 제곱근 편차는 잔차들을 하나의 척도로 종합할 때 사용한다.

- Relative Root Mean Square Error (RRMSE)

RRMSE는 각 잔차가 실제 값에 대해 조정되는 평균 제곱근 값으로 정규화된 평균 제곱근 오차를 의미한다. RMSE는 원래 측정 규모에 의해 제한되지만 RRMSE는 다양한 측정 기술을 비교하는 데 사용할 수 있다. 예측이 정확하지 않으면 RRMSE가 증가한다. RRMSE는 오류를 상대적으로 또는 백분율 형식으로 표현한다.

- bias

bias 즉 Mean Bias Error(MBE)는 예측값과 실제 값의 차이의 평균을 의미한다. bias는 양수 또는 음수 중 하나의 값을 가진다. 양의 bias는 자료가 과대 평가되었음을 의미하며 음수는 과소 평가되었다는 것을 의미한다. 하지만 양의 error와 음의 error가 상쇄될 수 있을 가능성이 존재한다.

그림 20(a)은 본 연구에서 생성한 DNN 기반 IST와 MODIS IST를 비교한 결과이다. 모든 Case의 총합으로 총 384628개의 테스트 자료를 대상으로 R은 0.94, RMSE는 3.46 K, RRMSE는 1.35 %, Bias 0.29 K의 결과를 계산하였다. 전체적으로 MODIS IST와 전체적으로 유사한 분포를 나타낸다. 추가적으로 Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL)에서 제공하는 Ice Mass Balance (IMB) buoy 자료와 검증을 수행하였다(그림 20(b)). 검증 결과 MODIS IST는 검증 자료 수는 65개로 R 0.92, RMSE 4.51 K, RRMSE 1.7%, Bias -2.81 K로 산출되었다. 본 연구에서 산출한 DNN 기반의 IST는 검증 자료 수 173개에 대해 R 0.98, RMSE 3.85 K, RRMSE 1.47 %, Bias -2.89 K가 나타났다. Bouy 자료와 비교결과 MODIS IST 비해 높은 정확도가 산출되는 것을 확인하였다.

그림 21은 각 계절별로 같은 날짜에 대한 MODIS IST와 DNN 기반 IST의 공간적 분포를 나타낸다. 전체적으로 MODIS IST와 전반적으로 유사한 공간적 분포가 나타나고 있다. MODIS IST에서는 pole hole을 포함한 넓은 지역에서 결측치가 발생하고 있으나, DNN 기반 IST에서는 결측치 없이 모든 지역에서 산출되는 것을 확인하였다.

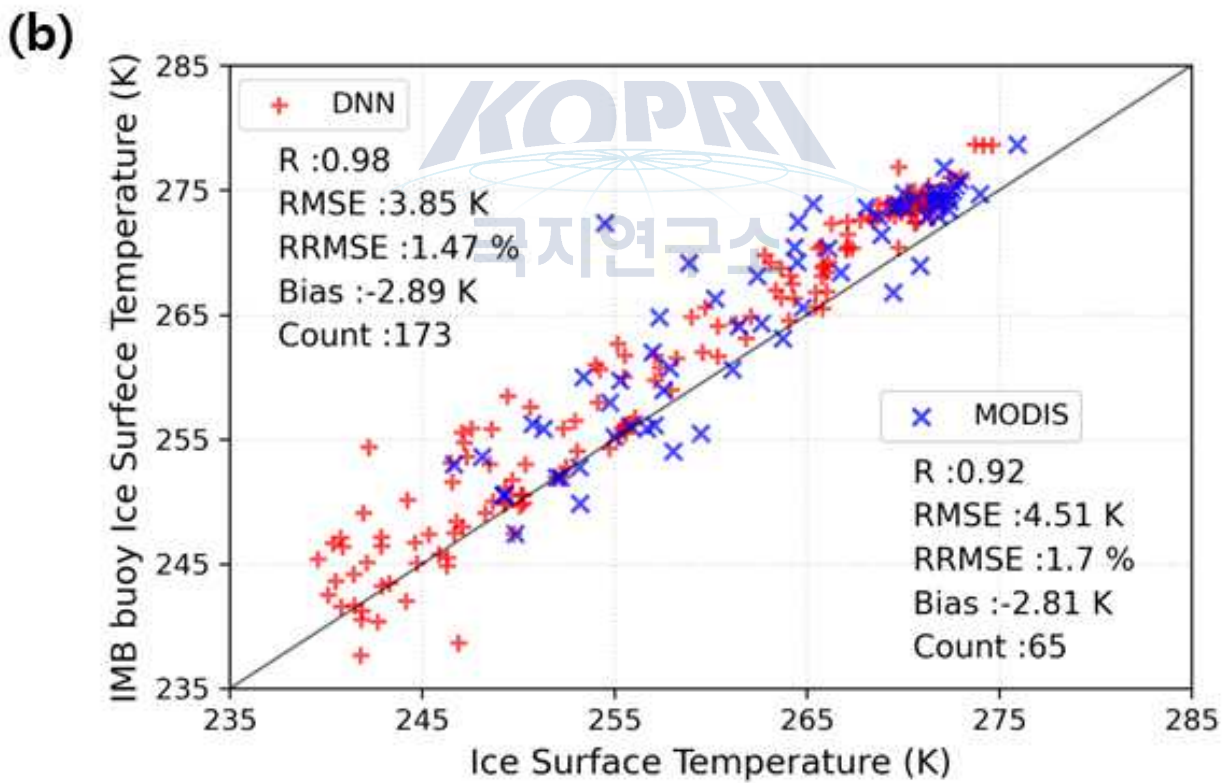
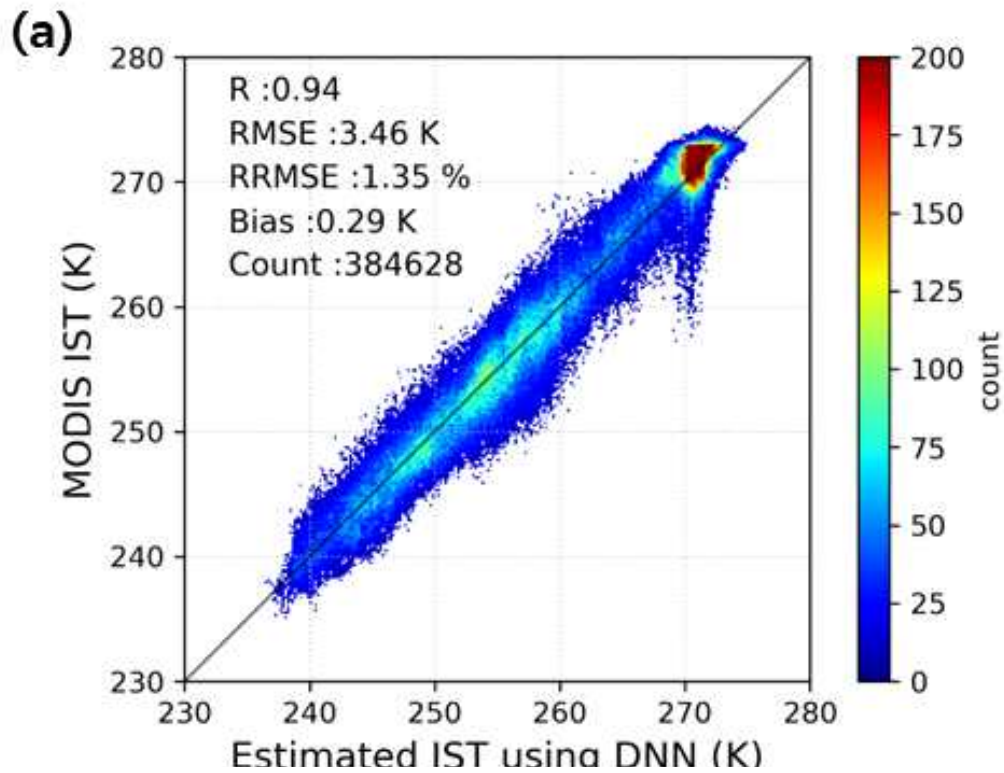


그림 20. MODIS IST 및 IMB buoy 데이터를 통해 DNN 기반 IST 검증 결과. (a) DNN기반 IST와 MODIS IST의 분포. (b) DNN 기반 IST 및 MODIS IST와 IMB buoy IST와 비교.

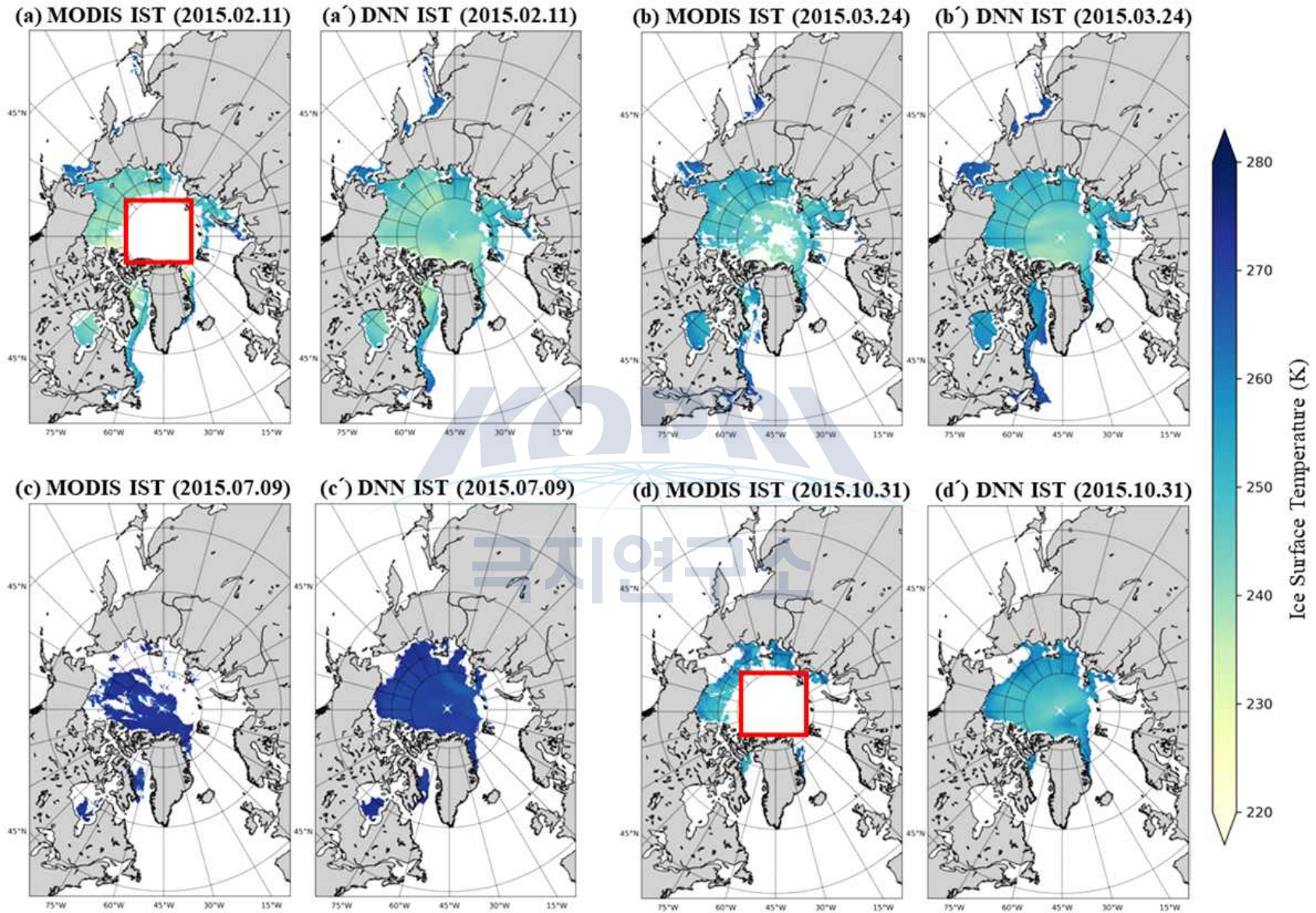


그림 21. MODIS IST(a, b, c, d)와 DNN 기반 IST와(a', b', c', d')의 공간적 분포.

다음으로 Case에 따른 분석을 수행하였다. 그림 22(a)은 DNN IST의 정량적 평가 결과 중 FYI case에 대한 결과로 R은 0.79 ~ 0.89, RMSE 2.77 ~ 3.87 K, Bias 0.606 ~ 1.35로 산출되었으며 IST warm case에서 일부 비선형적인 분포 양상이 나타났다. 그림 22(b)는 MYI case에 대한 결과로써 FYI case와 매우 비슷한 분포 양상이 나타났다. R 0.81 ~ 0.88, RMSE 2.69 ~ 3.77K, Bias -0.53 ~ -0.20으로 나타났다. Bias가 FYI case와는 달리 음수로 나온 것이 특징이며, IST warm case에서 FYI와 마찬가지로 일부 비선형적 분포 특징이 나타났다.

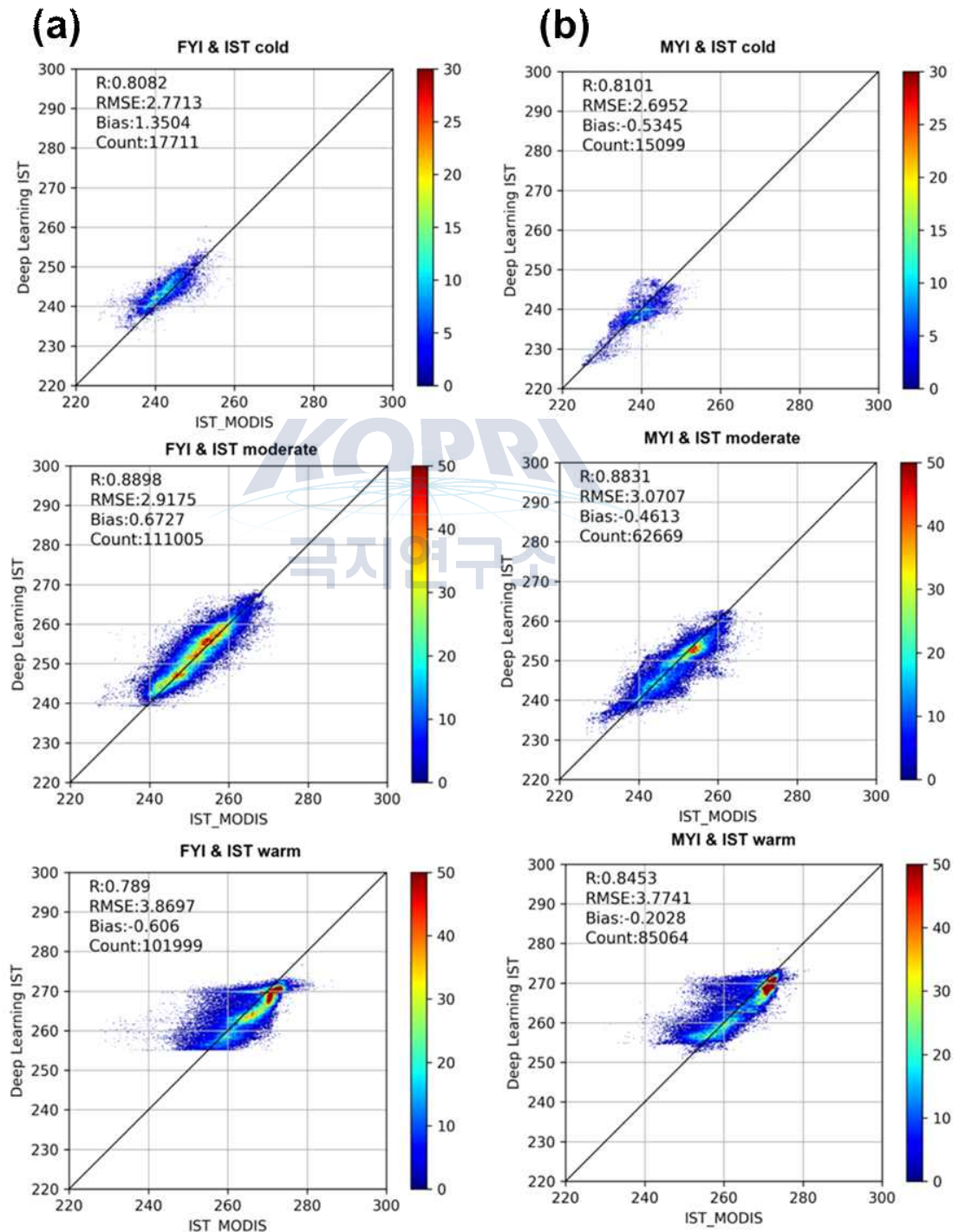


그림 22. Case 별 MODIS IST와의 검증 결과

그림 23는 DNN 모델에서 각 변수 별로 기여하는 영향력을 평가한 결과이다. 본 연구에서는 SHAP (Shapley Additive exPlanations) 값을 활용하였다. SHAP는 게임이론에서 사용하는 Shapley Value를 기반으로 예측 결과에 대한 각 변수의 기여도를 계산하는 것이다. SHAP 점댓값이 높을수록 모델에 큰 기여도를 갖는다고 해석이 가능하다. 각 case에 따라 변수의 기여도가 상이한 것을 알수 있다. 이러한 이유에 대해서는 추가 분석이 필요한 실정이다. 그럼에도 불구하고 case에 따라 변수의 중요도가 매우 상이하기 때문에 변수에 따른 구분은 필수적이라는 것이 설명 가능하다.

