

TSPE19120-041-12

북극해 에너지 해석을 통한 빙권 변동 요인  
분석

Analysis on variability of cryosphere through  
energy analysis over Arctic ocean



부경대학교

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 해빙 위성관측을 위한 분석 기술 개발” 과제의 위탁연구 “북극 해 에너지 해석을 통한 빙권 변동 요인 분석” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



2020. 1. 20.

(본과제) 총괄연구책임자 : 김 현 철

위탁연구기관명 : 부 경 대

위탁연구책임자 : 한 경 수

위탁참여연구원 : 서 민 지

“ : 이 경 상

“ : 최 성 원

“ : 성 노 훈

“ : 진 동 현

“ : 김 흥 희

“ : 이 다 래

“ : 권 채 영

“ : 이 은 경

“ : 한 현 경

# 보고서 초록

위탁연구과제명	북극해 에너지 해석을 통한 빙권 변동 요인 분석				
위탁연구책임자	한 경 수	해당단계 참여연구원수	11	해당단계 연구비	1차연도(2017): 70,000,000
					2차연도(2018): 50,000,000
					3차연도(2019): 50,000,000
연구기관명 및 소속부서명	부경대학교		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	87
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>장기간 북극지역의 에너지 수지와 관련한 자료 수집 및 전처리</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ERA5, NCEP, CERES EBAF, GEWEX SRB 등 5가지 이상의 복사 에너지 자료 수집</li> <li>- Equidistant Cylindrical Projection/Polar stereo graphic projection을 EASE 2.0 Grid로 re-mapping</li> </ul> </li>   <li>• <b>에너지 변수별 품질 분석</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- GEWEX 여름: 위도 80o 지역 과대추정, 겨울: 보퍼트, 추코트, 랍테프해역 과대추정</li> <li>- CMSAF 여름: 배핀만, 카라해 과소 추정, 겨울: 배핀만, 극점 부근 과소 추정</li> </ul> </li>   <li>• <b>북극 지역의 Radiative flux 변동 특성 분석</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 장기간 net radiation data set 산출 : - Net radiation trend : <math>-0.42 \text{ W/m}^2 \text{ decade}^{-1}</math></li> <li>- 계절별 순 복사의 경향 분석 : 봄 (<math>-8.98 \text{ W/m}^2 \text{ decade}^{-1}</math>), 여름 (<math>-2.07 \text{ W/m}^2 \text{ decade}^{-1}</math>) : 가을 (<math>-3.59 \text{ W/m}^2 \text{ decade}^{-1}</math>), 겨울 (<math>-6.3 \text{ W/m}^2 \text{ decade}^{-1}</math>)</li> </ul> </li>   <li>• <b>현열 추정을 위한 전처리 및 추정 및 고도화</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 4가지 방법을 활용한 현열 테스트 추정</li> <li>- RMSE : Case 2(<math>32.5 \text{ W/m}^2</math>), Case 3(<math>51.20 \text{ W/m}^2</math>), Case 4(<math>39.03 \text{ W/m}^2</math>)</li> <li>- Bias: Case 2(<math>-26.05 \text{ W/m}^2</math>), Case 3(<math>-42.30 \text{ W/m}^2</math>), Case 4(<math>-32.29 \text{ W/m}^2</math>)</li> <li>- 해빙특성을 고려한 현열 추정을 위하여 딥러닝을 활용한 현열 추정 고도화</li> </ul> </li>   <li>• <b>산출된 장기간 현열 변화 분석</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 계절별 현열 변화 분석 : 봄 (<math>2.02 \text{ W/m}^2 \text{ decade}^{-1}</math>), 여름 (<math>-0.95 \text{ W/m}^2 \text{ decade}^{-1}</math>) : 가을 (<math>2.50 \text{ W/m}^2 \text{ decade}^{-1}</math>), 겨울 (<math>1.72 \text{ W/m}^2 \text{ decade}^{-1}</math>)</li> </ul> </li>   <li>• <b>에너지 수지 모델 prototype 개발</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 에너지 수지 추정을 위한 자료 수집 및 전처리</li> <li>- Energy budget diagram (북극권, 2001~2007) 개발</li> </ul> </li> </ul>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	북극해, 에너지 수지, 순복사, 현열, 기온, 북극 온난화, 위성 자료			
	영 어	Arctic ocean, Energy budget, Net radiation, Sensible heat flux, temperature, Arctic warming, satellite data			

# 요 약 문

## I. 제 목

북극해 에너지 해석을 통한 빙권 변동 요인 분석

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

북극 지역과 같은 극지방의 경우 기후변화에 민감하게 반응하는 지역이자 전 지구적 기후변화에 영향을 미치는 주요 지역이다. 특히 북극 지역은 다양한 기후 피드백 메커니즘이 강력하게 발생하는 지역으로 기후변화에 결정적 역할을 한다. 하지만 극지방의 변동 요인에 관한 명확한 규명이 미흡하며, 이를 해결하기 위해서는 북극 지역의 에너지 수지의 정량적 변화 및 빙권 변동 요인의 파악이 필요하다. 북극 지역의 변화는 북극해 전역에서 다양하게 발생하기 때문에 넓은 지역의 변화를 관측하기 위해서는 실측자료보다 위성 자료를 활용하는 것이 실용적이다. 그러므로 위성 기반 자료를 활용하여 에너지 수지를 분석하고, 북극 해빙의 장기간 경향이 이와 어떤 연결고리가 있는지 파악하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 장기간 현장관측과 원격탐사 자료의 확보를 통해 북극 지역에서 순복사와 현열 변화가 에너지 수지에 미치는 지표과정 규명하고자 한다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 장기간 북극지역의 에너지 수지와 관련한 자료 수집 및 전처리
- 에너지 변수별 품질 분석
- 북극 지역의 Radiative flux 변동 특성 분석
- 현열 산출을 위한 전처리 및 산출
- 현열 산출 시 입력자료의 민감도 분석 및 현열 정확도 분석
- 산출된 장기간 현열 변화 분석
- 해빙 지역에서의 현열 추정 알고리즘 고도화
- 에너지 수지 모델 prototype 개발

## IV. 연구개발결과

- 장기간 북극지역의 에너지 수지와 관련한 자료 수집 및 전처리
  - 5가지 radiative flux 수집
  - 수집된 radiative flux 자료의 re-mapping
- 에너지 변수별 품질 분석
  - 선행 연구를 바탕으로 취득되는 자료에 따라 2가지의 순복사 산출 방식 이용
  - 위성 자료별 순복사의 계절별 공간적 차이 특성 분석

- 통계적 수치를 이용한 위성 자료별 오차 분석
- 실측자료를 이용한 위성 기반 순복사 검증
- 위성 자료 사이의 일관성 test 진행
  
- 북극 지역의 Radiative flux 변동 특성 분석
  - 전체 연구 기간 동안 순복사의 연간 경향 분석
  - 세부 연구영역별 시계열 변화 분석
  - 계절별 순복사의 변화 경향 분석
  
- 현열 산출을 위한 전처리 및 산출
  - 선진기관 현열 산출 기법 정리
  - 해빙/해빙 구역 구분 및 입력자료 분류(위성/모델)
  - 위성 기반 현열 시험 추정
  
- 현열 산출 시 input 자료의 민감도 분석 및 현열 정확도 분석
  - input 자료의 민감도 분석
  - 타 산출물 자료와 inter-comparison
  
- 산출된 장기간 현열 변화 분석
  - 시·공간적 변화 경향 분석
  - 다양한 조건에 따른 연구 권역 분류 및 세부 권역 분석
  
- 해빙 지역에서의 현열 추정 알고리즘 고도화
  - 해빙특성을 고려한 현열 추정
  - 딥러닝을 활용한 현열 추정
  
- 에너지 수지 모델 prototype 개발
  - 에너지 수지 추정을 위한 자료 수집 및 전처리
  - 위성 자료 및 재분석 자료를 활용한 Heat content 추정
  - 북극 지역의 에너지 수지 추정을 통한 에너지 수지 모델 prototype 개발
  - 북극 해빙 변동성 및 변동 요인 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

Analysis on variability of cryosphere through energy analysis over Arctic ocean

### II. Purpose and Necessity of R&D

Polar regions as Arctic are influenced by climate changes, and these area affects global climate changes. In addition, Arctic is key parameter in climate change because it is a region where several feedback mechanisms are strong. However, there is insufficient explanation for polar factors. Therefore, it is necessary to analyzed the quantitative changes in the energy balance of the Arctic region and the factors affecting the cryosphere. Variability of cryosphere factors and energy budget appear in large area over Arctic Ocean. Therefore, it is practical to use satellite data rather than in-situ data in order to observe changes in wide areas. It is necessary to analyze the link between long-term trends in Arctic sea ice and energy balance using satellite-based data. Therefore, in this study, we want to investigate the process of energy balance in the Arctic region through long-term field observations and remote sensing data.

### III. Contents and Extent of R&D

- Collection and processing of satellite-based long-term energy budget
- Quality analysis of energy budget data
- Study on variability of radiative flux over Arctic region
- Data collection and post-processing for estimation of sensible heat flux
- Sensitivity analysis of input data in estimation of sensible heat flux and accuracy analysis of estimated sensible heat flux
- Long-term analysis of the sensible heat flux
- Advancement of sensible heat estimation algorithm in sea ice area
- Development of energy balance model prototype

### IV. R&D Results

- Collection and processing of satellite-based long-term energy budget
  - Collection of five radiative flux variables
  - Collection and pre-processing of the radiative flux data

- Quality analysis of energy budget data
  - Calculation on net radiation based on previous study
  - Analysis of seasonal spatial difference of net radiation by satellite data
  - Error analysis by satellite data using statistical methods
  - Validation of net radiation based on satellite data using in-situ data
  - Inter-comparison between satellite data
  
- Study on variability of radiative flux over Arctic region
  - Time series analysis on net radiation during study periods
  - Time series analysis on net radiation per area of interest
  - Analysis on seasonal variability of net radiation
  
- Data collection and post-processing for estimation of sensible heat flux
  - Investigation of sensible heat flux calculation techniques in advanced organizations
  - Classification of sea ice / ocean area and input data (satellite / model)
  - Test estimation of sensible heat flux based on Satellite data
  
- Sensitivity analysis of input data in estimation of sensible heat flux and accuracy analysis of estimated sensible heat flux
  - Sensitivity analysis of Input data for estimation of sensible heat flux
  - Inter-comparison between estimated sensible heat flux and other organizations sensible heat flux products
  
- Long-term analysis of the sensible heat flux
  - Analysis of spatial and temporal trend over Arctic region
  - Classification of research area according to various conditions and analysis of time series each areas
  
- Advancement of sensible heat estimation algorithm in sea ice area
  - Estimation of sensible heat flux considering sea ice characteristics
  - Estimation of sensible heat flux using deep learning
  
- Development of energy budget model prototype
  - Collection data and post-processing for estimation of energy budget
  - Estimation of heat content using satellite and re-analysis data
  - Development of energy budget prototype model by estimating energy balance in Arctic region
  - Analysis on variability and change factor of Arctic sea ice

## 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 .....	1
제 1 절 목적 .....	1
제 2 절 필요성 .....	1
제 3 절 연구개발 내용 .....	4
제 4 절 기대효과 .....	5
1. 학술적 파급효과 .....	5
2. 경제적 파급효과 .....	5
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	7
제 1 절 극지방 기후변화 .....	7
제 2 절 극지방 에너지 수지 .....	9
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과 .....	12
제 1 절 연구 자료 .....	12
1. 위성 기반 Radiative flux .....	12
2. 복사 에너지 실측 자료 .....	17
3. 현열 산출을 위한 독립변수 .....	19
4. 추가 기온자료 .....	20
제 2 절 연구 방법 .....	21
1. 1차연도 (2017) .....	21
2. 2차연도 (2018) .....	22
3. 3차연도 (2019) .....	23
4. 목표 달성을 위한 연구 수행 방법 .....	24
제 3 절 연구 자료 전처리 및 위성 자료별 비교 분석 .....	27
1. projection 변환 .....	27

2. CM SAF과 GEWEX net radiation의 계절별 공간적 차이 특성 분석 .....	28
3. CM SAF과 GEWEX net radiation의 RMSE, bias 분석 .....	30
4. 실측 자료(SURE 07)를 이용한 위성 기반 net radiation 검증 .....	32
5. CERES와 GEWEX 사이의 일관성 Test .....	33
<b>제 4 절 공간자료별 복사 에너지 자료 검증 .....</b>	<b>34</b>
1. 장기간 ground observation을 활용한 검증 .....	34
<b>제 5 절 복사 에너지 자료의 장기간 변화 관측 .....</b>	<b>37</b>
1. 전체 연구 기간 net radiation의 변화 분석 .....	37
2. 계절별 net radiation의 변화 경향 분석 .....	38
3. 권역별 net radiation의 변화 경향 분석 .....	39
<b>제 6 절 위성 자료를 활용한 현열 추정 .....</b>	<b>43</b>
1. 선진기관 현열 산출 기법 정리 .....	43
2. 현열 추정을 위한 전처리 및 산출 .....	44
3. OAFlux 자료와의 상호 비교 .....	48
4. 현열 추정의 고도화 .....	52
5. 현열 경향성 변화 분석 .....	54
<b>제 7 절 에너지 수지 변화 .....</b>	<b>57</b>
1. 기온의 변화 .....	57
2. 에너지 수지 변화 prototype 모델 구축 .....	58
<b>제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 .....</b>	<b>62</b>
제 1 절 연구개발목표의 달성도 .....	62
1. 연구 성과목표 및 달성도 .....	62
2. 연구 성과목표 및 평가의 착안점 .....	64
<b>제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....</b>	<b>67</b>
제 1 절 추가연구의 필요성 .....	67

1. 북극 지역의 복사강제력 연구 .....	67
제 2 절 타 연구에의 응용 .....	67
1. 타 위탁연구와의 연계 .....	67
제 6 장 참고문헌 .....	70



# 표 목차

표 2.1.1. 극지방 기후변화와 관련된 연구 정리	8
표 2.2.1. 극 지역의 에너지 수지와 관련된 연구 정리	10
표 3.1.1. CM SAF albedo 자료의 정확도(CM SAF, 2016b)	13
표 3.1.2. CM SAF radiation 산출 자료의 정확도(CM SAF, 2016a)	13
표 3.1.3. GEWEX SRB 자료의 정확도( <a href="https://gewex-srb.larc.nasa.gov/">https://gewex-srb.larc.nasa.gov/</a> )	15
표 3.1.4. CERES radiation의 정확도.	16
표 3.1.5. NASA ground observation 자료의 정보	18
표 3.2.1. 목표 달성을 위한 연구 수행 방법	24
표 3.3.1. 위성별 검증 결과	33
표 3.4.1. 공간자료별 순 복사의 검증 결과	34
표 3.6.1. 기관별 현열 산출 알고리즘 및 입력자료 정리 (Yu et al., 2011 일부 인용)	44
표 4.1.1. 연구개발 목표 및 달성도	63
표 4.1.2. 전체 연구 기간의 성과목표 및 평가의 착안점	65



# 그림 목차

그림 1.2.1. 북극 지역의 다양한 기후 메커니즘(하호경과 김백민,2014) .....	1
그림 1.2.2. 본 과제와의 연계성 .....	3
그림 1.3.1. 전체 연구 개요 및 연구의 최종 목표 .....	4
그림 3.1.1. Earth' s radiation budget (NASA homepage). .....	12
그림 3.1.2. GEWEX all-sky shortwave downward flux 자료의 예. ....	14
그림 3.1.3. CERES EBAF 자료 예. ....	15
그림 3.1.4. ERA5 자료의 예시. ....	16
그림 3.1.5. NCEP 자료의 예시 .....	17
그림 3.1.6. Summit camp 위치. ....	17
그림 3.1.7. NASA CERES ground observation 위치. ....	18
그림 3.2.1. 1차연도 연구 흐름도. ....	21
그림 3.2.2. 2차연도 연구 흐름도. ....	22
그림 3.2.3. 3차연도 연구 흐름도. ....	23
그림 3.3.1. Northern and southern Equal-Area SSM/I Earth Grid projections(위) 와 Cylindrical EASE-Grid projection(아래) (Brodzik et al., 2012). ...	27
그림 3.3.2. 계절별 CERES 순복사와 각 위성 자료별 공간 분포 차이 (a)-(d)는 CM SAF 순복사와의 차이 분포, (e)-(h)는 GEWEX 순 복사 차이 분포; (a),(e) 2000/03(spring), (b),(f)는 2000/06(summer), (c),(g)는 2000/09(Autumn), (d),(h)는 2000/12(Winter). ....	29
그림 3.3.3. RMS-Diff(위)와 Bias(아래)의 시계열 변화 분포, 파란선은 GEWEX, 주황 색선은 CM SAF를 의미. ....	31
그림 3.3.4. 검증기간 동안 순 복사 자료의 시계열 분포, 빨간색 실선은 실측자료, 파란 색 선은 CERES, 주황색 선은 GEWEX, 초록색 선은 CM SAF. ....	32
그림 3.4.5. CERES 자료와 GEWEX 자료의 산점도 분포, x축은 CERES, y축은 GEWEX : Daily 분포(좌), Monthly 분포(우). ....	33
그림 3.4.1. ground observation과 공간자료 사이의 산점도(위쪽: TIK, 중간: SMT, 아래: NYA). ....	35
그림 3.4.2. ground observation과 공간자료 사이의 산점도(위쪽: NSA, 중간: ALE, 아래: BAR). ....	36
그림 3.5.1. Blending 된 순 복사의 시계열 분포. ....	37
그림 3.5.2. 계절별 순 복사의 시계열 분포. ....	38
그림 3.5.3. 연구 권역 구분, ocean 지역(좌), central arctic(우). ....	39
그림 3.5.4. Ocean 지역에서의 순복사 시계열 분포. ....	40

그림 3.5.5. Ocean 지역에서의 순복사 계절별 시계열 분포. ....	40
그림 3.5.6. Central arctic 지역에서의 순복사 시계열 분포. ....	41
그림 3.5.7. Central arctic 지역에서의 순복사 계절별 시계열 분포. ....	42
그림 3.6.1. 위성 기반 현열 시험 추정 흐름도. ....	44
그림 3.6.2. Case 1 현열 추정 예시. ....	45
그림 3.6.3. Case 2 현열 추정 예시. ....	46
그림 3.6.4. Case 3 현열 추정 예시. ....	47
그림 3.6.5. Case 4 현열 추정 예시. ....	48
그림 3.6.6. OAFflux와 추정된 현열의 공간 차이 분포 (OAFflux - Estimated sensible heat flux, 2002 ~ 2016). ....	49
그림 3.6.7. 전체 연구영역에서 OAFflux와 추정된 현열의 시계열 분포(2002~2016) ....	49
그림 3.6.8. OAFflux와 추정된 현열 사이의 산점도, all ocean(왼쪽), clearly ocean (오른쪽). ....	50
그림 3.6.9. 주요 해역별 OAFflux와 추정된 현열 사이의 산점도. ....	51
그림 3.6.10. 입력자료별 표준화(왼쪽), 정규화(오른쪽) 히스토그램 분포. ....	52
그림 3.6.11. 에포크 설정을 위한 MAE 분포. ....	53
그림 3.6.12. DNN으로 추정된 현열의 참고자료를 활용한 검증. ....	53
그림 3.6.13. DNN으로 추정된 현열의 예시. ....	54
그림 3.6.14. Case 2 현열 장기간 변화의 공간분포. ....	55
그림 3.6.15. 추정된 현열의 계절별 시계열 변화와 해빙 면적 변화의 시계열 비교. ....	56
그림 3.7.1. 북극권 지역에서 다양한 공간자료의 기온 변화. ....	57
그림 3.7.2. 계절별 북극권 지역의 기온 변화; (a) 봄, (b) 여름, (c) 가을, (d) 겨울. ....	58
그림 3.7.3. 에너지 수지 초기 모델 생성을 위한 개념도. ....	58
그림 3.7.4. 에너지 수지 초기 모델 예시. ....	59
그림 3.7.5. 에너지 수지 초기 모델 중, 순 복사 변화 시계열 변화와 해빙 면적 이벤트와의 비교. ....	60



서론

# 제 1 장 서론

## 제 1 절 목적

본 연구의 목적은 북극해 에너지 해석을 통한 빙권 변동 요인 분석 연구에 있다.

