

위성관측을 통한 북극 해빙 변화에 따른
복사강제력 산출 및 분석

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



부경대학교

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 단계보고서로 제출합니다.



2023. 1. 27

(본과제) 총괄연구책임자 : 김 현 철

위탁연구기관명 : 부 경 대

위탁연구책임자 : 한 경 수

위탁참여연구원 : 성 노 훈

“ : 진 동 현

“ : 정 대 성

“ : 심 수 영

“ : 우 종 호

“ : 변 유 경

“ : 전 우 진

“ : 김 나 연

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
- 표면온도 자료에 따른 복사강제력 차이 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
- 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/m^2)
- 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

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	9
제 1 절 목적	9
제 2 절 필요성	9
제 3 절 연구개발 내용	12
제 4 절 기대효과	13
1. 학술적 파급효과	13
2. 경제적 파급효과	13
제 2 장 국내외 기술개발 현황	15
제 1 절 지표와 관련된 복사강제력	15
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과	21
제 1 절 연구자료	21
1. Surface Albedo	21
2. Skin Temperature	22
3. Sea Ice Concentration	23
4. Radiative Kernel	24
제 2 절 연구방법	27
1. 1차연도(2020)	27
2. 2차연도(2021)	28
3. 3차연도(2022)	29
4. 목표 달성을 위한 연구 수행 방법	30
제 3 절 북극지역의 해빙에 따른 복사강제력 시공간 특성 분석	33
1. SIRFs의 연간 특성	34
2. SIRFs의 계절에 따른 특성	39
3. SIRFs의 월별 따른 특성	45
제 4 절 DNN기반 해빙표면온도 산출 및 복사강제력 비교	48
1. DNN기반 해빙표면온도 산출	50
2. DNN 기반 IST를 활용한 복사강제력 산출 및 평가	58
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	61
제 1 절 연구개발목표의 달성도	61
1. 연구 성과목표 및 달성도	61
2. 연구 성과목표 및 평가의 착안점	63

제 2 절 대외기여도	65
1. 학술 분야	65
2. 경제 분야	65
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	67
제 1 절 추가연구의 필요성	67
제 2 절 타 연구에의 응용	67
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	69
제 7 장 참고문헌	71



표 목차

표 1. Surface Shortwave Radiative Forcing 관련 연구 동향	20
표 2. Cloud Radiative Forcing 관련 연구 동향	21
표 3. Cryosphere Radiative Forcing 관련 연구 동향	22
표 4. CM SAF CLARA-A2-SAL	24
표 5. ERA5 skin temperature	25
표 6. NSIDC Sea Ice Concentration	26
표 7. 본 연구에 활용된 데이터 특성	29
표 8. 목표 달성을 위한 연구 수행 방법	33
표 9. 지역에 따른 SIRF 들의 연간 변화량(W/m ²)	39
표 10. 지역별 계절 SIRF의 변화량	46
표 11. 본 연구에 적용한 DNN 하이퍼파라미터	55
표 12. 연구개발 목표 및 달성도	65
표 13. 전체 연구 기간의 성과목표 및 평가의 착안점	67

KOPRI
극지연구소

그림 목차

그림 1. 1982~2020년 동안 기온 변화량	12
그림 2. 2020년 여름 기준 sea ice extent. (Michonscott, 2020, https://www.climate.gov/)	13
그림 3. 본 과제와의 연계성	14
그림 4. 연차별 연구목표 및 계획	15
그림 5. CM SAF surface albedo 자료의 예	24
그림 6 ERA5 Skin temperature 예시	25
그림 7 NSIDC Sea Ice Concentration 예시	26
그림 8. GCM에 따른 surface albedo 복사 커널들의 월평균 시계열 분포	27
그림 9. 6월 기준 GCM(CAM5, GFDL)에 따른 surface albedo 복사커널 차이의 공간적 분포.	28
그림 10 GCM에 따른 surface temperature 복사 커널들의 월평균 시계열 분포	28
그림 11 8월 기준 GCM(HadGEM3, CAM5)에 따른 surface albedo 복사커널 차이의 공간적 분포.	29
그림 12. 1차연도 연구방법	30
그림 13. 2차연도 연구방법	31
그림 14. 3차연도 연구방법	32
그림 15. 북극 영역의 지역명 지도	37
그림 16. 북극에서의 1982년부터 2015년까지 기후 모델에 따른 연평균 SIRF 들의 시계열 분포, (a) net-SIRF, (b) albedo-SIRF, (c) temperature-SIRF.	38
그림 17. 기후 모델들의 평균값을 이용한 연간 SIRF 변화량의 공간적 분포, (a) net-SIRF, (b) albedo-SIRF, (c) temperature-SIRF.	41
그림 18. 기후모델에 따른 평균 계절별 SIRF. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON ...	43
그림 19. 각 기후모델의 평균 커널값을 활용한 계절별 평균 SIRFs 공간적 분포, 가로축 : 계절, 세로축 : 각 요소별 SIRF	45
그림 20. 5개 커널 평균값을 이용한 월별 net-SIRF 시계열 분포	49
그림 21. 1982년부터 2015년 동안 각 요소별 SIRF 월별 변화량	49
그림 22. net-SIRF 월별 변화량의 공간적 분포	50
그림 23. 2000-2015년 기준 6월 평균 ERA5 및 MODIS의 표면온도 분포 특성	52
그림 24. 2000-2015년 기준 12월 평균 ERA5 및 MODIS의 표면온도 분포 특성	52
그림 25. 본 연구에 적용한 DNN 구조	55

그림 26. MODIS IST 및 IMB bouy 데이터를 통해 DNN 기반 IST 검증 결과. (a) DNN기 반 IST와 MODIS IST의 분포. (b) DNN 기반 IST 및 MODIS IST와 IMB buoy IST와 비교.	57
그림 27. MODIS IST(a, b, c, d)와 DNN 기반 IST와(a', b', c', d')의 공간적 분포.	58
그림 28. Case 별 MODIS IST와의 검증 결과	59
그림 29. SHAP를 활용한 Case에 따른 변수 중요도 평가 결과	60
그림 30. ERA5-SIRF와 DNN-SIRF의 연평균 시계열 분포.	61
그림 31. ERA5-SIRF와 DNN-SIRF의 계절별 평균 공간적 분포.	62





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 (0.69~1.08°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.

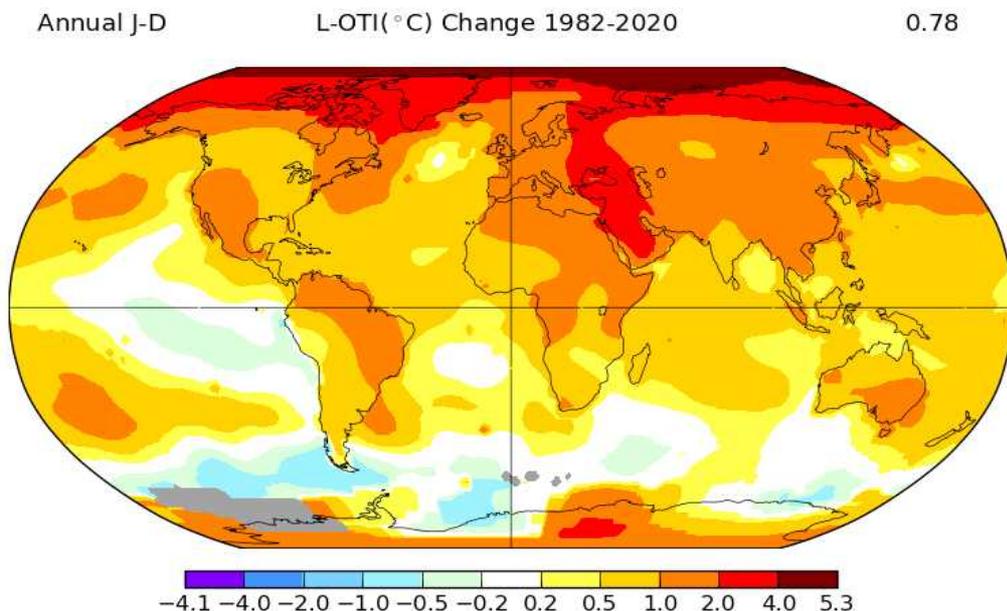


그림 1. 1982~2020년 동안 기온 변화량
(NASA, <https://data.giss.nasa.gov/>)

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).

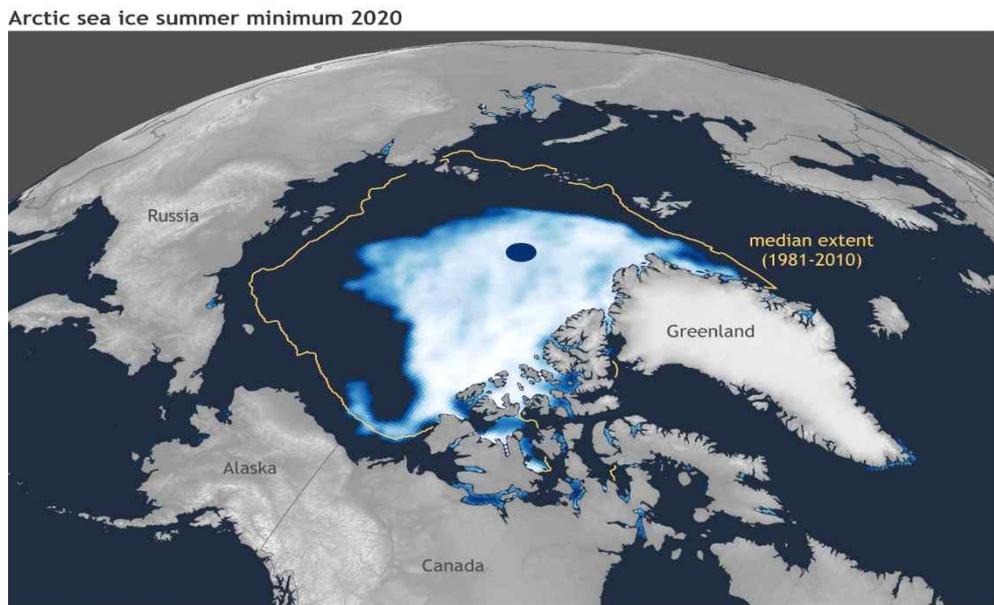


그림 2. 2020년 여름 기준 sea ice extent.
(Michonscott, 2020, <https://www.climate.gov/>)

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, 온실가스과 지표에서 흡수, 기타 지표 물질들에 의한 열 발산등 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.

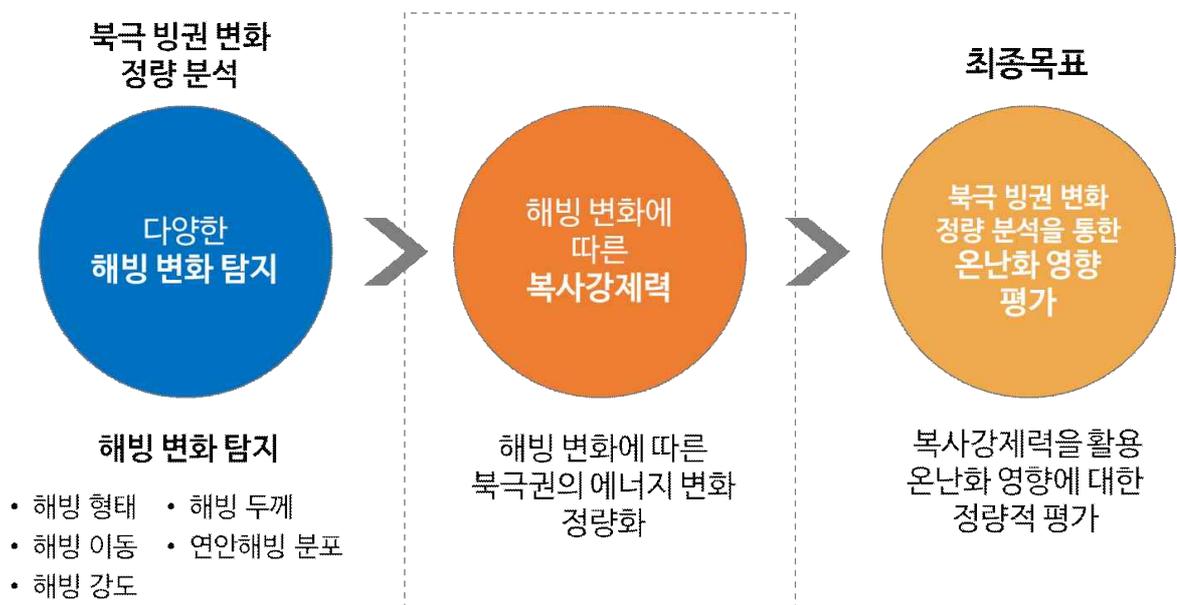


그림 3. 본 과제와의 연계성

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 그림 4와 같다.

1차 연도는 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.

2차 연도는 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.

3차 연도에는 복사강제력 기반으로 해빙변화에 따른 피드백을 정량적으로 평가하고자 한다. 먼저 2차년도 연구에서 확인된 재분석자료 및 기존 위성기반의 해빙표면온도 자료의 한계를 극복하고자 DNN 기반의 해빙표면온도를 생산한다. 그리고 이를 바탕으로 2차년도 복사강제력 결과와 비교 및 평가를 진행한다. 마지막으로 이를 바탕으로 북극지역의 복사강제력 특성을 종합하여 북극 기온의 정량적인 변화와 연계성 분석을 수행할 계획이다.

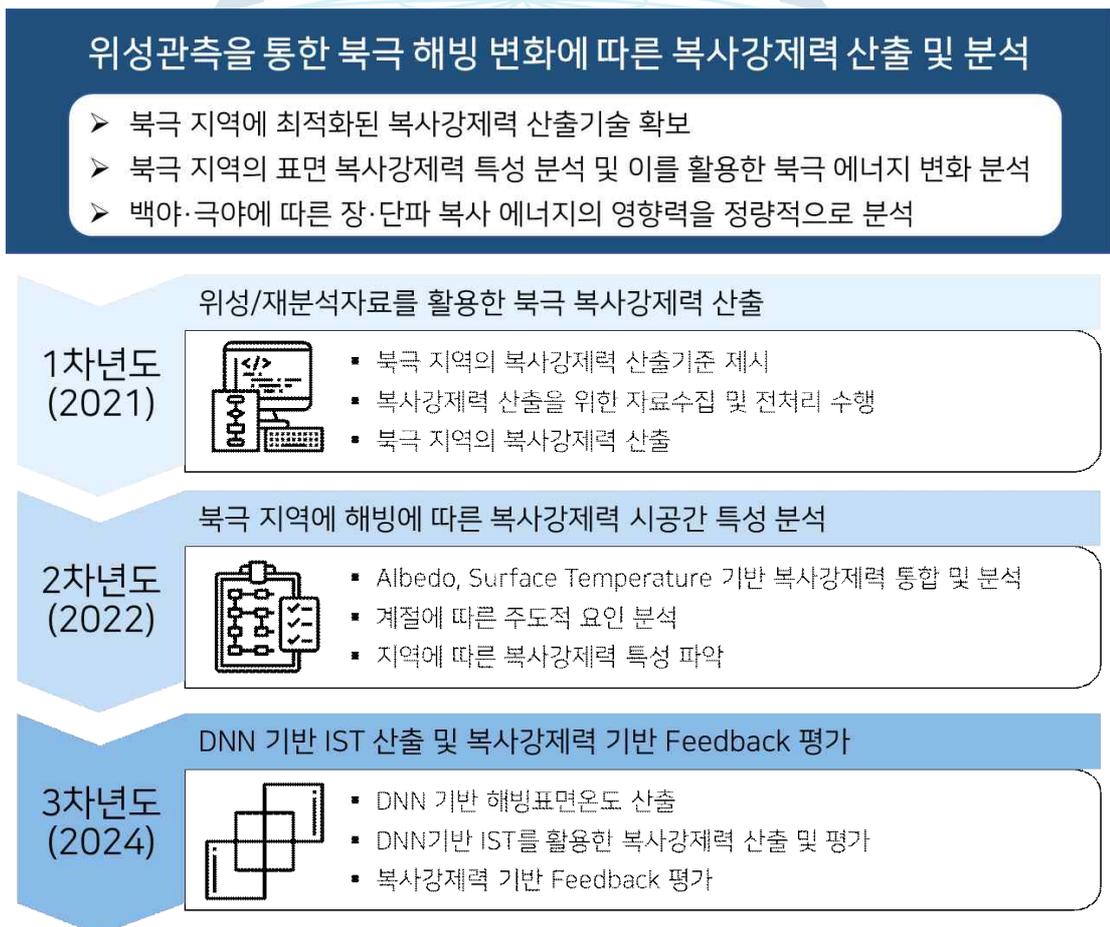


그림 4. 연차별 연구목표 및 계획

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 분석에 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 연구로써 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 연평균 CRF는 33W/m²로 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 단파 구름 강제력 : -50 W/m² ~ 0 W/m² : surface albedo, solar zenith angle, cloud liquid water.에 따라 크게 영향 ◆ 장파 구름 강제력 : 65 W/m² ~85 W/m² ◆ 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 60도 이상인 북극 해역에 대해 albedo-SIRF를 산출 ◆ CERES planetary albedo 자료 활용 ◆ 북반구에서 해빙 감소로 인하여 0.43 의 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	<ul style="list-style-type: none"> ◆ 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