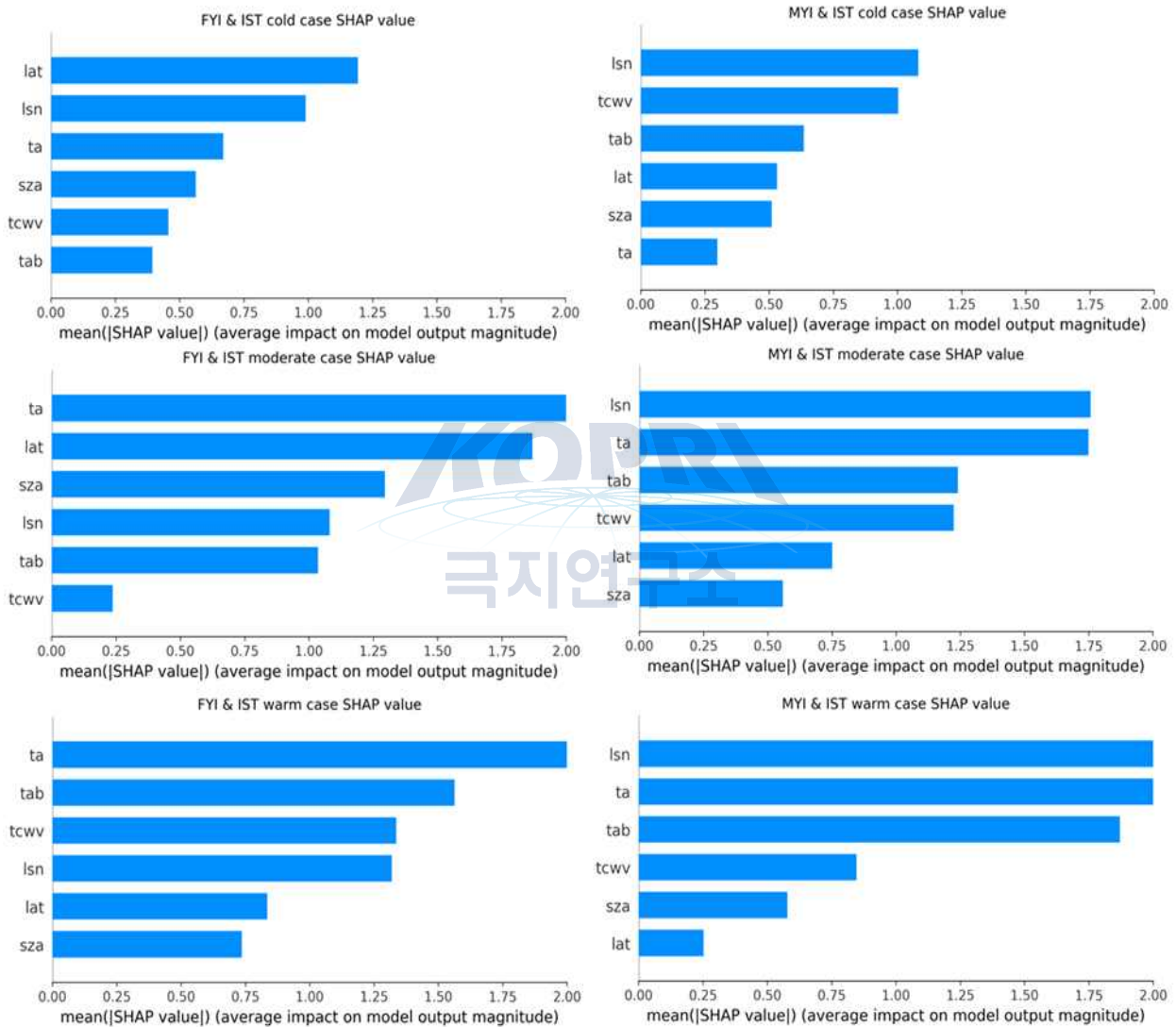


그림 23. SHAP를 활용한 Case에 따른 변수 중요도 평가 결과

2 DNN 기반 IST를 활용한 복사강제력 산출 및 평가

위 과정에서 생성된 DNN 기반의 IST 자료를 바탕으로 temperature-SIRF를 산출하고 그 특징을 기존 자료와 비교하였다. 그림 24은 3절에서 사용한 ERA5 skin temperature를 바탕으로 산출된 temperature-SIRF (이하 ERA5-SIRF)와 본 4절 1장에서 생성한 DNN 기반의 IST를 바탕으로 산출된 temperature-SIRF (이하 DNN-SIRF)의 연평균 시계열 분포를 나타낸다. 전체적으로 두 자료는 반대경향을 나타낸다. DNN-SIRF가 ERA5-SIRF에 비해 약 10 W/m^2 만큼 높게 산출되었다. 그리고 ERA5-SIRF는 증가경향인 반면에, DNN-SIRF는 증가경향이 나타나고 있다. 그림 25은 두 SIRF의 계절별 공간적 분포를 나타낸다. 시계열 분포특성과 마찬가지로 공간적 분포에서도 두 자료의 차이를 확인할 수 있다. 먼저 DJF 기간은 다른 계절에 비해 차이가 확연히 들어난다. DNN-SIRF의 경우 Chukchi 및 Barents 해역 등 전반적으로 양의 SIRF가 산출된 지역이 넓게 분포하고 있다. 이러한 특징 때문에 연평균 DNN-SIRF에서도 ERA5-SIRF에 비해 높게 산출되고 있다. 반면 해당기간 ERA5-SIRF는 지역에 따른 차이는 상대적으로 매우 작게 나타나며 전반적으로 약 -30 W/m^2 의 분포 특성이 나타난다. MAM 기간은 다른 계절에 비해서는 차이가 적게 나고 있으나, 북극 중앙해 부근에서 DNN-SIRF가 높은 값이 산출되고 있다. JJA 기간은 앞의 다른 계절과 다른 양상이 나타난다. DNN-SIRF와 ERA-SIRF 모두 지역에 따른 차이는 크게 나타나지 않는다. 하지만 해당 계절에서 DNN-SIRF는 대부분 지역에서 음의 SIRF가 산출되는 반면 ERA5-SIRF는 양의 SIRF가 산출되고 있다. SON 기간은 MAM기간과 비슷한 양상을 나타내고 있다. 두 SIRF 모두 0에 가까운 값이 산출되고 있으며 DNN-SIRF의 경우 Baring 및 Laptev 해역 일부에서 양의 SIRF가 나타난다.

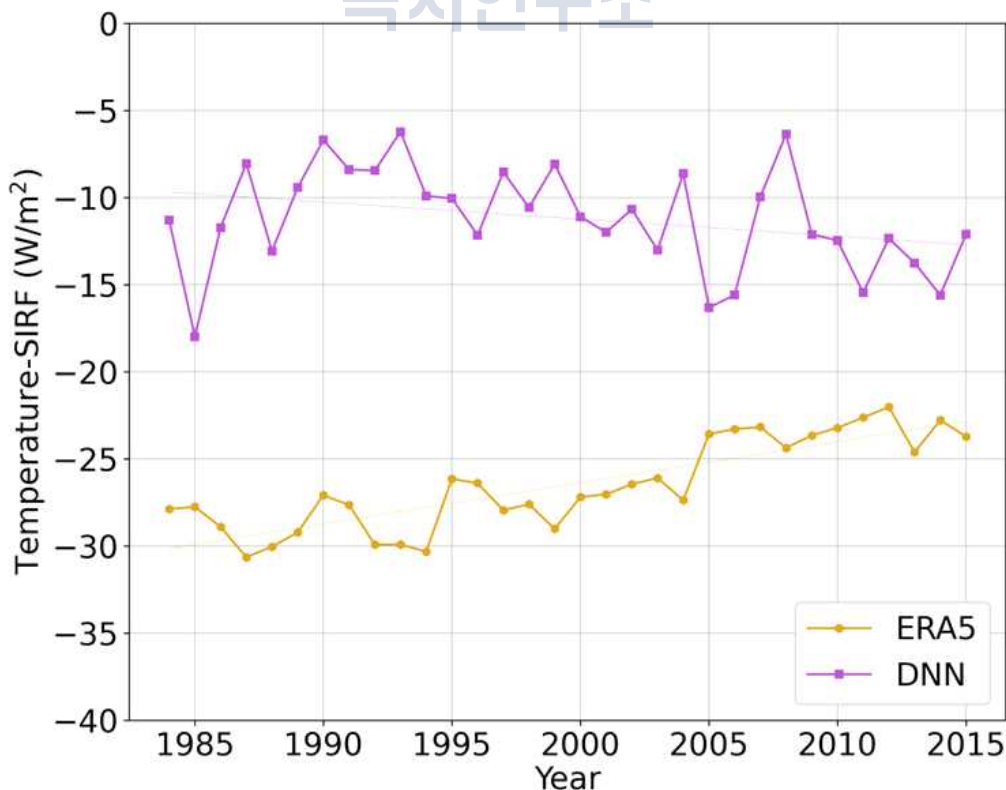


그림 24. ERA5-SIRF와 DNN-SIRF의 연평균 시계열 분포.

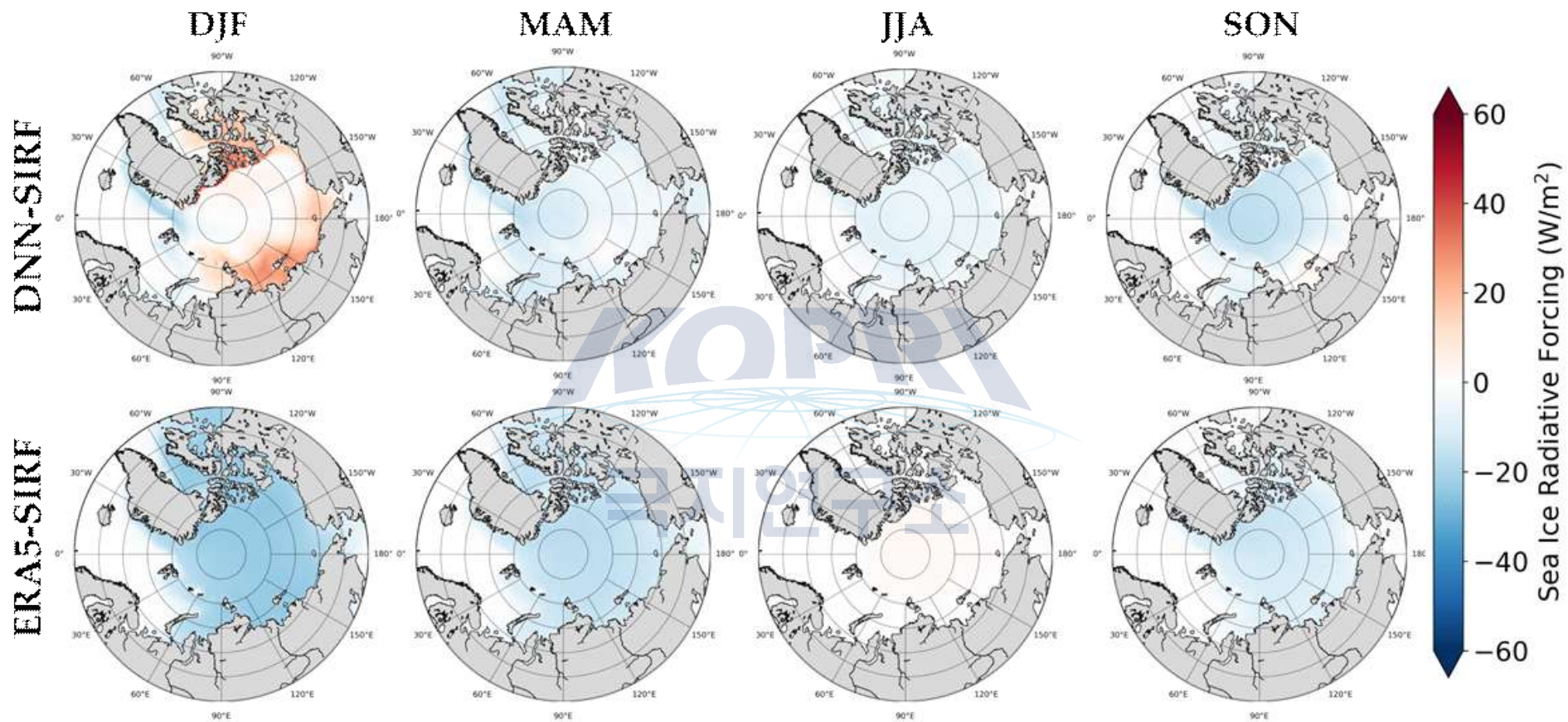


그림 25. ERA5-SIRF와 DNN-SIRF의 계절별 평균 공간적 분포.

제 5 절 AutoML 기반 해빙표면온도 산출

TPOT 기반 자동 기계학습을 통한 파이프라인 최적화 결과, K-최근접이웃(K-Nearest Neighbor, KNN) 알고리즘이 최적 예측 모델로 선정되었다. 최종 하이퍼파라미터는 이웃 수 7, Manhattan 거리 메트릭, 거리 기반 가중치로 결정되었다. 이러한 선택은 대규모 북극 데이터셋에 대한 계산 효율성을 유지하면서 대기 강제력과 표면 온도 간의 비선형 관계를 효과적으로 포착할 수 있는 알고리즘의 능력을 반영한다. 8개의 입력 변수(2m Temperature, Mean sea level pressure, Total Column water vapour, Downward shortwave radiation, outgoing longwave radiation, Local solar noon angle, latitude, longitude)를 활용하여 6:2:2 훈련-검증-테스트 분할과 5 fold cross validation을 통해 모델을 구축하였다.

훈련 단계에서 의도적으로 제외한 Beaufort Sea 지역에 대한 독립 검증 결과, AutoML IST는 탁월한 공간적 일반화 성능을 입증하였다. 2006년부터 2009년까지의 예측 결과를 MODIS 관측과 비교한 결과, 상관계수 $R = 0.9837$, 평균제곱근오차 $RMSE = 2.113$ K, 편향 0.021 K를 달성하였다. 전체 온도 범위(230 - 280 K)에서 예측 값과 관측 값 간의 강한 일치가 나타났으며, 특히 전형적인 북극 빙면 온도 범위(260 - 275 K)에서 1:1 선을 따라 데이터 포인트가 밀집되어 높은 밀도로 집중되었다. 무시할 만한 수준의 편향(0.021 K)은 모델이 훈련 데이터셋에 포함되지 않은 지역에서도 체계적 오차 없이 정확한 예측을 수행함을 확인하였다. 또한 1단계 DNN IST(T2m, Ta background data, Latitude, Solar zenith angle, Local solar noon angle, Total column water vapour)에서 2016년 1년만 산출한 결과와 비교했을 때에도 향상된 정확도를 확인하였다.