## 제 2 절 필요성

극지방 빙권은 지표나 해양 표면 위/아래에 눈·얼음 및 영구 동토층으로 구성된 기후시스템의 한 요소이며, 평균적으로 지표 면적의 5%를 차지하고 있다. 빙권 구성 요소 중 눈과 얼음은 지표의 다른 부분에 비해 알베도가 매우 높은 특징을 보이며 이러한 부분은 수권과 구별되는 지표 중 하나이다(Laine, 2008).

특히 북극 지역은 다양한 기후 피드백 메커니즘이 존재하며(그림 1.2.1), 육상-대기-해양 전체 지역에서 피드백 메커니즘이 발생하는 것을 알 수 있다. 중위도 지역에서 인간 활동에 의한 인위적 온실 기체 배출로 인하여 북극 대기에 온실효과를 발생시키며 이로 인하여 표면 온도가 상승하여 북극의 온난화가 발생한다. 이러한 온난화는 고위도 지역의 육상과 해양에 영향을 미치게 되는데, 해양의 경우 해빙이 감소하면서 알베도가 감소하고 태양복사 반사율이 감소하고 온난화가 가속되는 양의 메커니즘을 보여준다. 육상지역도 식생의 증가로 태양복사 반사율이 감소하여 온난화를 가속하며 영구 동토층이 용해되면서 이산화탄소보다 강력한 온실기체인 메탄이 대기로 배출되면서 온난화가 가속된다(Chapin, et al., 2005, 하호경과 김백민, 2014).

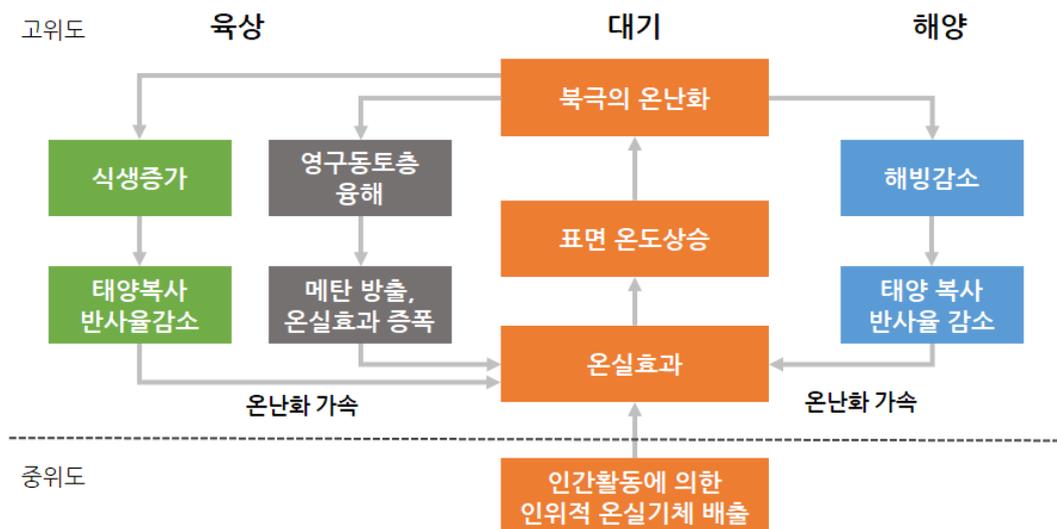


그림 1.2.1. 북극 지역의 다양한 기후 메커니즘(하호경과 김백민,2014)

극 소용돌이를 이용하여 기압 패턴에 따라 극진동 지수가 산출되는데, 이 극 진동이 약하게 나타나면 중위도 지역에 한파와 폭설을 동반한다. 또한, 여름 동안 북극 온도 변화의 경향이 북반구 온도 변화의 경향과 유사하게 관측되었다(Polyakov et al., 2003). 이러한 현상들은 극지방의 변화도 중위도 지역까지 직·간접적으로 영향을 미치기 때문에 극지방 변동의 중요성을 시사한다(Studingger et al., 2005). 극지방을 구성하고 있는 빙권 요소들인 만년설, 빙봉 등은 전 지구적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그린란드 지역의 ice mass는 20년 동안 꾸준히 감소하고 있으며, 상당수의 주요 분출빙하와 전체 손실률이 시간이 지날수록 증가하고 있다. 그린란드 빙상의 평균 감소율은 1992년~2001년에는 연간 34 Gt, 2002~20011년에는 연간 215 Gt로 손실률이 시간이 지날수록 증가하는 추세를 보인다(IPCC, 2014). NSIDC에 따르면 북극 지역의 해빙은 1979년~2008년 동안 약 4.1% decade<sup>-1</sup>의 감소 경향이 관측되었으며 남극의 0.9% decade<sup>-1</sup>과 대조되는 높은 수치를 보여준다(NSIDC, <http://nsidc.org/>).

결론적으로 북극 지역은 다양한 기후 피드백 메커니즘이 강력하게 발생하는 지역으로 기후 변화에 결정적 역할을 할 수 있다. 하지만 해빙, 해양, 대기 등 영역에서 다양한 변화가 관측되고 있지만, 극지 변동 요인에 대한 규명 미흡하다. 또한, 현재의 기후 역학 모델에서 북극의 해빙, 눈 덮임, 성층권 순환과 기후시스템 연관규명이 불명확하다는 한계점을 가지고 있다. 이러한 점을 보완하기 위해서는 실제 빙권 요소들의 변화가 발생할 때, 실제 에너지 수지가 어떻게 변화하는지 정량적 변화의 관측이 필요하며, 이를 바탕으로 빙권 변동 요인 파악 필요하다. 하지만 실측 자료를 활용할 경우 북극 지역의 환경적, 지역적 특성상 지속적이며, 조밀한 공간자료를 취득하기 어렵다. 그래서 광역범위를 주기적으로 관측 가능한 위성 자료를 활용하는 것이 실용적인 극지의 기상, 지표 관측하는 것이 가능하다.

또한, 본 연구는 ‘북극 해빙 위성 관측을 위한 분석 기술개발’에 정성적 결과를 뒷받침하는 결과를 제공한다. 본 과제에서 해빙 종류, 해빙 농도, 해빙 이동 등의 다양한 해빙 변화를 탐지한다. 해빙은 다양한 양상으로 변화하고 있지만, 탐지의 영역으로는 이 해빙들이 왜 변화하는지를 이해하기 어렵다. 해빙 변화에 어떤 의미가 존재하는지에 대한 부분을 해결하기 위하여 본 위탁연구가 진행되었으며 이를 활용하여 해빙 변화 탐지 결과에 에너지 해석 기반 정성적인 가치를 추가할 수 있다. 그리고 정성적 가치의 속성자료를 제공할 수 있으므로 에너지 관점에서 북극 해빙 변화의 설명이 가능하다. 즉 북극 해빙의 탐지를 이용한 현상 분석과 이 현상이 발생하는 원인 분석을 복합적으로 진행할 수 있는 기초자료로 활용할 수 있다.

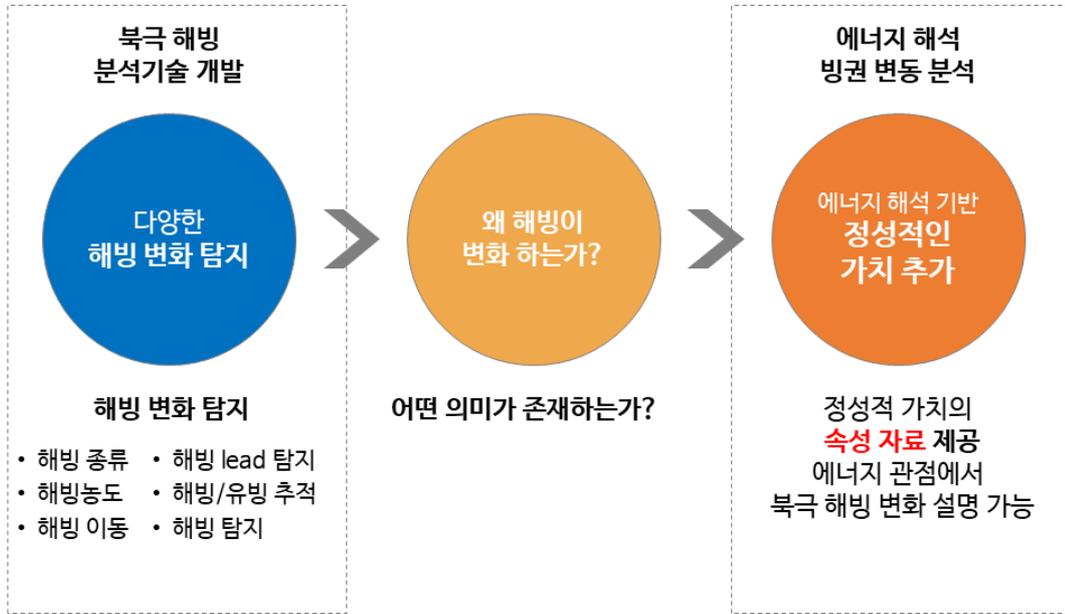


그림 1.2.2. 본 과제와의 연계성



### 제 3 절 연구개발 내용

본 연구의 전체적인 흐름은 총 3가지의 과정으로 구축되어 있으며, 자세한 내용은 그림 1.3.1과 같다. 본 위탁연구는 북극 해빙 위성 관측을 위한 분석 기술개발을 위한 협력 연구로써 북극해 에너지 해석을 통한 빙권 변동 요인 분석을 목표로 한다. 전체적인 과정은 순복사, 현열, 에너지 수지 모델의 3가지 과정으로 진행되었다. 우선 순복사의 경우 위성 기반 에너지 변수 품질 분석 및 특성 분석, 장기간 위성 기반 순복사 자료 구축, 장기간 변화 분석을 진행하였다. 2차연도의 경우 장기간 위성 자료를 활용하여 현열 시험 산출을 하였으며, 타 공간자료와 비교 분석 및 장기변화 분석을 수행하였다. 그리고 3차연도의 경우 전년도에 진행했던 현열 산출을 고도화하였으며 기온을 활용한 열에너지의 변화를 추가하여 에너지 수지 모델 prototype 개발을 진행하였다. 최종적으로 3가지 과정의 연계를 통하여 북극해의 에너지 수지 해석을 진행하고 이를 활용하여 빙권 변동 특성의 분석을 진행하였다.

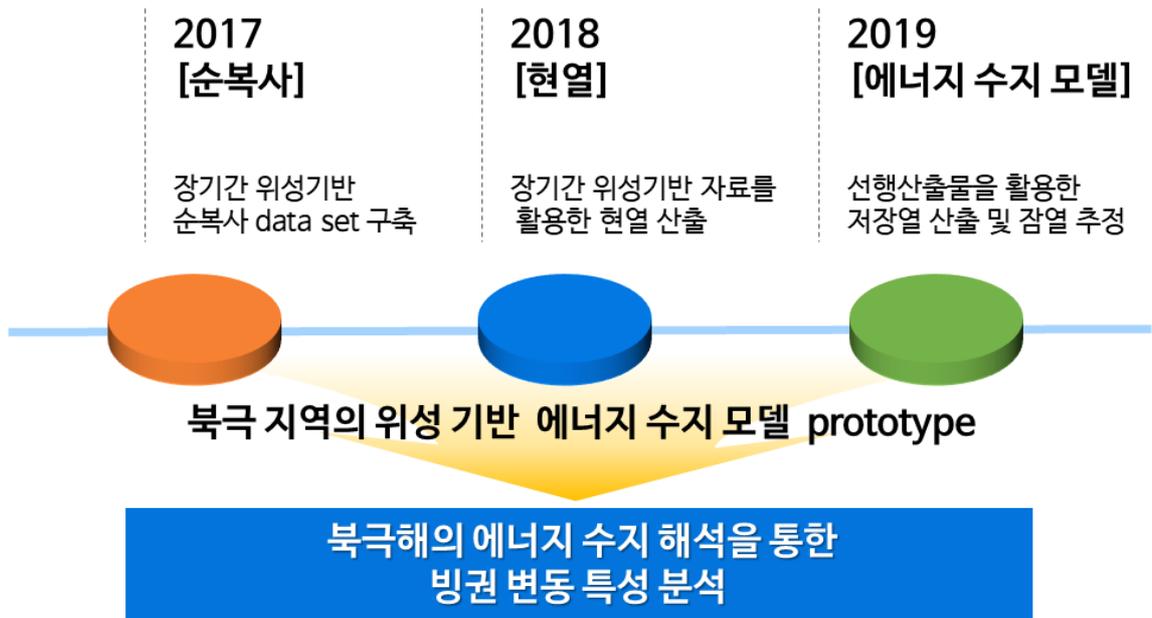


그림 1.3.1. 전체 연구 개요 및 연구의 최종 목표

## 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 에너지 수지의 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 연구 지역의 최적화된 자료의 분류 및 이용에 도움을 줌으로써 해빙 관측망 설립 및 기후 변화 모델의 정확성을 향상하는 데 도움을 줄 수 있다. 또한, 자료의 품질 분석을 통해 이후 극지방 자료 동화의 입력 자료 선택 등의 효율성을 향상할 수 있으며, 실제 관측 자료를 활용한 연구로써 다양한 기후 연구에서 활용 가능하며, 이후 극지방 기후 메커니즘 및 전 지구적 기후 변화 연구를 위한 기반 자료로 활용 가능성이 크다.

### 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 극지방 기후변화

극지방은 기후변화에 민감하게 반응하는 지역 중 하나이다. 극 지역의 기후 변화 연구의 경우 해당 지역 자체의 변화를 관측하는 연구도 다수 존재하였지만, 극지방의 기후변화가 변화와 중위도 기후 요소와 어떤 상관성이 존재하면 어떻게 영향을 미치는지에 대한 연구도 존재하였다. 극 소용돌이의 경우 극지방의 온난화로 중위도와 고위도의 기온 차이가 줄어든다. 이로 인해 북극 지역의 차가운 공기를 차단하는 제트기류가 약해지면서 극 소용돌이가 중위도 지역까지 남하하여 중위도 지역에 한파와 폭설 등의 이상기후를 발생시키면서 극지방의 기후변화가 중위도 지역에 영향을 미치게 된다. 또한, 온도 변화, ENSO, SAM과 같은 다양한 지수를 활용하여 북극 지역과 중위도의 연결고리를 찾기 위해 노력하였으며, 특히 기온을 주요 요인으로 한 분석이 다수 존재하였다.

Polyakov *et al.*(2003)의 연구에 따르면, 대기 온도는 봄철과 겨울철에 각각  $0.12^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ ,  $0.13^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ 의 strong warming 경향을 보였으며, 여름 동안의 북극 온도 변화는  $0.05 \pm 0.04^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ 로 나타났다. 평균대기 온도는  $0.06^{\circ}\text{C decade}^{-1}$ 로 북반구와 유사한 경향을 보였다. Davis *et al.* (2005)는 1992년부터 2003년 사이에 ERS 레이더 고도계를 이용하여 sea-level을 측정하였으며, 표면 고도 변화율(dS/dt)을 바탕으로 질량 균형을 산출하였다. 이를 통해 서남극에서 얕아지는 패턴과 동남극에서 두꺼워지는 패턴을 확인하였으며, 동남극의 패턴은 강설량의 증가로 예상된다고 하였다. Zwally *et al.*(2006)은 두께 변화 조건에 따른 얼음 질량의 연간 변화를 연구하였으며, 얼음 질량을 만년설로 가정하였을 때는 연간  $45 \pm 8\text{ Gt}$  증가, 얼음으로 가정하였을 때는 연간  $105 \pm 20\text{ Gt}$  증가를 나타냈다. Simpkins *et al.*(2012)에 따르면, 남극 해빙의 밀도 anomaly와 남극 진동(SAM), 엘니뇨 남반구 진동(ENSO)은 강한 연관성이 있으며, 회귀/합성/주성분 분석을 통해 호주의 겨울과 강한 연관성이 있음을 확인하였다. Comiso and Hall(2014)는 북극 빙권의 온도가 해빙 지역에서  $0.47 \pm 0.10^{\circ}\text{C}$ , Greenland (Ice sheet) 지역에서  $0.47 \pm 0.06^{\circ}\text{C}$ 의 경향을 확인하였으며, 이를 통해 북극 빙권의 모든 구성 요소에서 Surface temperature가 증가함을 확인하였다.

표 2.1.1. 극지방 기후변화와 관련된 연구 정리

저자	연도	제목	내용
Polyakov <i>et al.</i>	2003	Variability and Trends of Air Temperature and Pressure in the Maritime Arctic, 1875-2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 봄-겨울 시즌에 strong warming 경향: 0.12 ° C decade<sup>-1</sup> (봄) 0.13 ° C decade<sup>-1</sup> (겨울)</li> <li>- 여름 북극 온도 변화 : 0.05 ± 0.04° C decade<sup>-1</sup></li> <li>- 북반구 경향과 유사 (0.06° C decade<sup>-1</sup>)</li> </ul>
Davis <i>et al.</i>	2005	Snowfall-driven growth in East Antarctic ice sheet mitigates recent sea-level rise	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1992년부터 2003년 사이에 ERS 레이더 고도계 측정</li> <li>- 표면 고도 변화율(dS/dt)을 바탕으로 질량 균형 산출</li> <li>- 동남극: 두꺼워지는 패턴은 강설량의 증가로 예상</li> <li>- 서남극: 얇아지는 패턴</li> </ul>
Zwally <i>et al.</i>	2006	Surface melt-induced acceleration of Greenland ice-sheet flow	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 두께 변화 조건에 따른 얼음 질량의 연간 변화</li> <li>- 만년설로 가정 : 연간 45 ± 8 Gt의 증가</li> <li>- 얼음으로 가정 : 연간 105 ± 20 Gt 증가</li> </ul>
Simpkins <i>et al.</i>	2012	Seasonal Relationships between Large-Scale Climate Variability and Antarctic Sea Ice Concentration	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 남극 해빙의 밀도 anomaly 값과 남극 진동(SAM), 엘니뇨 남반구 진동(ENSO)은 강한 연관성</li> <li>- 회귀/합성/주성분 분석 : 호주의 겨울에 강한 연관성을 확인</li> </ul>
Comiso and Hall	2014	Climate trends in the Arctic as observed from space	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sea Ice : 0.47 ± 0.10 ° C</li> <li>- Greenland (Ice sheet): 0.47 ± 0.06 ° C</li> <li>- 북극 빙권의 모든 구성 요소에서 Surface temperature 증가경향</li> </ul>

## 제 2 절 극지방 에너지 수지

극지방의 경우 다양한 ice-albedo feedback이 발생하는 지역이다. 빙권 요소의 감소로 알베도의 감소가 발생하고, 순 복사와 온도가 증가하면서 빙권 요소가 감소하는 양의 피드백을 하고 있다. 이때, 순 복사와 온도 사이에서 발생하는 에너지 수지를 파악하는 것은 극지방의 환경변화를 관측하는 주요 과정이 된다(Seo *et al.*, 2017). 극지방의 경우 식생 변화에 따른 북극 대기로의 에너지 이동의 증가 관측되며, 개빙 구역의 solar heat input 증가, 빙권 요소에 따른 에너지 흡수량의 차이에 따른 에너지 수지의 변동이 관측된다. 극지방의 에너지 수지 변화를 파악함으로써 에너지의 입·출입과 관련한 해석이 가능하며, 이는 빙권 변동 분석을 위한 초석으로 사용할 수 있다.