1 Surface Albedo

본 연구에서는 CM SAF에서 제공하는 CLARA-A2-SAL (CLARA Dataset, AVHRR 2nd release, Surface albedo) 자료를 활용하였다. 본 자료는 CLARA-A1-SAL Dataset (Riihelä et al. 2013)을 개선한 자료로, National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and Meteorological Operational (METOP) 위성의 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)의 Red 및 NIR 채널 자료를 바탕으로 생성하였다. 대기 보정은 Simplified method for the atmospheric correction of satellite measurements in the solar spectrum(SMAC) algorithm (Rahman and Dedieu, 1994), Bidirectional Reflectance Distribution Function(BRDF) algorithm은 Roujean et al. (1992)과 Wu et al. (1995)를 바탕으로 수행하였다. 공간 해상도는 0.25°이며, 1982년부터 2015년까지 해빙이 존재하는 지역을 대상으로 월평균 된 자료를 적용하였다. 본 자료는 surface albedo, insolation(SIS), incoming(SDL)/outgoing long wave(SOL)와 같은 다양한 에너지 수치 변수를 제공하고 있다. 해당 자료는 각 변수별로 다양한 시간 해상도로 제공되고 있으며, 기본적으로 모든 변수는 월평균 자료로 제공된다. 해당 자료의 정확도는 Greenland Summit 지역의 실측 자료와 비교한 결과, RMSE 0.044, Mean relative retrieval difference [%] -3.88로 나타났으며 (Karlsson et al., 2017), 북극의 surface albedo 연구에서도 활용하고 있다(Cao et al., 2015; Xiao et al., 2017). 해당 산출물의 특징 및 예시는 아래 표 4, 그림 5와 같다.

표 4. CM SAF CLARA-A2-SAL

Sensor/Platform	AVHRR
Spatial resolution	0.25 degree
Spatial coverage	N: 90, S: -90, E: 180, W: -180
Temporal resolution	Monthly
Temporal coverage	1982~2015

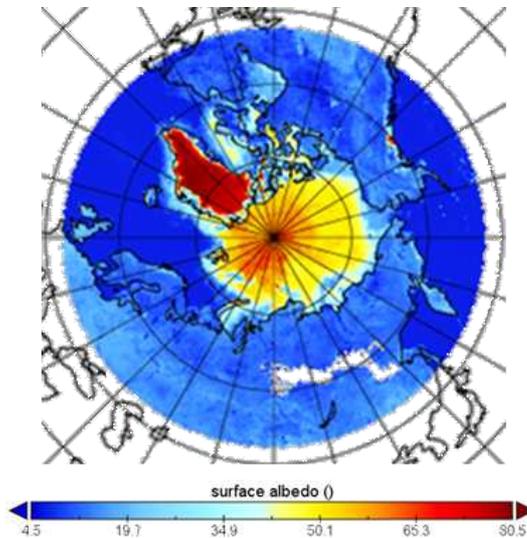


그림 5. CM SAF surface albedo 자료의 예

2 Skin Temperature

피부온도(Skin Temperature)는 표면 flux의 변화에 즉각적으로 반응할 수 있는 최상부 표면층의 온도를 나타낸다. 본 연구에서는 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECWMF)에서 제공한 ERA5의 자료를 사용하였다. ERA5(ECMWF ReAnalysis 5)는 ECMWF의 5세대 국제 기후대기 재분석 자료다. 2017년 ECMWF는 ERA-Interim을 대체하기 위해 역학 과정을 개선하는 동시에 시·공간 해상도를 대폭 늘린 5세대 재분석자료인 ERA5를 공식적으로 배포하기 시작했다. ERA5는 기존 ERA-Interim에 비해 다양한 분야가 개선되었다. 먼저 더 많은 위성 자료를 바탕으로 산출되었으며, 불확실성을 일관되게 제시하며, 입력자료에 대해 투명하게 공개한다. 뿐만 아니라 시간 해상도인 6시간 해상도(예보 자료의 경우 3시간)보다 매우 높아진 1시간 간격의 해상도를 가지며, 공간해상도 (위도×경도) $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 로 4배 이상 높은 해상도를 가진다. 본 연구에서 사용한 Skin temperature는 ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present의 산출물 중 하나로써 시간해상도 월 평균, 공간해상도 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 를 사용하였으며 해당 자료는 북극의 기후 변화를 이해하는데 중요한 역할을 한다. 해당 자료는 the International Arctic Buoy Programme (IABP), Multidisciplinary Drifting Observatory for the study of Arctic Climate (MOSAiC), Cold Regions Research and Engineering Laboratory (CRREL) 등 국제 buoy 프로그램에서 운영되고 있는 자료들과 검증을 수행하였다. 상관계수 0.98로 높은 정확도를 나타냈다(Yu et al., 2021).

표 5. ERA5 skin temperature

Sensor/Platform	AVHRR
Spatial resolution	0.25 degree
Spatial coverage	N: 90, S: -90, E: 180, W: -180
Temporal resolution	Monthly
Temporal coverage	1982~2015

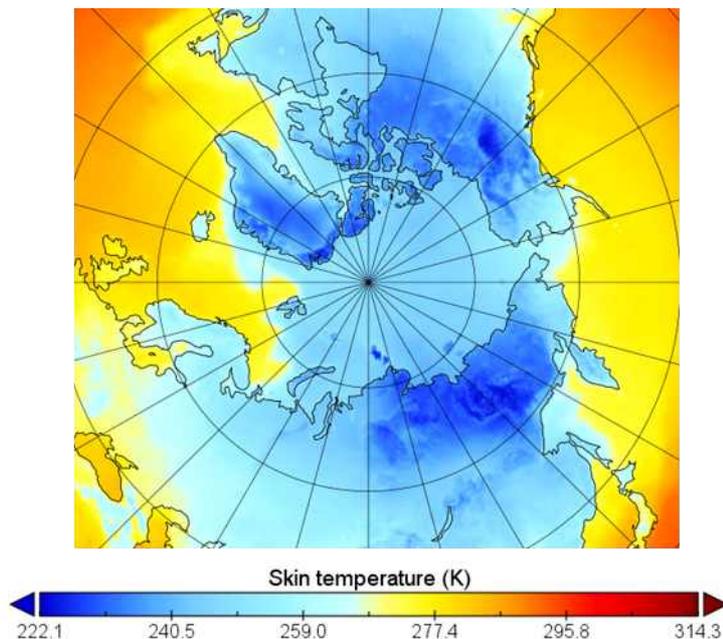


그림 6 ERA5 Skin temperature 예시

3 Sea Ice Concentration

해빙 농도(Sea Ice Concentration)는 단위가 없는 항이며, 얼음이 덮여있는 영역을 상대적인 양으로 설명한다. 보편적으로 위성기반 해빙농도는 해당 격자 안에 얼마나 해빙이 덮여있는지를 표출하며 농도는 전형적으로 퍼센트(%) 단위로 표현한다. (0~100%: 15% 이하의 해빙 농도의 경우 해양으로 구분). 본 연구에서는 Sea Ice Concentrations from Nimbus-7 SMMR and DMSP SSM/I-SSMIS Passive Microwave Data, Version 2 (NSIDC-0051) 자료를 활용하였다. 해당 자료는 Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) onboard Nimbus-7, Special Sensor Microwave/Imagers (SSM/I) onboard the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)-F8, -F11, and -F13, and Special Sensor Microwave Imager/Sounder (SSMIS) on DMSP-F17 등 다양한 passive microwave 센서들을 활용하여 생성되었다. 이 자료는 겨울철 5%, 여름철 melt pond 등에서 15% 정도의 불확실성을 가진다 (Cavalieri, et al., 1996). 해당 자료는 현재 많은 북극 연구에서 활용되고 있다(Ivanova et al., 2014; Meier 2005).

표 6. NSIDC Sea Ice Concentration

Sensor/Platform	Multi Microwave sensors
Spatial resolution	0.25 degree
Spatial coverage	N: 90, S: -90, E: 180, W: -180
Temporal resolution	daily
Temporal coverage	1982~2015

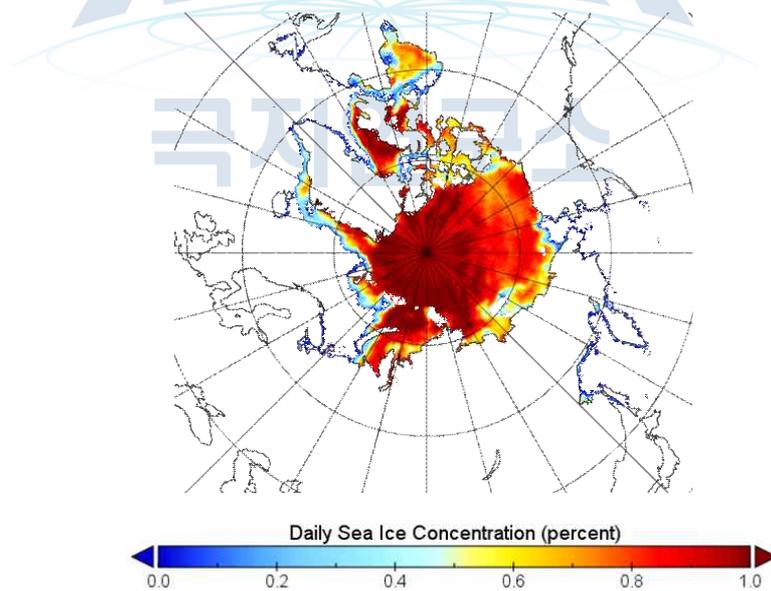


그림 7 NSIDC Sea Ice Concentration 예시

4 Radiative Kernel

복사 커널(Radiative Kernel)은 복사 관련 상태 변수의 작은 섭동이 지구의 에너지 균형에 어떻게 영향을 미치는지 설명한다[39,44]. 복사 커널은 general circulation models (GCMs)을 기반으로 생성한다. 그러나 GCM들에 따라 복사 커널을 계산하는 데 사용되는 대기 상태 기후 데이터의 기간과 종류는 매우 다양합니다[64]. 따라서 본 연구에서는 사용되는 GCM에 따른 불확실성을 제거하고자 총 5가지의 GCM 기반의 복사 커널을 수집하였다: Community Atmosphere Model version 5 (CAM5) , Hadley Centre Global Environment Model version 2 (HadGEM2), Hadley Centre Global Environment Model version 3 (HadGEM3), Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), European Center and Hamburg model version 6 (ECHAM6).

본 연구에서는 all-sky 기준으로 surface albedo와 skin temperature 두 종류의 복사 커널을 사용하였다. surface albedo 복사 커널은 표면의 albedo가 1% 변화할 때, radiative flux에 미치는 에너지양 (W/m^2)을 의미한다. 그림 8은 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. 그림 9는 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.

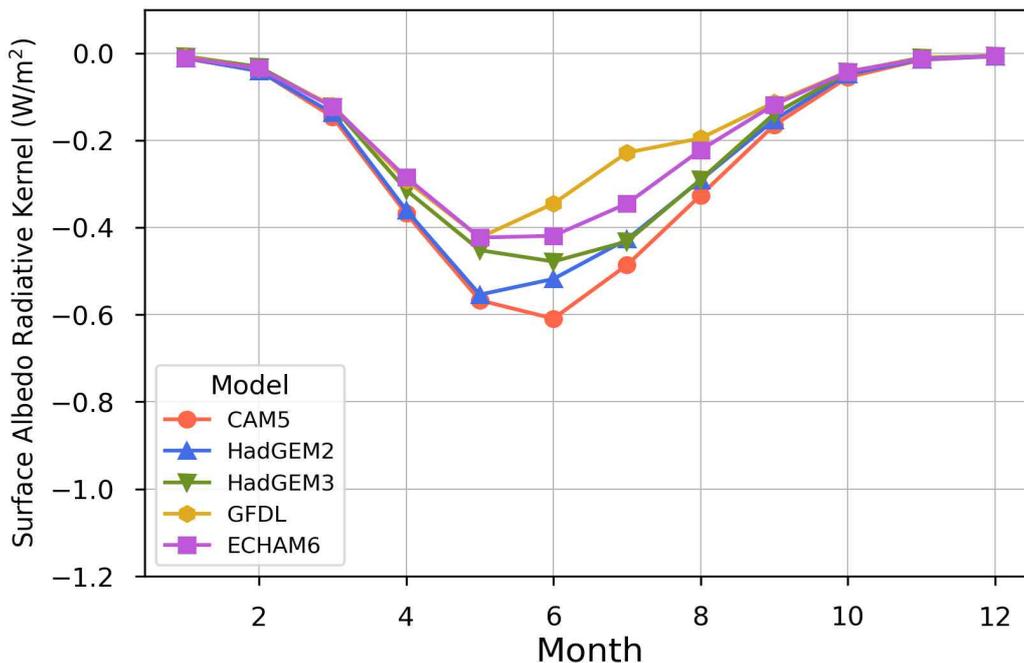


그림 8. GCM에 따른 surface albedo 복사 커널들의 월평균 시계열 분포

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(그림 10). 그 중

에서도 CAM5와 GFDL의 경우 계절에 따른 변동성이 더욱 자게 나타난다. HadGEM2, HadGEM3, ECHAM6는 비슷한 양상을 띤다. 그림 11은 차이가 가장 크게 발생하는 8월 기준 HadGEM3와 CAM5 surface temperature 복사 커널의 차이를 공간적 분포로 표현한 것이다. 북극 전역에 대하여 HadGEM3 surface temperature 복사 커널이 0.55 W/m² 낮게 나타나며 지역적인 특색은 나타나지 않았다.

본 연구에 사용된 자료들의 요약은 표 7과 같다.