AutoML IST <2단계 IST>

- 2단계 IST 산출 입력변수
- T2m, TCWV, SWD, OLR, LSN, SLP, Lat, Lon
- hyperparameters

Model	n_neighbors	p	weights
K-nearest neighbors	7	Manhattan distance	distance

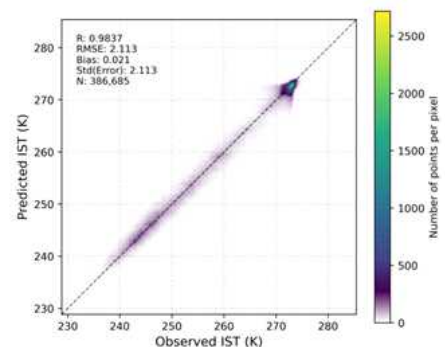


그림 26. 2단계 IST 산출 모델 및 하이퍼파라미터와 정확도

DNN IST <1단계 IST>

- 1단계 IST 산출 입력변수
- T2m, Ta background, Lat, SZA, LSN, TCWV
- hyperparameters

Layer	Node	Batch size	Epoch	Loss Function
3	-128,128,128	32	100	Mean squared error

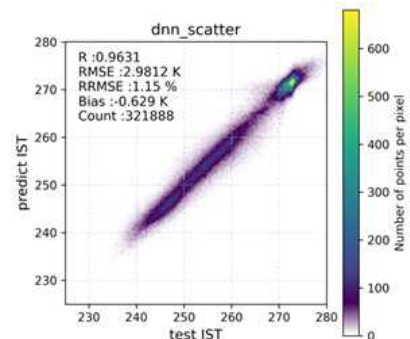


그림 27. 1단계 IST 산출 모델 및 하이퍼파라미터와 정확도

1. IST Validation & Inter Comparison

Beaufort Sea에 대한 일별 평균 IST 시계열 분석 결과, MODIS 관측과 AutoML 예측 간에 우수한 시간적 일치가 확인되었다. 2006년부터 2009년까지 4월에서 9월 기간 동안, 두 데이터셋 모두 초봄(4월 250 - 260 K)부터 여름 용해 시즌(6월 - 9월 270 - 275 K)까지의 특징적인 온난화 경향을 정확하게 포착하였다. 용해 개시 동안 복잡한 얼음-대기 상호작용이 관여하는 봄철 온난화 기간(4월 - 5월)에서도 서로 다른 해에 걸쳐 체계적 편향 없이 점진적인 온도 상승을 성공적으로 재현하였다. 반면 온도가 용해점에 제약되는 여름 기간(6월 - 8월) 동안 예측값과 관측값은 270 - 273 K 부근에서 긴밀하게 수렴하여 열역학적 일관성을 보였다. 다만 2008년과 2009년의 늦여름에서 초가을(8월 - 9월) 급격한 온도 하강 사건 동안 일부 불일치가 관찰되었으며, 이는 종관 규모 대기 교란 또는 일시적인 구름 오염 효과로 인한 MODIS 산출물의 급격한 변화를 반영하는 것으로 판단된다.

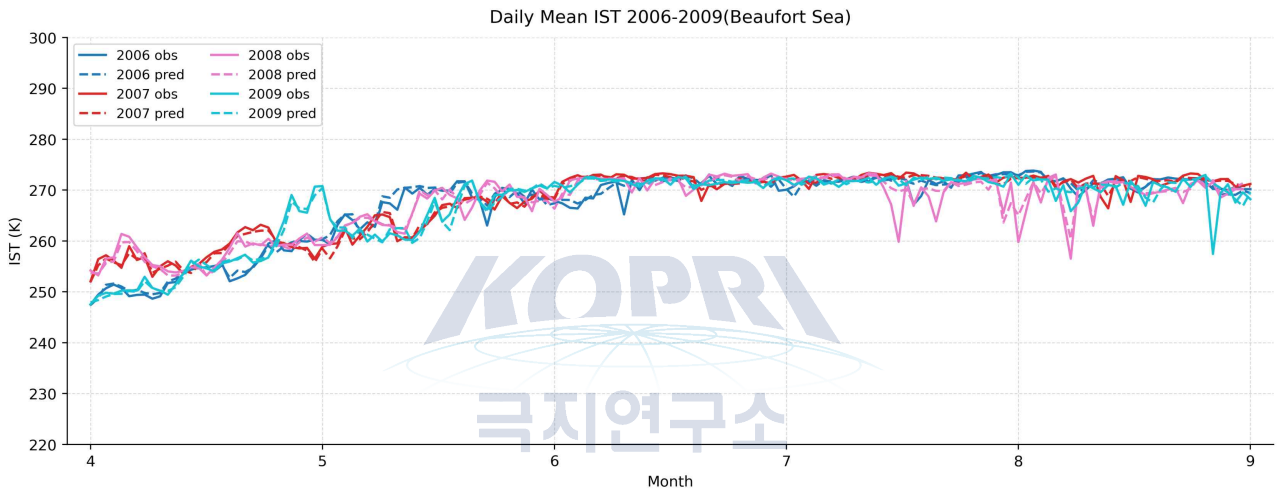


그림 28. AutoML IST와 MODIS IST 시계열 비교

2004년부터 2015년까지 CRREL Ice Mass Balance(IMB) 부이 자료를 사용한 독립 검증 결과, AutoML IST는 우수한 정량적 정확도를 나타냈다. AutoML IST는 상관계수 $R = 0.86$, $RMSE = 4.33$ K, 편향 = -2.353 K, 상대 $RMSE = 1.75\%$ 를 달성하였다. 비교를 위해 수행한 ERA5 IST 검증에서는 $R = 0.83$, $RMSE = 4.73$ K, 편향 = $+2.546$ K, 상대 $RMSE = 1.92\%$ 를 나타내어, AutoML IST가 ERA5에 비해 더 높은 상관관계와 낮은 $RMSE$ 를 기록하였다. AutoML IST의 $RMSE$ 4.33 K는 EUMETSAT OSISAF의 운영 IST 산출물 목표 정확도 요구사항에 근접하는 수준이다. 주목할 점은 AutoML이 음의 편향(-2.353 K)을, ERA5가 양의 편향($+2.546$ K)을 나타내어 대조적인 편향 특성을 보였다는 것이며, 이는 각 산출물의 자료 출처 및 방법론의 근본적인 차이를 반영한다.

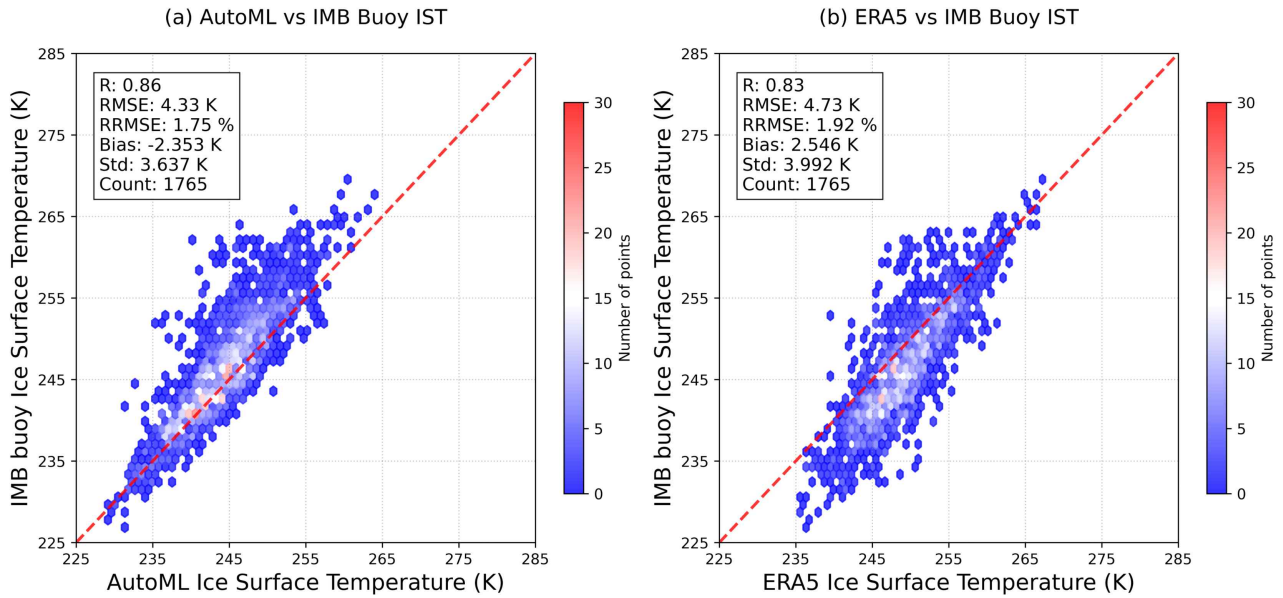


그림 29. IMB Buoy와 검증 결과, (좌) AutoML vs IMB Buoy, (우) ERA5 vs IMB Buoy

AutoML IST에서 관측된 음의 편향은 주요 훈련 대상인 MODIS의 특성을 상속한 결과이다. MODIS를 포함한 위성 기반 열적외 산출물은 북극 겨울 조건에서 구름 상단과 빙면 구별의 어려움, 보수적인 구름 필터링으로 인한 더 차가운 산출물의 우선 유지, 휘도온도-표면온도 변환 계수의 제한된 대표성 등으로 인해 현장 관측 대비 약 -1°C 에서 -2°C 의 음의 편향을 나타낸다. 반면 ERA5의 양의 편향은 해빙 위 적설 모델의 부재와 고정된 해빙 두께(1.5 m) 사용으로 인한 전도 열속 과대평가에서 비롯되며, 이는 북극 겨울 동안 지역적으로 4°C - 15°C 에 달할 수 있다. AutoML 결측치 보완 접근법은 MODIS 훈련 자료로부터 음의 편향 경향을 상속하지만, ERA5 유래 대기 변수와의 열역학적 일관성을 기반으로 조정하여 위성 음의 편향을 부분적으로 완화하면서 ERA5의 극단적인 온난 편향을 회피한다. 그 결과 AutoML IST는 음의 편향을 가진 MODIS 관측과 온난 편향을 가진 ERA5 재분석 사이의 중간 위치를 차지하게 되었다.

2020년 대표 기간에 대한 MODIS, AutoML, ERA5 IST 산출물의 확률 분포 분석 결과, 뚜렷한 차이가 확인되었다. 2020년 2월(겨울철 최대 해빙 범위), MODIS는 245 - 250 K 부근에 뚜렷한 피크를 가진 가장 차가운 분포를 보이며 240 K 이하까지 상당한 빈도가 확장되었다. AutoML IST는 MODIS보다 약 5 - 10 K 더 따뜻하게 이동한 분포를 나타내며 피크가 250 - 255 K 부근에 중심을 두었다. ERA5는 255 - 260 K 부근에 피크를 가진 가장 따뜻한 분포를 보였다. 2020년 9월(연간 최소 해빙 범위), 모든 분포는 더 따뜻한 온도 범위(255 - 275 K)로 이동하고 좁아졌으며, 상대적 순서는 동일하게 유지되었다(MODIS가 가장 차갑고, AutoML이 중간이며, ERA5가 가장 따뜻함). 주목할 점은 MODIS와 AutoML 분포 간의 분리가 여름에 더욱 뚜렷해져, 결측치 보완 알고리즘의 위성 산출물 조정이 계절적으로 의존적이며 용해 기간 동안 MODIS 관측의 가용성과 품질에 의해 영향을 받음을 시사하였다.

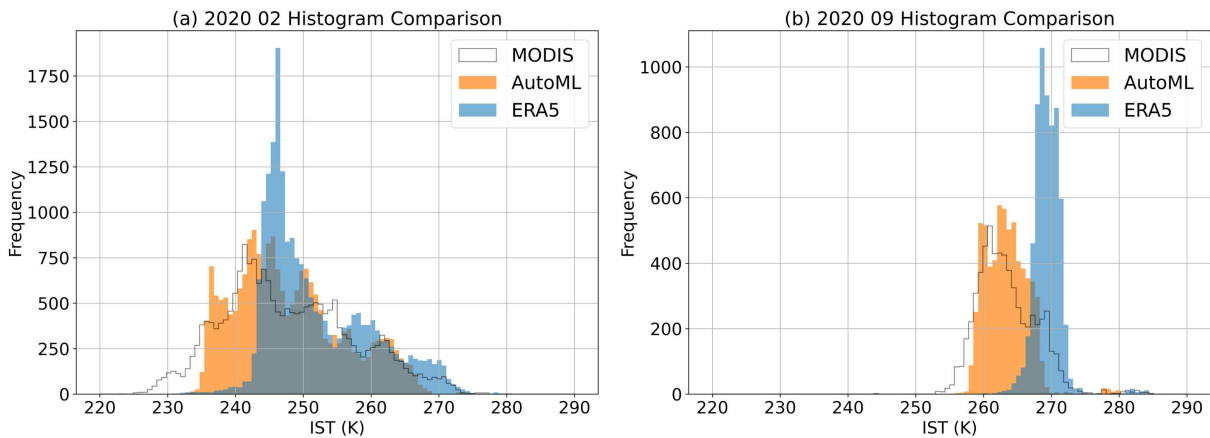


그림 30. MODIS IST가 존재하는 지점에서의 Histogram matching 결과

Buoy 검증 결과를 종합하면, AutoML IST는 ERA5 IST에 비해 여러 측면에서 우수한 성능을 보였다. 상관계수는 0.03 더 높았고(0.86 vs 0.83), RMSE는 0.4 K 더 낮았으며(4.33 K vs 4.73 K), 상대 RMSE는 0.17% 더 낮았다(1.75% vs 1.92%). 편향의 절대값은 AutoML이 약간 작았으나(-2.353 K vs $+2.546$ K), 두 산출물 모두 약 2.5 K 수준의 체계적 편향을 나타냈다. AutoML IST의 우수한 성능은 위성 관측의 물리적 기반과 재분석 자료의 열역학적 일관성을 결합한 하이브리드 접근법의 장점을 입증한다. 특히 AutoML IST는 MODIS의 구름 조건 하 결측치 문제를 해결하면서도 ERA5의 구조적 한계(해빙 위 적설 모델 부재, 고정된 빙 두께)로 인한 극단적인 온난 편향을 회피하여, 극야 기간을 포함한 연중 연속적이고 정확한 IST 자료를 제공하는 데 성공하였다.

AutoML 기반 결측치 보완의 가장 중요한 성과는 극야 기간(10월 - 3월) 동안 MODIS IST의 광범위한 결측 영역을 성공적으로 채웠다는 점이다. 원본 MODIS IST는 보수적인 구름 마스킹으로 인해 겨울철 중앙 북극에 지속적인 "pole hole"을 형성하여 온도 기반 복사 효과가 지배적인 가을-겨울 기간의 IST 변화 평가가 불가능하였다. AutoML IST는 물리적으로 일관된 대기 변수들과의 학습된 관계를 활용하여 이러한 결측치를 보완함으로써, 1988년부터 2023년까지 36년간 연중 완전한 시공간적 커버리지를 가진 IST 자료를 생산하였다. 이는 Temperature-SIRF의 연중 정량화를 가능하게 하여, 기존 연구들이 여름철 Albedo-SIRF에 집중했던 한계를 극복하고 겨울철 온도 기반 복사강제력의 중요성을 평가할 수 있는 기반을 제공하였다. 공간적 커버리지 측면에서도 AutoML IST는 구름이 빈번한 지역과 극야 기간 동안 MODIS 대비 관측 밀도를 획기적으로 향상시켜, 지역별 IST 변화 경향과 공간 패턴 분석의 신뢰성을 크게 높였다.