Chapin *et al.*(2005)에 따르면, 북극에서 알베도가 감소하고 온도가 상승하는 경향을 보이며, 에너지 흡수와 대기로의 이동은 10년 동안  $26 \text{ MJ/m}^2 \text{ decade}^{-1}$ 로 증가함을 확인하였다. Perovich *et al.*(2007)은 개빙 구역에서의 solar heat input을 산출하였다. 전체 영역 중 solar heat input trend는 89%의 양의 경향, 11%의 음의 경향을 보였으며  $200 \text{ MJ/m}^2$  에서  $400 \text{ MJ/m}^2$ 으로 증가함을 확인하였다. Zhang *et al.*(2011)에 따르면, Surface-based inversions(SBI)는 남/북극의 지표-대기 경계에서 자주 나타났으며, 가을과 겨울에 더 강하고 자주 두껍게 발생함을 확인하였다. Nicolaus *et al.*(2012)는 여름 동안의 일년빙과 다년빙의 흡수와 투과의 차이를 연구하였으며, 일년빙이 다년빙에 비해 더 낮은 알베도를 보이며 여름에 더 녹기 쉬운 것을 확인하였다. Riihel *et al.*(2016)에 따르면, CERES SYN1deg flux가 해빙과 눈에서 적은 error, 초기 여름에 sea ice albedo를 과소 추정하며, AVHRR 기반 CLARA 자료가 눈과 해빙에서 과대 추정하는 경향을 보였다. 또한, GEWEX SRB cloud faction의 차이가 존재함을 확인하였다.

표 2.2.1. 극 지역의 에너지 수지와 관련된 연구 정리

저자	연도	제목	내용
Chapin <i>et al.</i>	2005	Role of Land-Surface Changes in Arctic Summer Warming	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 북극에서 알베도가 감소하고 온도가 상승하는 경향</li> <li>- 북극에서 에너지 흡수와 대기로의 이동은 10년 동안 <math>26 \text{ MJ/m}^2 \text{ decade}^{-1}</math>로 증가</li> </ul>
Perovich <i>et al.</i>	2007	Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979-2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 개빙 구역에서의 solar heat input 산출</li> <li>- 전체 영역 중 solar heat input trend</li> <li>- Positive : 89% / Negative : 11%</li> <li>- <math>200 \text{ MJ/m}^2</math> 에서 <math>400 \text{ MJ/m}^2</math>으로 증가</li> </ul>
Zhang <i>et al.</i>	2011	Climatological Characteristics of Arctic and Antarctic Surface-Based Inversions	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Surface-based inversions(SBI)는 남·북극의 지표-대기 경계에서 자주 발생</li> <li>- SBI는 가을과 겨울에 더 강하고 자주 두껍게 발생.</li> </ul>
Nicolaus <i>et al.</i>	2012	Change in Arctic sea ice result in increasing light transmittance and absorption	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 여름 동안 일년빙과 다년빙의 흡수, 투과 차이</li> <li>- 다년빙에 비해 일년빙이 더 낮은 알베도를 보임</li> <li>- 일년빙이 다년빙에 비해 여름 동안 녹기 쉬움</li> </ul>
Riihel <i>et al.</i>	2016	An intercomparison and validation of satellite-based surface radiative energy flux estimates over the Arctic	<ul style="list-style-type: none"> <li>- CERES SYN1deg flux 해빙, 눈에서 적은 error, 여름 초기 : sea ice albedo 과소 추정</li> <li>- AVHRR 기반 CLARA 자료 : 눈과 해빙에서 과대추정</li> <li>- GEWEX SRB cloud faction 차이 존재</li> </ul>

The image features a large, light blue watermark of the KORRI logo in the background. The logo consists of the word 'KORRI' in a bold, sans-serif font, with a stylized globe or network diagram below it. The globe is composed of several intersecting lines forming a grid-like pattern.

연구개발 수행 내용 및 결과

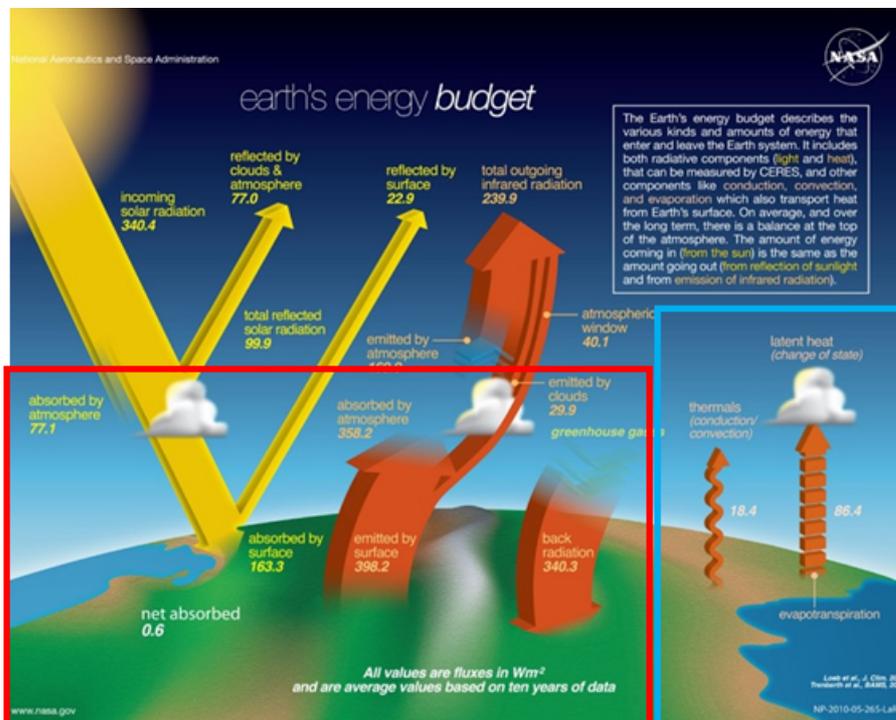
극지연구소

## 제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

### 제 1 절 연구 자료

#### 1. 위성 기반 Radiative flux

지구의 에너지 수지는 그림 3.1.1과 같이 나타낼 수 있다. 지구의 에너지 수지는 크게 태양에너지로 인해 발생하는 복사 에너지 영역과 지표의 가열 및 물의 상태 변화 등과 관련된 turbulent flux로 구분할 수 있다. 아래의 그림에서 빨간색 박스의 부분은 radiative flux 영역을 나타내었으며 파란색 박스 부분은 turbulent flux 영역을 나타낸다. 에너지 수지의 경우 복사 에너지와 turbulent flux가 균형을 이루고 있고, 이 flux를 이용하여 에너지 균형을 관측할 수 있다. 본 연구의 최종적인 목적은 지구 에너지 수지의 요소들을 이용하여 극지방의 에너지 변화를 관측하는 것에 있으며 해당 연도의 경우 radiative flux를 위주로 분석을 수행하였다.



출처: NASA homepage (www.nasa.gov)

그림 3.1.1. Earth' s radiation budget (NASA homepage).

#### (1) CM SAF CLARA-A2

EUMETSAT의 The Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM SAF)에서 제공하는 Thematic Climate Data Records (TCDR) data로 정식명칭은 CM SAF cCloud, Albedo and Radiation dataset, AVHRR-based, edition 2 (CLARA-A1)이다. 본 자료는 surface albedo, insolation(SIS), incoming(SDL)/outgoing long wave(SOL)와 같은 다양한 에너지 수지 변수를 제공하고 있다. 해당

자료는 각 변수별로 다양한 시간 해상도로 제공되고 있으며, 기본적으로 모든 변수는 월평균 자료로 제공된다. longwave 영역의 자료는 월평균만을 제공하고 있지만, shortwave 영역의 자료는 insolation의 경우 평균, albedo의 경우 5일 평균 자료를 제공한다. CLARA-A1의 경우 1982년에서 2009년까지 제공하였지만, 최근 업데이트를 통해서 1982년부터 2015년까지 30년 이상의 장기간 자료가 제공된다. 모든 자료는 0.25 degree의 공간 해상도로 제공하고 있으며, 자료는 Geographic projection으로 등 간격 자료로 제공된다. 알베도의 경우 극 좌표계인 Lambert Azimuthal equal area 좌표계로 변환된 자료를 추가로 제공한다. 표 3.1.1~2는 각 요소의 정확도를 나타내고 있다. 먼저 표 3.1.1은 알베도 자료의 정확도이며, 3개의 사이트는 모두 그린란드 지역에 분포한다. summit과 DYE-2의 경우 GCOS 기준에 가까운 RMSE가 관측되었지만 Sodankyla 관측 지역의 경우 0.119로 다소 높은 에러 값이 관측되었다. 표 3.1.2는 복사 변수의 정확도를 나타내며 SIS와 SDL의 경우 낮은 absolute bias를 보였으며, SOL의 경우 두 가지 변수보다 다소 높은 bias가 관측되었다. 3가지 변수 모두 유의미한 정확도를 보이지만, 해당 validation report의 경우 전체 산출 영역에서 수행된 결과이기 때문에 극지방에서는 높은 오차가 관측될 가능성이 존재한다. 해당 자료는 CM SAF 홈페이지에서 받을 수 있다.

표 3.1.1. CM SAF albedo 자료의 정확도(CM SAF, 2016b)

Albedo (Greenland site)	RMSE	Mean rel. Difference(%)
Summit	0.044	-3.88
DYE-2	0.067	-6.19
Sodankyla	0.119	43.17

표 3.1.2. CM SAF radiation 산출 자료의 정확도(CM SAF, 2016a)

Radiation	Abs.bias (W m <sup>-2</sup> )	Std.dev (W m <sup>-2</sup> )
SIS	8.8	13.1
SDL	7.9	9.4
SOL	13.7	18.1

## (2) NASA GEWEX

NASA에서 Global Energy and Water Exchanges Project (GEWEX)에서 제공하는 Surface Radiation Budget(SRB) 자료이다. 본 자료는 surface shortwave/longwave upward/downward 자료를 제공하며, 'downward' 자료는 지표에 입사되는 각각의 에너지양을 나타내며, 'upward' 자료는 지표에서 반사되는 에너지의 양을 나타낸다. 모든 복사 에너지 자료는 청천역인 clear-sky 자료와 구름의 영향력이 포함된 all-sky 자료 두 가지를 제공하고 있으며, 본 연구에서는 실제 대기 상태와 같은 all-sky 자료를 이용하였다. GEWEX 자료는 1983년 7월 ~ 2007년 12월 까지 제공하고 있으며 International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) 자료를 이용하여 visible과 infrared radiances를 이용하여 산출된다. 본 자료는 geographic projection의 등 간격 좌표계로 제공하고 있으며, 공간 해상도는 1 degree, 시간 해상도는 월평균과 일평균 두 가지의 자료를 제공한다. 그림 3.1.2는 실제 제공되는 자료의 예시이다. 표 3.1.3은 GEWEX SRB 자료의 정확도를 나타낸 것이다. GEWEX 알고리즘을 이용하여 산출된 월평균 자료의 경우 정확도는  $\pm 5-20 \text{ Wm}^{-2}$ 를 보인다. 단파 영역에서 일 평균에 비해 월평균에서 다소 높은 bias를 보이지만, RMS와 장파 영역에서는 하루평균보다 월평균이 훨씬 안정된 정확도를 보여준다.

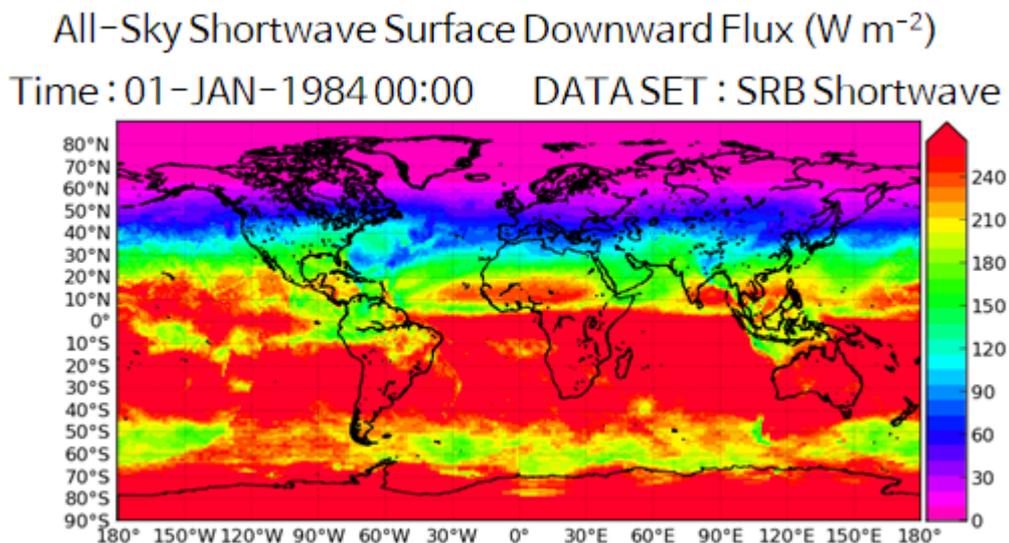


그림 3.1.2. GEWEX all-sky shortwave downward flux 자료의 예.

표 3.1.3. GEWEX SRB 자료의 정확도(<https://gewex-srb.larc.nasa.gov/>)

Time Ave	Shortwave		Longwave	
	Bias(W m <sup>-2</sup> )	RMS(W m <sup>-2</sup> )	Bias(W m <sup>-2</sup> )	RMS(W m <sup>-2</sup> )
Monthly	-4.3	23.1	0.2	11.1
Daily	-3.2	35.7	0.48	22.1
3-hourly monthly	-6.7	41.0	0.57	13.4
3-hourly	-5.9	87.9	0.67	30.2

### (3) NASA CERES

NASA에서 제공하는 Clouds and the Earth's Radiant Energy System(CERES) 자료를 사용하였다. 본 자료는 다양한 형태로 배포하고 있으며 Energy Balanced and Filled (EBAF) 자료와 Synoptic TOA and surface fluxes and clouds (SYN) 를 사용하였다. 본 자료는 전 지구 영역을 제공하며 geographic projection 좌표계로 제공된다. 자료 배포 기간은 2000. 03~2018.12 동안 제공하고 있으며, 공간 해상도는 1 degree, 시간 해상도는 기본적으로 월평균 자료를 제공하며 EBAF 자료는 일평균 자료를 같이 제공하고 있다. SNY1deg 자료는 Terra와 Aqua 위성에 탑재된 CERES 센서에서 관측된 flux 및 구름 자료를 결합해서 만들어졌다. 본 자료에는 직접 및 확산 단파 표면 flux가 포함된다.

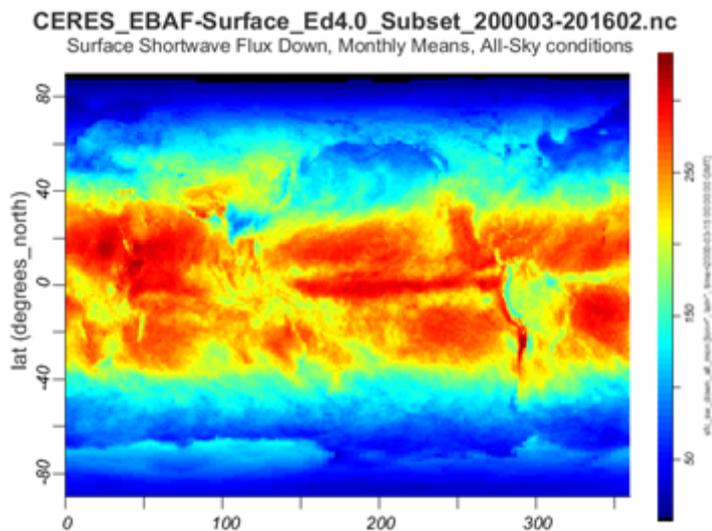


그림 3.1.3. CERES EBAF 자료 예.

표 3.1.4. CERES radiation의 정확도.

	Shortwave		Longwave	
	Down( $W\ m^{-2}$ )	Up( $W\ m^{-2}$ )	Down( $W\ m^{-2}$ )	Up( $W\ m^{-2}$ )
Ocean	-4.3	23.1	0.2	11.1
Land	-3.2	35.7	0.48	22.1
Arctic	-6.7	41.0	0.57	13.4
Antarctic	-5.9	87.9	0.67	30.2

(4) ERA5

ECMWF와 Copernicus에서 제공하는 대기 재분석 자료로써 전 지구 영역을 제공한다. ECMWF ERA-interim의 향상된 버전으로 12시간 4D-VAR 자료 동화를 이용하여 산출되었다(Jiang, et al., 2019). geographic projection 좌표계로 제공된다. 자료 배포 기간은 1979년부터 현재까지 제공하고 있으며, 공간 해상도는 0.25 degree, 시간 해상도는 기본적으로 월평균으로 제공한다.

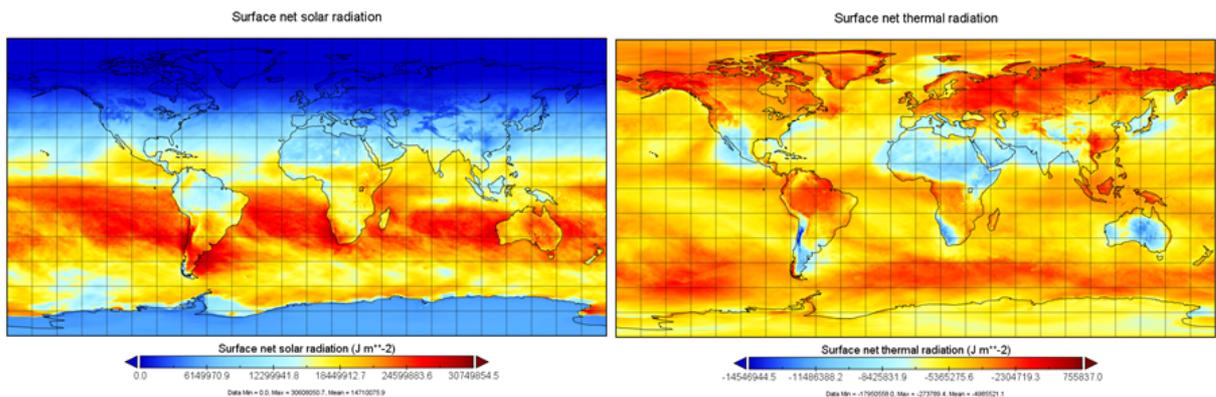


그림 3.1.4. ERA5 자료의 예시.

(5) NCEP

NOAA ESRL(Earth System Research Laboratory)에서 제공하는 NCEP/NCAR Reanalysis Monthly means and other derived variables 자료를 사용하였다. 공간 해상도는 T62 Gaussian grid로 제공되며 시간 해상도는 월평균/일평균 자료를 제공한다. T62 Gaussian grid는 전 지구 영역을 경도 192개의 화소, 위도 94개의 화소로 산출된다.