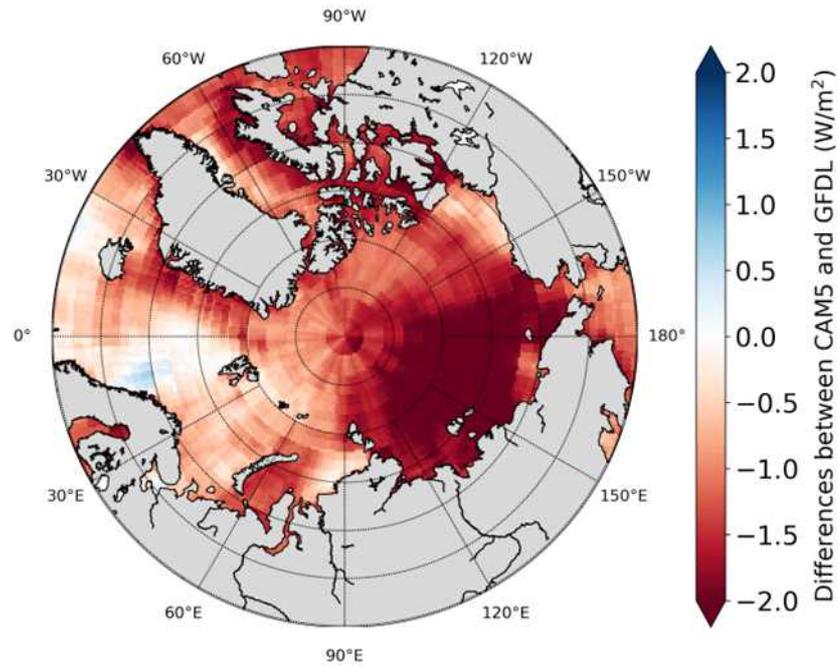


그림 9. 6월 기준 GCM(CAM5, GFDL)에 따른 surface albedo 복사 커널 차이의 공간적 분포.

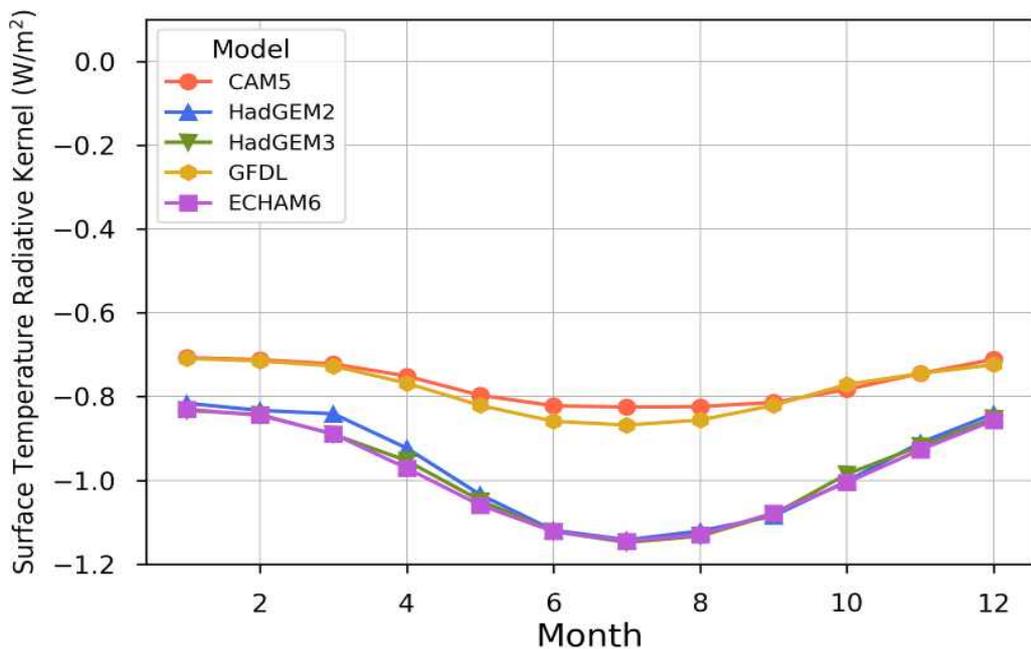


그림 10 GCM에 따른 surface temperature 복사 커널들의 월평균 시계열 분포

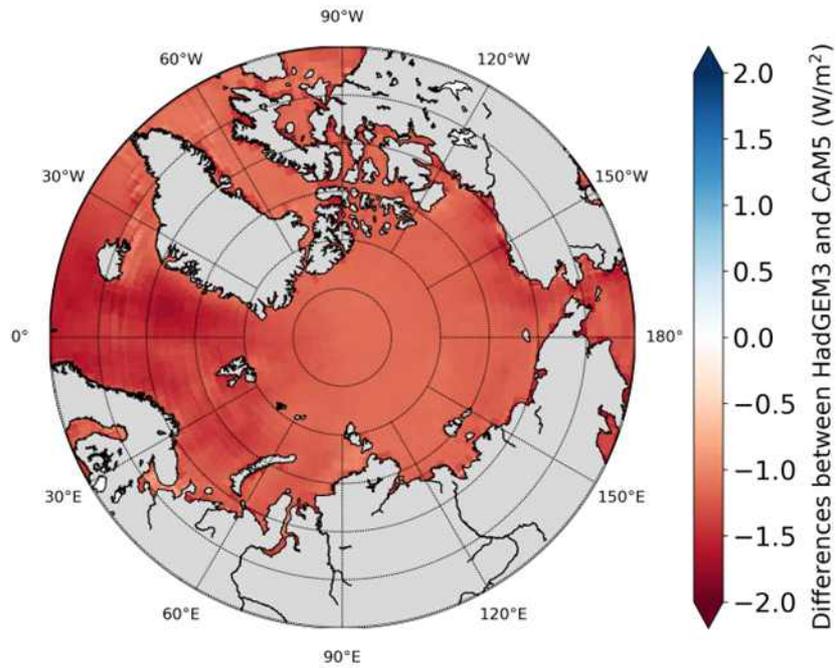


그림 11 8월 기준 GCM(HadGEM3, CAM5)에 따른 surface albedo 복사커널 차이의 공간적 분포.

표 7. 본 연구에 활용된 데이터 특성

Variables	Datasets	Horizontal resolution	Temporal resolution	Time span
Surface Albedo	CLARA-A2	25 km	Monthly	1982-2015
Skin Temperature	ERA5	0.25°	Monthly	1982-2015
Sea Ice Concentration	NECI	0.25°	Daily	1982-2015
Radiative Kernels	CAM5	1.25°	Monthly	-
	HadGEM2	1.88°		
	HadGEM3	1.88°		
	GFDL	2.5°		
	ECHAM6	1.88°		

제 2 절 연구방법

1 1차연도(2020)

위성 및 재분석자료를 활용하여 북극의 복사강제력 산출을 목표로 한다. 이를 위하여 우선 북극 지역의 복사강제력 산출 기준을 제시하여야 한다. 현재 진행되고 있는 선행 연구 및 선진기관에서 지표와 관련된 복사강제력 산출 조건을 조사하고 본 연구에 적합한 북극 지역의 복사강제력 산출 기준을 제시한다. 이 때 3개 이상의 다음으로 복사강제력 산출을 위한 자료 수집 및 전처리 과정이 필요하다. 북극의 기후변화를 관측 및 연구 하기 위해서는 장기간의 자료 확보가 필수적이다. 해당 자료들은 대부분 1980년대 중반부터 존재한다. 각각의 자료는 제공하는 기관, 사용되는 sensor에 따라 그 시·공간적 해상도가 상이하므로 동일한 좌표계와 해상도로 변환할 필요가 있다. 이를 위하여 전처리 과정을 수행하는데, 기하 보정을 통하여 극지방에 적합한 좌표계로 re-mapping 해준다. 동시에 평균과 up/down scaling과 같은 방법을 이용하여 동일한 시·공간적 해상도로 일치시킨다. 이렇게 확보된 자료를 바탕으로 shortwave, longwave 영역의 복사강제력을 산출한다. 우선적으로 북극 에너지 순환에 중요 지점인 북극권 지역을 산출수행하며, 전체적인 경향을 파악한다.

위성/재분석자료를 활용한 북극 복사강제력 산출

선진기관 및 선행 연구를 바탕으로 북극지역의 복사 강제력의 산출 기준 제시

- 위성/재분석 자료 기반 복사강제력 산출 자료 배포현황 기초 조사
- 현재 활용 중인 복사강제력 산출 기준 정리

복사강제력 산출을 위한 위성 기반 자료 수집 및 전처리

- 복사강제력 산출을 위한 위성 기반 자료 수집
- 확보된 자료의 시공간 해상도 일치 / 기하 보정 및 Remapping

북극 지역에서 복사강제력 산출

- 북극 에너지 순환에 중요 지점인 북극권 지역 우선 산출
- 북극 복사강제력 Test 산출 수행

그림 12. 1차연도 연구방법

2 2차연도(2021)

2차연도에는 관측자료를 바탕으로 Radiative kernel 평가를 수행하고, 북극 지역의 해빙에 따른 복사강제력의 시공간 특성 분석을 진행한다. 먼저 Radiative kernel을 1차년도에 이해 추가적으로 확보하고 그 특성을 비교한다. 기후모델은 모델마다 에러값을 포함하고 있기 때문에 각 모델이 내포하고 있는 불확실성에 대해 분석이 필요하다. 이때 각 기후모델에 따른 시공간 차이를 비교하며 3가지 이상의 기후모델 자료를 수집이 필요하다. 다음으로 관측자료와 Radiative kernel 기반 자료의 비교 및 평가를 수행한다. 지표변화(Albedo, temperature)에 따른 커널 기반의 TOA Flux 변화를 산출하고, 관측 기반의 TOA Radiation과 패턴을 비교한다. 이러한 비교를 통해 각 기후모델의 radiative kernel의 특성을 파악한다. 시공간적으로 Albedo, Temperature 기반의 복사강제력은 다른 경향을 나타내고 있다. 따라서 본 연구에서는 복사강제력을 산출하는데 두 가지 요인(Albedo, Temperature)을 통합하여 Net 복사강제력을 산출하고 평가를 진행한다. 이 결과를 기존 연구(Albedo 만 사용한 선행연구)와 비교하여 시공간 특성에 대해 제시한다. 다음으로 계절에 따른 주도적 요인이 무엇인지 파악한다. 북극의 경우 여름철에는 백야, 겨울에는 극야가 진행되어 계절에 따른 특징이 다른 지역에 비하여 매우 뚜렷하다. 이 때 월별 해빙 변화량에 따른 복사강제력 특성을 분석하고 계절에 따른 주도적 요소를 파악하게 된다. 다음으로 지역에 따른 복사강제력 특성 파악도 필요하다. 선행 연구에 의하면 현재 북극은 지역에 따라 온도 변화의 경향이 다르게 나타나고 있다. 특히 북극의 Warming에 대해 많은 영향을 끼치는 해역에 대한 분석이 필요하다.

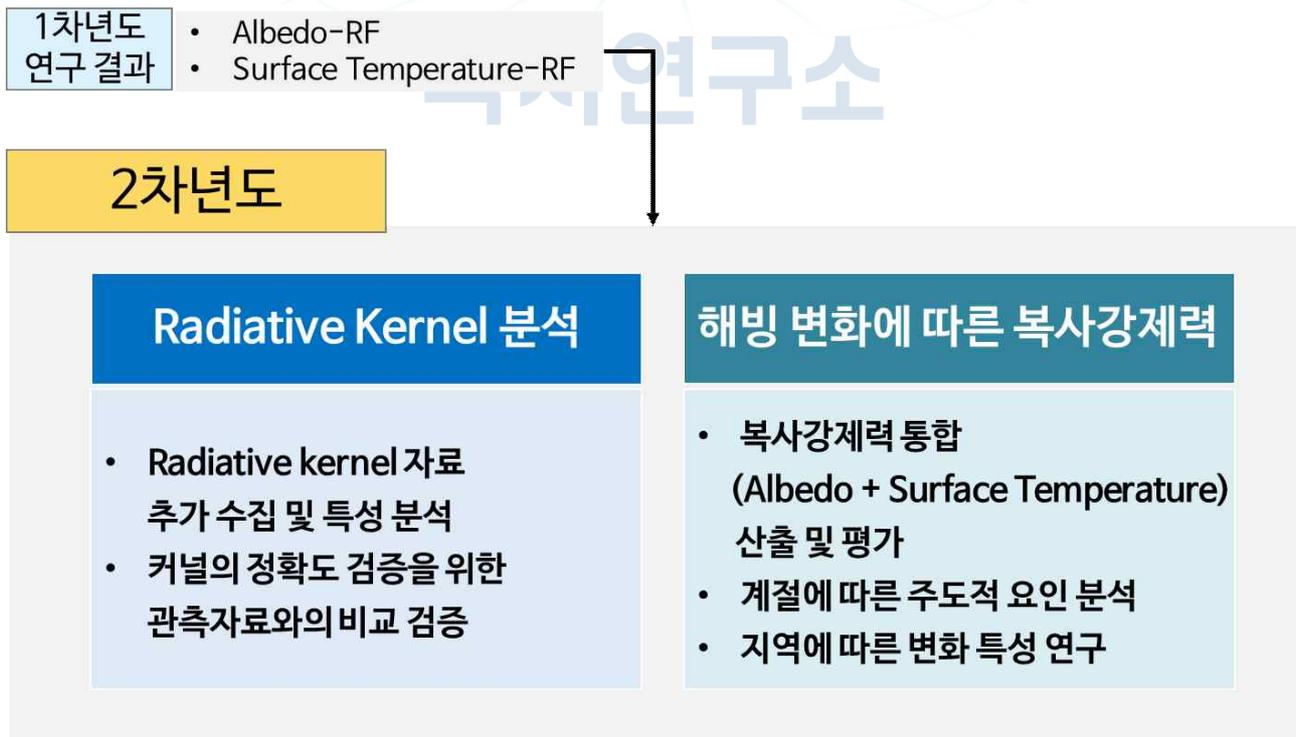


그림 13. 2차연도 연구방법

3 3차년도(2022)

3차년도에는 DNN 기반 해빙표면온도(Ice Surface Temperature) 산출하고 이를 바탕으로 표면온도 복사강제력 재산출 및 기존 자료와의 평가를 목표로 한다. 위성 및 재분석기반의 해빙표면온도는 다른 경향을 나타낸다. 위성기반의 IST는 MODIS에서 제공하고 있으나, 결측지가 다수 존재하며, 재분석자료의 경우 결측지 없이 전 영역에서 산출되고 있으나 위성기반의 IST와는 다른 경향이 나타난다. 따라서 계절에 관계없이 결측치가 없는 위성기반의 해빙표면온도 산출이 필수적이다. 현재 위성기반의 해빙표면온도는 대부분 Brightness Temperature 기반으로 산출하게 되는데 이는 위성의 궤도 및 구름의 영향으로 결측치를 발생시킨다. 따라서 본 연구에서는 먼저 IST와 밀접한 관계가 있는 기후자료를 바탕으로 IST를 산출하고자 한다. 입력자료 선정을 위하여 선행연구를 바탕으로 입력변수를 수집하고, 변수마다 상관관계 분석을 통하여 최적의 변수를 선정한다. 따라서 본 연구에서는 최근 위성 관련 연구에 많이 활용되고 있는 Deep Neural Network (DNN)기반의 IST 산출 모델을 구축한다. 산출된 IST는 타 위성(MODIS IST) 자료 및 CREEL-Mass Balance Buoy 자료의 표면온도 자료와 검증을 수행한다. 이렇게 최종 산출된 IST를 바탕으로 Temperature-SIRF를 산출하고 2차년도 연구결과인 ERA5 skin temperature를 이용한 Temperature-SIRF와 비교 분석하여 최종적으로 Albedo-SIRF와 결합하여 북극 해빙 변화에 따른 복사강제력을 산출하고자 한다.