제 6 절 AutoML IST 기반 해빙 복사강제력

1 복사강제력 변화 경향

1988년부터 2023년까지 36년간 범북극 해빙 복사강제력(SIRF) 분석 결과, 모든 산출물에서 통계적으로 유의한 증가 경향이 확인되었다. Albedo-SIRF는 0.13 ± 0.01 W/m²/year ($p < 0.001$)의 경향을 보여 잘 알려진 북극 해빙 범위 감소 및 이와 관련

된 지표 알베도 감소를 반영하였다. Temperature-SIRF는 더욱 강한 경향을 나타냈으며, AutoML-SIRF는 $0.29 \pm 0.02 \text{ W/m}^2/\text{year}$ ($p < 0.001$), ERA5-SIRF는 $0.21 \pm 0.02 \text{ W/m}^2/\text{year}$ ($p < 0.001$)의 증가율을 기록하였다. AutoML-SIRF의 경향이 ERA5-SIRF보다 약 38% 더 높게 나타난 것은 서로 다른 IST 산출물이 해빙 손실의 복사 영향을 정량화하는 방식에서 중대한 불일치가 있음을 보여준다. 1988 - 2023년 기간 동안 연평균 AutoML-SIRF (-31.07 W/m^2)는 ERA5-SIRF (-21.82 W/m^2)에 비해 해빙으로 인한 냉각 효과가 더 강함을 나타내며, 이러한 9.25 W/m^2 차이는 ERA5가 빙면 온도의 복사 기여를 체계적으로 과소평가함을 시사한다. 특히 주목할 점은 ERA5-SIRF의 크기가 기록 전반에 걸쳐 Albedo-SIRF와 비슷하거나 더 약하여 ERA5가 온도 효과에 알베도 효과와 유사하거나 더 낮은 복사 중요성을 부여함을 나타낸 반면, AutoML-SIRF는 최근 몇 년 동안 알베도 강제력의 크기를 초과하여 북극 해빙이 더 젊고 얇으며 계절적인 상태로 전환됨에 따라 온도 기반 복사 차이가 알베도 변화보다 더 중요해졌음을 입증하였다.

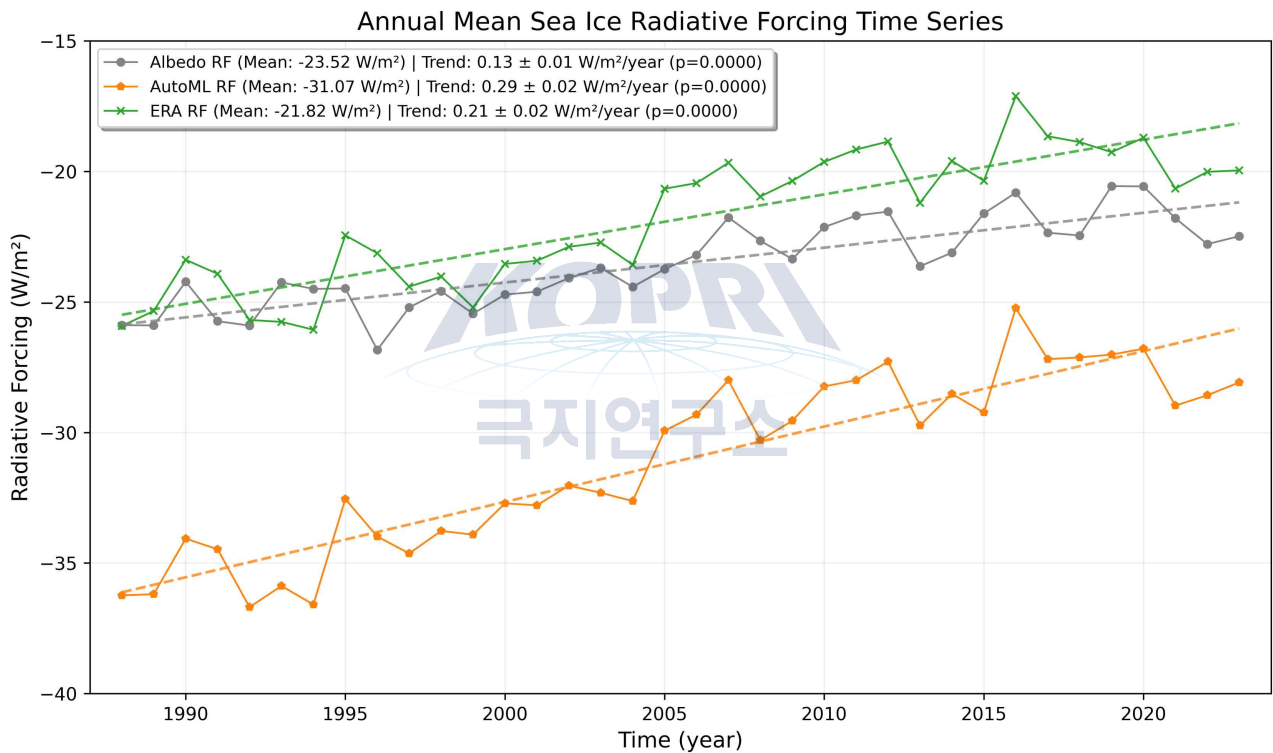


그림 31. 복사강제력 연 변화 경향 시계열 분석 결과

계절별 SIRF 분석 결과, 서로 다른 물리 과정이 지배하는 뚜렷한 체제가 확인되었다. 봄과 여름철(3월 - 8월) 동안 Albedo-SIRF가 지배적이었으며, 최대 태양 복사 및 급격한 해빙 용해 기간인 5월에 $-97.38 \pm 1.45 \text{ W/m}^2$ 에 달하는 크기를 기록하였다. 이러한 큰 음의 값은 고알베도 해빙 표면과 더 어두운 개방 해역을 비교할 때 상당한 에너지 손실과 관련된다. 이 일조 기간 동안 온도 기반 복사강제력은 부차적인 역할을 하였으며, AutoML-SIRF는 7월 $-2.62 \pm 0.42 \text{ W/m}^2$ 에서 5월 $-20.07 \pm 0.84 \text{ W/m}^2$ 까지 범위를 보였다. 이는 빙면 온도가 용해점 근처로 제한되고 얼음과 물 사이의 온도 대비가 최소화되기 때문이다. 반면 ERA5-SIRF는 여름철 동안 물리적으로 비일관적인 양의 값을 나타냈으며, 6월 $+2.60 \pm 0.20 \text{ W/m}^2$ 와 7월 $+2.28 \pm 0.18 \text{ W/m}^2$ 에 도달하여 인접한 해수면 온도를 초과하는 비현실적인 빙면 온도를 암시하였다. 이러한 행동은

특히 적설 모델의 부재와 과대평가된 전도 열속을 초래하는 고정된 1.5 m 빙 두께로 인한 해빙 열역학에서 ERA5의 구조적 한계를 반영한다. 가을과 겨울철(9월 - 2월)은 근본적으로 다른 강제력 구조를 보였다. Albedo-SIRF는 태양 복사가 부재한 극야 기간 동안 무시할 만한 수준이 되는 반면, 온도 기반 복사강제력이 표면 에너지 수지를 제어하는 지배적인 구성요소로 부상하였다. AutoML-SIRF는 2월에 $-57.66 \pm 1.84 \text{ W/m}^2$ 의 최대 크기를 기록하여 북극 겨울 조건 동안 차가운 빙면과 상대적으로 따뜻한 개방 수역 간의 상당한 열적외 복사 차이를 반영하였다. ERA5-SIRF는 가을-겨울 기간 전반에 걸쳐 체계적으로 낮은 크기를 보였으며, 역시 2월에 $-46.50 \pm 1.69 \text{ W/m}^2$ 로 정점을 기록하였다. 겨울철 최대 강제력에서의 11.16 W/m^2 차이(ERA5에서 약 24% 더 약함)는 ERA5의 온난 IST 편향이 온도 효과가 표면 에너지 수지를 지배하는 극야 기간 동안 해빙 존재의 계산된 냉각 효과를 실질적으로 감소시킴을 입증하였다.

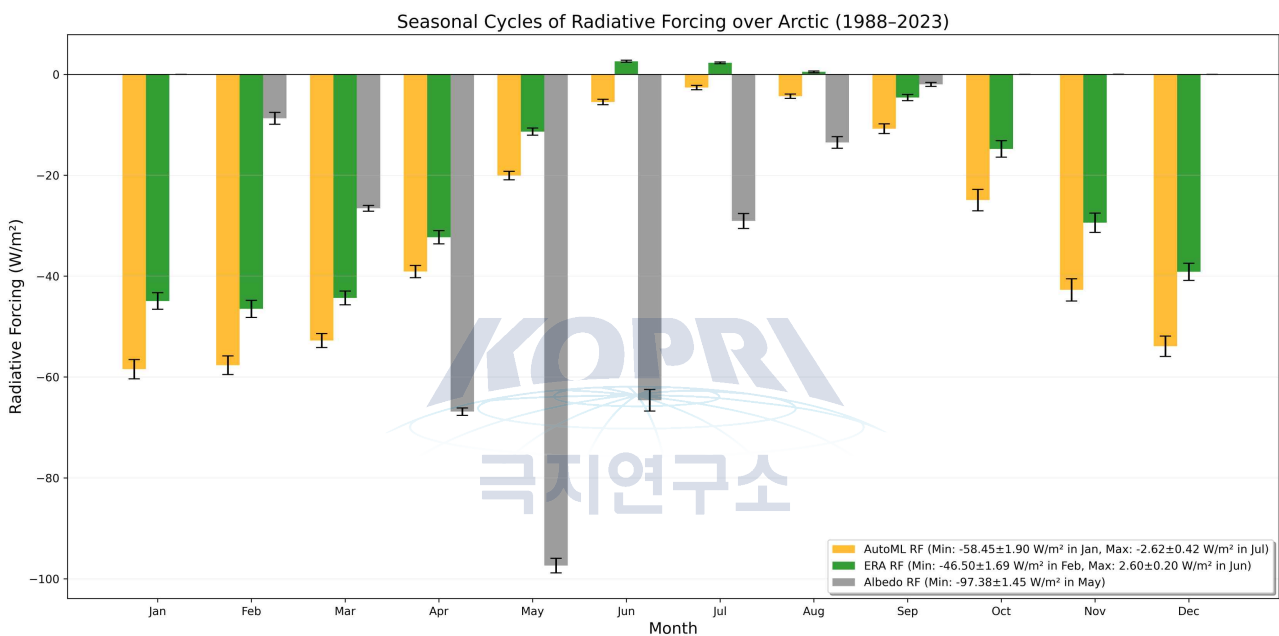


그림 32. 월별 복사강제력 평균 비교

연주기 전체에 걸쳐 AutoML-SIRF는 평균 -31.07 W/m^2 를 기록한 반면 ERA5-SIRF는 -21.82 W/m^2 로, 9.25 W/m^2 의 차이(AutoML에서 약 42% 더 강한 냉각 효과)를 나타냈다. 이러한 지속적인 과소평가는 모든 계절에 걸쳐 명백하지만 겨울철(12월 - 3월) 동안 가장 두드러지며, AutoML-SIRF가 ERA5-SIRF를 일관되게 $10 - 13 \text{ W/m}^2$ 초과하였다. 전환 계절(4월 - 5월, 9월 - 10월) 동안에도 알베도와 온도 효과가 모두 전체 SIRF에 기여할 때 AutoML-SIRF와 ERA5-SIRF 간의 격차가 상당하여, AutoML-SIRF가 ERA5-SIRF를 $6 - 8 \text{ W/m}^2$ 초과하였으며 이는 40 - 60% 더 강한 온도 강제력을 나타낸다. 태양 계절(3월 - 9월) 동안에도 평균 AutoML-SIRF (-19.31 W/m^2)는 ERA5-SIRF (-12.46 W/m^2)보다 실질적으로 강하게 유지되어, 온도 효과가 알베도 강제력(-42.85 W/m^2 평균)에 부차적일 때조차 ERA5가 빙면 온도의 복사 기여를 약 35% 체계적으로 과소평가함을 나타냈다. 전환 기간은 얼음 용해 개시와 동결의 시기를 제어하며, 이는 차례로 용해 계절의 길이와 얼음-알베도 되먹임 메커니즘의 강도를 결정하기 때문에 북극 기후에 특히 중요하다. 따라서 위성 기반과 재분석 기반

IST 산출물 간의 선택은 북극 기후 변화 메커니즘 이해와 미래 기후 궤적 예측에 중요한 의미를 갖는다.

1988 - 2023년에 걸친 월별 경향 분석 결과, AutoML-SIRF와 ERA5-SIRF가 체계적으로 다른 계절 패턴을 나타내며 온도 기반 강제력이 지배하는 겨울철에 가장 큰 차이가 발생함을 입증하였다. 겨울철(10월 - 3월)은 가장 강한 temperature-SIRF 경향을 보였으며, AutoML-SIRF는 $0.40 - 0.55 \text{ W/m}^2/\text{year}$ 를 초과하고 ERA5-SIRF는 $0.30 - 0.45 \text{ W/m}^2/\text{year}$ 범위를 기록하였다. 이러한 경향은 통계적으로 유의하며($p < 0.05$) 최대 북극 표면 기온 경향(약 0.15 K/year)과 일치하여 극야 기간 동안 복사강제력과 대기 온난화 간의 물리적 결합을 확인하였다. 뚜렷한 겨울철 강화는 더 차가운 표면이 동일한 복사 조정을 달성하기 위해 더 큰 온도 변화를 필요로 한다는 근본적인 열역학 원리를 반영한다. 북극 해빙이 더 짧고 얇아짐에 따라 겨울 동안 얼음으로 덮인 지역과 개방수역 지역 간의 온도 대비가 강화되어 해빙 손실의 복사 영향을 증폭시킨다. 대조적으로 여름철(6월 - 8월)은 더 약한 temperature-SIRF 경향(두 산출물 모두 $0.02 - 0.12 \text{ W/m}^2/\text{year}$)을 보이지만 강한 Albedo-SIRF 경향(약 $0.50 \text{ W/m}^2/\text{year}$)을 나타냈다. 이러한 계절적 비대칭은 북극 증폭을 지배하는 뚜렷한 물리 메커니즘을 반영한다. 즉, 감소된 알베도를 통한 여름 에너지 흡수는 해양 혼합층에 저장되어 가을-겨울 동안 방출되며, 최대 복사강제력 이후 수개월에 정점을 이루는 지연된 대기 온난화를 생성한다. 관측 결과와 이론적 예측 간의 일관성은 북극 증폭의 주요 동인으로서 온도 되먹임 메커니즘에 대한 검증을 제공한다.