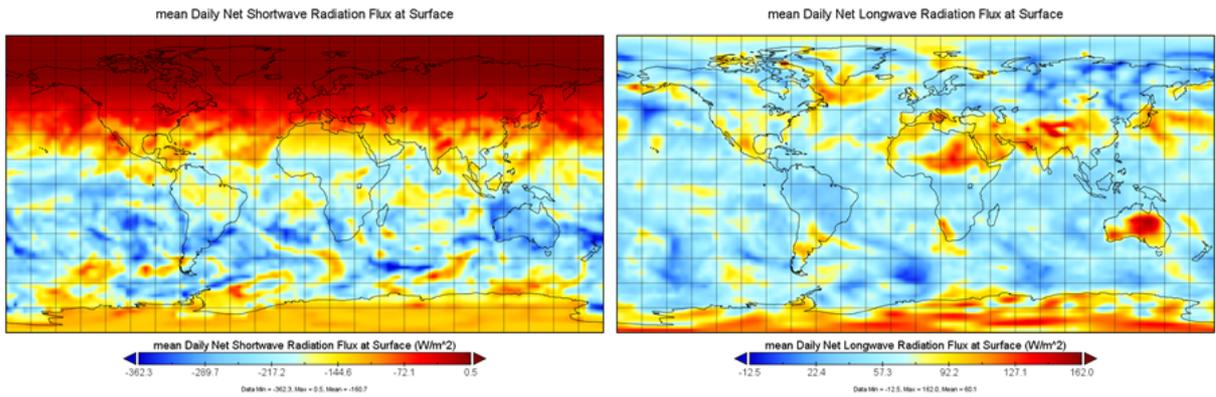


그림 3.1.5. NCEP 자료의 예시

## 2. 복사 에너지 실측 자료

### (1) Summit SURE07

그린란드 Summit 지역에 있는 Greenland Environmental Observatory (72° 340' N, 38° 280' W, 3209 m)에서 관측된 자료이다. 본 자료는 2009년 Munneke *et al.*의 연구에서 사용된 자료다(Kuipers *et al.*, 2009, The Cryosphere. 본 자료는 The Summit Radiation Experiment - SURE ' 07로 명명되어 있다. 자료 제공 기간은 2007.6.8.~7.20이며, 30분 간격으로 제공된다. 본 자료는 Air temperature, Relative humidity, pressure, Wind speed, 10 col. Snow temperature, Shortwave incoming/outgoing, Longwave incoming/outgoing 자료를 제공하며 본 연구에서는 복사 에너지 변수를 사용하였다.

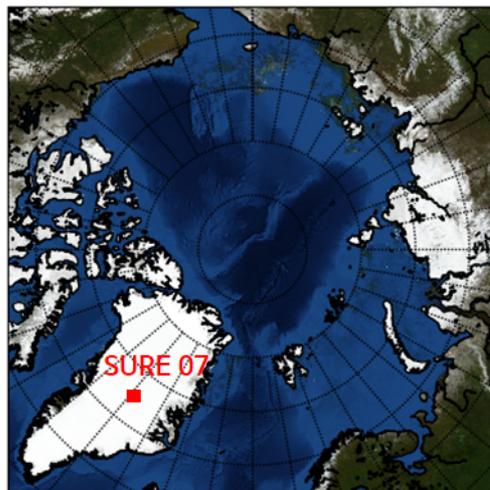


그림 3.1.6. Summit camp 위치.

(2) NASA CERES surface observation data

NASA CERES팀에서 제공하는 ground observation 자료를 수집하여 사용하였다. 본 자료는 실제 CERES 복사 에너지 자료의 검증 시 이용되는 자료이며 다양한 기관과 캠페인을 통해서 획득된 자료이다. 표 3.1.5는 본 위탁연구에서 사용한 북극권 지역에 포함되는 검증 자료의 정보를 정리한 것이며, 각 검증 자료의 위치는 그림 3.1.7에 나타난다.

표 3.1.5. NASA ground observation 자료의 정보

#	site	Location	Data periods
TIK	Tiksi, Russi	71.59, 128.92, Elev: 48m	2011.04.01.- 2016.12.01
SMT	ETH/Greenland Summit	72.60, 321.58, Elev: 3216m	2011.01.01.- 2014.06.01
NYA	NyAlesund, Norway	78.93, 11.93,Elev: 11m	2000.03.01.- 2018.03.01
NSA	NSlope Alaska (ARM NSA1)	71.32, 203.39,Elev:8m	2000.03-01- 2018.03.01
ALE	Alert, Canada BSRN	82.45, 297.49, Elev:200m	2004.07.01.- 2014.03.01
BAR	Barrow, Ak BSRN/GMD	71.32, 203.39, Elev: 8m	2000.03.01.- 2017.08.01

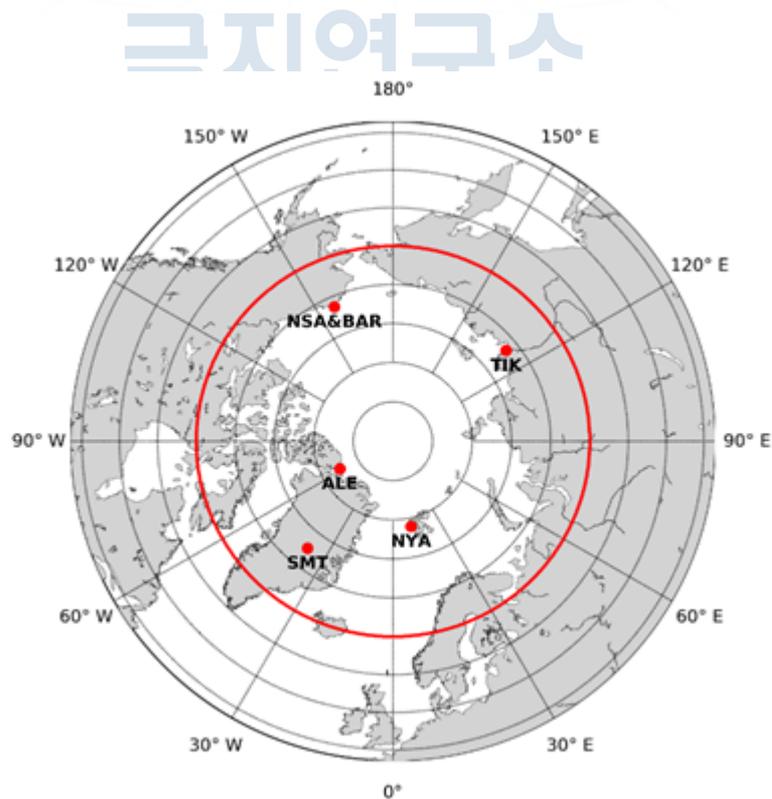


그림 3.1.7. NASA CERES ground observation 위치.

### 3. 현열 산출을 위한 독립변수

일반적으로 현열을 추정할 때 3.1.1을 이용한다. 기본적으로 기온과 표면 온도, 풍속이 독립변수로 입력된다. 공기 질량, 비열, 현열 교환계수의 경우 표면의 조건, 위치 등을 바탕으로 변화하게 되며 연구에 따라 상수로 계산되는 예도 있다. 본 연구에서는 3가지 독립변수와 현열 산출을 위한 보조자료로 표면 조건을 알 수 있는 해빙 농도(해빙-개빙 지역 구분), 해빙 거칠기(지표 추정 방식 적용)를 추가로 이용하였다.

$$SHF = \rho C_p C_h U (T_s - T_a) \quad (\text{수식 3.1.1})$$

$\rho$ : air density,

$C_p$ : Specific heat of the air,

$C_h$ : transfer coefficients for SHF,

$U$ : Wind velocity,

$T_s$ : Surface temperature,

$T_a$ : Air temperature

#### (1) 기온 (Air Temperature)

본 연구에서 기온은 ECMWF ERA-interim 2 m temperature monthly mean data 자료를 활용하였다. 기온의 경우 표면 온도와 다르게 위성으로 직접 산출하기 어려운 변수이기 때문에, 재분석 자료를 활용하였다. 사용된 기온자료는 위성 기반 순복사 자료 중 해상도가 높은 CM SAF를 기준으로 자료를 수집하였다.

#### (2) 표면 온도 (Surface temperature)

북극 지역의 경우 해양-해빙-지표로 구분할 수 있는데, 위성 관측 자료를 활용하기 위하여 각각의 타입에 따라 표면 온도는 총 3가지의 자료를 활용하였다.

##### - Sea Surface temperature (SST)

본 위탁연구에서는 NOAA에서 제공하는 OISST Monthly data 자료를 사용하였다. 제공 기간은 1982년부터 2012년까지 제공되며 공간 해상도는 1 degree, 시간 해상도는 월평균 자료로 제공된다.

##### - Ice Surface temperature (IST)

해빙 표면 온도를 수집하기 위하여 NASA에서 제공되는 MODIS IST daily data를 사용하였다. 이 자료는 MOD29 자료로 Terra 위성 자료를 이용하였으며, 공간 해상도는 4 km, 시간 해상도는 일 평균 자료로 제공된다. 본 자료는 극지방 연구를 위해 지리 보정을 마친 자료로써 자료의 품질을 위하여 quality flag를 기준으로 정확도 높은 자료만 제공된다. 그렇기 때문에 북극 겨울철의 경우 품질문제로 극점을 기준으로

결측된 영역이 다수 존재한다.

- Land Surface temperature (LST)

지표 온도 자료로는 NASA에서 제공하는 MODIS LST CMG monthly data를 사용하였다. 해수면 온도와 얼음 표면 온도의 경우 그린란드 지역과 같은 영구 동토층, 북극권에 속하는 대륙을 포함하지 않기 때문에 따로 지표 온도 자료를 사용하였다. 공간 해상도는 0.05 degree, 시간 해상도는 월평균으로 제공되며, climate modeling grid (CMG)로 동일한 격자 자료로 제공된다.

(3) 풍속 (Wind speed)

위성 기반 풍속 자료도 다양하게 배포하고 있지만, 대부분 자료는 해빙 지역에서 해빙의 표면 조건에 따라 변화하는 풍속을 하나의 위성만으로 산출하기 어렵다. 그렇기 때문에 대부분의 위성 기반 풍속 자료의 경우 해양영역만 제공한다. 하지만 본 연구에서는 북극 지역의 현열은 산출해야 하므로 해빙 영역의 풍속은 필수 입력자료이기 때문에 재분석 자료를 활용하였다. 본 위탁연구에서는 ECMWF 10 m wind speed monthly mean data를 사용하였다.

(4) 해빙 농도 (Sea ice concentration)

해빙의 유무를 판단하기 위하여 해빙 농도자료를 사용하였다. 해빙 농도자료는 가장 기본적인 해빙 산출물로서 다양한 기관에서 제공 하고 있다. 제공하는 기관이 다양한 만큼 bootstrap, NASA team algorithm 등 다양한 알고리즘을 이용하여 산출되고 있으며, 본 연구에서는 북극해를 중심으로 진행하고 있기 때문에 해수면 온도와 일치성을 위하여 OISIC Monthly mean data를 사용하였기 때문에 OISST와 동일한 시·공간자료로 제공된다.

(5) 지표 거칠기(Surface roughness)

본 연구에서 현열을 추정할 때 지표 알고리즘의 적용을 진행하였다. 이때, 지표의 경우 식물 등의 표면에 있는 물체의 높이 혹은 texture 등의 정보가 필요하므로 거칠기 자료를 사용하였다. 지표 거칠기 자료는 위성 기반 자료인 Cryosat-2와 재분석 자료인 ECMWF ERA-Interim 자료를 이용하였다.

#### 4. 추가 기온자료

기온자료는 3.1.3 현열 산출을 위한 독립변수에서 사용된 자료와 에너지 수지 분석을 위해 자료를 추가하여 분석하였으며 복사 에너지와 동일한 해상도를 가진 ERA5와 CMIP5의 기온자료를 사용하였다.

## 제 2 절 연구 방법

### 1. 1차연도 (2017)

위성 기반 에너지 변수 품질 분석 및 특성 분석을 목표로 한다. 이를 위하여 위성 기반의 에너지 변수 (Albedo, Insolation, Longwave Radiation)과 같은 복사 에너지와 연관된 자료의 수집이 필요하다. 해당 자료들은 대부분 1980년대 중반부터 2007~9년 정도 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. 다음으로 타 위성과의 비교검증을 통해 위성 산출 자료의 품질을 평가할 수 있다. 이때 Quality control 등을 이용하여 최적의 자료만을 sampling 하여 정확한 자료와의 비교검증이 수행되어야 할 것이다. 품질 분석이 완료된 자료를 바탕으로 북극 지역의 순 복사 변동 특성을 분석하여 해당 연구지역의 빙권 변화 요인 분석 및 관측을 목표로 한다. 각각의 에너지 변수의 변화를 시·공간적으로 시계열 분석을 수행하여 그 변화를 정량적으로 관측한다. 이후 선행 연구를 바탕으로 수집된 자료를 이용하여 순 복사를 산출하여 시계열/구성분 분석 및 이상치 분석을 수행하여 Net radiation의 변화와 이와 연구지역의 환경적 변화의 연관성을 분석하고자 한다.

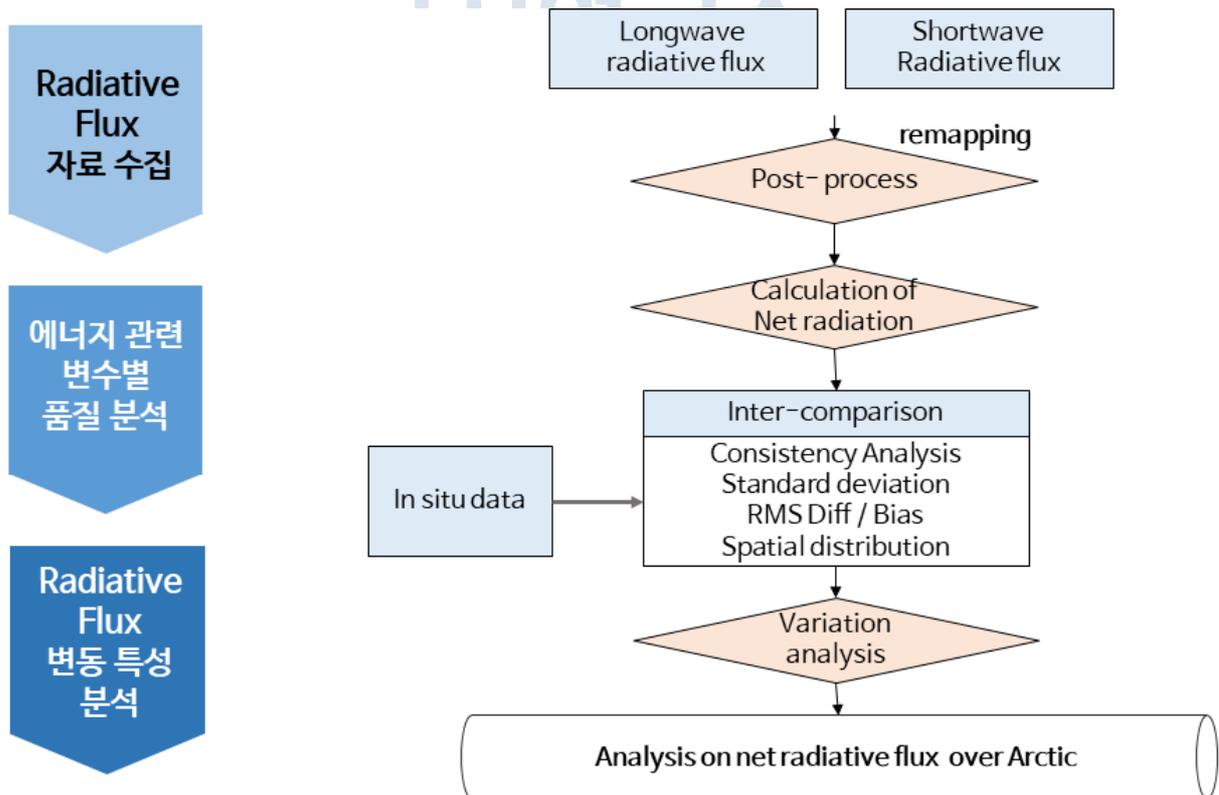


그림 3.2.1. 1차연도 연구 흐름도.

## 2. 2차연도 (2018)

1차 연도에서 북극 지역의 위성 기반 net radiation의 정확도 검증 및 장기간 변화를 시·공간적으로 분석하였다. 2차 연도에서는 turbulent flux 중 위성 기반 현열 산출 및 검증, 장기간 분석을 목적으로 한다. 북극 지역의 위성 기반 현열을 산출하기 위해서 우선 선진기관에서 산출 기법 및 선행 연구의 산출 기법을 정리하여 북극 지역에 최적화된 현열 산출을 목표로 한다. 이때 북극 지역의 경우 해양 부분과 해빙 부분이 혼재되어 있어, 이를 정확하게 구분하기 위해 해빙/개빙 구역의 경계를 정확하게 구분이 필요하다. 그리고 해빙과 해양 지역을 구분하여 북극 지역의 위성 기반 현열을 산출한다. 이후 산출된 현열과 input 자료별 민감도 분석과 타 위성 산출물과의 상호 비교를 통해 정확도를 분석한다. 1차 연도에서 수행된 순 복사 변화와 산출된 현열의 장기간 시계열 분석 및 조화 분석을 통해 북극 지역의 에너지 수지 분석 및 빙권 변동의 특성을 분석할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 결과는 본과제의 북극 해빙 위성 관측을 위한 분석 기술개발 시, 실제 해빙 자체의 물성만이 아닌 해빙 변화 양상 및 단기 예측에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

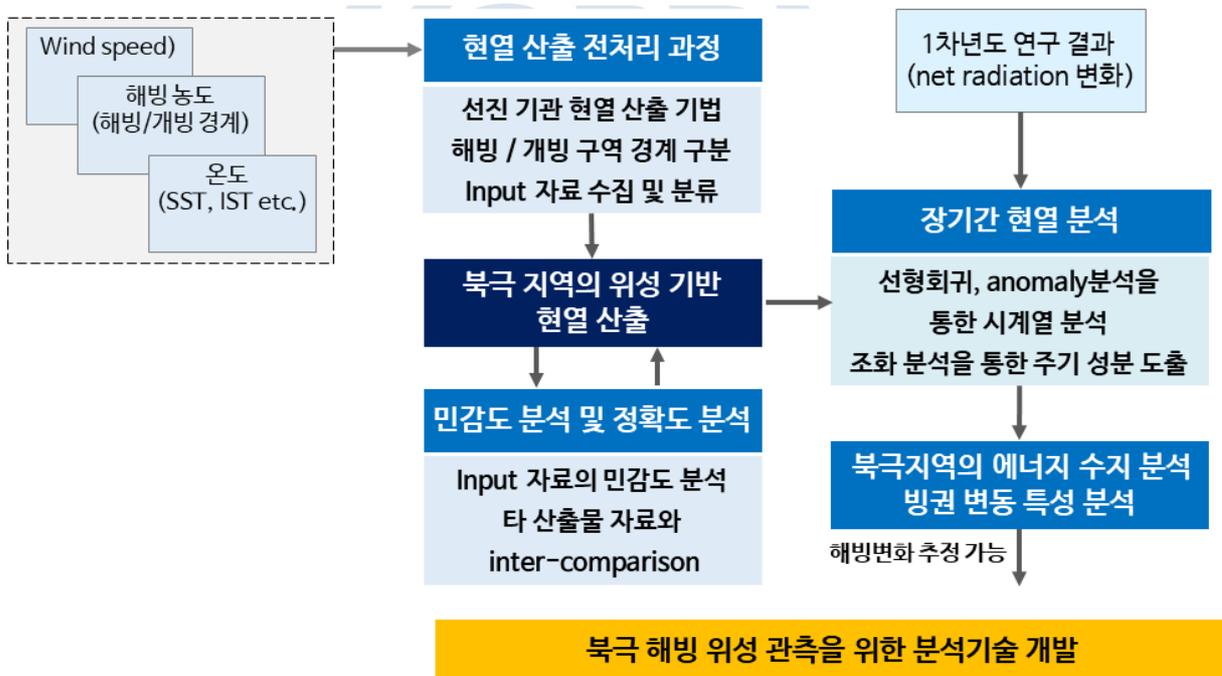


그림 3.2.2. 2차연도 연구 흐름도.