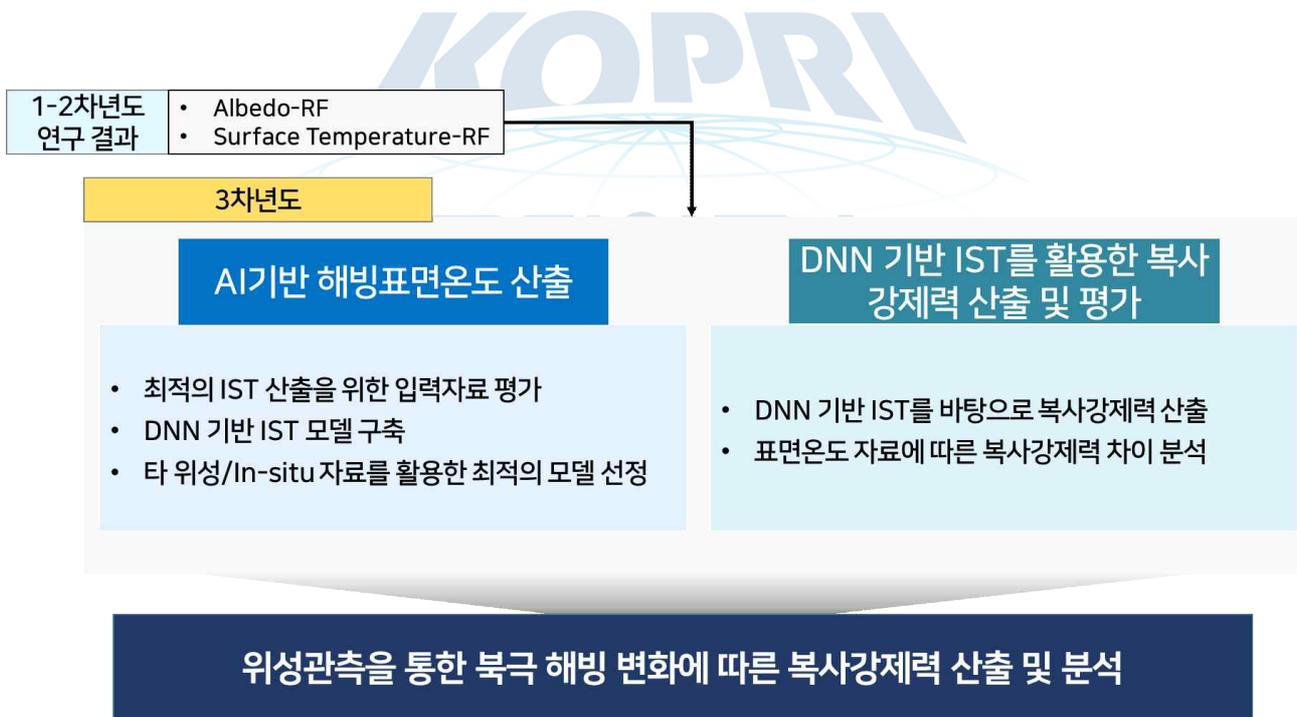


그림 14. 3차년도 연구방법

4 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 8. 목표 달성을 위한 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	<ul style="list-style-type: none"> - 지표 관련하여 다양한 복사강제력 산출기법 존재 (SSRF, CRF, CrRF 등) - 해빙의 영향에 따른 복사강제력 산출 기법 제시 - 장과 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	단과 영역 복사강제력 산출	<ul style="list-style-type: none"> - surface albedo kernel 및 Albedo 적용하여 해빙에 따른 지표의 복사강제력 산출 - 연평균 및 월평균 복사강제력 시공간적 비교 분석
		장과 영역 복사강제력 산출	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - 총 5개의 기후모델의 Radiative Kernel 자료 확보 (CAM5, ECHAM6, HadGEM2, HadGEM3, GFLD) - Kernel(Albedo & Temperature)에 따른 모델별 특징 비교 : 공간 및 월에 따른 특징 분석
	관측자료와 Radiative Kernel 자료 평가	경향 및 상관관계 분석	<ul style="list-style-type: none"> - Kernel을 이용하여 표면 변화에 따른 TOA Flux의 변화량 산출 - CERES TOA radiation 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	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - 해역에 따른 복사강제력 연간 변화량 분석 - 해역에 따른 계절별 평균 변화량 분석
DNN기반 해빙표면온도	IST 산출을 위한	문헌 조사 및 자료 확보	<ul style="list-style-type: none"> - Total Column Water Vapor (TCWV), ERA5

산출	입력자료 선정		<ul style="list-style-type: none"> - 2m air temperature (Ta), ERA5 - Sea Ice Concentration (SIC), OISST_v2 - Solar Zenith Angle (SZA) - Ta Climatology - Latitude - Ice Surface Temperature (IST), MODIS
	DNN기반 모델 구축	딥러닝 모델 구현	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - 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	<ul style="list-style-type: none"> - 표면온도 자료에 따른 연평균, 월별 SIRF 변화량 시계열 분석 - 계절별 SIRF 분포특성 분석

제 3 절 북극지역의 해빙에 따른 복사강제력 시공간 특성 분석

복사 커널을 이용한 연구는 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 α (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 α 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 15).

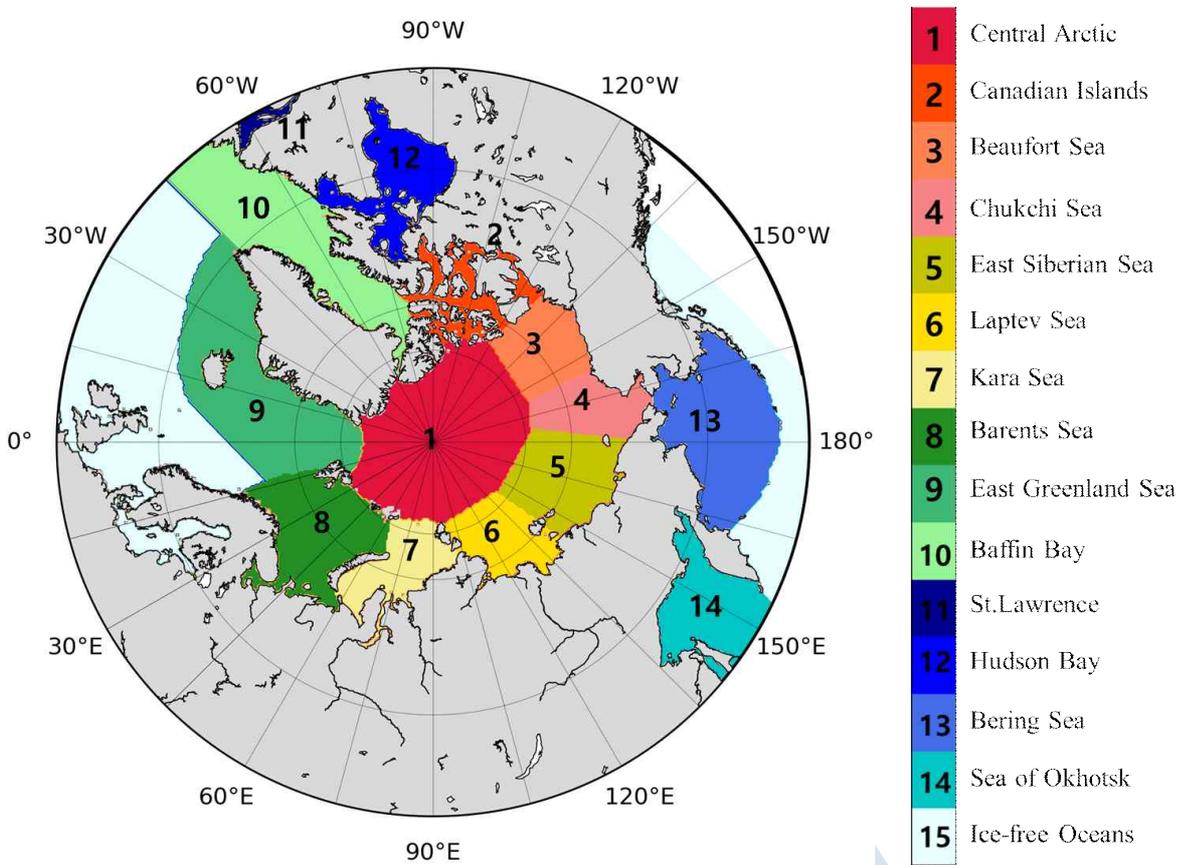


그림 15. 북극 영역의 지역명 지도

1 SIRFs의 연간 특성

본 연구에서는 복사 커널을 이용하여 albedo-SIRF, temperature-SIRF를 산출하였으며, 이 두 SIRF의 합을 net-SIRF로 표현하였다. 그림 16은 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.

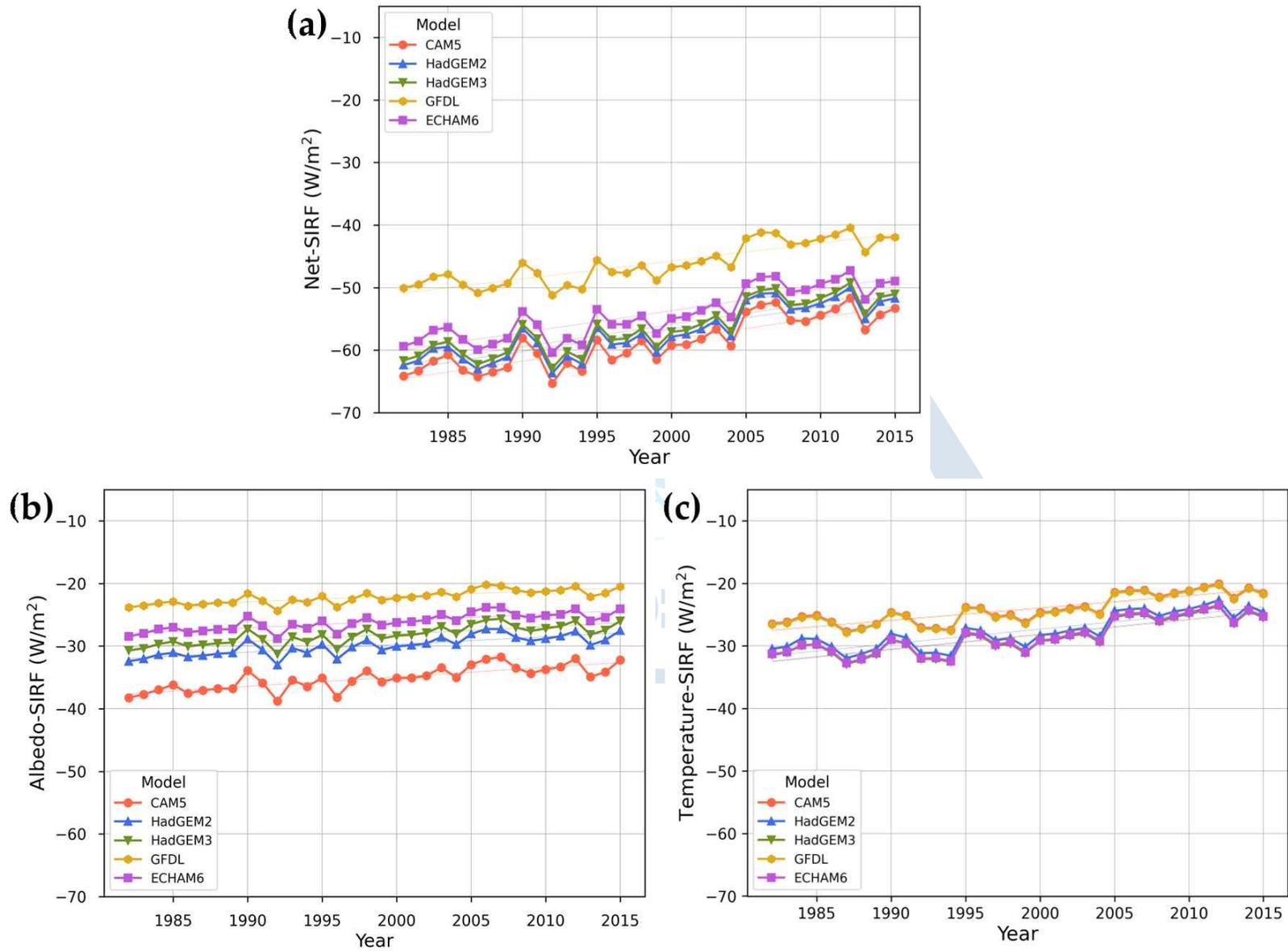


그림 16. 북극에서의 1982년부터 2015년까지 기후 모델에 따른 연평균 SIRF 들의 시계열 분포. (a) net-SIRF, (b) albedo-SIRF, (c) temperature-SIRF.

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 16에서 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 9). 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 9. 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

그림 4와 같이 북극 지역의 대부분에서 SIRF 값들은 모두 증가 경향이 나타나는 반면에, Baring 해역과 East Greenland 해역의 일부 지역에서는 감소 경향이 나타나고 있다. 이것은 해빙이 존재하는 Baring 및 East Greenladn 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 SIRF를 계산 하였다. 하지만 NSIDC에서는 해빙 농도가 15% 이상인 지역에 대해서만 해빙 지역 지역이라 표현한다. 이 지역는 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.



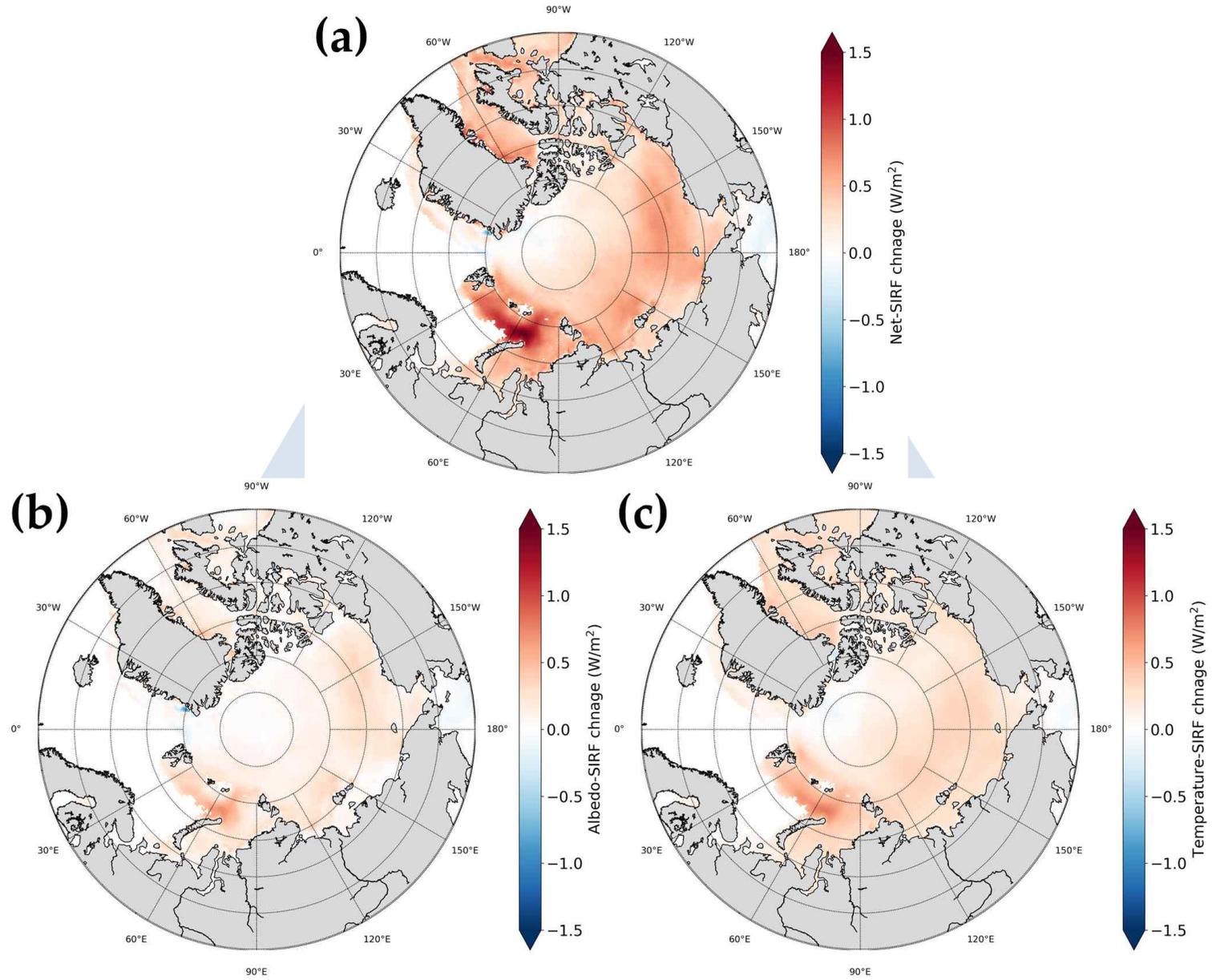


그림 17. 기후 모델들의 평균값을 이용한 연간 SIRF 변화량의 공간적 분포, (a) net-SIRF, (b) albedo-SIRF, (c) temperature-SIRF.