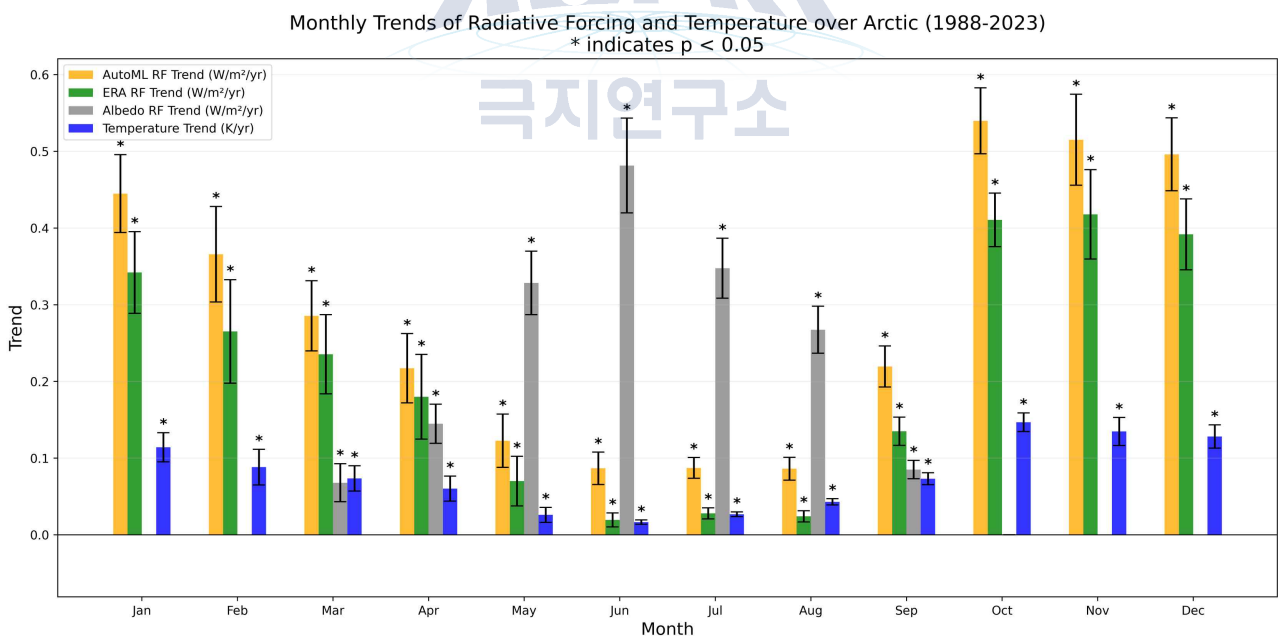


그림 33. 월별 복사강제력 변화 경향 분석

2 복사강제력 아노말리 비교 결과

1988 - 2023년 기후평균 대비 계절별 anomaly를 분석한 결과, 뚜렷한 계절적 비대칭과 명확한 체제 전환이 확인되었다. 전체 기간 동안 겨울(DJF)이 가장 강한 경향($+3.78 \text{ W/m}^2/\text{decade}$, $p < 0.001$)을 보였으며, 이어 가을(SON, $+3.32 \text{ W/m}^2/\text{decade}$, $p < 0.001$), 봄(MAM, $+1.85 \text{ W/m}^2/\text{decade}$, $p < 0.001$), 여름(JJA, $+0.65 \text{ W/m}^2/\text{decade}$, $p < 0.001$).

0.001) 순이었다. 겨울과 여름 경향 간의 5배 차이는 해빙 복사 냉각 효과의 약화가 여름 알베도 변화보다는 주로 극야 기간 동안 온도 관련 과정에 의해 구동됨을 입증한다. Pettitt 검정을 사용한 변화점 분석 결과, 모든 계절에 걸쳐 2004년에 통계적으로 유의한 체제 전환이 식별되었다($p = 1.3 \times 10^{-5}$). 이러한 전환은 북극 해빙 시스템을 더 두껍고 오래된 얼음에서 더 얇고 젊은 얼음으로 근본적으로 변화시킨 해빙 체류 시간의 문서화된 2단계 감소(2005년과 2007년)와 일치한다. 이 체제 전환은 2007년에 감지된 계절 주기 진폭의 급격하고 지속적인 증가에 의해 추가로 입증되며, 이는 증가된 경년 변동성을 가진 더 계절적인 빙 덮개로의 근본적인 전환을 반영한다. 2005년 이전 기간은 -7 에서 $+2 \text{ W/m}^2$ 범위의 영 주변 큰 진폭 진동으로 특징지어지는 반면, 2005년 이후 기간은 해빙의 냉각 효과 체계적 약화를 나타내는 지속적으로 양의 이상($+1$ 에서 $+7 \text{ W/m}^2$)을 보인다. 주목할 점은 겨울과 가을이 2005년 이전 강한 경향(각각 $+3.90$ 과 $+3.96 \text{ W/m}^2/\text{decade}$)을 보이고 2005년 이후 완화되지만(각각 $+1.11$ 과 $+1.13 \text{ W/m}^2/\text{decade}$), 중요한 차이는 경향 크기가 아니라 진동 행동에서 지속적인 양의 이상으로의 근본적인 전환에 있으며, 이는 해빙이 체계적으로 더 약한 복사 냉각을 발휘하는 새로운 체제로의 전환을 입증한다.



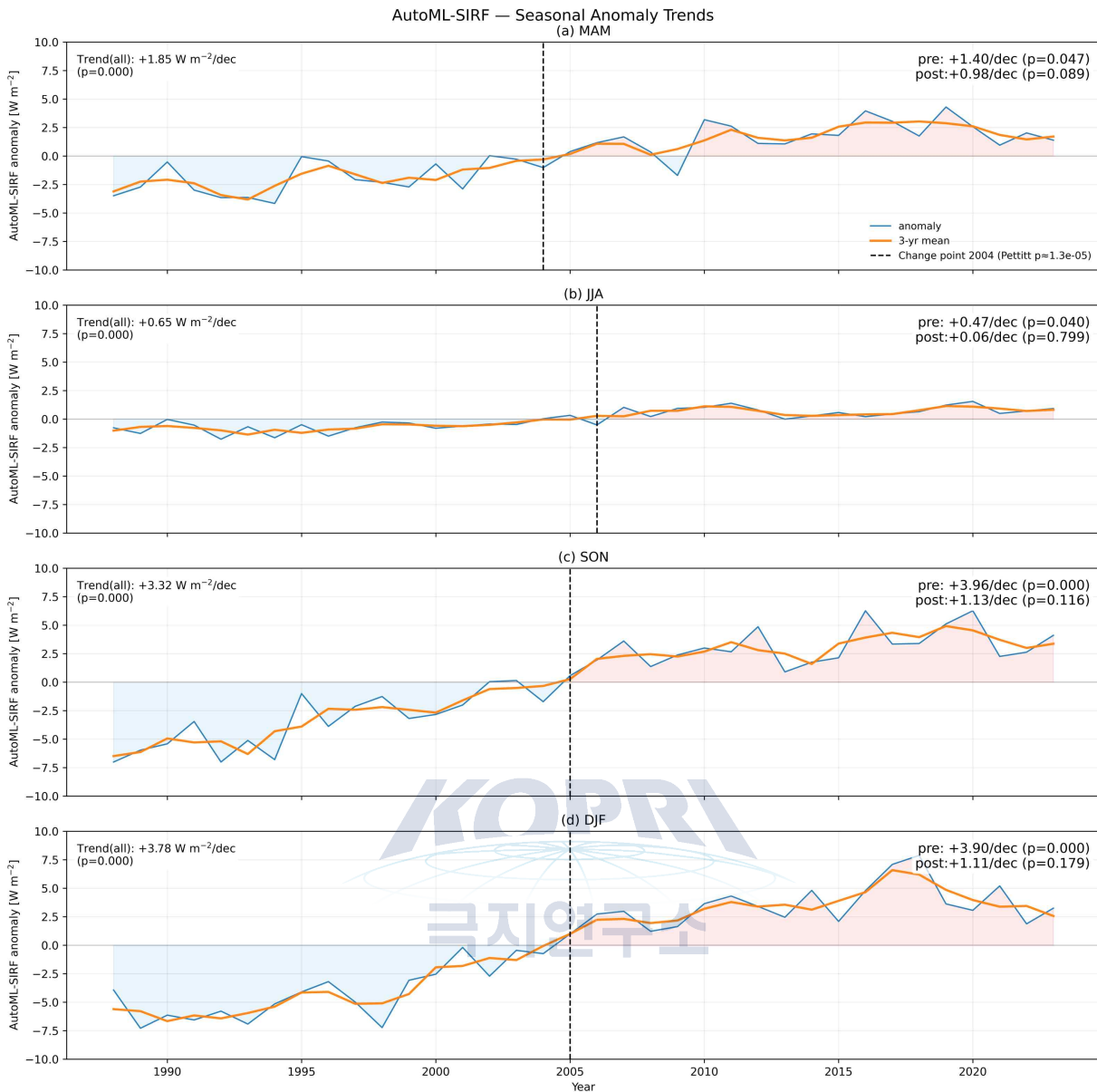


그림 34. AutoML IST 기반 복사강제력 아노말리 시계열 분석 결과

가을-겨울(SON-DJF) anomaly 패턴의 공간 분석 결과, 2005년 이전(1988 - 2004)과 2005년 이후(2005 - 2023) 기간 사이에 북극 기후 시스템의 실질적인 변화가 드러났다. 2005년 이전 기간은 Beaufort Sea와 중앙 북극 위에 집중된 강한 음의 AutoML-SIRF 이상(-5 에서 -10 W/m^2)을 보이며 평균보다 강한 해빙 냉각 효과를 나타냈다. 해당하는 SLP 이상은 북극 분지 위에 주로 저기압 패턴을 보였으며, 표면 기온 이상은 대부분 지역에 걸쳐 완만하게(-1 에서 $+1 \text{ K}$) 유지되었다. 2005년 이후 기간은 현저하게 다른 공간 구조를 나타냈다. AutoML-SIRF 이상은 유라시아 북극 전역에 걸쳐 강하게 양의 값($+5$ 에서 $+10 \text{ W/m}^2$)으로 전환되었으며, 특히 다년생 빙 손실이 가장 뚜렷했던 Barents-Kara Seas와 East Greenland 지역에서 강렬한 이상($+8$ 에서 $+12 \text{ W/m}^2$)을 기록하였다. 해빙 냉각 효과의 체계적 약화를 나타내는 이러한 양의 SIRF 이상은 Beaufort Sea 위의 강건한 고기압 anomaly($+4$ 에서 $+6 \text{ hPa}$) 및 주요 SIRF 변화를 경험하는 지역에 집중된 광범위한 표면 기온 증가($+2$ 에서 $+5 \text{ K}$)와 일치하였다. 약화된 복사 냉각, 대기 온난화, 주요 빙 손실 지역에 집중된 변화된 순환 패턴 간의 공간적

일관성은 대기 순환과 해빙 복사강제력 간의 진화하는 관계에 대한 더 상세한 조사를 동기부여하였다.

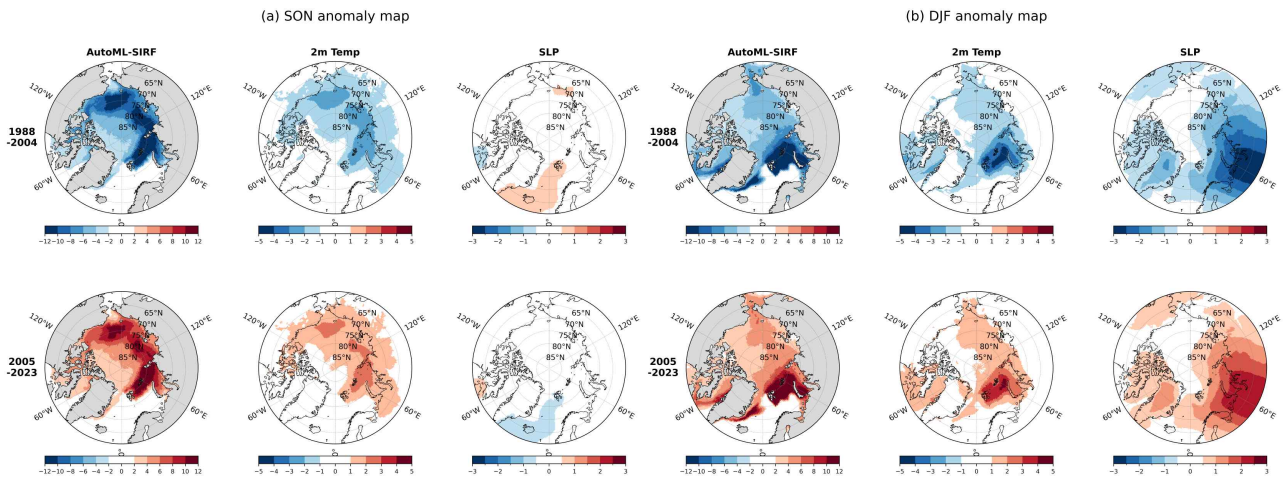


그림 35. 복사강제력, 대기온도, 표면기압 아노말리 매핑

3 대기 순환과 복사강제력

EOF 분석을 통해 1988 - 2004년과 2005 - 2023년 두 기간에 걸친 주요 대기 순환 패턴을 비교한 결과, 극적인 변화가 확인되었다. 가을(SON) EOF1은 2005년 이전 기간 동안 동부 북극(Barents, Kara, Laptev seas) 위의 고기압 패턴을 보였으나, 2005년 이후 기간에 쌍극자 구조로 전환되었다. EOF1이 설명하는 분산은 33.5%에서 27.4%로 감소하여 가을 대기 순환의 복잡성 증가를 나타냈다. 설명된 분산의 이러한 감소는 지배적인 변동성 모드가 다른 순환 패턴에 비해 약화되었음을 시사하며, 더 파편화된 대기 상태와 일치한다. 가을 EOF2는 SLP anomaly의 공간 구조에서 변화를 보였으며, 2005년 이전에는 Greenland Sea를 중심으로 한 평균 anomaly 기압 패턴을 보이다가 2005년 이후에는 향상된 압력 경도와 함께 서쪽으로 이동하여 서부 지역에 높은 압력, 동부 지역에 낮은 압력을 나타냈다. 가장 극적인 변화는 겨울에 발생하였다. EOF1은 완전한 부호 역전을 겪었다. 중앙 북극, Barents Sea, Greenland Sea 위의 저기압 anomaly(-6 hPa)으로 지배되던 2005년 이전 패턴이 2005년 이후 기간에 Greenland Sea에서 Barents, Kara, Laptev seas에 걸쳐 강한 고기압 이상($+4$ hPa)으로 전환되었다. 주목할 점은 EOF1이 설명하는 분산이 52.5%에서 62.8%로 증가하여, 부호 역전에도 불구하고 이 모드가 북극 대기 변동성을 조직화하는 데 훨씬 더 지배적이 되었음을 나타낸다. EOF2는 덜 극적인 공간 재조직을 보였지만 진폭에서 현저한 약화를 나타냈다. SLP anomaly 크기가 실질적으로 감소하여 이 부차적 모드와 관련된 변동성 감소를 시사하였다. EOF2의 이러한 약화와 EOF1의 강화 및 역전의 결합은 북극 대기 순환 체제의 근본적인 재조직을 나타낸다.