### 3. 3차연도 (2019)

1차연도(2017)에서 북극 지역의 위성 기반 순복사의 정확도 검증 및 장기간 변화를 시·공간적으로 분석하였다. 2차연도(2018)에서는 turbulent flux 중 위성 기반 현열 산출 및 검증, 장기간 분석하였다. 해당 연도(2019)에는 북극 지역의 에너지 수지를 추정하고 이를 바탕으로 북극 지역의 해빙 변동 요인을 분석하고자 한다. 당해 연도는 총 3가지 과정을 통해 연구를 진행하고자 한다. 첫 번째 과정은 Heat content를 추정하는 부분이다. 이때 Heat content를 산출하기 표면·대기·해양 인자 등의 다양한 자료를 수집하여 북극 지역에 최적화된 변수 산출을 진행하고자 한다. 안정적인 추정을 위하여 단일 관측 자료가 아닌, 위성/모델/재분석 등 다양한 자료를 활용할 계획이다. 에너지 수지를 산정하기 위해 heat storage와 latent heat 추정을 우선으로 추정할 예정이며, 경험·물리 기반 등 다양한 방식을 토대로 heat content를 산정한다. 다음은 2017~2018년도에 진행되었던 radiative heat flux와 Sensible heat flux, 전 과정에서 산정된 Heat content를 바탕으로 Earth energy budget 및 Arctic climate 메커니즘을 활용하여 북극 지역의 에너지 수지를 추정한다. 그리고 추정된 에너지 수지의 특성 및 변동성을 다양한 통계 기법을 활용하여 분석하여 북극 지역의 에너지 수지 모델 prototype을 개발한다. 그리고 본 과제의 해빙 관측 기법으로 산출된 해빙 변동성을 바탕으로 에너지 수지가 해빙 변화에 미치는 영향력을 분석하여 북극해 에너지 해석을 통한 북극 빙권의 변동 요인을 분석한다. 이를 통해 북극해빙이 정성적 가치를 가진 속성자료로 제공 가능할 것이며, 에너지의 관점에서 북극해빙의 변화를 설명 가능할 것이다.

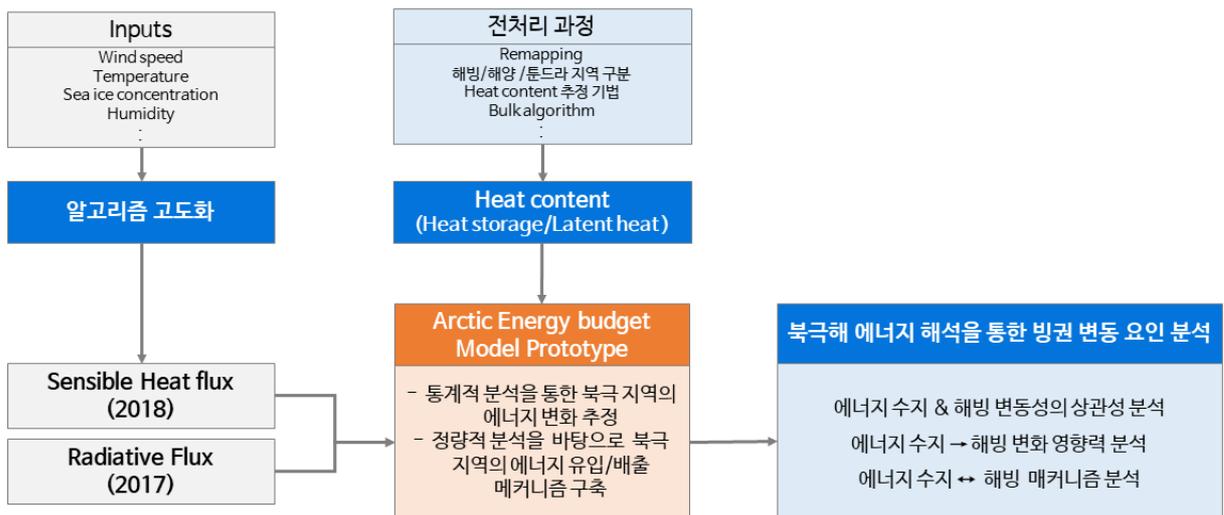


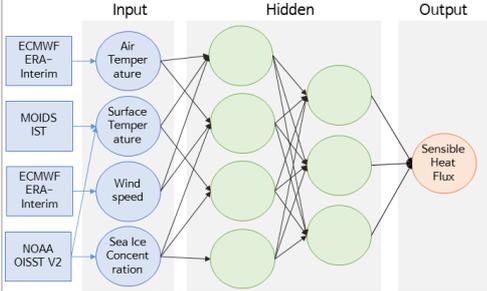
그림 3.2.3. 3차연도 연구 흐름도.

#### 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 3.2.1. 목표 달성을 위한 연구 수행 방법

세부목표	연구수행방법 (이론적·실험적 접근방법)	구체적인 내용
위성기반 에너지 변수 수집 및 전처리	Re-mapping (Nearest Neighbor 방법)	geographic projection인 자료를 nearest neighbor 방법을 사용하여 EASE-2 grid 변환
	Net radiation 산출	실측 자료와의 비교를 위해 CM SAF에서 제공되는 Daily SIS, Pentad SAL, Monthly SOL, SDL를 사용하여 daily net radiation 산출
에너지 변수별 품질 분석	차이 분석	CERES 자료를 활용하여 GEWEX, CM SAF net radiation의 공간적 차이 비교 분석
	정확도 분석 (통계치 분석)	Root Mean square error, standard deviation, average를 이용하여 위성 기반 net radiation 자료의 정확도 분석
	일관성 분석 (산점도, 통계치 분석)	산점도를 통한 CERES와 GEWEX 자료 분포에 따른 일관성 분석 상관계수와 bias, rms-diff를 활용한 두 자료의 일치도 평가
북극 지역의 Radiative flux 변동 특성 분석	Data blending	CERES와 GEWEX 자료의 중첩되는 기간 동안 평균하여 30년 이상의 장기 기후 자료 생성
	시계열 분석 (선형회귀 분석)	북극지역 net radiation의 시계열 연간 변화율 산정 및 변화 경향 분석
현열 추정을 위한 전처리 및 산출	현열 추정	아래의 식을 활용하여 현열 추정 $SHF = \rho C_p C_h U (T_s - T_a)$ $\rho$ : air density, $C_p$ : Specific heat of the air, $C_h$ : transfer coefficients for SHF, $U$ : Wind velocity, $T_s$ : Surface temperature, $T_a$ : Air temperature
	선행연구를 활용한 북극 현열 추정	Inoue et al., 2011의 선행연구를 바탕으로 Arctic Marginal Ice Zone에서 취득된 조건을 바탕으로 현열 추정

	교환계수 활용한 북극 현열 추정	표면 특성에 따라 교환계수( $C_h$ )를 활용하여 현열을 해빙 지역과 해양 지역을 구분하여 추정
	지표 모델을 활용한 북극 현열 추정	Bastiaanssen, 2000 & Han et al., 2010 방법에 따라서 지표에서 활용되는 표면 거칠기를 활용하여 해빙 지역의 현열 추정
	COARE 3.0 Bulk식을 활용한 북극 현열 추정	Fairall et al. (2003)에서 The Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment을 활용
input 자료의 민감도 분석 및 현열 정확도 분석	차이 분석	해양 지역에서의 현열 추정값을 OAFflux 자료와 비교 분석 시, 공간적 차이 및 산점도, 시계열 분석을 통한 두 자료의 차이를 계산
	정확도 분석 (통계치 분석)	Root Mean square error, standard deviation, average를 활용하여 실측 자료와 본 연구에서 산출한 현열 및 비교 자료의 정확도 검증
시·공간적 변화 경향 분석	시계열 분석 (선형회귀 분석)	북극 지역의 월별 현열을 바탕으로 연간 변화율을 정량적으로 산정
다양한 조건에 따른 연구 권역 분류 및 세부 권역분석	일관성 분석 (산점도, 통계치 분석)	산점도를 활용하여 OAFflux와 본 연구에서 추정한 현열의 해역별 상관계수와 bias, rms-diff를 활용하여 세부 연구 해역 도출
해빙지역에서의 현열 추정 알고리즘 고도화	자료의 정규화	(1) 표준화 (standardization) $(x - x_{mean}) / x_{std}$ (x-mean) / standard deviation 데이터의 평균을 0으로 맞춰줌 (2) 정규화 (normalize) $(x - x_{min}) / (x_{max} - x_{min})$ 모든 자료를 0~1로 맞춰 줌
	딥러닝을 활용한 현열 추정	 <p>(1) h2o 활용: Deep Neural Network  learning rate : <math>1e-5</math>  epochs: 4000,  hidden: [14]*6</p>

		<p>activation: Rectifier</p> <p>(2) Tensorflow-Keras 활용  learning rate : <math>1e-5</math>  epochs: 1000  hidden=[64]*2  activation: Rectified Linear Unit</p>
에너지 수치 추정을 위한 자료 수집 및 전처리	re-mapping (최소거리 & Great circle distance)	<p>(1) 최소거리  - Geographic projection에서 대응 픽셀의 중심 위·경도의 거리가 가까운 위치를 mapping</p> <p>(2) Great Circle Distance (GCD)  - GCD를 활용하여 Geographic &amp; polar stereographic projection을 EASE-grid 2.0으로 변환  - 최소 중심각 지점과 remapping 수행</p> $\Delta\sigma = \arccos(\sin\phi_1\sin\phi_2 + \cos\phi_1\cos\phi_2\Delta\lambda)$ $\Delta\sigma = 2\arcsin\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) + \cos\phi_1\cos\phi_2\sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right)}\right)$ <p><math>\phi_1, \lambda_1</math> and <math>\phi_2, \lambda_2</math> = latitude and longitude of two points  <math>\Delta\phi, \Delta\lambda</math> = absolute difference of two points  <math>\Delta\sigma</math> = central angle between two points</p>
위성자료 및 재분석 자료를 활용한 Heat content 추정	선행연구를 활용한 북극의 Solar heat input 추정	<p>선행연구 Perovich et al., 2011<sup>1)</sup> 참고</p> <p>Solar heat input (<math>F_{rw}</math>)  <math>= F_r(1 - \alpha)(1 - C)</math>  where, <math>F_r</math> = insolation,  <math>\alpha</math> = albedo,  <math>C</math> = ice concentration</p>
북극 지역의 에너지 수치 추정을 통한 에너지 수치 모델 prototype 개발	정확도 검증 (통계치 분석)  에너지 수치 모델 prototype 개발	<p>Root Mean square error, Bias, Correlation coefficient를 활용하여 실측 자료(5개의 ground observation)와 복사 에너지 자료의 정확도 검증</p> <p>복사 에너지 및 현열, heat content의 정량화를 통한 북극권 지역에서의 에너지 수치 prototype 모델을 개발</p>
북극 해빙 변동성 및 변동 요인 분석	시계열 분석 (선형회귀 분석)	북극 지역 복사 에너지의 시계열 연간 변화율 산정 및 변화 경향 분석

### 제 3 절 연구 자료 전처리 및 위성 자료별 비교 분석

#### 1. projection 변환

앞에서 수집한 3가지 위성 기반 복사 자료의 경우 전구를 관측할 때 적합한 cylindrical EASE-Grid projection으로 구성되어 있다. 이는 등 간격 좌표계로 일반적인 지도 체계에 널리 쓰이는 좌표계이다. 하지만 등 간격 좌표계는 고위도 지역으로 갈수록 왜곡이 심하여 극 지역과 같은 극 지역을 관찰하기 어려움이 존재한다. 그러므로 극지방에 최적화된 좌표계로 변환해주는 과정이 필요하며, 다양한 위성 및 재분석 자료의 공간적 크기가 달라서 이를 같은 크기로 변환해주는 과정이 필요하다. 일반적으로 Map projection 및 interpolation re-grid에 대한 다양한 통계적 방법이 적용 가능하며, 물리량(Physics)의 특성에 따른 방법 선택하게 된다. 본 연구에서는 최소거리 법과 Great Circle Distance를 바탕으로 remapping을 진행하였으며, 변환한 좌표계는 극지방 연구에 널리 쓰이는 Equal-Area SSM/I Earth Grid (EASE-Grid)를 이용하였다. 좌표계는 그림 3.3.1과 같으며, 본 연구에서는 북극점을 중심으로 Northern EASE-grid projection을 이용하였다.

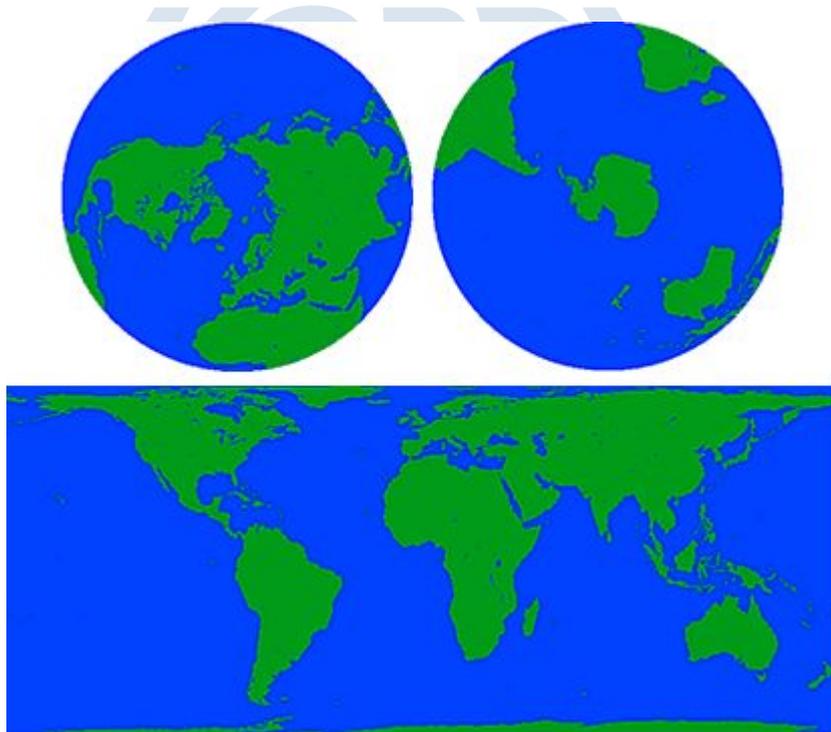


그림 3.3.1. Northern and southern Equal-Area SSM/I Earth Grid projections(위)와 Cylindrical EASE-Grid projection(아래) (Brodzik *et al.*, 2012).

## 2. CM SAF과 GEWEX net radiation의 계절별 공간적 차이 특성 분석

산출된 순 복사 에너지의 특성을 분석하기 위해서 위성별 상호 비교를 수행하였다. 이때, 에너지 수지 자료에서 정확하다고 알려진 CERES 순 복사 자료를 기준으로 CM SAF와 GEWEX 자료를 비교하였다. 그림 3.3.2은 계절별 차이의 분포를 보여준다. 그림 3.4.1에서 위쪽 부분인 (a)–(d)는 CM SAF 순 복사와의 차이 분포를 나타내며, 아래쪽 (e)–(h)는 GEWEX 순 복사와의 차이를 보여준다. 그리고 (a),(e) 2000/03(spring), (b),(f)는 2000/06(summer), (c),(g)는 2000/09(Autumn), (d),(h)는 2000/12(Winter)의 기간을 나타낸다.

### (1) CMSAF

앞에서 언급했듯이, (a)–(c)의 경우, 산출된 순 복사 자료에서 결측치를 확인할 수 있다. 주로 극점을 기준으로 결측이 관측된다. 봄철의 경우, CERES와 비교 시 전체적으로 낮은 분포를 보이지만 특정 위도에서 높게 관측되는 특성이 존재한다. 여름철의 경우 CERES와 비교 시 0.91로 높은 상관관계를 보여주며 봄철과 마찬가지로 전체적으로 낮은 분포를 보여준다. 특히 배핀만과 카라해 지역에서 과소 추정하는 것을 알 수 있다. 가을도 전체적으로 낮은 분포를 보이지만 위도 80° 지역에서 높게 관측되는 것을 알 수 있으며, 그린란드 지역의 경우 중앙 지역에서 CERES와 비교 시 낮은 분포를 보인다. 겨울철의 경우 배핀만, 극점 부근 과소 추정 경향이 두드러지며, 그린란드 지역에서 과소 추정이 관측된다.

### (2) GEWEX

GEWEX는 CM SAF와 반대로 CERES와 비교 시, 전체적으로 높은 순 복사의 공간적 분포를 보여준다. 여름철의 경우 전반적으로 높은 분포를 보이지만, 극점과 그린란드 지역에서 낮은 분포가 관측된다. 여름의 경우 0.94의 높은 상관관계를 보이지만 전체적으로 높은 분포가 관측되며 특히 위도 80° 지역에서 과대추정이 관측된다. 가을의 경우 전체적으로 유사한 값의 분포를 보여주고 있다. 겨울철의 경우 이분화된 공간 분포를 보여준다. 그린란드 지역의 경우에 과소 추정을 하지만, 보퍼트/추코트해/랍테프해의 경우 과대추정이 관측되며, CM SAF에서 과소 추정이 관측되었던 부분과 유사한 지역에서 과소 추정의 경향이 보인다.

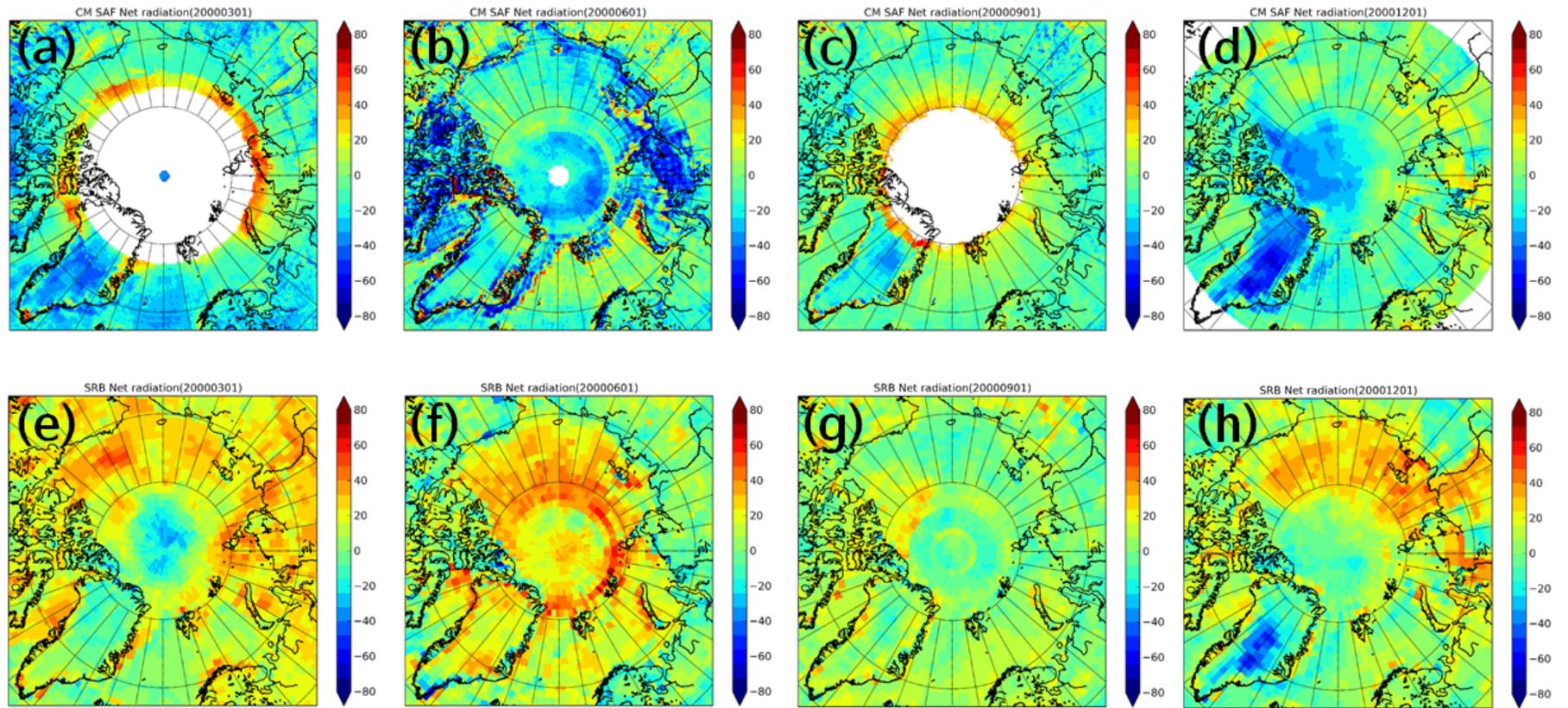


그림 3.3.2. 계절별 CERES 순복사와 각 위성 자료별 공간 분포 차이 (a)–(d)는 CM SAF 순복사와의 차이 분포, (e)–(h)는 GEWEX 순복사 차이 분포; (a),(e) 2000/03(spring), (b),(f)는 2000/06(summer), (c),(g)는 2000/09(Autumn), (d),(h)는 2000/12(Winter).