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 18과 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.

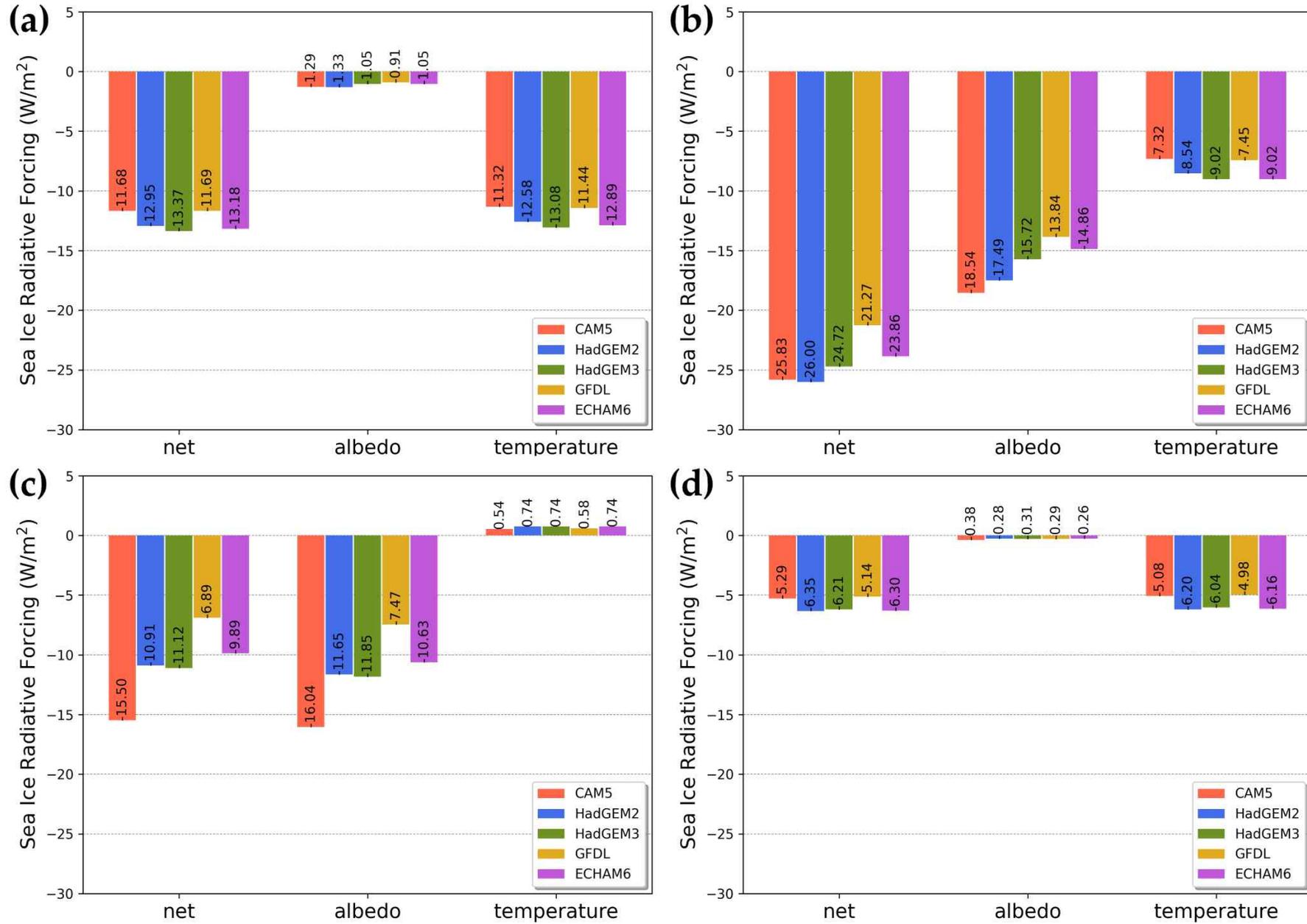


그림 18. 기후모델에 따른 평균 계절별 SIRF. (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA, (d) SON

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 19와 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 10은 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.

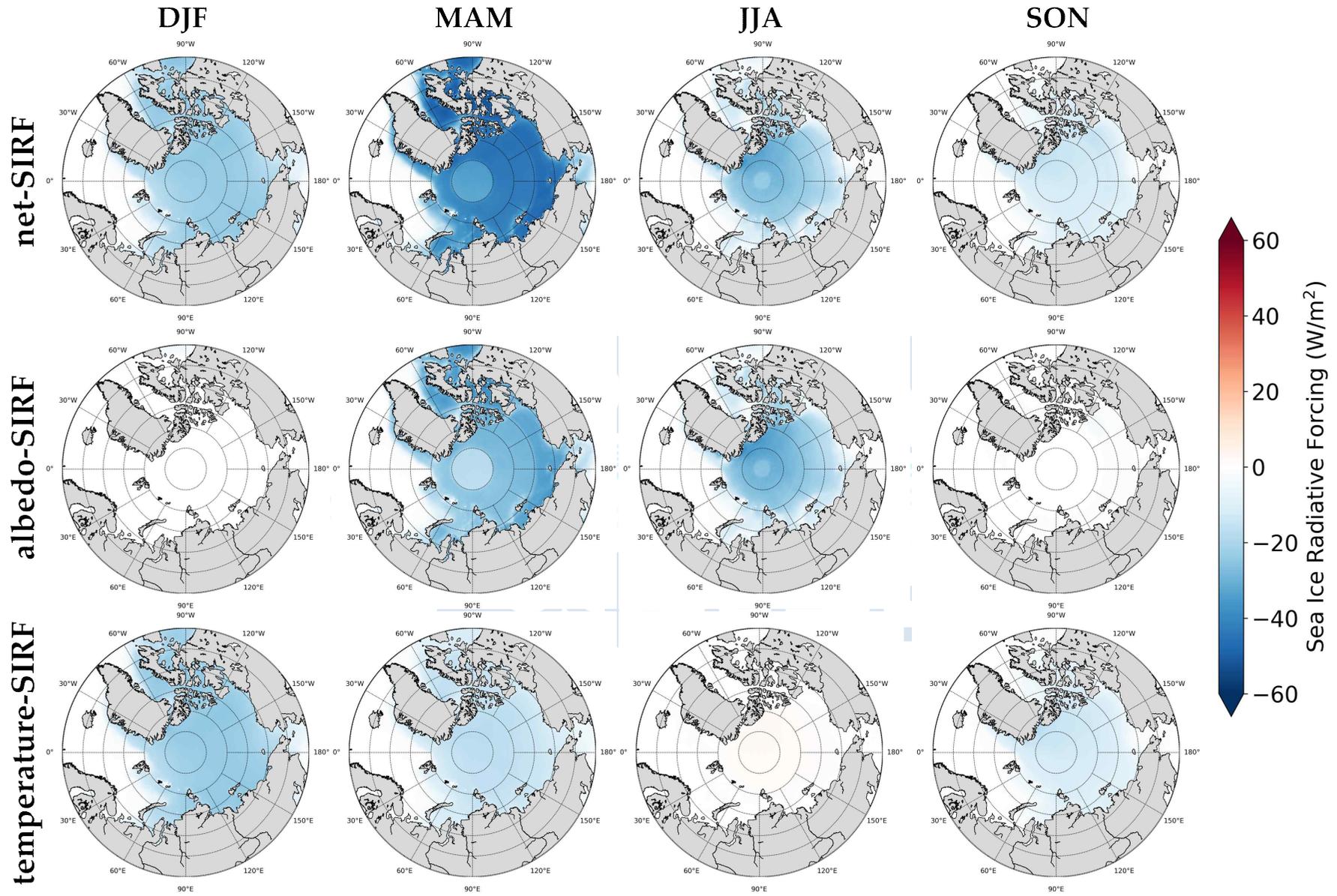


그림 19. 각 기후모델의 평균 커널값을 활용한 계절별 평균 SIRFs 공간적 분포, 가로축 : 계절, 세로축 : 각 요소별 SIRF

표 10. 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 19와 같이 변화량이 거의 나타나지 않았다. 다른 계절과는 달리 이 시기에는 선정된 계절 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 20과 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 21은 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 22는 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 21에서 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.