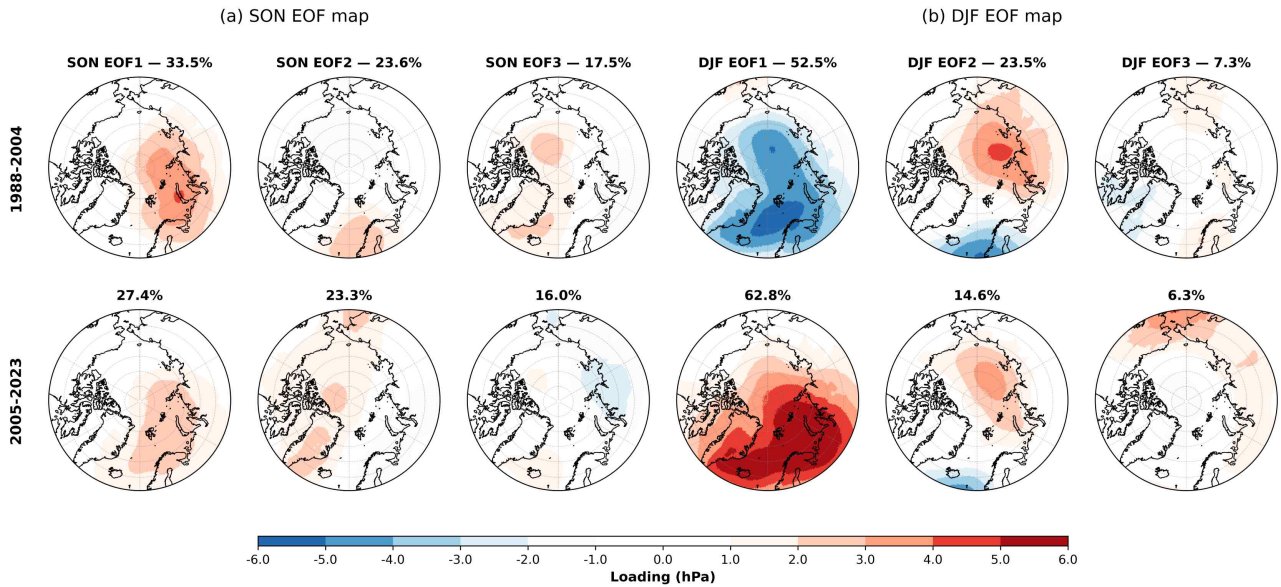


그림 36. 표면 기압 EOF 분석 결과

대기 순환 모드가 표면 복사강제력을 조절하는 방식을 정량화하기 위해 EOF 주성분과 장파 복사강제력 이상 간의 다중회귀분석을 수행하였다. 표준화된 회귀계수(β^*)는 다른 모드를 고정했을 때 주성분의 1 표준편차 변화당 복사강제력 변화($W\ m^{-2}$)를 나타낸다. 1988 - 2004년 겨울 동안 EOF1이 중앙 북극 위의 강한 저기압 이상을 나타냈을 때, 양의 β^* 값(+0.2에서 +0.4)이 Kara와 Laptev seas를 지배하였다. 이는 더 강한 저기압 이상(양의 PC1)이 복사강제력을 증가시켜 온난화 경향에 해당함을 나타낸다. 물리적 메커니즘은 저기압 조건과 관련된 향상된 구름 덮개 및 증가된 하향 장파 복사를 포함할 가능성이 있다. 주목할 점은 음의 β^* 값(-0.4에서 -0.6)이 Chukchi와 Bering seas에 나타나 양의 EOF1 위상이 복사 냉각을 강화하였으며, 이는 이러한 주변 지역에서 대기 격리 효과가 여전히 효과적임을 시사한다. 2005년 이후, EOF1 패턴이 고기압 지배로 역전되었음에도 불구하고 Kara와 Laptev seas는 양의 β^* 값을 유지하였으나 +0.1에서 +0.2로 약화되었다. 결정적으로, 이전에 강한 대기 냉각 제어를 보였던 Chukchi와 Beaufort seas는 이제 영 근처의 β^* 값을 보였다. 이러한 대기 영향의 중립화는 이 지역들이 알베도-온도 feedback이 대기 강제력을 압도하는 임계값을 넘었음을 나타낸다. 반대 순환 위상 하에서도 대서양 부문 해역에서 양의 β 가 지속되는 것은 되먹임 과정이 이제 대기 상태와 무관하게 복사 반응을 지배함을 시사한다. 태평양 부문에서 강한 음의 β 의 소멸은 이 지역들에서 거의 완전한 여름 빙 손실과 초년 빙으로의 전환과 일치한다. 지역 빙 두께가 임계 임계값 이하로 떨어지면, 시스템은 대기 순환 변동성이 더 이상 표면 복사를 효과적으로 조절할 수 없는 되먹임 고정 상태로 진입한다.

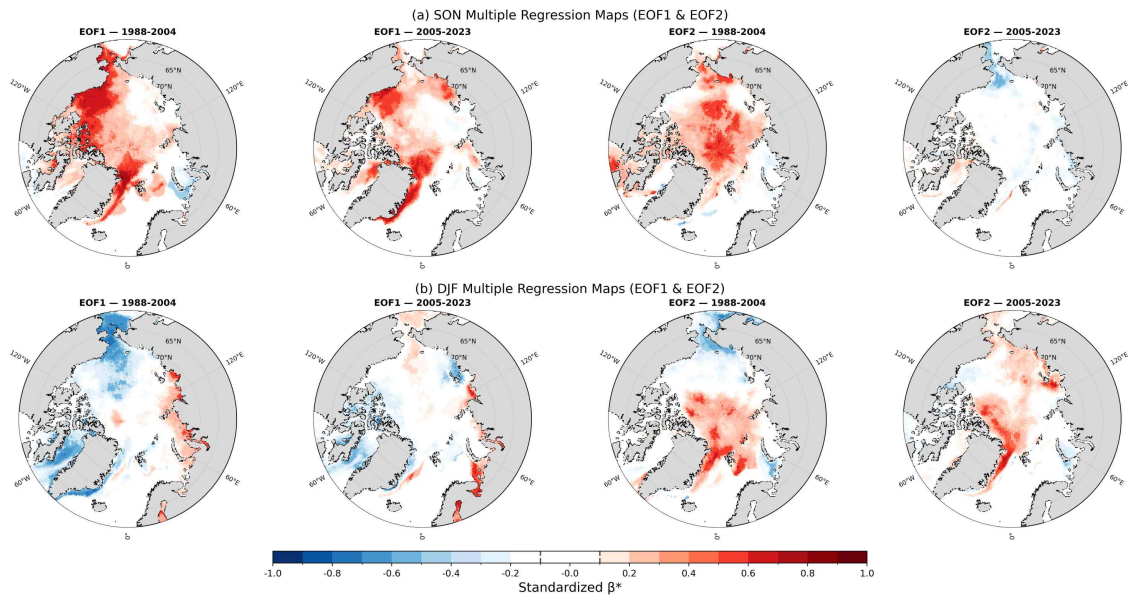


그림 37. 표면기압-복사강제력 다중회귀분석 mapping 결과

지역별 분석 결과, 주요 북극 해역에 걸쳐 향상된 북극 온난화 패턴이 확인되고 정량화되었다. Kara Sea가 가장 강한 지역 경향($0.54 \pm 0.18 \text{ W/m}^2/\text{year}$)을 보였으며, Laptev ($0.41 \pm 0.10 \text{ W/m}^2/\text{year}$)와 Chukchi Seas ($0.42 \pm 0.09 \text{ W/m}^2/\text{year}$)가 뒤를 이었다. 시베리아 대륙붕 해역은 일관되게 북극 평균을 초과하여 해빙 감소가 대규모 대기 순환 변화로부터의 증가된 장파 복사에 의해 지배되는 증폭 핫스팟으로서의 역할을 확인하였다. Barents Sea는 높은 평균 경향을 보이지만 예외적인 공간 변동성($\pm 0.25\text{--}0.37 \text{ W/m}^2/\text{year}$)을 나타냈으며, 이는 해양-대기 현열 속을 강화하고 극단적인 겨울 대기 온난화를 야기하는 따뜻한 대서양 수의 증가된 북향 수송에 의해 구동된다. 이러한 결과는 북극 온난화가 공간적으로 균일하지 않으며 특정 지역, 특히 대서양 및 태평양 영향을 받는 해역이 북극 기후 시스템의 전반적인 변화를 주도함을 입증한다.

복사강제력 분석을 넘어 복사 되먹임 매개변수(λ)의 공간적 분포와 시간적 변화를 정량화한 결과, 2005년 체제 전환을 경계로 북극 되먹임 메커니즘의 근본적인 재구성이 확인되었다. 복사 되먹임 매개변수는 표면 온도 변화당 대기 상단 복사 플럭스 변화를 나타내며($\text{W/m}^2/\text{K}$), 양의 값은 증폭 되먹임(온난화를 강화), 음의 값은 감쇠 되먹임(온난화를 약화)을 의미한다. 1988-2023년 전체 기간에 걸쳐 알베도 되먹임(λ_{Albedo})은 북극 전역에서 약한 양의 값($0\text{--}4 \text{ W/m}^2/\text{K}$)을 보이며, 특히 태평양 부문(Chukchi, Beaufort seas)과 대서양 부문(Barents, Kara seas)에서 상대적으로 강한 양의 되먹임이 관찰되었다. 온도 되먹임($\lambda_{\text{Temperature}}$)은 더욱 강한 양의 값($2\text{--}6 \text{ W/m}^2/\text{K}$)을 나타내며 중앙 북극과 시베리아 대륙붕 해역에서 특히 두드러졌다. 순 복사 되먹임(λ_{Total})은 알베도와 온도 효과를 결합하여 북극 전역에서 강한 양의 되먹임($4\text{--}8 \text{ W/m}^2/\text{K}$)을 보여 북극 증폭의 자기 강화 특성을 입증하였다. 2005년 이전 기간(1988-2004)은 뚜렷한 공간 패턴을 보였다. 알베도 되먹임은 중앙 북극과 캐나다 군도를 중심으로 강한 양의 값($4\text{--}8 \text{ W/m}^2/\text{K}$)을 기록하였으며, 이는 다년생 빙이 지배적인 지역에서 알베도 변화가 복사 수지에 큰 영향을 미쳤음을 나타낸다. 온도 되먹임 역시 중앙 북극, Beaufort Sea, East Siberian Sea에서 매우 강한 양의 값($6\text{--}8 \text{ W/m}^2/\text{K}$)을 나타냈다. 순 복사 되먹임은 거의 전 북극에 걸쳐 강한 양의 값($6\text{--}8 \text{ W/m}^2/\text{K}$)을 보이

며, 특히 중앙 북극에서 최대 되먹임이 집중되었다. 이는 2005년 이전 북극이 매우 강한 증폭 되먹임 체제 하에 있었음을 의미한다.

2005년 이후 기간(2005-2023)은 극적으로 변화된 공간 구조를 나타냈다. 알베도 되먹임은 전반적으로 약화되었으며, 특히 태평양 부문에서 약한 양의 값($0-2 \text{ W/m}^2/\text{K}$) 또는 일부 지역에서 약한 음의 값이 나타났다. 이는 해빙이 이미 크게 감소한 지역에서 추가적인 알베도 변화의 여지가 줄어들었음을 시사한다. 반면 대서양 부문(Barents, Kara seas)은 여전히 양의 알베도 되먹임($2-4 \text{ W/m}^2/\text{K}$)을 유지하여 이 지역이 현재 진행 중인 해빙 감소의 주요 무대임을 나타낸다. 온도 되먹임은 공간적으로 재배치되었으며, 중앙 북극에서는 다소 약화된 반면 주변 해역, 특히 Kara와 Laptev seas에서는 강한 양의 값($4-8 \text{ W/m}^2/\text{K}$)을 유지하거나 강화되었다. 순 복사 되먹임은 여전히 양의 값을 보이지만 공간적 불균일성이 증가하였으며, 중앙 북극에서는 약화되고 주변 해역에서는 강화되는 패턴을 나타냈다.

체제 전환에 따른 변화($\Delta\Delta$)는 복잡한 공간 패턴을 보였다. 알베도 되먹임 변화는 대부분 지역에서 음의 값(파란색, -4 에서 $0 \text{ W/m}^2/\text{K}$)을 나타내어 알베도 되먹임이 전반적으로 약화되었음을 확인하였다. 특히 Chukchi Sea, Beaufort Sea, 동그린란드 해역에서 가장 큰 감소(-3 에서 $-4 \text{ W/m}^2/\text{K}$)가 관찰되었으며, 이는 이 지역들에서 여름 해빙이 거의 소멸하여 추가적인 알베도 변화의 잠재력이 고갈되었음을 나타낸다. 온도 되먹임 변화는 더욱 복잡한 공간 패턴을 보였다. Barents와 Kara seas에서는 강한 양의 변화(빨간색, $+2$ 에서 $+4 \text{ W/m}^2/\text{K}$)가 나타나 이 지역에서 온도 되먹임이 강화되었음을 보여주는 반면, Beaufort Sea와 캐나다 군도 일부에서는 음의 변화(파란색, -2 에서 $-4 \text{ W/m}^2/\text{K}$)가 관찰되었다. 순 복사 되먹임 변화는 지역에 따라 증가와 감소가 혼재하였으나, 대서양 부문에서는 주로 양의 변화를, 태평양 부문에서는 주로 음의 변화를 나타냈다.

이러한 공간 패턴 변화는 북극 되먹임 메커니즘의 근본적인 재구성을 시사한다. 2005년 이전에는 중앙 북극과 다년생 빙 지역이 되먹임의 중심지였으나, 2005년 이후에는 되먹임이 주변 해역, 특히 대서양 영향 지역으로 이동하였다. 태평양 부문에서 알베도 되먹임이 약화된 것은 이 지역이 이미 계절적 빙 체제로 전환되어 여름철 거의 완전한 빙 제거 상태에 도달하였기 때문이다. 반면 대서양 부문에서 온도 되먹임이 강화된 것은 따뜻한 대서양 수의 유입 증가와 해빙-해양 상호작용 강화를 반영한다. 중앙 북극에서 되먹임이 약화된 것은 두꺼운 다년생 빙에서 얇은 초년생 빙으로의 전환으로 인해 빙면 온도 변동성이 변화하고 알베도 대비가 감소했기 때문으로 해석된다. 이러한 결과는 북극 증폭이 단순히 강화되는 것이 아니라 공간적으로 재배치되고 있으며, 서로 다른 되먹임 메커니즘의 상대적 중요성이 지역과 시기에 따라 변화하고 있음을 보여준다. 특히 알베도 되먹임이 포화 상태에 접근하는 지역에서는 온도 되먹임과 해양 열속 변화가 미래 북극 기후 변화를 주도할 것으로 예상되며, 이는 기후 모델 개선과 미래 예측에 중요한 의미를 갖는다.

1988년부터 2023년까지의 해빙 복사강제력 분석 결과, 북극 기후 시스템이 근본적인 체제 전환을 경험하였음이 명확히 드러났다. AutoML 기반 IST를 사용한 Temperature-SIRF는 기존에 널리 연구된 Albedo-SIRF보다 더 강한 증가 경향을 보였으며(0.29 vs $0.13 \text{ W/m}^2/\text{year}$), 특히 겨울철에 복사강제력이 집중되어 온도 기반 되먹임이 북극 증폭의 주요 동인임을 확인하였다. ERA5 재분석 자료의 온난 편향으로

인한 Temperature-SIRF 과소평가(약 35-42%)는 재분석 기반 평가가 해빙의 기후 역할을 실질적으로 저평가할 수 있음을 시사한다. 2005년 전후의 뚜렷한 체제 전환은 해빙 체류 시간 감소, 얼음 연령 및 두께 감소와 일치하며, 대기 순환 패턴의 극적인 재조직을 동반하였다. 특히 대기 순환이 복사강제력을 조절하는 능력이 현저히 약화되어, 특정 지역(Beaufort, Chukchi seas)에서는 거의 완전히 상실되었으며, 이는 시스템이 대기 제어에서 되먹임 지배 역학으로 전환되었음을 나타낸다. 이러한 결과는 북극 기후 변화 메커니즘에 대한 이해를 심화시키며, 미래 기후 예측과 정책 결정을 위한 중요한 함의를 제공한다.