### 3. CM SAF과 GEWEX net radiation의 RMSE, bias 분석

위성 자료 사이의 정성적인 차이가 아닌 정량적 차이를 분석하기 위하여 RMS-Diff와 Bias의 시간 분포를 관측하였다(그림 3.3.3). 본 분석에서도 기준 자료는 CERES 순 복사 자료를 이용하였다.

#### (1) 평균 RMS Diff

그림 3.3.3에서 위쪽 그래프의 영역이다. 파란색 선은 GEWEX, 주황색 선은 CM SAF 기반의 순복사 RMS-Diff를 나타낸다. 회색으로 표시된 부분은 RMS-Diff가 높게 관측된 지점을 표시하였다. GEWEX는  $17.23 \text{ W m}^{-2}$ , CM SAF :  $20.25 \text{ W m}^{-2}$ 의 RMS-Diff를 보였으며 봄~여름철 RMS Diff 가 높게 분포하는 것을 알 수 있다.

#### (2) MAE(Mean Absolute Error)

그림 3.3.3에서 아래쪽 그래프의 영역이다. 본 그래프에서 파란색 선은 GEWEX, 주황색 선은 CM SAF 기반의 순복사의 bias를 나타내며, 회색으로 표시된 부분은 7~9월 기간을 나타낸다. GEWEX의 경우 MAE가  $10.52 \text{ W m}^{-2}$ , CM SAF :  $6.13 \text{ W m}^{-2}$ 의 결과가 관측되었다. 이때, RMS-Diff와 다르게 CM SAF의 bias가 낮게 관측되었는데, 이는 CM SAF의 경우 양과 음의 bias가 혼재되어 있어서 발생하는 현상으로 사료된다. GEWEX의 경우 2007년 봄철의 제외하고는 전체적으로 양의 Bias 경향이 관측되었으며, 특히 봄~여름철 bias가 높게 분포하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향성은 RMS-Diff와도 동일한 결과이다. 하지만 CM SAF의 경우 여름철을 제외하면 전반적으로 음의 bias 경향이 관측된다. RMS-Diff의 분포와 비교 하였을 때, 양의 bias를 보이는 기간에서는 전반적으로 CERES 순 복사와의 차이가 작게 나타났으며, 음의 bias를 보이는 기간에는 비교적 높은 RMS-Diff를 보여준다.

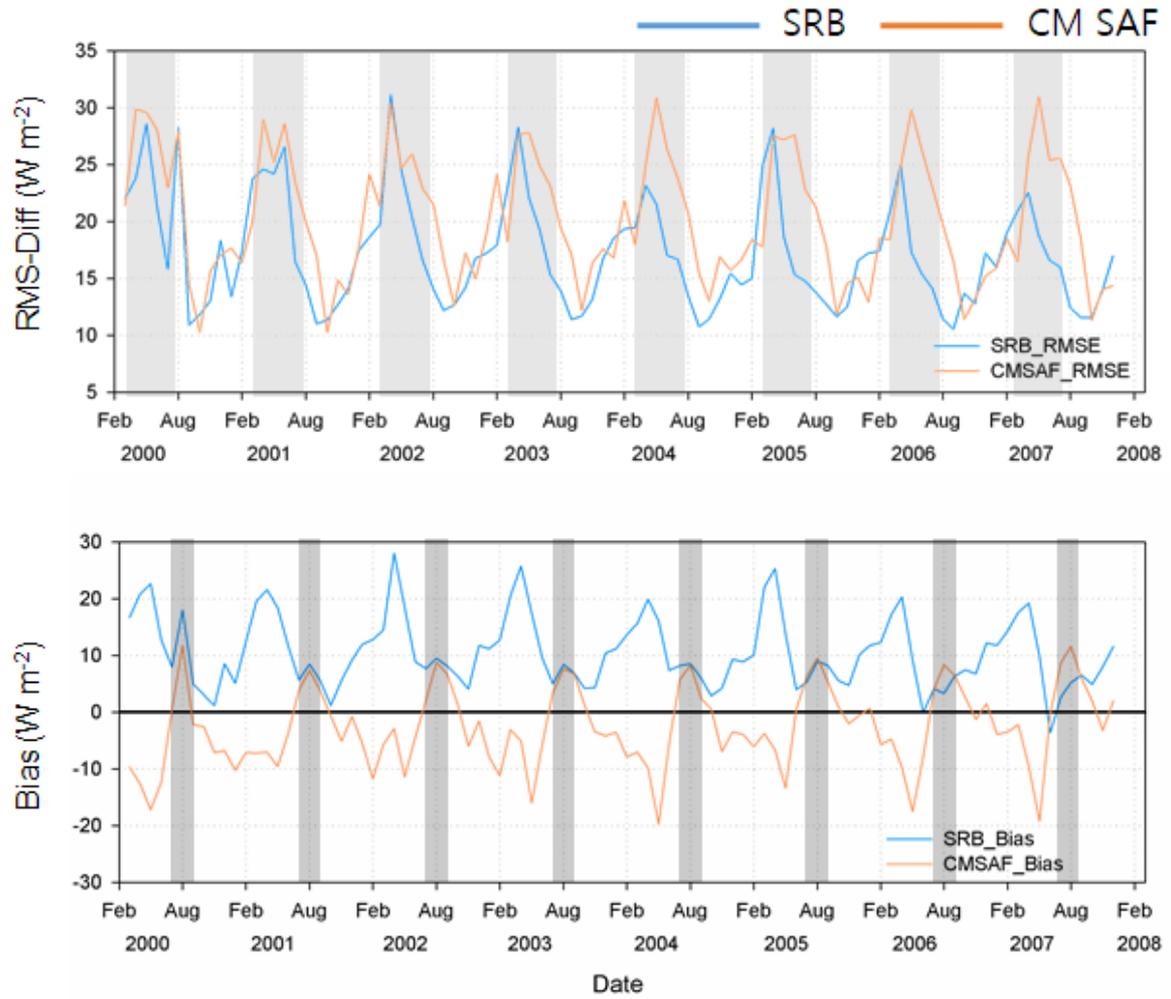


그림 3.3.3. RMS-Diff(위)와 Bias(아래)의 시계열 변화 분포, 파란선은 GEWEX, 주황색선은 CM SAF를 의미.

#### 4. 실측 자료(SURE 07)를 이용한 위성 기반 net radiation 검증

위성 사이의 상호 비교의 경우 정확한 기준 자료의 설정이 애매하기 때문에 정확도에 대한 절대적인 수치로 이용하기 어렵다. 따라서 실측자료를 활용하여 위성 기반 순복사 자료의 검증을 수행하였다. 실측자료의 경우 30분 간격으로 제공이 되기 때문에, 이를 일 평균하여 위성 자료와 분석하였다. 하지만 CM SAF 자료의 경우 장파 복사에너지는 월평균 자료만 제공되기 때문에 일평균 일사량을 기준으로 한 달 동안 동일한 장파 자료와 pentad mean 알베도 자료를 이용하여 일 평균 순복사 자료를 산출하였다. 검증 기간은 실측자료가 존재하는 2007년 6월 7일부터 7월 18일로 설정하였다. 그림 3.3.4 각각 산출된 순복사의 시계열 분포를 보여준다. 빨간색 선은 실측자료인 SURE 07를 나타내며, 파란색 선은 CERES, 주황색 선은 GEWEX, 초록색 선은 CM SAF를 나타낸다. 시계열 분포를 보면 실측자료와 CERES, GEWEX의 순복사 시계열 경향은 유사하게 관측되지만, CM SAF의 경우 전혀 다른 패턴을 보여준다. 이러한 결과는 CM SAF의 일평균 순복사를 산출할 때, 장파 영역에서 한 달 동안의 자료를 고정하여 산출하기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다.

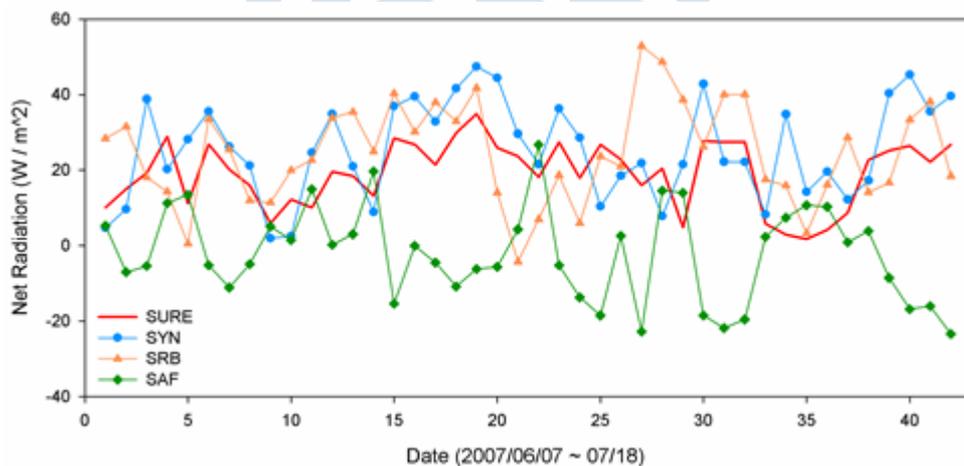


그림 3.3.4. 검증기간 동안 순복사 자료의 시계열 분포, 빨간색 실선은 실측자료, 파란색 선은 CERES, 주황색 선은 GEWEX, 초록색 선은 CM SAF.

표 3.3.1은 실측자료와의 정량적 비교 결과를 나타낸다. CERES는  $RMSE\ 12.15\ W\ m^{-2}$ , GEWEX는  $RMSE\ 14.35\ W\ m^{-2}$ , CMSAF는  $RMSE\ 28.15\ W\ m^{-2}$ 의 결과가 관측되었다. 전체적으로 CERES가 가장 정확한 결과를 보였으며 GEWEX, CM SAF 순의 정확도를 보였다. 실측자료와 검증 시 자료별로 순복사 산출 자료는  $12\sim 30\ W\ m^{-2}$  차이 존재한다. 순복사 자료의 경우 극지방의 현·잠열을 추정할 때 주요 변수로 작용하기 때문에 이러한 차이는 이후 극지방 현·잠열 추정에 오류를 야기하여 정확한 극지방 에너지 해석의 오차 요인이 될 가능성이 크다. 이러한 정량적

차이는 북극 툰드라 지역의 융설 발생 시, 대기 중 에너지 흡수·이동증가가  $3.3 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$  증가하는 것은  $\text{CO}_2$ 가 2배 증가하는 것과 같은 온난화 효과를 발휘한다(Chapin *et al*, 2005).

표 3.3.1. 위성별 검증 결과

	SURE 07	CERES	GEWEX	CM SAF
Ave	19.10	25.51	24.51	-2.13
SD	8.66	12.85	13.16	12.47
RMSE	-	12.15	14.35	28.15

### 5. CERES와 GEWEX 사이의 일관성 Test

기후변화를 관측하기 위해서는 최소 30년 이상의 장기 자료가 필요하다. 장기간 자료가 제공되는 CM AF의 경우 다른 두 자료에 비해 낮은 정확도 및 상이한 시계열 패턴을 보였기 때문에 이 자료를 직접 사용하는 것은 오차의 발생을 야기할 가능성이 있다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 GEWEX와 CERES 자료를 활용하여 장기간 자료를 구축하고자 한다. 이를 위해서는 두 위성 자료 사이의 일관성 test를 통하여 두 자료의 일치성 평가 후 연속적 사용이 가능성 파악이 필요하다. 그림 3.3.5 두 가지 순복사 자료의 산점도를 나타낸 것이다. Daily와 monthly를 바탕으로 산점도 분석을 수행하였고 Daily와 Monthly 모두 0.76, 0.94의 높은 상관관계 보였다. 또한, RMS-Diff도  $33.32 \text{ W m}^{-2}$ ,  $17.91 \text{ W m}^{-2}$ 의 유의한 수치를 보였다.

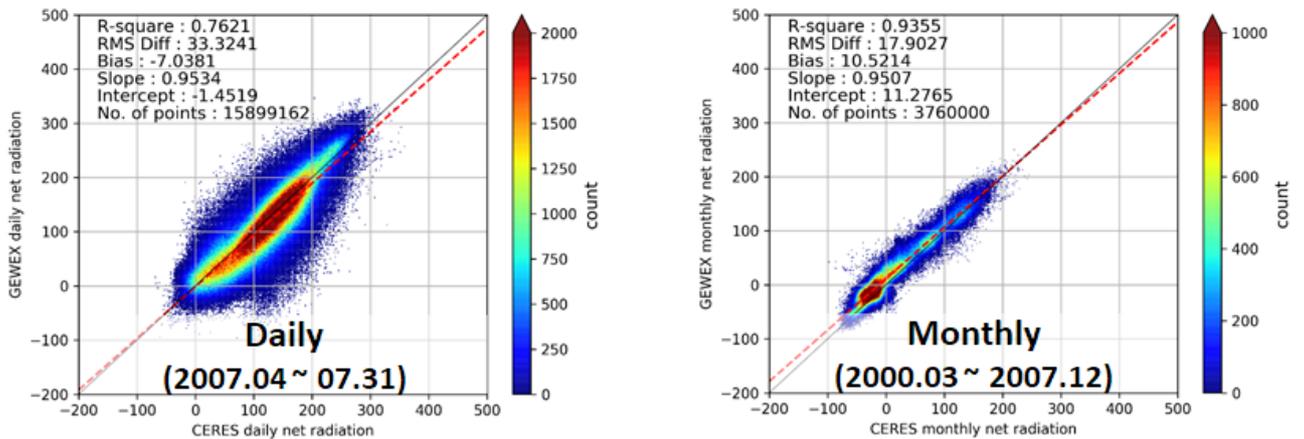


그림 3.4.5. CERES 자료와 GEWEX 자료의 산점도 분포, x축은 CERES, y축은 GEWEX : Daily 분포(좌), Monthly 분포(우).

## 제 4 절 공간자료별 복사 에너지 자료 검증

### 1. 장기간 ground observation을 활용한 검증

앞선 장에 위성 자료로 한정하여 단기간 검증을 수행하였고 이번 절에서는 공간자료별 복사 에너지를 검증하였다. CM SAF 자료의 경우 타 자료에 비해 정확도가 매우 낮게 관측되었기 때문에 이번 검증에서는 제외하였다. 각 자료를 검증하기 위해서 공간자료와 검증자료간의 collocation을 수행하였다. 이후 각각 검증 자료의 제공기간에 맞춰서 검증을 수행하였고 각각의 정확도는 표 3.4.1과 같다. TIK와 SMT의 경우 2010년 이후의 기간만 제공되어 CMIP5와 GEWEX와의 검증은 수행되지 못했다. 검증 결과는 재분석 자료인 ERA5가 가장 높은 정확도가 관측되었고 EBAF, GEWEX, CMIP5, NCEP 순으로 정확도가 관측되었다.

정확도가 높았던 ERA5와 EBAF를 비교 했을 때 그림 3.4.1~2와 같이 NYA 실측 지점을 제외하고 항상 반대의 관측경향이 나타났다. ERA5가 과대 추정을 했을 때, EBAF는 과소 추정 경향이 보였으며 반대의 경우 ERA5는 과소 추정, EBAF는 과대 추정을 하였다. 이런 차이가 나는 원인에 대해서는 순복사를 구성하는 각 요소에 따른 분석이 필요할 것으로 사료된다.

표 3.4.1. 공간자료별 순 복사의 검증 결과

		ERA5	NCEP	CMIP5	EBAF	GEWEX
TIK	R	0.96	0.86	-	0.97	-
	RMSE	14.92	36.77	-	22.22	-
	Bias	-5.22	-5.05	-	4.41	-
SMT	R	0.94	0.88	-	0.63	-
	RMSE	8.45	23.25	-	20.78	-
	Bias	5.76	10.47	-	-18.61	-
NYA	R	0.97	0.91	0.91	0.92	0.91
	RMSE	27.01	65.5	47.21	36.05	46.86
	Bias	18.57	3.62	12.96	7.06	-15.57
NSA	R	0.97	0.83	0.98	0.96	0.94
	RMSE	14.41	37.68	26.1	16.33	22.03
	Bias	-6.6	10.17	-7.51	2.52	-10.46
ALE	R	0.94	0.84	0.93	0.96	0.92
	RMSE	21.41	28.94	21.99	17.64	21.63
	Bias	-13.79	9.34	14.04	-4.79	-10.09
BAR	R	0.97	0.81	0.97	0.96	0.93
	RMSE	14.42	41.38	24.06	19.1	24.58
	Bias	-2.7	13.73	-5.37	6.25	-9.62

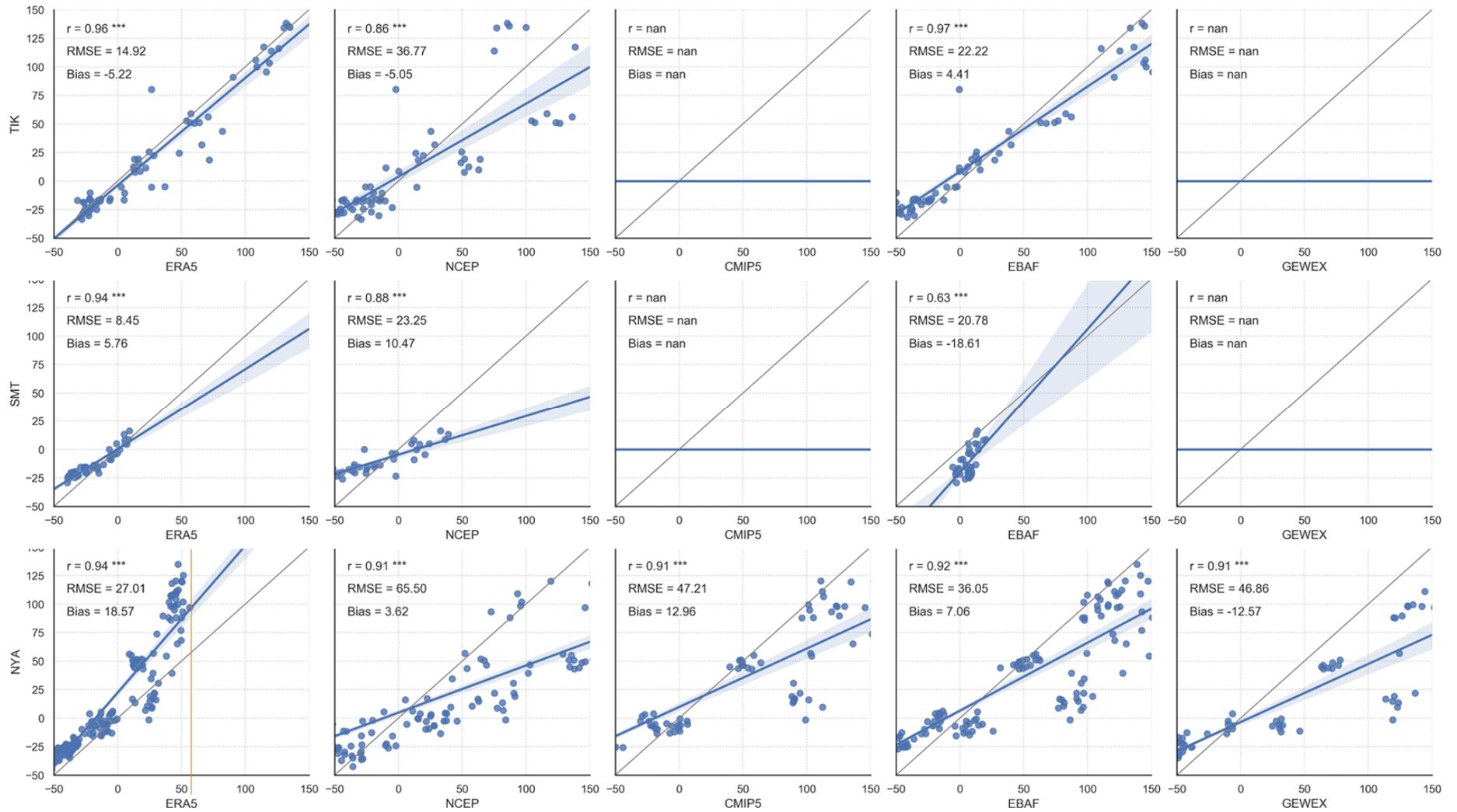


그림 3.4.1. ground observation과 공간자료 사이의 산점도(위쪽: TIK, 중간: SMT, 아래: NYA).