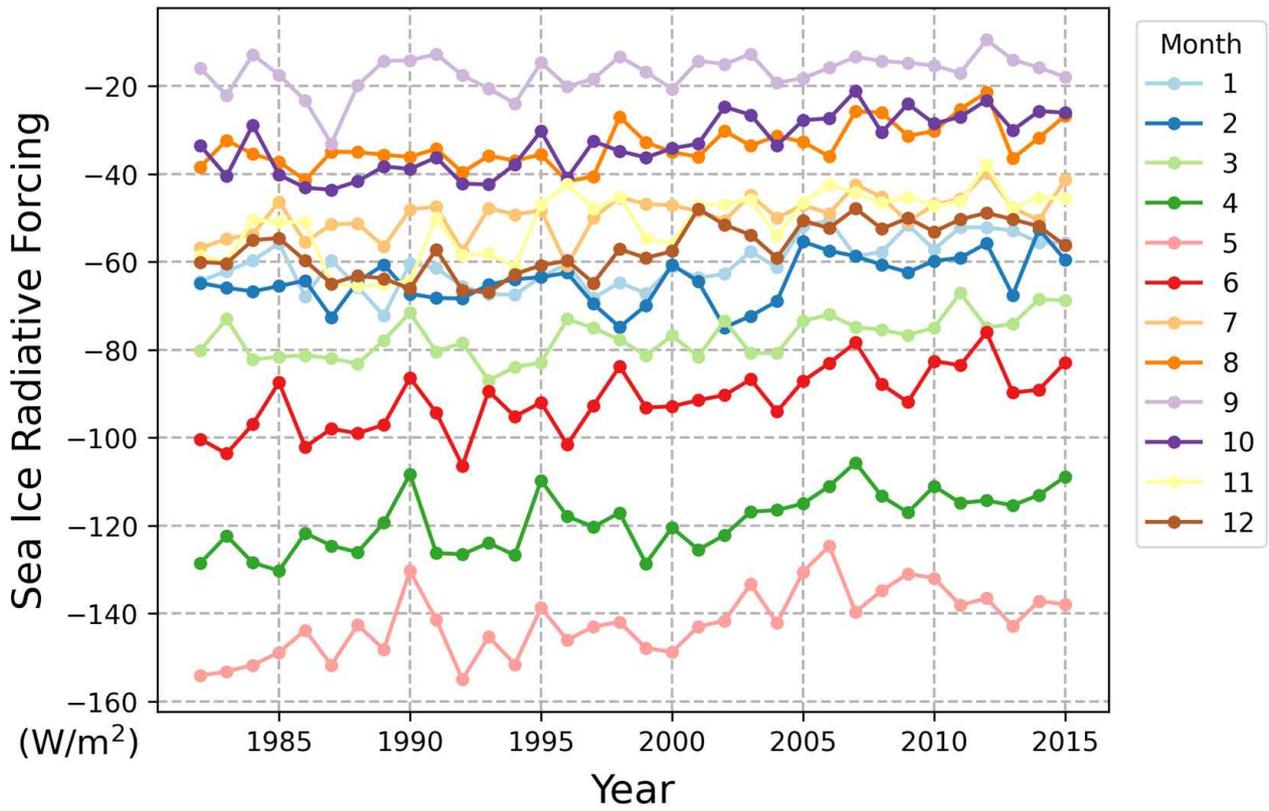


그림 20. 5개 커널 평균값을 이용한 월별 net-SIRF 시계열 분포

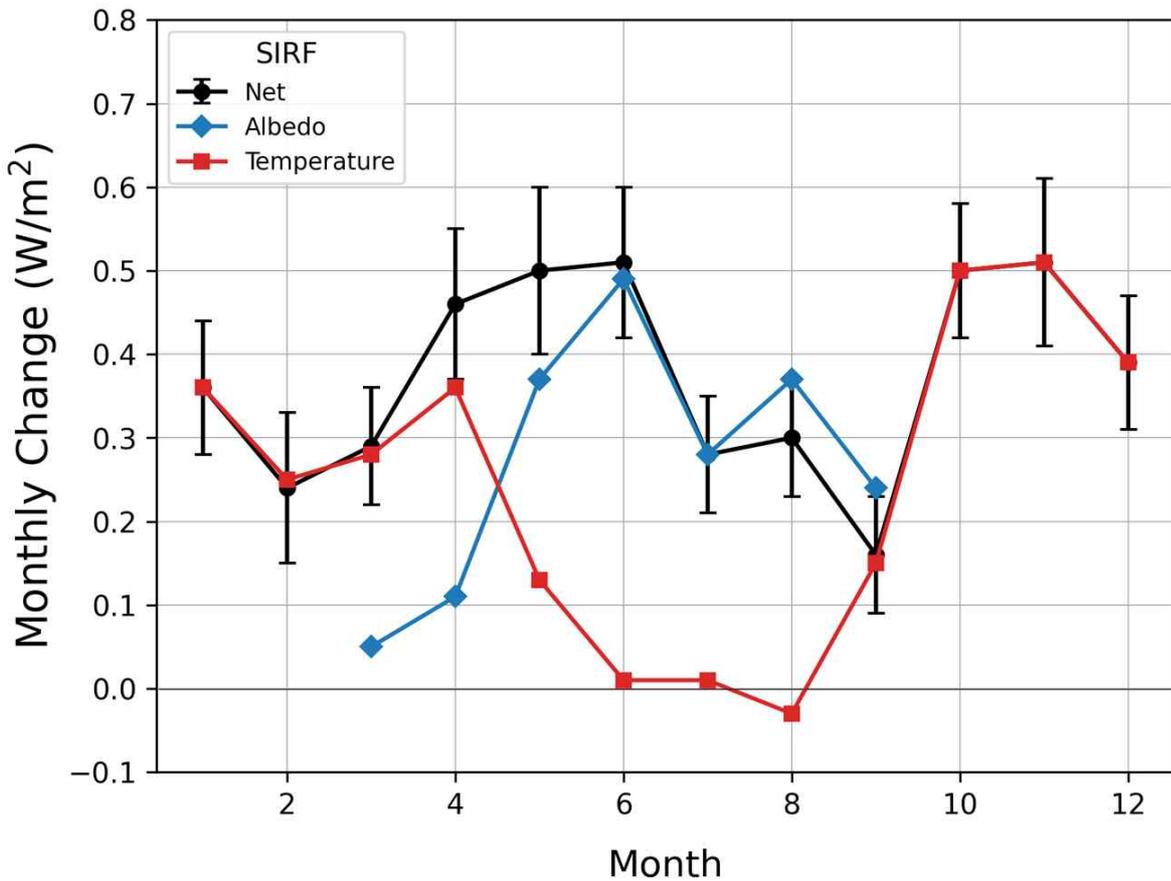


그림 21. 1982년부터 2015년 동안 각 요소별 SIRF 월별 변화량

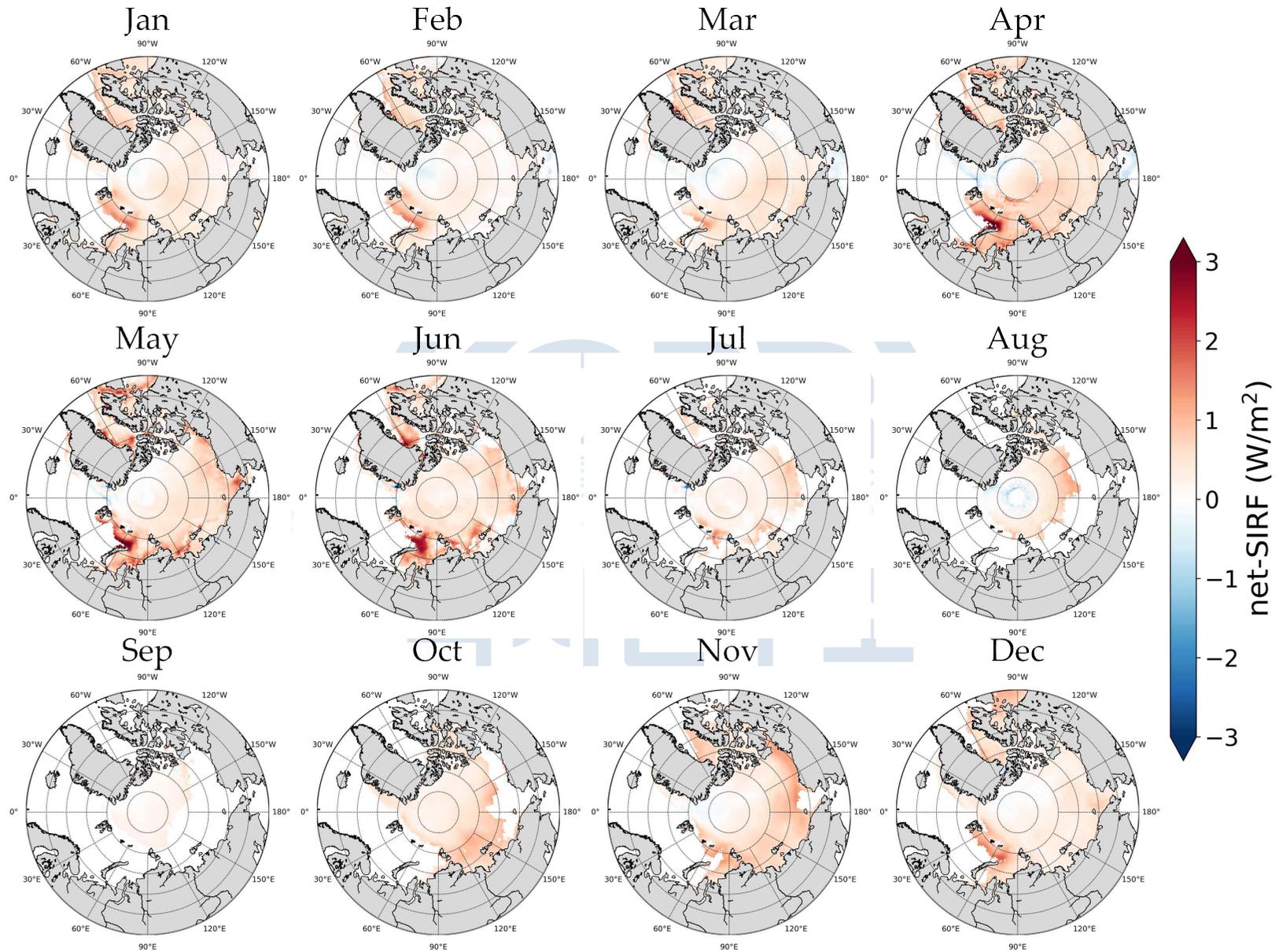


그림 22. net-SIRF 월별 변화량의 공간적 분포

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 23은 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 24와 같이 나타난다. 여름철과 다르게 전체적인 분포특성의 차이는 있지만 여름철보다는 유사한 분포를 띤다. 하지만 MODIS의 경우 Brightness Temperature 기반으로 IST를 산출하는데 이 때, 위성의 궤도 및 구름의 영향으로 결측이 발생하게 된다.

따라서 제 4절에서는 계절에 관계없이 결측지가 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

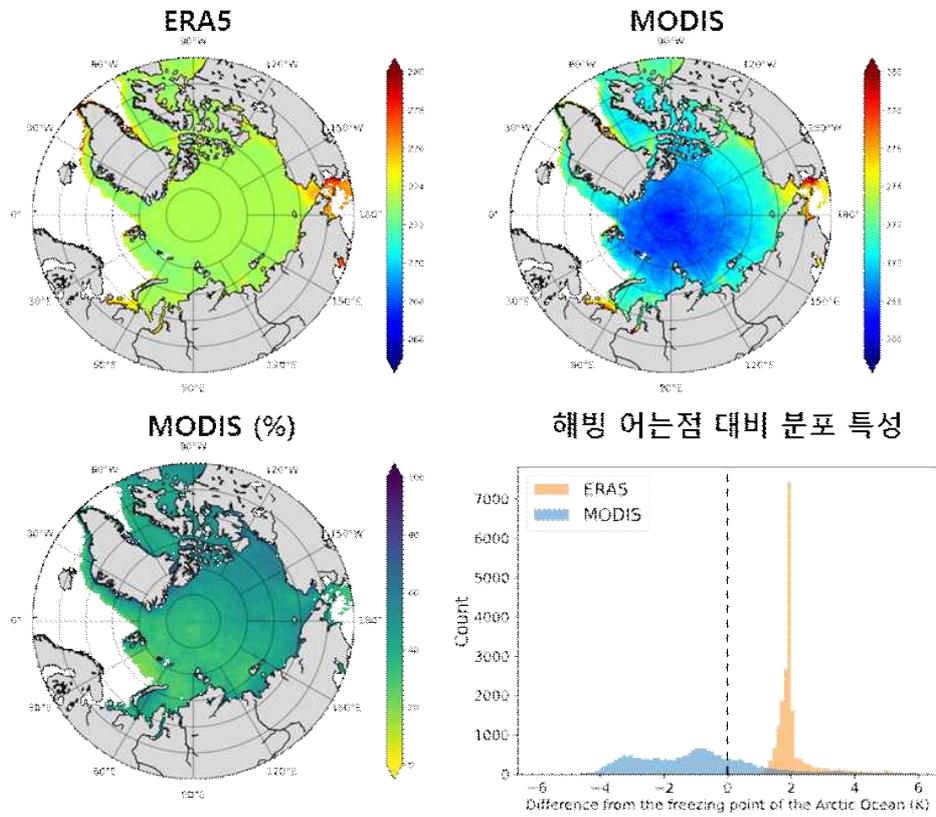


그림 23. 2000-2015년 기준 6월 평균 ERA5 및 MODIS의 표면온도 분포 특성

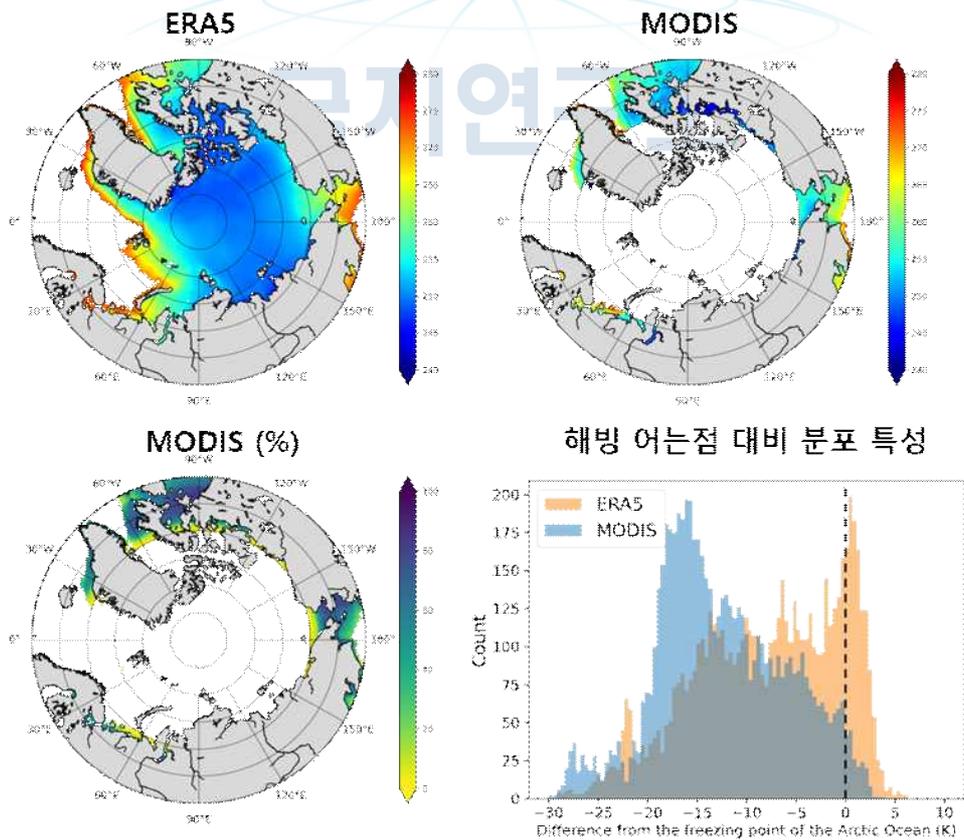


그림 24. 2000-2015년 기준 12월 평균 ERA5 및 MODIS의 표면온도 분포 특성

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 Christopher A. et al., (2014) 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 생상한 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(Preußner, 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 11um의 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 설명자로서 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 11). GridSearchCV는 하이퍼파라미터를 순차적으로 학습시킨 후 최적의 값을 도출하는 방식이다. 또한 과적합방지를 위하여 EarlyStopping 콜백함수를 적용하였다. 훈련 및 검증데이터, 테스트 데이터는 StratifiedShuffleSplit를 사용하여 동일한 월을 기준으로 각각 60%, 20%, 20%로 분류하여 사용하였다. 그림 25는 본 연구의 DNN 구조를 도식화 한 것이다.

표 11. 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)

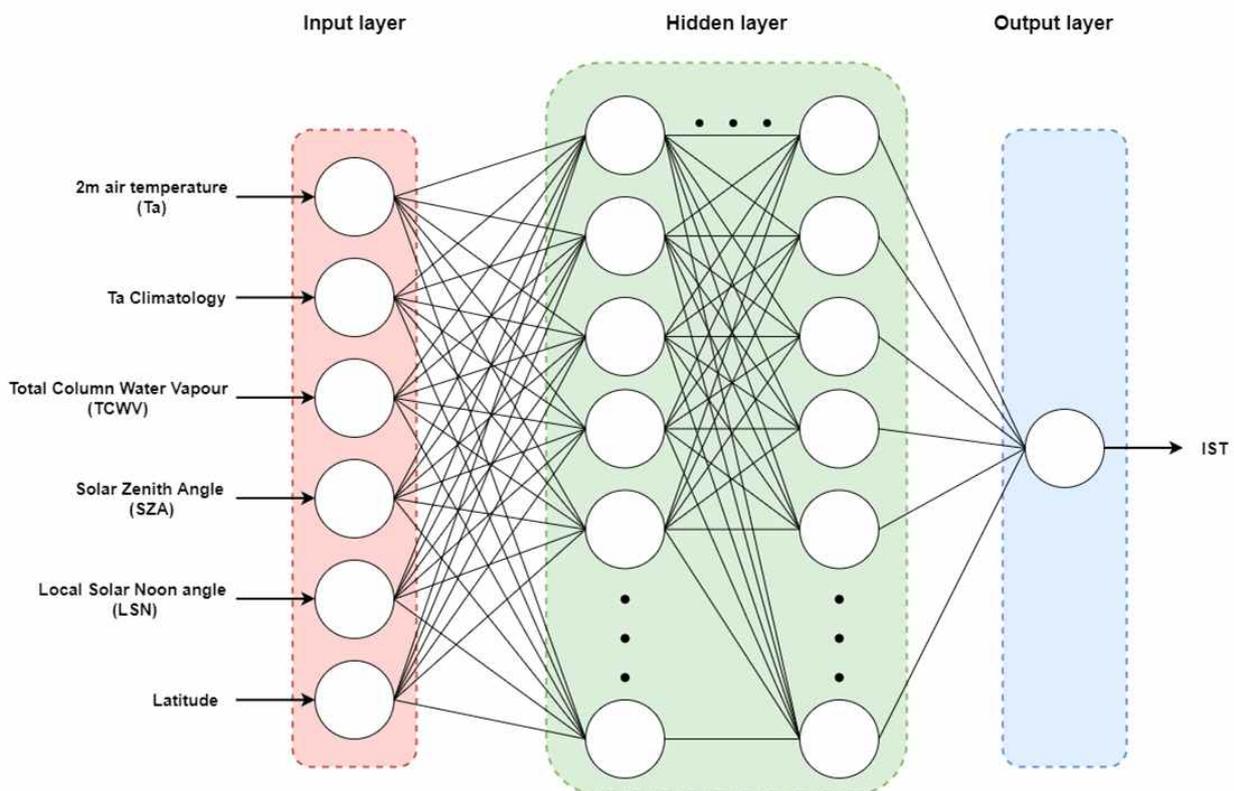


그림 25. 본 연구에 적용한 DNN 구조

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 측도이다. 정밀도(precision)를 표현하는데 적합하다. 각각의 차이값은 잔차(residual)라고도 하며, 평균 제곱근 편차는 잔차들을 하나의 측도로 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 26(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 26(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 27은 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.