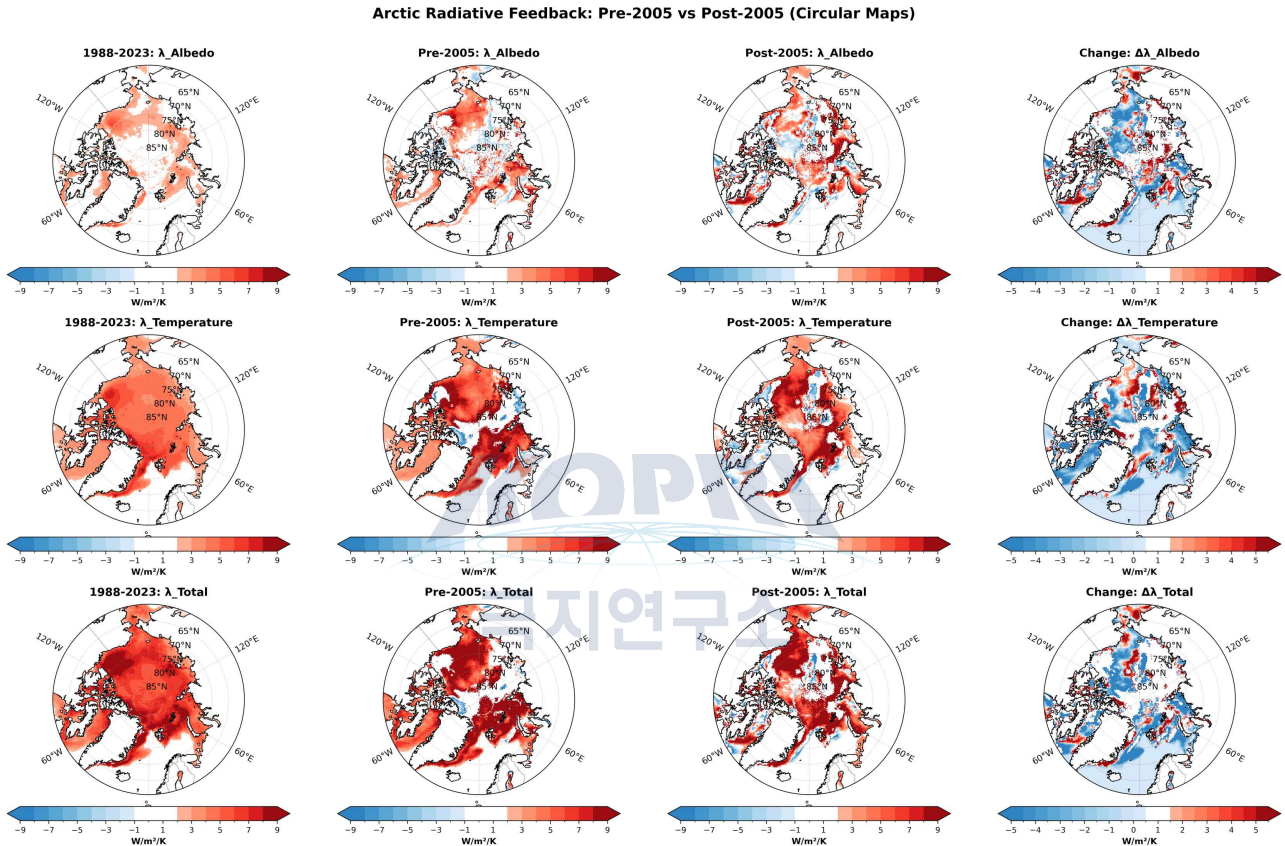


그림 38. Albedo & Temperature Feedback 분석 (2005년 전,후)

연구개발목표 달성도 및
극지연구소 대외기여도

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표의 달성도

1 연구 성과목표 및 달성도

전체 연구 기간의 성과목표에 따른 세부목표와 달성 주요 내용, 그리고 그에 따른 달성도를 수치화한 것이다.

표 9. 연구개발 목표 및 달성도

성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도(%)
위성/ 재분석자료를 활용한 북극 복사강제력 산출	북극 지역의 복사강제력 산출 기준 제시	- 선진기관 및 선행 연구에서 수행된 위성기반 복사강제력 산출 조건 정리 - 북극 지역의 복사강제력 산출의 기준 제시	100%
	북극 복사강제력산출을 위한 자료 수집 및 전처리	- 충분한 기간의 자료 취득 - 극지방에 최적화된 projection으로 변환 - Quality control을 이용한 최적 자료 sampling	100%
	북극 지역의 복사강제력 산출	- 북극 지역에 최적화된 복사강제력 산출	100%
관측자료를 바탕으로 Radiative Kernel 평가	Radiative Kernel 추가 확보 및 특성 비교	- Radiative Kernel 추가 자료 수집 - 각 모델별 시공간 차이 비교	100%
	관측자료와 Raditive Kernel 자료 평가	- 지표변화(Albedo, Surface Temperature)에 따른 커널 기반 TOA Flux 변화량 산출 - 관측기반 TOA radiation과 패턴 비교	100%

북극 지역의 해빙에 따른 복사강제력 시공간 특성 분석	Albedo, Surface Temperature 기반 복사강제력 통합 및 분석	- 두가지 요인(Albedo, Surface Temperature) 통합하여 복사강제력 평가	100%
	계절에 따른 주도적(Albedo, Surface Temperature) 요인 분석	월별 해빙 변화량에 따른 복사강제력 특성 분석 계절에 따른 주도적 요인 파악	100%
	지역에 따른 복사강제력 특성 파악	Warming에 대해 주도적 역할 하는 해역 경향성 파악	100%
DNN 기반 해빙표면온도 산출	IST 산출을 위한 입력자료 선정	북극의 해빙표면온도와 밀접한 변수 선정 MODIS IST와의 변수별 상관관계 분석	100%
	DNN기반 모델 구축	입력자료 및 hyperparameter 에 따른 모델 정확도 분석 Deep Neural Network (DNN)기반의 IST 산출 모델 구축	100%
	타 위성 / In-situ 자료를 활용한 모델 평가	타 위성(MODIS IST)자료를 활용하여 DNN기반 IST 분포특성 분석 CREEL-Mass Balance Buoy 자료의 표면온도와 검증 수행	100%
DNN 기반 IST를 활용한 복사강제력 산출 및 평가	DNN 기반 IST를 바탕으로 복사강제력 산출	DNN기반 IST를 바탕으로 온도기반 복사강제력(Temperature-SIRF) 산출	100%
	표면온도 자료에 따른 복사강제력 차이 분석	2차년도 연구결과(표면온도 자료로 ERA5 사용)와 당해연도 산출된 복사강제력 비교 및 평가	100%

AI기반 IST 원형 알고리즘 개발	IST 산출을 위한 입력자료 선정	북극의 해빙표면온도와 관련 있는 기상인자 List-up 입력변수 상관성, 독립성 평가를 통한 입력자료 후보 선정	100%
	IST 산출을 위한 위성기반 및 재분석 자료 수집 및 전처리	장기간 연구를 위한 충분한 기간의 자료 취득 및 projection 변환 최적의 입력자료 sampling을 위한 quality control	100%
	AI기반 IST 알고리즘 구축(1)	선행연구를 바탕으로 북극 연구 및 시계열 Gap-filling에 활용된 AI 기반 알고리즘 구축(I)	100%
AI 기반 IST 알고리즘 평가	AI기반 IST 알고리즘 구축(2)	선행연구를 바탕으로 북극 연구 및 시계열 Gap-filling에 활용된 AI 기반 알고리즘 구축(II)	100%
	각 알고리즘에 따른 북극 지역의 IST 시공간 특성 분석	북극권 지역을 중심으로 알고리즘에 따른 연구기간 동안의 IST 특성 분석 다양한 해역 / 계절 / 기상인자에 따른 시·공간 특성 분석	100%
	현장자료 및 타 위성자료를 활용한 AI 기반의 IST 산출물 자료 검증/비교	타 위성자료 및 현장 관측자료와의 비교/검증을 통하여 AI 기반의 IST 산출물 정확도 제시 해역 및 계절에 따른 특징 분석 수행	100%

복사강제력 기반 Feedback 평가	최종 선택된 AI 기반의 IST를 바탕으로 복사강제력 산출	최종 선택된 IST 산출물을 바탕으로 해빙 변화에 따른 복사강제력 산출	100%
	1단계 연구결과(복사강제력) 과 비교 및 특성 분석	1단계에서 제시한 복사강제력과의 비교 및 계절, 지역에 따른 특성 분석	100%
	복사강제력을 활용한 Feedback 평가	복사강제력을 활용하여 Feedback 산출 및 선행연구와 비교	100%

2 연구 성과목표 및 평가의 착안점

표 10. 성과 목표 및 착안점

년도		성과목표	세부목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1 단계	1차년도 (2020)	위성/ 재분석자료 를 활용한 북극 복사강제력 산출	북극 지역의 복사강제력의 산출 기준 제시	30	- 3개 이상의 기관 조사
			북극 복사강제력 산출을 위한 자료 수집 및 전처리	25	- 다양한 변수 수집 - QC 자료사용
			북극 지역의 복사강제력 산출	45	- 10년 이상의 자료 생성 - 학술회의 발표
	2차년도 (2021)	관측자료를 바탕으로 Radiative Kernel 평가	Radiative Kernel 추가 확보 및 특성 비교	10	- 3개 이상의 Radiative Kernel 자료 확보
			관측자료와 Raditive Kernel 자료 평가	10	- 정량적인 score
		북극 지역의 해빙에 따른 복사강제력 시공간 특성 분석	Albedo, Surface Temperature 기반 복사강제력 통합 및 분석	30	- 10년 이상의 자료 생성 - 학술회 발표 - 정량적인 score
			계절에 따른 주도적(Albedo, Surface Temperature) 요인 분석	25	

2 단계	3차년도 (2022)		지역에 따른 복사강제력 특성 파악	25	
		DNN기반 해빙표면온 도 산출	IST 산출을 위한 입력자료 선정	20	- 선행연구 활용 여부 조사
			DNN기반 모델 구축	30	- 정량적인 score - 학술대회 발표
			타 위성 / In-situ 자료를 활용한 모델 평가	20	
		DNN기반 IST를 활용한 복사강제력 산출 및 평가	DNN기반 IST를 바탕으로 복사강제력 산출	10	- 정량적인 score - 10년 이상의 자료
			표면온도(ERA5, DNN기반 IST) 자료에 따른 복사강제력 차이 분석	20	- 정량적인 score - 10년 이상의 자료
	1차년도 (2023)	위성/ 재분석자료 를 활용한 북극 해빙표면 온도 산출	북극 해빙표면온도 산출을 위한 기상인자 수집	30	- 결측 없는 자료
			북극 해빙표면온도 산출을 위한 자료 수집 및 전처리	25	- 다양한 변수 수집 - QC 자료사용
			AI기반 해빙표면온도 산출	45	- 학술회의 발표
	2차년도 (2024)	AI기반 장기간 해빙표면온 도 산출	AI 기반 IST 알고리즘 구축	30	- 장기간 산출 안정성
			산출 정확도 및 Validation을 통한 정확도 제시	35	- 타기관 자료를 통한 비교 및 검증 - 학술회의 발표
			북극 지역의 IST 시공간 특성 분석	35	- 학술회의 발표
	3차년도 (2025)	복사강제력 기반 Feedback 평가	최종 복사강제력 산출 및 비교	40	- 1단계 연구 비교 결과 - 30년 이상 자료 생성
			계절적 지역적 평가 진행	30	- 주도적 해역 분석 - 계절적 평가 결과
			해빙 표면 변화에 따른 Feedback 산출 및 평가	30	- 선행연구와 정량적 비교 - 학술회의 발표

제 2 절 대외기여도

1 학술 분야

본 연구는 아래와 같은 학술적 분야에 기여가 가능하다.

- 극지방 복사강제력의 변화 경향을 분석함으로써 기후변화 연구에서 다양한 참고자료로 활용 가능
- 에너지 자료의 품질 분석을 통하여 연구지역의 최적화된 자료의 적용 및 분류
- 대부분의 복사강제력 연구는 모델 기반으로 2.5~3°의 낮은 공간 해상도로 산출되지만 본 연구는 복사강제력의 경우 위성 기반 자료를 활용하여 비교적 높은 공간 해상도를 제공 가능
- 모델 자료보다 높은 공간 해상도를 가지고 있어서 지역적인 규모의 기후 연구에 있어서 적합한 입력 자료 제공 가능
- 북극 지역의 복사강제력 자료는 북극 빙권 변화 표현하는 중요한 속성자료로 활용할 수 있으며 이를 이용하여 북극 빙권 변화특성 이해 가능

2 경제 분야

본 연구의 결과는 아래와 같은 경제적 효과를 기대할 수 있다.

- 극한 기후 지역의 경우 현장관측 자료와 비교하면 위성 기반 자료는 취득 및 사용이 쉬우므로 실측 시 발생하는 기회비용에 비해 고효율의 자료 이용 가능
- 북극 지역의 변동 예측 자료로써 활용 가능하며 이를 활용하여 북극 지역의 변화에 따른 중위도 지역의 기후예측이 가능 및 이상기후 대비를 위한 기반 자료로 활용
- 극지 기후의 정확한 이해는 국가 기후변화 대응 전략 수립에 과학적 근거 제공
- 위성 기반의 복사강제력 자료는 전 지구적인 기후변화로 인한 생태계 변화 관측에 있어 중요한 요소이며, 이를 활용하여 국가 정책 수립에 있어 요구되는 높은 신뢰성을 가진 자료 산출 가능
- IPCC 보고서에 따르면 표면 특징의 변화에 따른 복사강제력의 정량화는 매우 어려우며 낮은 과학적 이해도를 나타내지만, 위성 기반 자료를 활용한 본 연구의 결과물을 바탕으로 문제점 개선 가능

연구개발결과의 활용계획



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 추가연구의 필요성

해빙표면온도와 다른 해빙 특성 산출물의 통합 분석이 요구된다. 본 연구는 IST에 초점을 맞추었으나, 북극 해빙 시스템의 포괄적 이해를 위해서는 해빙 두께, 해빙 농도, 해빙 연령, 적설 깊이, 융해 웅덩이 비율 등 다양한 해빙 특성 산출물과의 통합 분석이 필수적이다. 특히 해빙 두께는 열전도 특성을 통해 IST에 직접적인 영향을 미치며, 적설 깊이는 단일 효과를 통해 빙면 온도와 복사 수지를 조절한다. 해빙 연령과 유형(초년생 빙, 다년생 빙)에 따라 알베도와 열적 특성이 크게 달라지므로, 이러한 변수들을 IST 및 복사강제력과 결합하여 분석하면 북극 기후 변화의 물리적 메커니즘을 더욱 정확히 규명할 수 있다. 또한 여러 산출물 간의 상호 일관성 검증은 통해 개별 산출물의 불확실성을 감소시키고, 해빙 상태 변화에 대한 종합적인 진단 체계를 구축할 수 있을 것이다. 이러한 다변수 통합 접근법은 기후모델 검증, 해빙 예측 시스템 개선, 북극 기후 되먹임 정량화에 기여할 것으로 기대된다.

제 2 절 타 연구에의 응용

AutoML 기반 해빙표면온도 산출 기술과 복사강제력 분석 결과는 북극 항로 연구 및 운영에 직접적으로 활용될 수 있다. 극야 기간을 포함한 연중 연속적인 IST 자료는 해빙의 열적 상태를 실시간으로 모니터링할 수 있게 하며, 이는 해빙 강도 및 안정성 평가의 핵심 정보가 된다. 특히 본 연구에서 밝혀진 계절별 복사강제력 특성은 해빙 융해 개시 시기와 동결 시작 시점을 예측하는 데 중요한 물리적 근거를 제공한다. 봄철(4-5월) 단파 복사강제력의 급격한 증가와 가을철(9-10월) 온도 기반 복사강제력의 변화 패턴은 항해 가능 시기의 시작과 종료를 예측하는 지표로 활용될 수 있다. 또한 지역별 복사강제력 변화 분석 결과는 북극 항로의 주요 구간인 Kara Sea, Laptev Sea, Chukchi Sea 등에서 서로 다른 해빙 감소 속도와 계절 특성을 보여주며, 이는 항로별 최적 운항 시기 선정과 경로 계획 수립에 활용될 수 있다. 2005년 이후 체제 전환으로 인한 해빙의 젊고 얇은 상태로의 변화는 여름철 항해 가능 기간이 연장되고 있음을 시사하지만, 동시에 해빙 변동성 증가로 인한 예측 불확실성도 커지고 있어 실시간 해빙 모니터링의 중요성이 더욱 강조된다. 본 연구의 AutoML IST를 실시간 위성 자료 처리 시스템에 통합하면 북극 항로를 운항하는 선박에 현재 해빙 상태와 단기 변화 전망을 제공하는 의사결정 지원 시스템을 구축할 수 있으며, 장기적으로는 기후 변화에 따른 북극 항로의 개설 시기 연장 추세를 정량적으로 평가하여 항로 개발 및 인프라 투자 계획 수립에 과학적 근거를 제공할 수 있다.