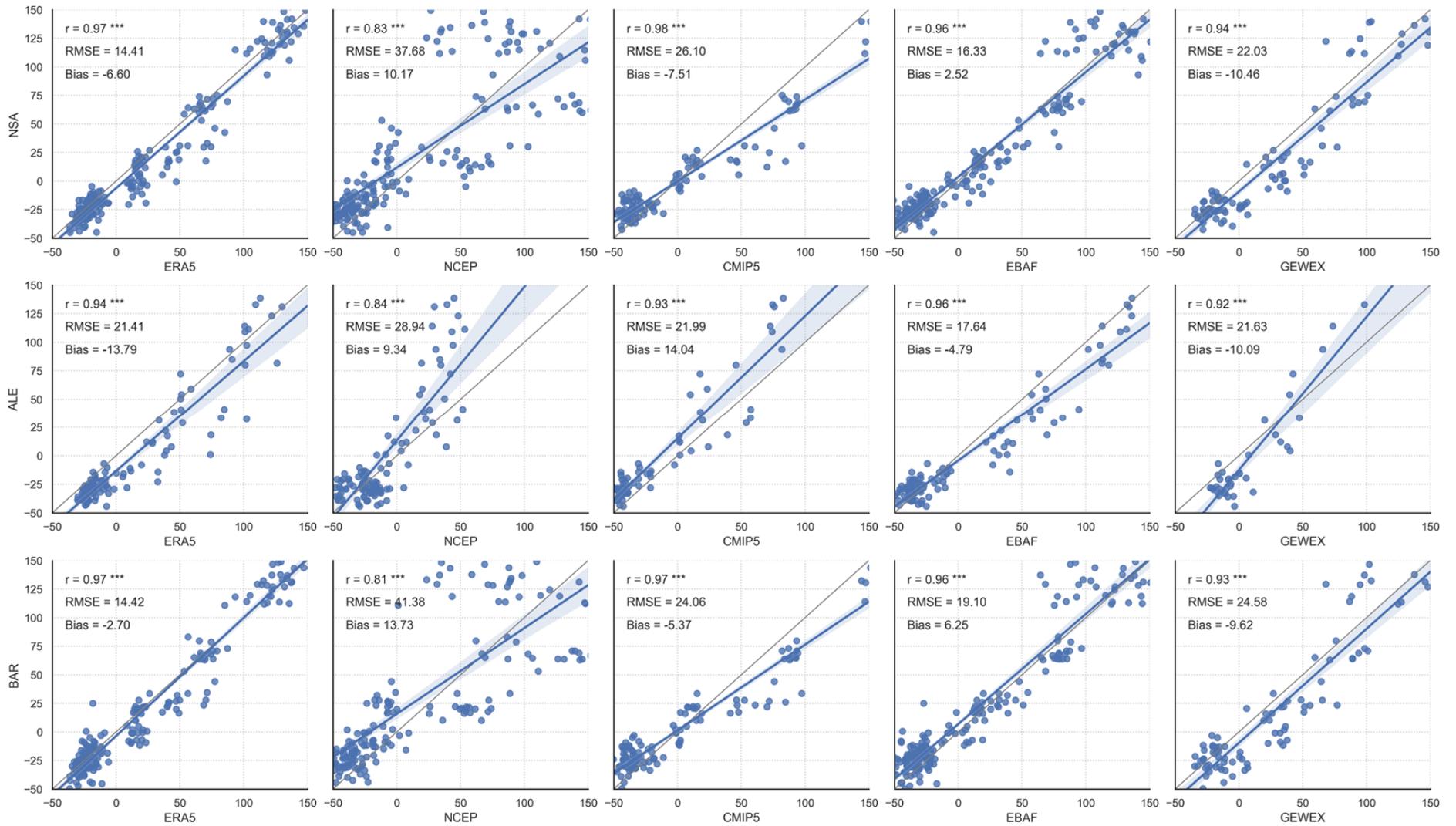


그림 3.4.2. ground observation과 공간자료 사이의 산점도(위쪽: NSA, 중간: ALE, 아래: BAR).

## 제 5 절 복사 에너지 자료의 장기간 변화 관측

### 1. 전체 연구 기간 net radiation의 변화 분석

북극 지역의 radiation flux의 변동 특성을 분석하기 위해서 net radiation trend를 분석하였다. 이때, 장기간 자료를 이용하기 위하여 GEWEX와 CERES 자료를 blending 하여 분석에 사용하였다. Blending 방식은 두 자료의 물리량을 최대한 이용할 수 있게, 중첩되는 2000년~2007년의 기간 동안 두 순 복사를 평균하여 이용하였다. 이렇게 구축된 순복사의 시계열 분포는 그림 3.5.1과 같다. 연구영역 전체를 바탕으로 순 복사의 시계열을 관측하였기 때문에 해양-빙하-해빙이 모두 섞여 있다. 전체적인 변화 경향은  $-0.42 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ 의 낮은 경향성을 보여주고 있지만, 계절적 영향력으로 인해서 여름철에는 높은 순복사가, 겨울철에는 낮은 순복사가 분포하기 때문에 상당 부분 상쇄된 경향성을 보여준다.

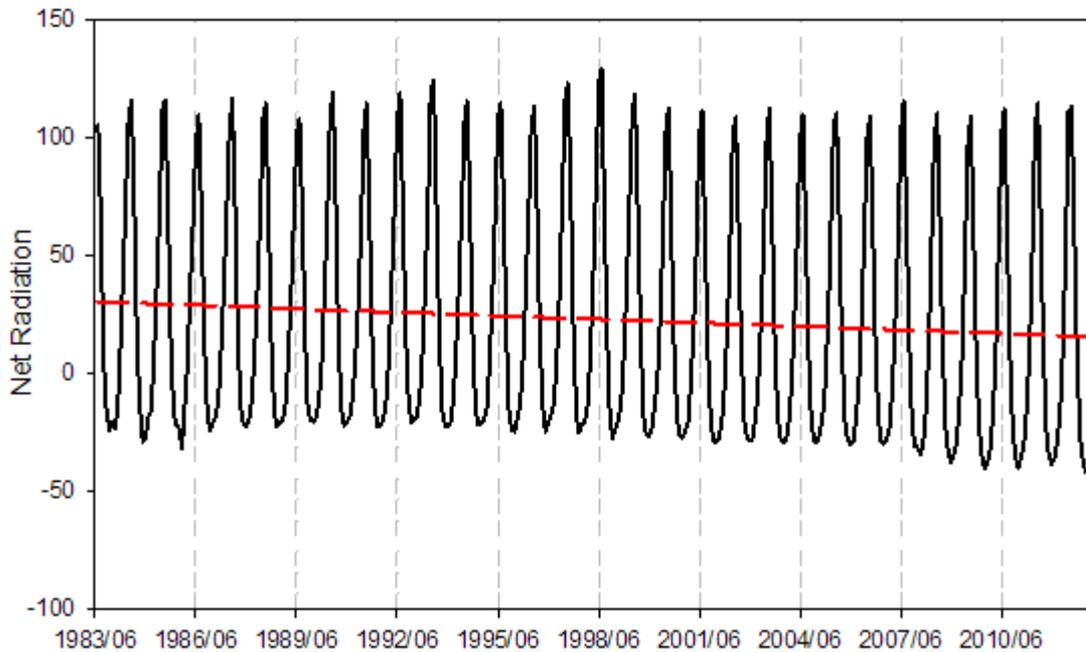


그림 3.5.1. Blending 된 순 복사의 시계열 분포.

## 2. 계절별 net radiation의 변화 경향 분석

전체기간 동안 시계열 분석하였을 때, 계절적 특성으로 인한 영향력이 크기 때문에 계절별로 구분하여 분석하였다. 계절은 겨울(Dec-Jan-Feb), 봄(Mar-Apr-May), 여름(Jun-Jul-Aug), 가을(Sep-Oct-Nov)로 구분하였다. 그림 3.5.2는 계절별 순복사의 시계열 분포를 보여주며 검정 원형 심볼은 겨울, 빨간색 역삼각형 심볼은 봄, 초록색 사각형 심볼은 여름, 노란색 마름모 심볼은 가을을 나타낸다. 전체적으로 감소 경향이 관측되었으며 봄과 겨울철에 그 경향이 두드러짐을 관측하였다. 계절별 정량적 변화는 봄철에  $-8.98 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ , 겨울은  $-6.3 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ , 여름은  $-2.07 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ , 가을은  $-3.59 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ 로 관측되었다.

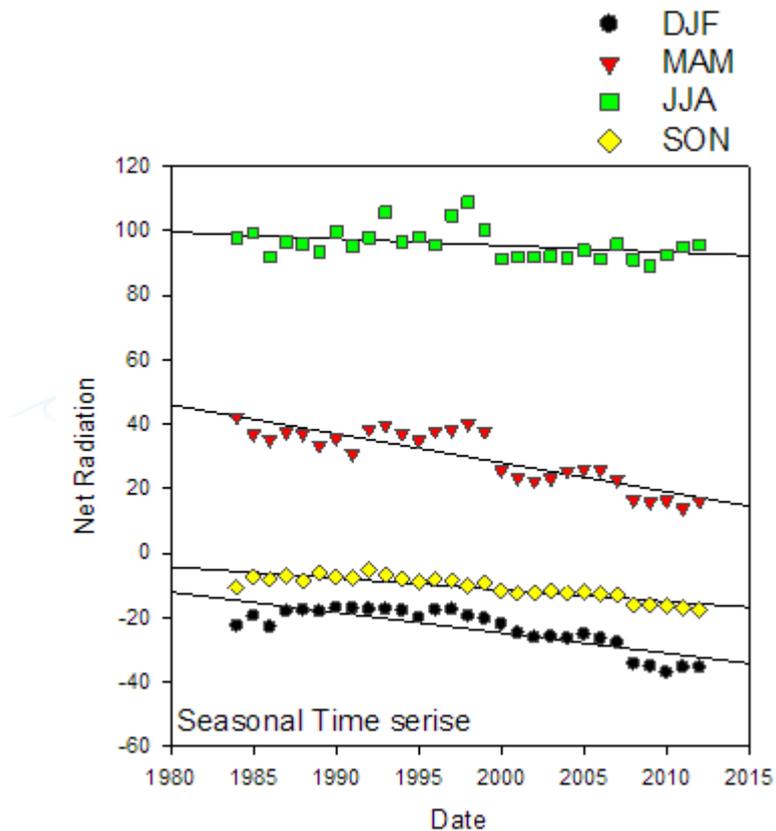


그림 3.5.2. 계절별 순 복사의 시계열 분포.

### 3. 권역별 net radiation의 변화 경향 분석

전체 연구지역의 경우 해양-빙하-해빙이 혼재된 영역으로 순복사의 변화 경향이 각 관측 지표 상태에 따라 상이한 특성이 관측될 가능성이 존재한다. 그러한 특성을 최소화하며, 본 과제와의 연계성을 위하여 북극해 지역을 주요 분석 지역으로 구분하였다. 또한, 전체 북극해 지역만이 아닌, 최근 중요성이 대두되고 있는 Central 북극해 지역을 따로 구분하여 추가 분석을 수행하였다(그림3.5.3). 북극해와 central 북극해의 구분은 NSIDC에서 제공하는 Regional mask를 기준으로 구분하였다.

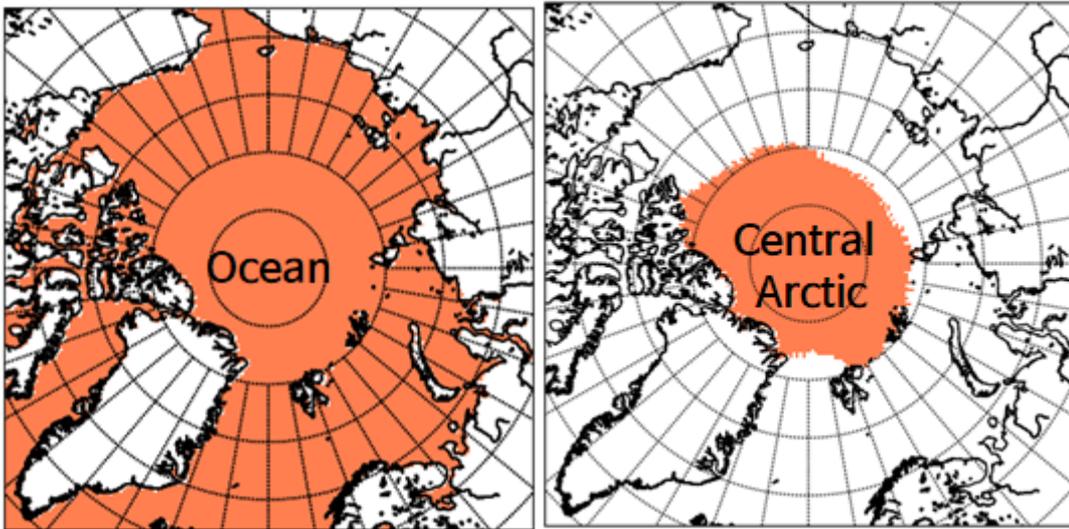


그림 3.5.3. 연구 권역 구분, ocean 지역(좌), central arctic(우).

#### (1) Ocean

북극해 지역의 순복사 시계열 분포는 그림 3.5.4와 같다. 이때 전체 연구영역과 동일하게 계절적 특성이 뚜렷하게 관측되며, 여름철에 높은 순복사의 분포, 겨울철에는 낮은 순복사의 분포가 관측된다. 순복사의 trend는  $-5.64 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ 의 전체 지역에 비해 높은 변동성이 관측되었다. 그림 3.5.5는 북극해 지역에 계절별 변화를 나타내며 겨울은  $-7.01 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ , 봄은  $-9.84 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ , 여름에는  $-3.19 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ , 가을에는  $-3.53 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ 의 감소하는 경향성이 관측되었으며 특히 봄과 겨울철에 감소 경향이 두드러졌다.

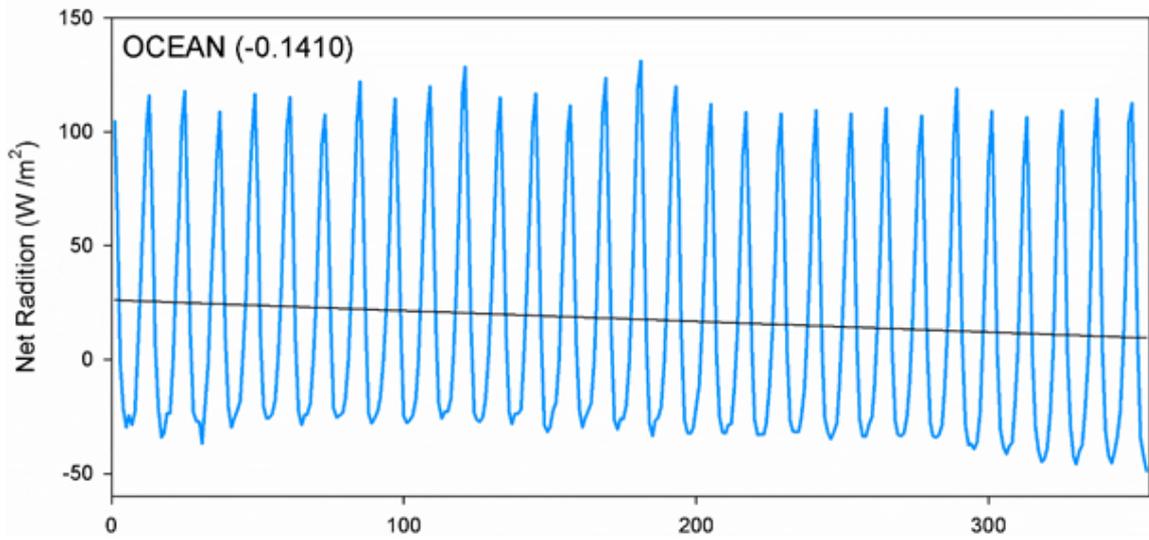


그림 3.5.4. Ocean 지역에서의 순복사 시계열 분포.

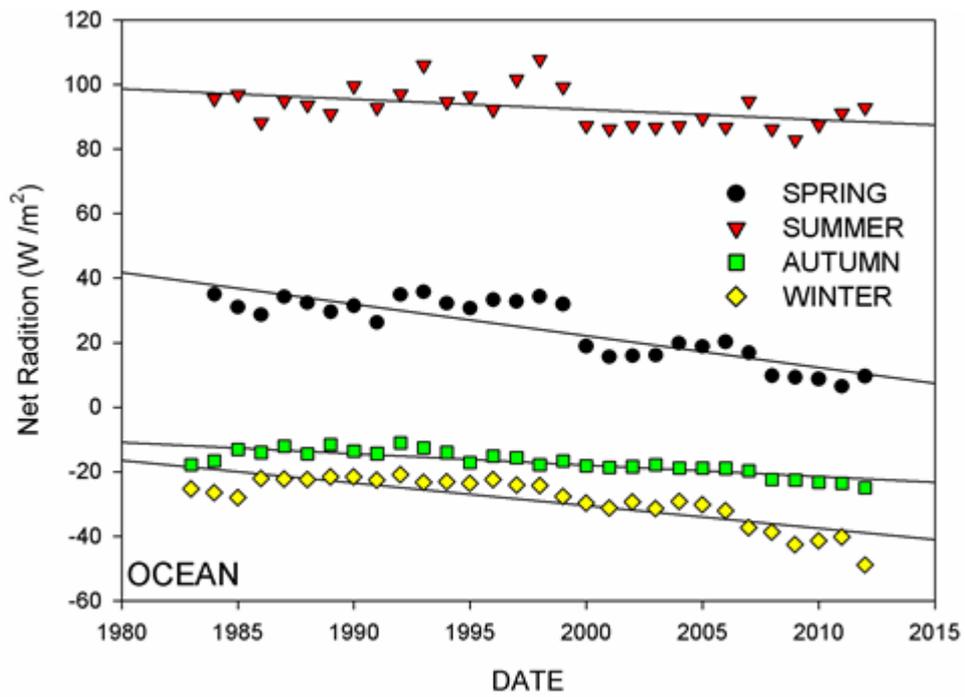


그림 3.5.5. Ocean 지역에서의 순복사 계절별 시계열 분포.

## (2) Central Arctic

북극해 지역의 순 복사 시계열 분포는 그림 3.5.6과 같다. 이때 전체 연구영역과 같이 계절적 특성이 뚜렷하게 관측되며, 여름철에 높은 순 복사의 분포, 겨울철에는 낮은 순 복사의 분포가 관측된다. 순복사의 trend는  $-6.56 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ 의 전체 지역에 비해 높은 변동성이 관측되었다. 그림 3.5.7는 북극해 지역에 계절별 변화를 나타내며 겨울은  $-6.38 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ , 봄은  $-12.98 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ , 여름에는  $-3.27 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ , 가을에는  $-4.63 \text{ W m}^{-2} \text{ decade}^{-1}$ 의 감소하는 경향성이 관측되었으며 특히 봄철에 감소 경향이 두드러졌다.