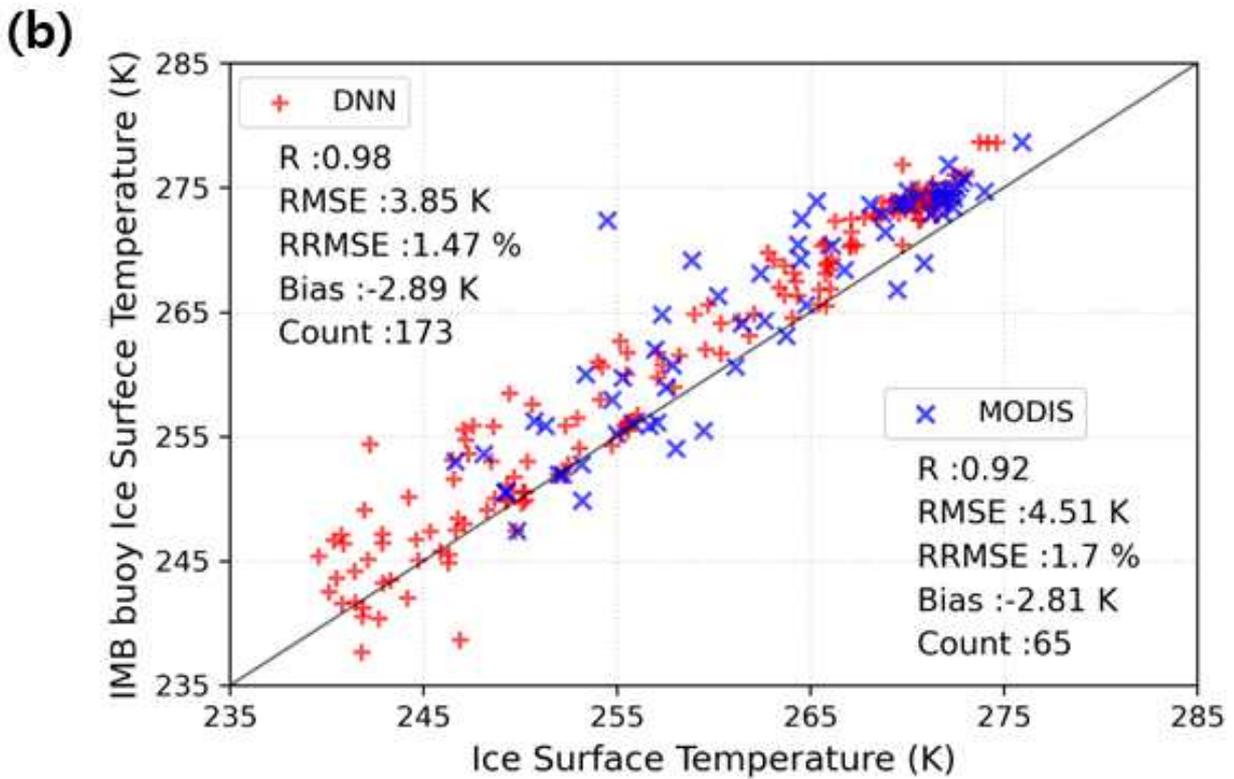
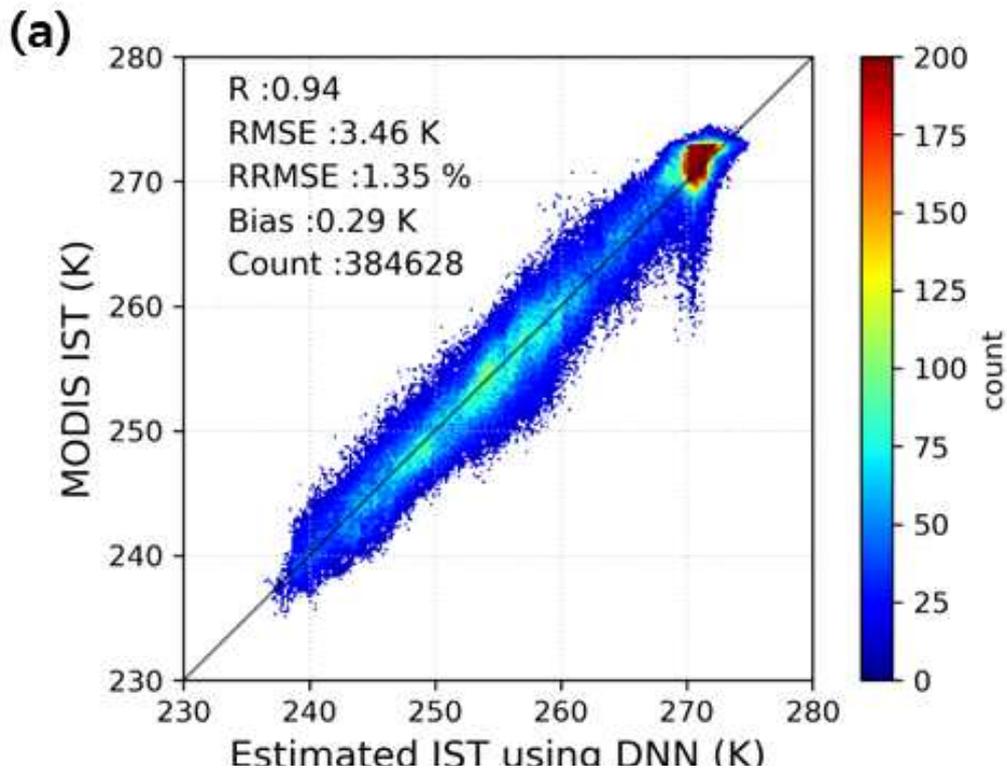


그림 26. MODIS IST 및 IMB buoy 데이터를 통해 DNN 기반 IST 검증 결과. (a) DNN기반 IST와 MODIS IST의 분포. (b) DNN 기반 IST 및 MODIS IST와 IMB buoy IST와 비교.

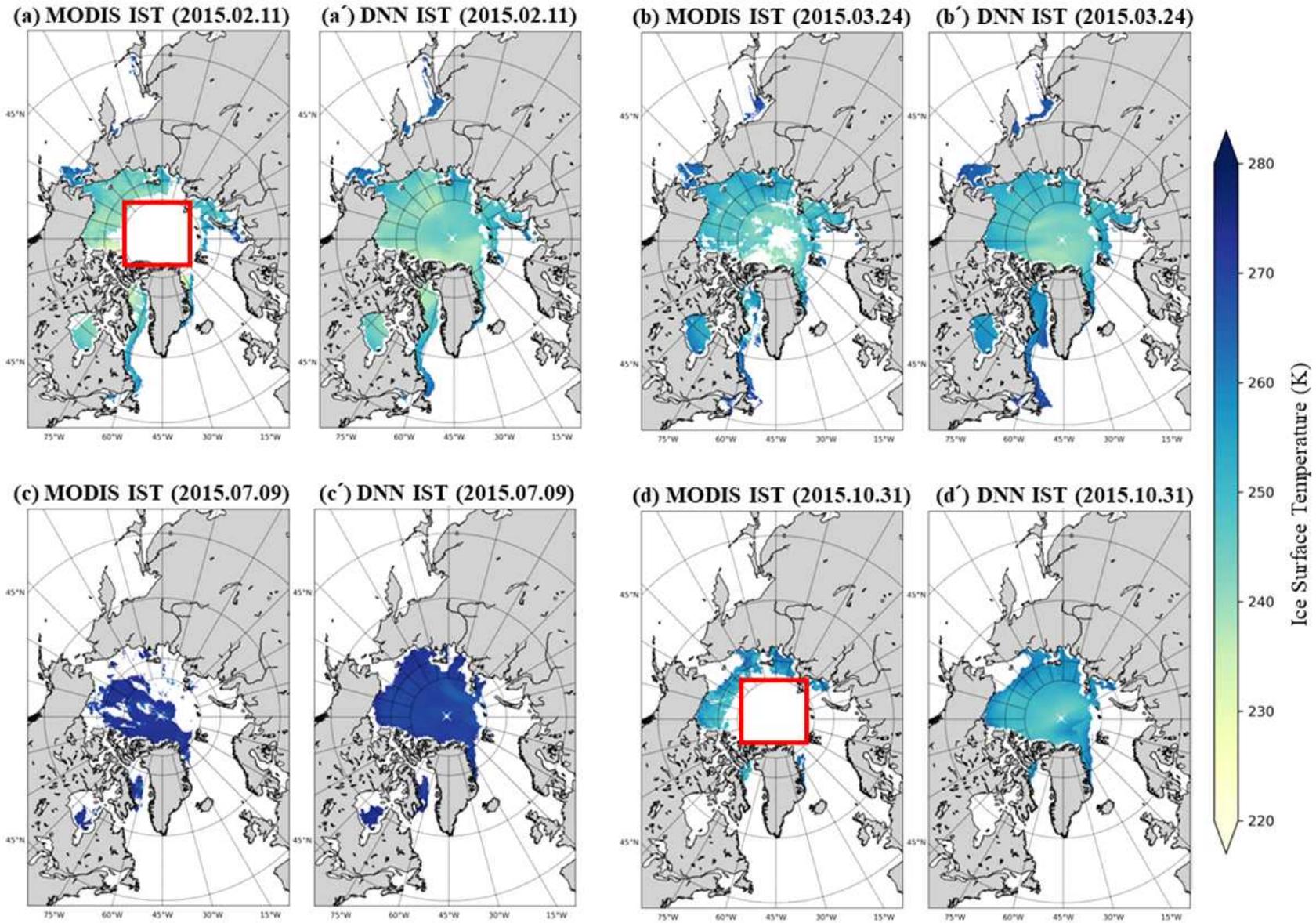


그림 27. MODIS IST(a, b, c, d)와 DNN 기반 IST와(a', b', c', d')의 공간적 분포.

다음으로 Case에 따른 분석을 수행하였다. 그림 28(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 28(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.

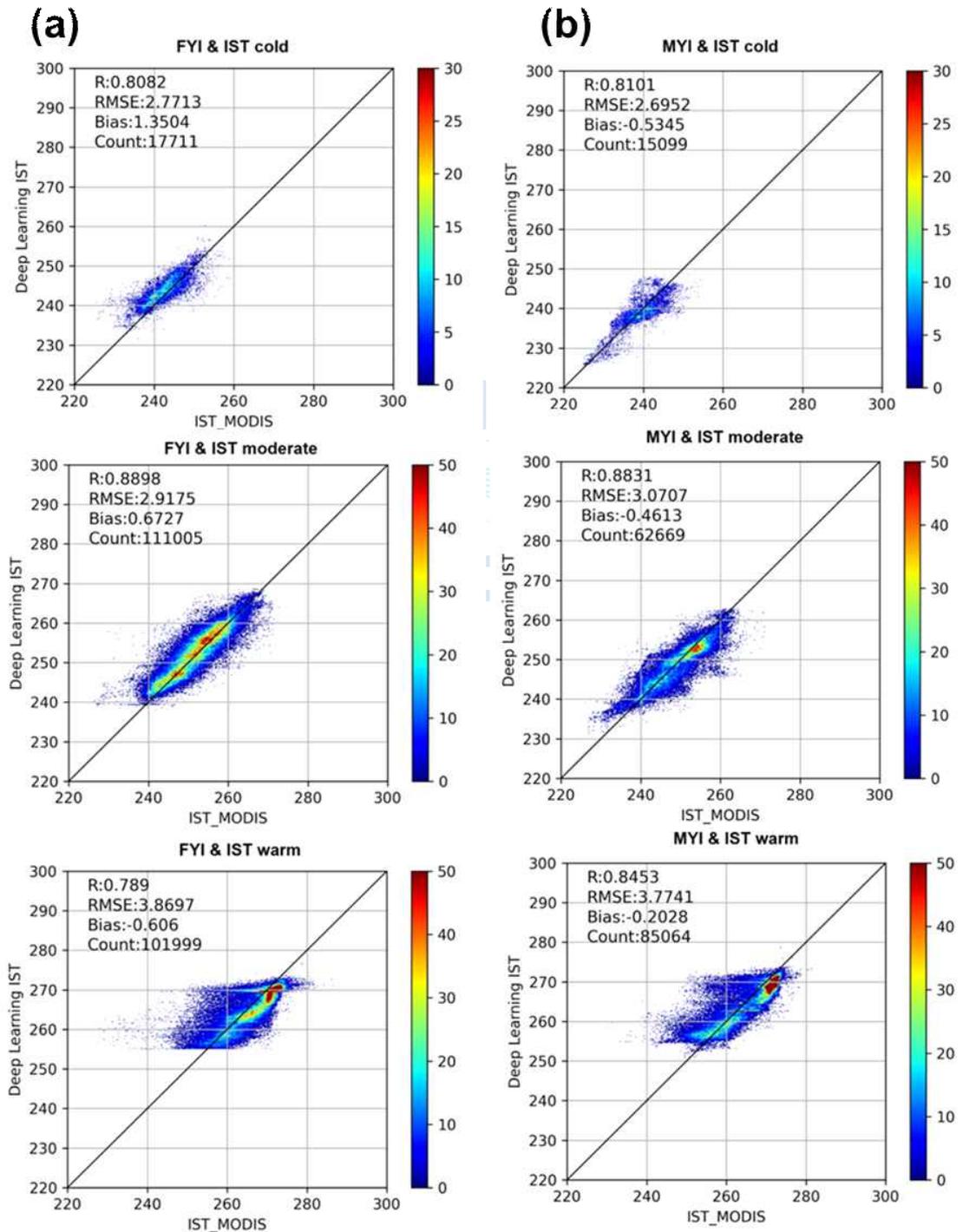


그림 28. Case 별 MODIS IST와의 검증 결과

그림 29는 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 절댓값이 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.

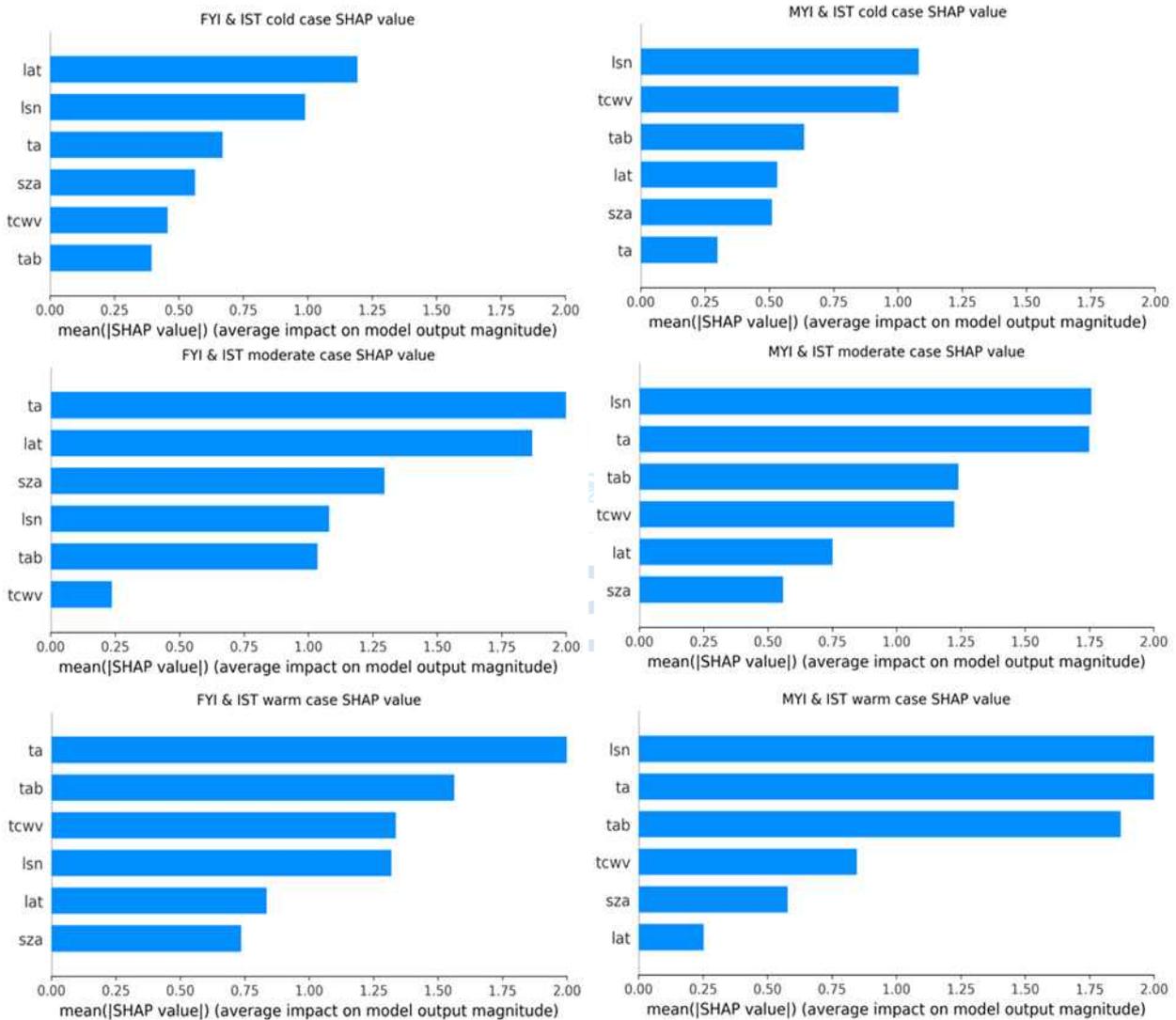


그림 29. SHAP를 활용한 Case에 따른 변수 중요도 평가 결과

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 30은 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 31은 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 나타나고 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.