연구개발과정에서 수집한
해외과학기술정보

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구는 북극의 해빙변화에 따른 복사강제력 산출에 관한 연구로써 다양한 접근방법이 존재하였다. 그중에서 본 연구에서 사용한 Sea Ice Radiative Forcing은 radiative kernel을 이용하는 방법이다. 본 연구에서는 Albedo-SIRF와 Temperature-SIRF 2가지를 산출하였으나 해외 연구에서는 Albedo를 기반으로 빙권 변화에 따른 복사강제력을 산출하였다.

Flanner et al.(2011)은 1979년부터 2008년까지 북극을 포함한 북극권의 영역에서 빙권 변화에 의한 복사강제력을 산출하였다. land albedo는 MODIS MCD43C3 collection 5 자료를 사용하였으며, sea ice albedo는 AVHRR APP, surface albedo radiative kernel은 CAM3 자료를 사용했다. 해당 연구에서는 빙권의 냉각효과가 $0.15 \sim 0.32 \text{ W/m}^2$ 감소하였다.

Cao et al.(2015)와 Cao et al.(2016)의 연구에서는 1982년부터 2009년까지 북극권에 대한 SIRF 연구를 수행했다. 해당 연구에서는 총 5가지 surface albedo 자료를 사용했다: Cloud, Albedo, and Radiation dataset, AVHRR based, version 1 (CLARA-A1), European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Interim Reanalysis (ERA-Interim), Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications (MERRA), National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System Reanalysis (CFSR), Japanese 55-Year Reanalysis (JRA-55). surface albedo radiative kernel은 2가지를 사용했다: Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Atmosphere Model 2 (GFDL AM2) and NCAR CAM3. 북반구 기준으로 SIRF는 CLARA-A1 자료를 바탕으로 albedo-SIRF를 산출하였을 때 해빙 감소로 인하여 $0.20 \pm 0.05 \text{ W/m}^2$ 증가 경향이 나타났다. surface albedo 자료에 따라 SIRF는 최대 26 W/m^2 차이가 발생했다.

Pistone et al.(2014)는 북위 60도 이상인 북극 해역에 대해 albedo-SIRF를 산출하였다. 해당 연구는 2000년부터 2011년 까지 Clouds and Earth's Radiant Energy System (CERES)의 planetary albedo 자료를 바탕으로 수행되었다. 북반구에서 해빙 감소로 인하여 0.43 의 $\text{SIRF} \pm 0.07 \text{ W/m}^2$ 변화가 발생하였다.

Marcianesi et al.(2021)는 북위 48.5도 이상인 지역에 한하여 CERES Energy Balanced And Filled (EBAF) 자료를 활용하여 연구를 수행하였다. 1982년부터 2015년까지 북극 해역에 연간 $1.82 \pm 0.07 \text{ W/m}^2$ 의 일사량이 증가하여 sea ice albedo의 변화를 야기한다고 발표하였다.



참고 문헌

제 7 장 참고문헌

- Hall, A. The role of surface albedo feedback in climate. *J. Clim.* 17, 1550 - 1568 (2004).
- Bony, S. et al. How well do we understand and evaluate climate change feedback processes? *J. Clim.* 19, 3445 - 3482 (2006).
- Goosse, H. et al. Quantifying climate feedbacks in polar regions. *Nat. Commun.* 9, 1919 (2018)
- Thackeray, C. W., & Hall, A. (2019). An emergent constraint on future Arctic sea-ice albedo feedback. *Nature Climate Change*, 9(12), 972-978.
- Flanner, M. G., Shell, K. M., Barlage, M., Perovich, D. K., & Tschudi, M. A. (2011). Radiative forcing and albedo feedback from the Northern Hemisphere cryosphere between 1979 and 2008. *Nature Geoscience*, 4(3), 151-155.
- Cao, Y., Liang, S., Chen, X., & He, T. (2015). Assessment of sea ice albedo radiative forcing and feedback over the Northern Hemisphere from 1982 to 2009 using satellite and reanalysis data. *Journal of Climate*, 28(3), 1248-1259.
- Xiao, L., Che, T., Chen, L., Xie, H., & Dai, L. (2017). Quantifying snow albedo radiative forcing and its feedback during 2003 - 2016. *Remote Sensing*, 9(9), 883.
- Chen, X., Liang, S., & Cao, Y. (2016). Satellite observed changes in the Northern Hemisphere snow cover phenology and the associated radiative forcing and feedback between 1982 and 2013. *Environmental Research Letters*, 11(8), 084002.
- Chen, X., Yang, Y., & Yin, C. (2021). Contribution of Changes in Snow Cover Extent to Shortwave Radiation Perturbations at the Top of the Atmosphere over the Northern Hemisphere during 2000 - 2019. *Remote Sensing*, 13(23), 4938.
- Chen, X., Liang, S., Cao, Y., He, T., & Wang, D. (2015). Observed contrast changes in snow cover phenology in northern middle and high latitudes from 2001 - 2014. *Scientific reports*, 5(1), 1-9.
- Cao, Y., Liang, S., He, T., & Chen, X. (2016). Evaluation of four reanalysis surface albedo data sets in Arctic using a satellite product. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(3), 384-388.

Pistone, K., Eisenman, I., & Ramanathan, V. (2014). Observational determination of albedo decrease caused by vanishing Arctic sea ice. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3322–3326.

Marcianesi, F., Aulicino, G., & Wadhams, P. (2021). Arctic sea ice and snow cover albedo variability and trends during the last three decades. *Polar Science*, 28, 100617.

Wang, X. & Key, J. R. Arctic surface, cloud, and radiation properties based on the AVHRR polar pathfinder dataset. Part I: Spatial and temporal characteristics. *J. Clim.* 18, 2558–2574 (2005).

Shell, K. M., Kiehl, J. T. & Shields, C. A. Using the radiative kernel technique to calculate climate feedbacks in NCAR's community atmospheric model. *J. Clim.* 21, 2269–2282 (2008).

Kumar, A., Perlwitz, J., Eischeid, J., Quan, X., Xu, T., Zhang, T., ... & Wang, W. (2010). Contribution of sea ice loss to Arctic amplification. *Geophysical Research Letters*, 37(21).

Serreze, M. C., & Barry, R. G. (2011). Processes and impacts of Arctic amplification: A research synthesis. *Global and planetary change*, 77(1–2), 85–96.

Haine, T. W., & Martin, T. (2017). The Arctic-Subarctic sea ice system is entering a seasonal regime: Implications for future Arctic amplification. *Scientific reports*, 7(1), 1–9.

Pithan, F., & Mauritsen, T. (2014). Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature geoscience*, 7(3), 181–184.

Soden, B. J., Held, I. M., Colman, R., Shell, K. M., Kiehl, J. T., and Shields, C. A.: Quantifying Climate Feedbacks Using Radiative Kernels, *J. Climate*, 21, 3504 – 3520, 2008.

Pendergrass, A. G., Conley, A., & Vitt, F. M. (2018). Surface and top-of-atmosphere radiative feedback kernels for CESM-CAM5. *Earth System Science Data*, 10(1), 317–324.

Block, K., & Mauritsen, T. (2013). Forcing and feedback in the MPI ESM LR coupled model under abruptly quadrupled CO₂. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(4), 676–691.

Smith, C. J., Kramer, R. J., Myhre, G., Forster, P. M., Soden, B. J., Andrews, T., ... & Watson Parris, D. (2018). Understanding rapid adjustments to diverse forcing

agents. *Geophysical Research Letters*, 45(21), 12–023.

Smith, C. J., Kramer, R. J., & Sima, A. (2020). The HadGEM3-GA7. 1 radiative kernel: the importance of a well-resolved stratosphere. *Earth System Science Data*, 12(3), 2157–2168.

Seo, M., Kim, H. C., Lee, K. S., Seong, N. H., Lee, E., Kim, J., & Han, K. S. (2020). Characteristics of the Reanalysis and Satellite-Based Surface Net Radiation Data in the Arctic. *Journal of Sensors*, 2020. . *Nature communications*, 10(1), 1–13.

Bliss, A. C., Steele, M., Peng, G., Meier, W. N., & Dickinson, S. (2019). Regional variability of Arctic sea ice seasonal change climate indicators from a passive microwave climate data record. *Environmental Research Letters*, 14(4), 045003.

Bintanja, R., & Van der Linden, E. C. (2013). The changing seasonal climate in the Arctic. *Scientific reports*, 3(1), 1–8.

Karlsson, K. G., Anttila, K., Trentmann, J., Stengel, M., Fokke Meirink, J., Devasthale, A., ... & Hollmann, R. (2017). CLARA-A2: the second edition of the CM SAF cloud and radiation data record from 34 years of global AVHRR data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(9), 5809–5828.

Riihelä, A., Laine, V., Manninen, T., Palo, T., & Vihma, T. (2010). Validation of the Climate-SAF surface broadband albedo product: Comparisons with in situ observations over Greenland and the ice-covered Arctic Ocean. *Remote Sensing of Environment*, 114(11), 2779–2790.

Climate Data Store. ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Available online: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview>

Lindsay, R.; Wensnahan, M.; Schweiger, A.; Zhang, J. Evaluation of Seven Different Atmospheric Reanalysis Products in the Arctic. *J. Clim.* 2014, 27, 2588 – 2606.

Yu, Y., Xiao, W., Zhang, Z., Cheng, X., Hui, F., & Zhao, J. (2021). Evaluation of 2-m air temperature and surface temperature from ERA5 and ERA-I using buoy observations in the arctic during 2010 - 2020. *Remote Sensing*, 13(14), 2813.

Cavalieri, D. J., C. L. Parkinson, P. Gloersen, and H. J. Zwally. 1996, updated yearly. Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 1. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado USA.

NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <https://doi.org/10.5067/8GQ8LZQVL0VL>.

Cavalieri, D. J., J. Crawford, M. R. Drinkwater, D. Eppler, L. D. Farmer, R. R. Jentz and C. C. Wackerman. 1991. Aircraft Active and Passive Microwave Validation of Sea Ice Concentration from the DMSP SSM/I. *Journal of Geophysical Research* 96(C12):21,989–22,009.

Ivanova, N., O. M. Johannessen, L. T. Pedersen, and R. T. Tonboe. 2014. Retrieval of Arctic sea ice parameters by satellite passive microwave sensors: A comparison of eleven sea ice concentration algorithms, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 52(11), 7233–7246

Meier, W. N. 2005. Comparison of passive microwave ice concentration algorithm retrievals with AVHRR imagery in the Arctic peripheral seas, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 43(6), 1324–1337.

Maslanik, J. A. 1992. Effects of Weather on the Retrieval of Sea Ice Concentration and Ice Type from Passive Microwave Data. *International Journal of Remote Sensing* 13(1):37–54.

National Center for Environmental Information. Regional Sea Ice. Available online: <https://www.ncdc.noaa.gov/snow-and-ice/regional-sea-ice/overview>

Bright, R. M., & O'Halloran, T. L. (2019). Developing a monthly radiative kernel for surface albedo change from satellite climatologies of Earth's shortwave radiation budget: CACK v1. 0. *Geoscientific Model Development*, 12(9), 3975–3990.

Pendergrass, A. G., Conley, A., & Vitt, F. M. (2018). Surface and top-of-atmosphere radiative feedback kernels for CESM–CAM5. *Earth System Science Data*, 10(1), 317–324.

Smith, C. J., Kramer, R. J., Myhre, G., Forster, P. M., Soden, B. J., Andrews, T., ... & Watson Parris, D. (2018). Understanding rapid adjustments to diverse forcing agents. *Geophysical Research Letters*, 45(21), 12–023.

Smith, C. J., Kramer, R. J., & Sima, A. (2020). The HadGEM3–GA7. 1 radiative kernel: the importance of a well-resolved stratosphere. *Earth System Science Data*, 12(3), 2157–2168.

Stevens, B., Giorgetta, M., Esch, M., Mauritsen, T., Crueger, T., Rast, S.,

Salzmann, M., Schmidt, H., Bader, J., Block, K., Brokopf, R., Fast, I., Kinne, S., Kornblueh, L., Lohmann, U., Pin- cus, R., Reichler, T., and Roeckner, E.: Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6, *J. Adv. Model. Earth Sy.*, 5, 146 - 172, 2013

Chen, X., Long, D., Hong, Y., Liang, S., & Hou, A. (2017). Observed radiative cooling over the Tibetan Plateau for the past three decades driven by snow cover induced surface albedo anomaly. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(12), 6170–6185.

Jonko, A. K., Shell, K. M., Sanderson, B. M., & Danabasoglu, G. (2012). Climate feedbacks in CCSM3 under changing CO2 forcing. Part I: Adapting the linear radiative kernel technique to feedback calculations for a broad range of forcings. *Journal of Climate*, 25(15), 5260–5272.

Reynolds, R. W., Smith, T. M., Liu, C., Chelton, D. B., Casey, K. S., & Schlax, M. G. (2007). Daily high-resolution-blended analyses for sea surface temperature. *Journal of climate*, 20(22), 5473–5496.

Kumar, A., Yadav, J., & Mohan, R. (2021). Spatio-temporal change and variability of Barents-Kara sea ice, in the Arctic: Ocean and atmospheric implications. *Science of The Total Environment*, 753, 142046.

Parkinson, C. L., & Cavalieri, D. J. (2008). Arctic sea ice variability and trends, 1979 - 2006. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C7).

Smedsrud, L. H., Esau, I., Ingvaldsen, R. B., Eldevik, T., Haugan, P. M., Li, C., ... & Sorokina, S. A. (2013). The role of the Barents Sea in the Arctic climate system. *Reviews of Geophysics*, 51(3), 415–449.

Boisvert, L. N., Petty, A. A., & Stroeve, J. C. (2016). The impact of the extreme winter 2015/16 Arctic cyclone on the Barents - Kara Seas. *Monthly Weather Review*, 144(11), 4279–4287.

Lind, S., Ingvaldsen, R. B., & Furevik, T. (2018). Arctic warming hotspot in the northern Barents Sea linked to declining sea-ice import. *Nature climate change*, 8(7), 634–639.

National Snow and Ice Data Center. All About Sea Ice. Available online: <https://nsidc.org/cryosphere/seaice/data/terminology.html>

Perovich, D. K., & Polashenski, C. (2012). Albedo evolution of seasonal Arctic sea ice. *Geophysical Research Letters*, 39(8).

Lee, S. M., Sohn, B. J., & Kim, S. J. (2017). Differentiating between first year and multiyear sea ice in the Arctic using microwave retrieved ice emissivities. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(10), 5097–5112.

ECMWF IFS DOCUMENTATION—Cy43r1 Operational Implementation Part IV: Physical Processes; ECMWF: Reading, UK, 2016.

Bintanja, R., & Krikken, F. (2016). Magnitude and pattern of Arctic warming governed by the seasonality of radiative forcing. *Scientific Reports*, 6(1), 1–7.

Hall, D.; Key, J.; Casey, K.; Riggs, G.; Cavalieri, D. Sea ice surface temperature product from MODIS. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2004, 42, 1076 – 1087.

Son, Y. S., Kim, H. C., & Lee, S. J. (2018). ASTER-Derived High-Resolution Ice Surface Temperature for the Arctic Coast. *Remote Sensing*, 10(5), 662.

Wielicki, B. A., Wong, T., Loeb, N., Minnis, P., Priestley, K., & Kandel, R. (2005). Changes in Earth's albedo measured by satellite. *Science*, 308(5723), 825–825.

Winton, M. (2006). Amplified Arctic climate change: What does surface albedo feedback have to do with it?. *Geophysical Research Letters*, 33(3).

Winton, M. (2008). Sea ice-albedo feedback and nonlinear Arctic climate change. Arctic sea ice decline: Observations, projections, mechanisms, and implications, *Geophys. Monogr*, 180, 111–131.

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.