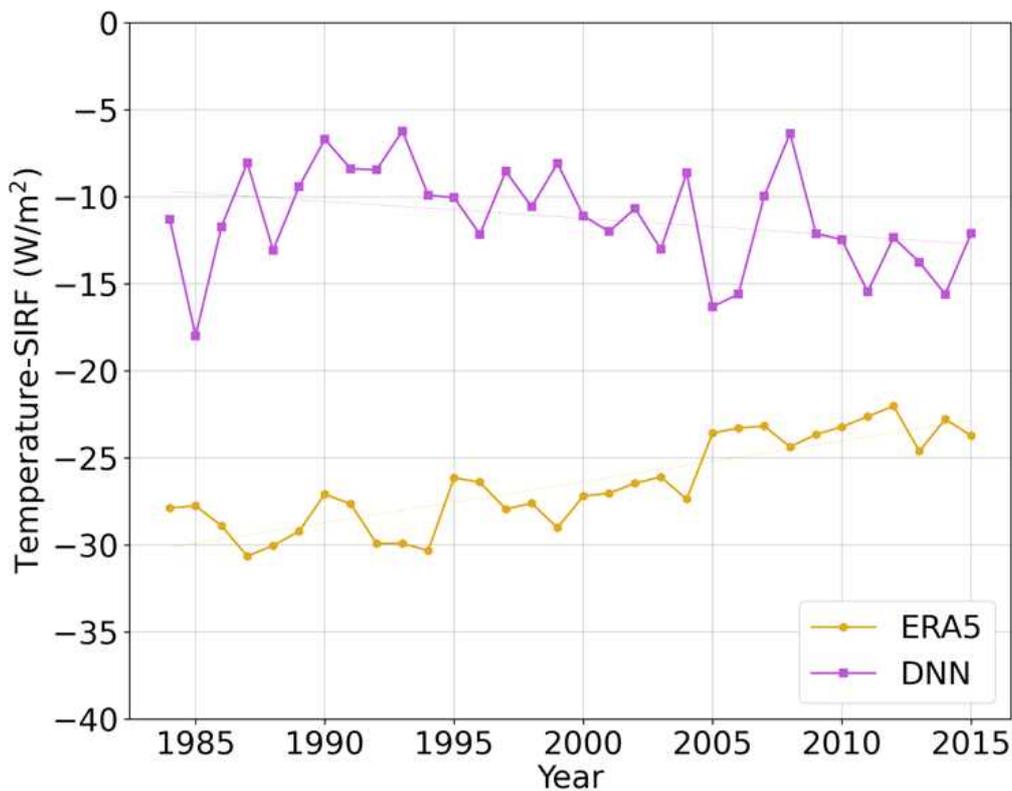


그림 30. ERA5-SIRF와 DNN-SIRF의 연평균 시계열 분포.

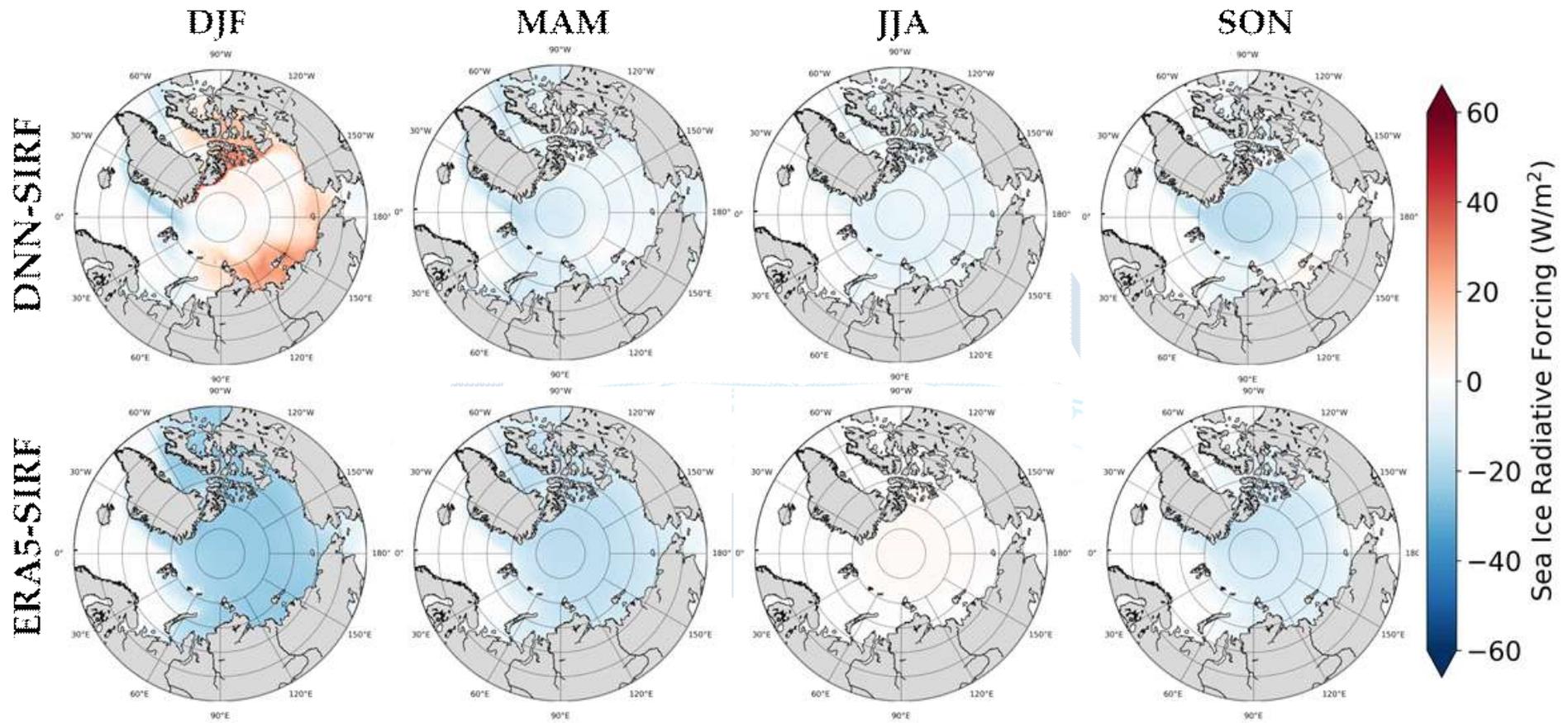


그림 31. ERA5-SIRF와 DNN-SIRF의 계절별 평균 공간적 분포.



연구개발목표 달성도 및
대외기여도
극지연구소

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연구개발목표의 달성도

1 연구 성과목표 및 달성도

표 12는 전체 연구 기간의 성과목표에 따른 세부목표와 달성 주요 내용, 그리고 그에 따른 달성도를 수치화한 것이다. 본 연구는 총 5가지의 성과목표를 중심으로 수행되었다. 첫 번째 성과목표는 위성 및 재분석자료를 활용한 북극 복사강제력 산출로 선정하였으며 총 3가지의 세부 목표를 설정하였다. 먼저 북극 지역의 복사강제력 산출 기준을 제시하고자 선진기관 및 선행 연구에서 수행된 위성기반의 복사강제력 산출 조건을 정리하였다. 다음으로 이를 바탕으로 본 연구에서 적용할 북극 지역의 복사강제력 산출기준을 제시하였다. 다음으로 복사강제력 산출을 위하여 자료 수집 및 전처리를 수행하였다. 총 1982년부터 2015년까지 다양한 자료를 취득하였으며 극지방에 최적화된 projection으로 변환하고 모든 자료를 월평균하였다. 추가로 Quality control를 이용하여 최적의 자료 sampling을 하였다. 이 자료를 바탕으로 북극 지역에 최적화된 해빙 변화에 따른 복사강제력 산출을 수행하였다.

두 번째 목표는 관측자료를 바탕으로 한 Radiative Kernel 평가를 진행하였다. 이를 위하여 albedo, skin temperature에 대해 총 5가지의 기후모델의 Radiative kernel 자료를 수집하였으며 각 모델에 따른 시공간 특성을 분석하였다. 다음으로 관측자료와 radiative kernel 자료 평가를 수행하였다. 지표변화(albedo, skin temperature)에 따른 커널 기반 TOA Flux 변화량을 산출하여 이를 바탕으로 관측기반 TOA radiation과 패턴을 비교하였다. 이를 바탕으로 기후모델들의 커널의 평균값을 이용하여 북극 지역의 해빙에 따른 복사강제력의 시공간 특성 분석을 수행하였다. 먼저 1차년도 연구결과에 이어서 Albedo, surface temperature 기반 복사강제력을 통합 및 분석하였다. 다음으로 계절에 따른 주도적 요인에 대해 분석하였다. 월별 해빙 변화량에 따른 복사강제력 특성 분석과 계절에 따른 주도적 요인을 파악했다. 마지막으로 Wariming에 대해 주도적 역할을 하는 해역에 대해 변화 경향을 파악하였다.

네 번째 목표는 DNN 기반의 해빙표면온도 산출이다. 2차년도에는 ERA5 skin temperature, 즉 재분석자료를 이용하여 temperature-SIRF를 산출하였다. 재분석자료와 위성기반 자료를 분포 특성이 달라 추가적으로 결측지가 없는 해빙표면온도 자료가 필요했다. 먼저 IST 산출을 위한 입력자료 선정을 위하여 북극의 해빙표면온도와 밀접한 변수를 선정하고 MODIS IST와의 변수별 상관관계 분석을 수행했다. 이를 바탕으로 DNN기반 모델을 구축하였다. 입력자료 및 hyperparameter에 따른 모델의 정확도 분석을 수행하고 최종적으로 DNN기반의 IST 산출 모델을 선정하였다. 최종 선정된 DNN 기반 IST를 타 위성 및 In-situ 자료를 활용하여 평가를 진행하였다. 이 때 훈련에 사용하지 않은 MODIS IST자료와 CREEL-Mass Balance Buoy 자료의 표면온도와 검증 수행했다.

마지막으로 DNN 기반 IST를 활용하여 복사강제력 산출 및 평가를 수행했다. 먼저 DNN 기반 IST 바탕의 temperature-SIRF를 산출하고 2차년도 연구결과와 현 연구결과를 비교 및 평가하였다.

표 12. 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	IST 산출을 위한	북극의 해빙표면온도와 밀접한 변수 선정	100%

해빙표면온도 산출	입력자료 선정	MODIS IST와의 변수별 상관관계 분석	
	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%

2 연구 성과목표 및 평가의 착안점

연구 성과목표 및 목표에 따른 세부목표, 목표들의 가중치, 해당 연구의 평가 착안점 및 척도에 관해 정리하였다(표 13). 성과목표와 세부목표에 관련된 자세한 내용은 표 12와 본문에 설명하였다. 북극 지역의 복사강제력 산출 기준을 제시하기 위하여 3개 이상의 기관 및 다양한 선행 연구를 조사하였다. 다음으로 이를 바탕으로 복사강제력을 산출하기 위하여 장기간의 다양한 자료 수집 및 전처리를 수행을 통해 북극 지역의 복사강제력을 산출하였다. 연구기간은 1982년부터 2015년까지 34년으로 설정하였으며 해당 연구결과를 바탕으로 학술대회 발표를 진행하였다. 다음으로 관측자료를 바탕으로 Radiative Kernel 평가를 위하여 총 5개의 Radiative kernel 자료를 취득하였고, 위성 기반의 radiation 자료를 수집하였다. 본 연구에서는 RMSE, Bias와 같은 통계적 수치를 활용하여 정량적인 검증 score를 제시하였다. 다음으로 북극 지역의 해빙에 따른 복사강제력 시공간 특성 분석의 대한 목표를 위하여 10년 이상의 자료를 생성하고 위와 마찬가지로 정량적인 score를 제시하였다. 이를 취합하여 학술대회 발표 및 국제 학술지에 논문을 게재하였다. 3차년도에 수행한 DNN 기반의 해빙표면온도 산출은 선행연구 활용 여부 조사 바탕으로 연구를 수행하여 최종 결과에 대한 정량적 검증 결과를 제시하고 해당 내용을 학술대회에 발표하였다. 마지막으로 DNN 기반 IST를 활용한 복사강제력 산출 및 평가 내용은 10년 이상의 자료 생성 및 정량적 검증 결과를 제시하였다.

표 13 전체 연구 기간의 성과목표 및 평가의 착안점

년도	성과목표	세부목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1차년도 (2020)	위성/ 재분석자료를 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 - 학술대회 발표 - 정량적인 score
		계절에 따른 주도적(Albedo, Surface Temperature) 요인 분석	25	
		지역에 따른 복사강제력 특성 파악	25	
	3차년도 (2022)	DNN기반 해빙표면온도 산출	IST 산출을 위한 입력자료 선정	20
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

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
극지연구소

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 추가연구의 필요성

해빙표면온도는 해빙 예측 모델 및 대규모 기후 모델에서의 중요 매개 변수로, 해빙의 성장 및 대기-해양간 열적 교환을 제어하는 요소이다. 또한 IST는 해빙 열역학의 상한선을 통제하며 해빙과 눈의 열수지에 중요한 자료이기 때문에 극지방 에너지수지 파악에 필요한 현잠열 및 복사강제력 산출의 필수 입력 변수(Key and Haefliger, 1992)이다. 따라서 극지방의 기후시스템을 이해하기 위해서는 극지방 전역의 시·공간적 연속성이 뛰어난 장기간 IST 자료가 필수적이다. 하지만 춥고 접근성이 어려운 극지방의 지리적인 특성 상 현장관측 기반 IST 자료는 현재 상당히 부족한 실정이다(Fan et al., 2020). 이러한 극지방 실측자료의 한계점으로 인해 위성자료 활용의 중요성이 대두됨에 따라 다양한 극지 연구에서 위성자료 기반 산출물을 활용하고 있다. 기존의 광학 위성자료 기반 IST 산출 알고리즘은 대부분 11 μm 와 12 μm 파장의 밝기온도(Brightness Temperature) 차이를 이용하여 산출하고 있으며(Dybkjaer et al., 2018), 대표적인 광학 위성인 MODIS의 경우, 북극 지역에서 약 3.7 K의 정확도로 IST를 산출하고 있다(Hall et al., 2004). 하지만 밝기온도를 활용한 산출 방법은 구름 및 극야(Polar night)에서는 산출이 불가능하기 때문에, 구름이 많이 발생하는 여름철과 극야에 해당하는 겨울철에 다량의 IST 결측 값이 발생한다는 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 IST와 높은 상관성을 갖는 기상, 해빙 그리고 기하변수들을 선정하고 이를 기반으로 DNN 모델을 활용하여 IST 예측 모델을 생성하였다. 다양한 연구에서 DNN을 활용하여 위성산출물을 개발하고 있지만, xgboost, lightGBM, ConvuLSTM 등 다양한 기계학습 모델에서 DNN 보다 우수한 성능이 나타난다고 알려져 있다. 따라서 DNN 뿐만 아니라 다양한 기계학습 모델을 적용하고, 모델 결과에 가장 큰 영향을 끼치는 입력자료에 대한 추가적인 문헌조사 및 실험을 통하여 최적의 입력자료와 기계학습 모델을 선정이 필요하다.

제 2 절 타 연구에의 응용

기후 되먹임(climate feedback) 작용은 기후 시스템에 작은 변화가 일어났을 때 이를 증폭시키거나 약화시킬 수 있는 기후 시스템 내부의 고유 메커니즘이다. 지구온난화에 있어 기후 되먹임 작용은 매우 중요한 역할을 한다. 기후 되먹임 과정은 지구상 대기와 해양, 생명 현상 등 다양한 물리 과정 속에 내재되어 있으며 따라서 지역마다 매우 다른 양상으로 나타난다. 북극은 전지구상에서도 기후 되먹임 작용이 가장 다양하고 강력하게 발생하고 있는 지역이기 때문에 지구시스템의 기후 되먹임 과정을 이해하는데 있어서 매우 중요한 장소이다(Serreze et al., 2006). 지구시스템 내에 존재하는 가장 강력한 되먹임 작용은 극지 해빙 변동을 조절하는 아이스-알베도 피드백이다. 하지만 일부 연구에서는 아이스-알베도 피드백 보다 아이스-온도 피드백이 북극 온난화에 더 큰 영향을 끼친다고 제시하였다(Screen et al., 2010; Pithan et al., 2014). 피드백은 surface air temperature의 1도 상승에 따른 표면요소 변화에 의한 복사강제력의 변화량을 TOA에서의 Net radiation으로 정량화 할 수 있다. 따라서 본 연구의 복사강제력 결과를 활용한다면 본 과제의 최종 목표인 북극 빙권 변화 정량 분석을 통한 온난화 영향 평가에 적극적으로 기여할 것이라 판단된다.



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

극지연구소

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 in netcdf : <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.