북극 지역에서 전체적으로 순 복사는 감소하는 경향이 관측되었다. 이러한 경향성은 실제 북극 지역에서 관측되는 현상일 수도 있지만, 자료가 blending 되는 과정에서 발생한 오차로 인한 경향일 가능성도 존재한다. 전기 기간(1983~2000)에서 GEWEX 자료는 후기 기간 (CERES)에 비해 과대 추정되는 경향성이 관측되었기 때문에 이러한 부분으로 인해 경향성이 편향될 가능성이 존재한다. 이러한 부분을 해결하기 위해서는 보다 고도화된 blending 기법을 활용한 장기 data set 구축이 필요하다.

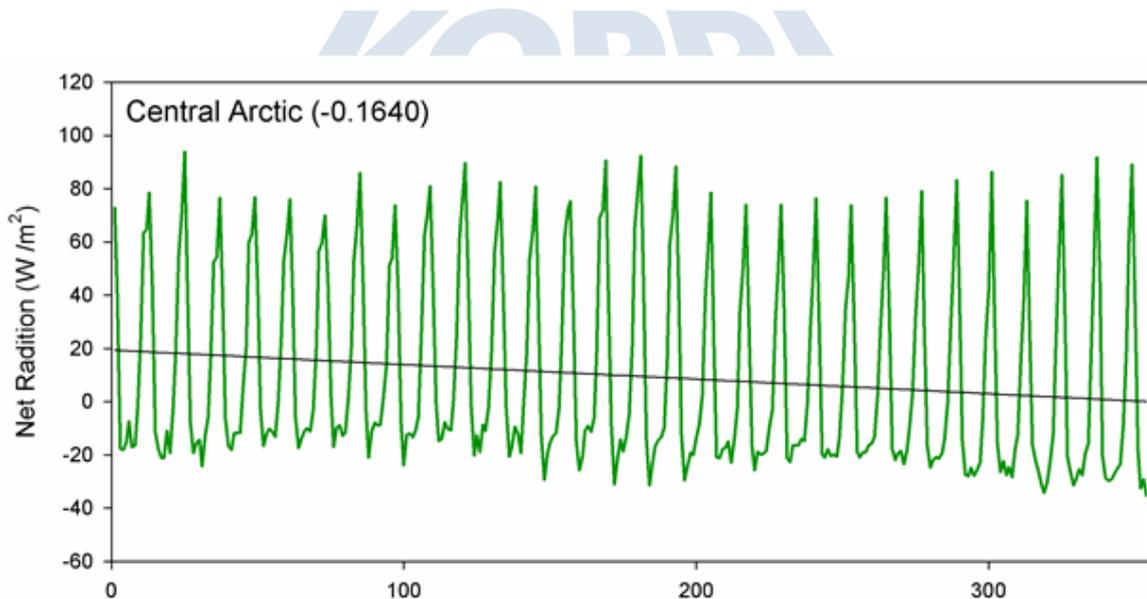


그림 3.5.6. Central arctic 지역에서의 순복사 시계열 분포.

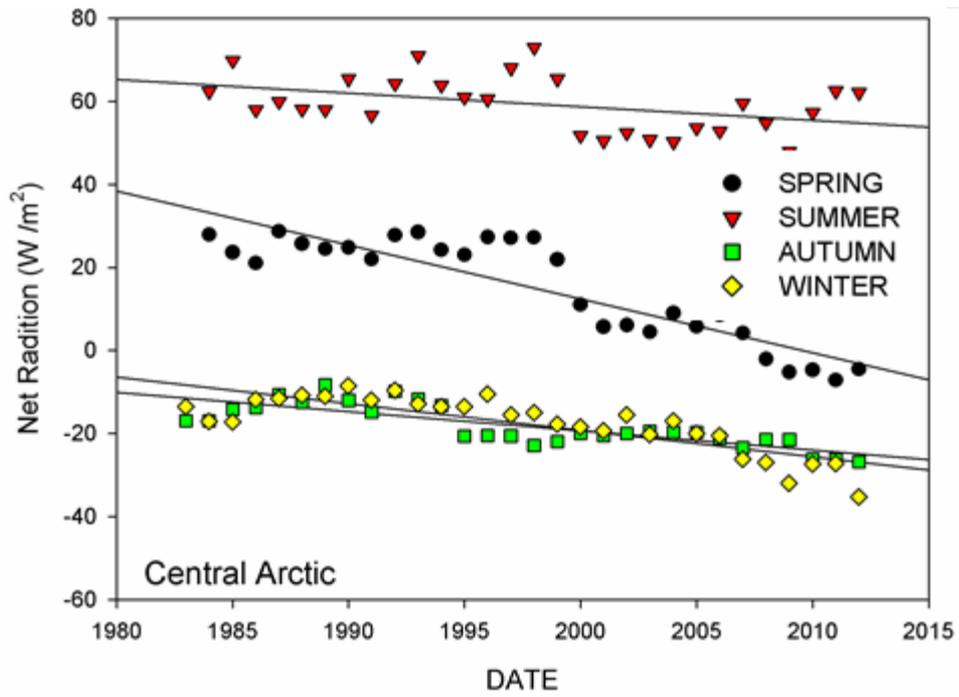


그림 3.5.7. Central arctic 지역에서의 순복사 계절별 시계열 분포.



## 제 6 절 위성 자료를 활용한 현열 추정

### 1. 선진기관 현열 산출 기법 정리

현열을 산출 중인 총 8개의 기관을 조사하였으며 각 기관과 현열 산출 알고리즘, 입력자료들은 표 3.6.1과 같다. 조사가 진행된 해양 위주로 산출되어서 해빙 지역에서의 자료가 부재하였다. 대부분 2010년 전후로 자료 제공이 중단된 것을 확인하였다.

#### (1) 사용 자료 분류

현열 추정 시 온도 자료의 경우 위성 기반 자료와 재분석·모델 자료 등의 다양한 공간자료가 사용되었지만, 풍속의 경우 passive microwave 기반의 위성 자료가 주로 사용되었다.

- Surface temperature  
: NCEP, ERA-Interim / Metop, AVHRR, OISST
- Air temperature  
: NCEP / SSM/I, NOAA, TRIOS, POLES,
- Wind Speed  
: SSM/I, ERS-1&2, Ouik-SCAT, TRMM

#### (2) 사용 알고리즘 분류

현열 산출 시, 사용된 알고리즘은 크게 Bulk aerodynamic 알고리즘과 COARE 3.0 bulk 알고리즘으로 구분할 수 있다. Bulk aerodynamic 알고리즘의 경우 cool skin layer 효과가 고려되지 않아 극지 해역에 적용하기 어려움이 있다. 하지만 COARE 3.0 bulk 알고리즘의 경우 cool skin layer 효과를 적용할 수 있으며 wave spectrum, 대류의 돌풍도, 포화 습도 상 염분 효과를 고려할 수 있다. 또한, wind speed 자료를 활용하여 돌풍도가 고려된 turbulent friction velocity를 이용가능 하며 온도 자료들을 통해 온도 scaling parameter를 산정하여 현열을 산출한다. 하지만 3.0버전의 경우 풍속변수의 수정이 이루어지지 않았기 때문에 풍속의 산출폭이 업데이트 버전에 비해 좁다.(3.5버전의 경우 풍속은 20 m/s로 산출 가능).

Good quality의 화소를 바탕으로 두 알고리즘을 비교할 경우 Bulk aerodynamic 알고리즘으로 산출된 ERA-40의 경우 Root mean square error가  $2.25 \text{ W m}^{-2}$ , COARE 3.0으로 산출한 OAFflux의 경우  $1.47 \text{ W m}^{-2}$ 으로 관측되어 COARE 3.0이 좀 더 높은 정확도를 보인다.

- Bulk aerodynamic: Chou(1993), Bentamy.(2013), Beljaars (1994,1995)
- COARE 3.0 bulk algorithm

표 3.6.1. 기관별 현열 산출 알고리즘 및 입력자료 정리 (Yu *et al.*, 2011 일부 인용)

	Surface Temperature ( $t_s$ )	Air temperature ( $t_a$ )	Wind speed (U)	Bulk Algorithm
GSSTF-2	NCEP	NCEP	SSM/I	Chou(1993)
J-OFURO	NCEP, Metop	NCEP	SSM/I, Quik-SCAT	COARE3.0
HOAPS	NODC/RSMAS AVHRR	SSM/I	SSM/I	COARE3.0
IFREMER	ERA-Interim	NOAA	ERS-1&2, ADEOS, Quik-SCAT	Bentamy <i>et al.</i> (2013)
OAFflux	NOAA OI SST, NWPM	Satellites, NWPM	SSM/I, MSR-E Quik-SCAT	COARE3.0
SeaFlux	AVHRR, NCEP	TRIOS,NCEP	TRMM, SSM/I, NCEP	COARE3.0
COREv2	OISST	POLES	QuikCAT	COARE3.0
ERA-40				Beljaars (1994,1995)

2. 현열 추정을 위한 전처리 및 산출

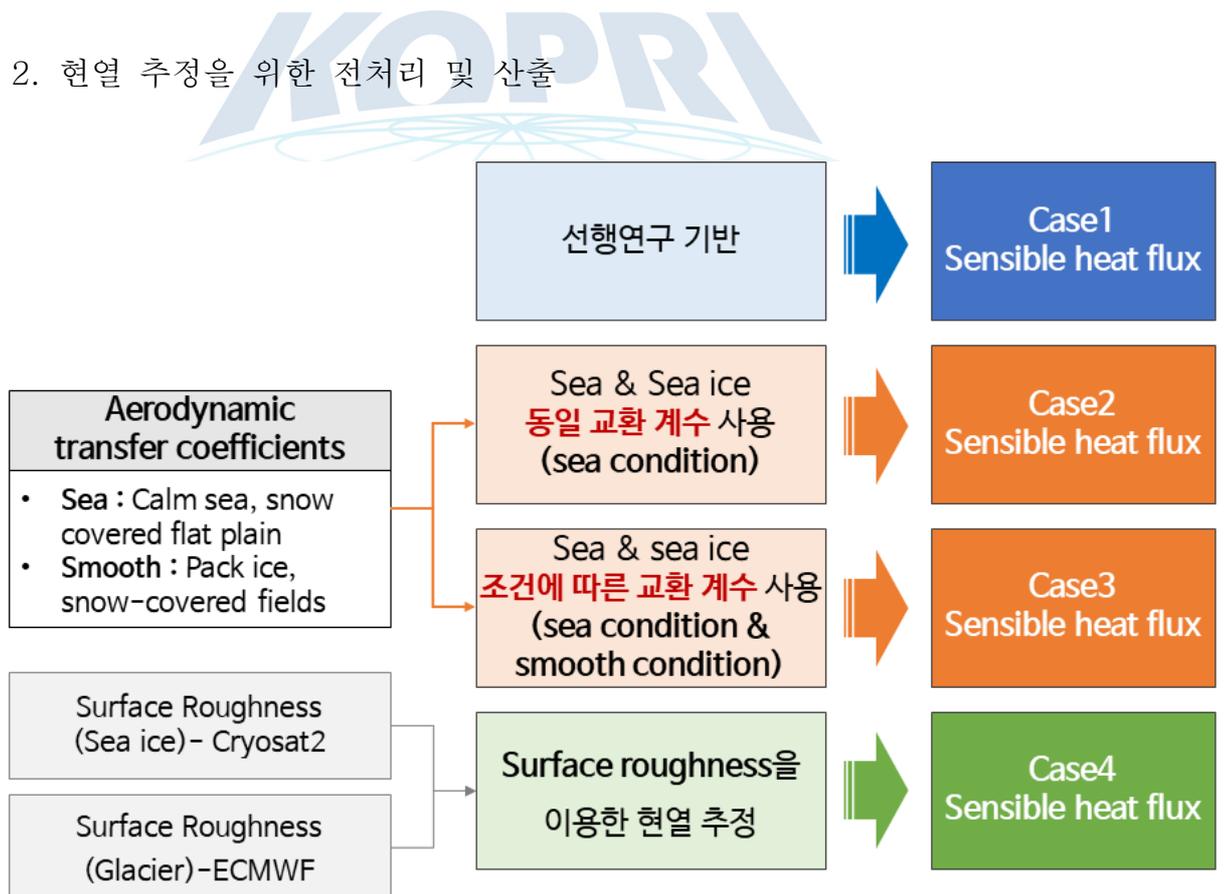


그림 3.6.1. 위성 기반 현열 시험 추정 흐름도.

본 연구에서는 총 4가지 방법을 기반으로 현열을 시험 추정하였다. 각 방법은 그림 3.6.1과 같이 Case 1~4로 명명하였으며 선행 연구 기반으로 추정한 현열을 Case 1, 현열 산출 시 입력되는 Aerodynamic 교환계수를 해빙과 해양 모두 동일한 계수를 적용했을 경우 Case 2, 해빙과 해양을 구분하여 교환계수를 적용했을 경우 Case 3이라고 명명하였다. Case 4의 경우 앞에서 언급된 방법과 다르게 지표 현열 추정 기법을 활용하여 추정하였으며, 지표 거칠기를 이용하여 Aerodynamic resistance를 추정하여 계산한다. 수식 3.1.1을 기본으로 현열을 추정하였으며 선행 연구 기반의 Case 1을 제외하고 입력되는 air density와 specific heat of air at constant pressure는 동일한 자료를 이용하여 계산하였다. Air density는 ECMWF에서 제공하는 mean sea level pressure와 Specific Gas constant, 기온을 이용하여 계산하였다. specific heat of air at constant pressure의 경우  $1004 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 로 고정하여 사용하였다.

(1) 현열 시험 추정 (Case 1: 선행 연구 기반)

$$SHF = \rho C_p C_h U (T_s - T_a)$$

$\rho$ : air density =  $1.3 \text{ Kg m}^{-3}$ ,  
 $C_h$ : transfer coefficients for SHF =  $1.33 \times 10^{-3}$

Inoue et al., 2011 연구를 기반으로 air density, aerodynamic transfer coefficients for temperature (교환계수)를 모두 상수로 설정하여 추정하였다. 자세한 수치는 위의 식과 같으며, 앞에서 언급했던 변수는 동일하다. 이때 독립변수를 제외한 모든 변수가 고정된 상태로 추정되었다.

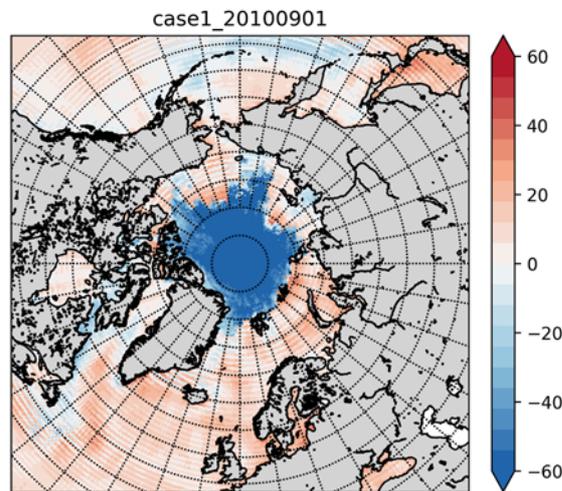


그림 3.6.2. Case 1 현열 추정 예시.

(2) 현열 시험 추정 (Case 2: 동일 교환계수 적용)

$$SHF = \rho C_p C_h U (T_s - T_a)$$

$C_h$ : transfer coefficients for SHF =  $1.4 \times 10^{-3}$

해양, 해빙 모두 표면조건이 sea condition일 때를 가정하여 추정하였다. 여기서 sea condition은 Clam sea, snow covered flat plain 조건일 때를 의미하며 해빙영역이 flat 하다는 가정하에 추정을 수행하였다. 추정된 결과는 Case 1과 유사하게 추정되었다.

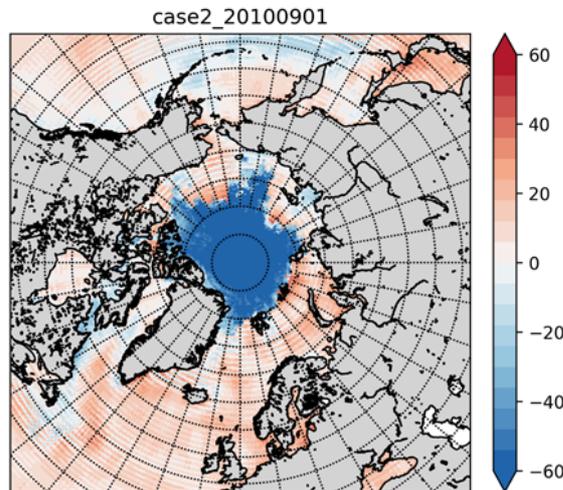


그림 3.6.3. Case 2 현열 추정 예시.

(3) 현열 시험 추정 (Case 3: 해양-해빙별 교환계수 적용)

$$SHF = \rho C_p C_h U (T_s - T_a)$$

$\rho$ : air density =  $1.3 \text{ Kg m}^{-3}$ ,

$C_h$ : transfer coefficients for SHF =  $1.4 \times 10^{-3}$  (ocean)

$C_h$ : transfer coefficients for SHF =  $2.8 \times 10^{-3}$  (sea ice)

해양에서는 sea condition으로 가정하고, sea ice 영역에서 smooth condition으로 가정하여 추정을 진행하였다. 여기서 smooth condition은 Pack ice, snow covered fields 조건을 의미하며, 앞선 sea condition에 비해 거친 표면일 때 적용되는 교환계수이다. 이 과정에서 해빙을 눈 덮임과 요철이 많은 경우로 가정하여 추정하였으며 추정된 예시는 그림 3.6.4와 같다. 동일한 교환계수를 적용한 Case 2와 비교해서 해빙 영역에서 더 낮은 현열을 추정하였다.

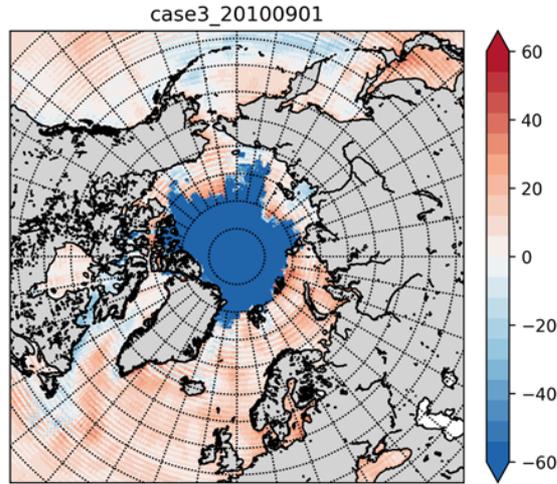


그림 3.6.4. Case 3 현열 추정 예시.

(4) 현열 시험 추정 (Case 4: 지표 현열 산출 기법 적용)

$$SHF = \frac{\rho C_p (T_s - T_a)}{r_a}$$

$$r_a = \frac{\left[ \frac{\ln(z-d)}{z_0} \right]}{k^2 U}$$

$\rho$  : air density,

$C_p$  : Specific heat of the air,

$k$  : von Karman Constant = 0.41

$U$  : Wind velocity,

$T_s$  : Surface temperature,

$T_a$  : Air temperature

$z$  : height of the anemometer (10 m)

$z_0$  : surface roughness

Cryosat-2의 해빙 roughness 자료를 활용하여, aerodynamic resistance를 추정하여 현열 추정하였다. 일반적으로 지표 현열을 추정하는 방식을 해빙지역에 적용하였다. 지표영역의 경우 식생의 유무 및 종류로 지표의 높이를 추정하여 aerodynamic resistance를 추정하는데, 본 연구에서는 해빙 거칠기를 이용하여 산출하였다. 이 방식으로 추정된 현열의 경우 Case 1과 Case 2와 유사한 값의 분포를 보인다. 해빙거칠기 자료의 좁은 swath로 인하여 극점 지역에서 트랙을 따라서 결측 자료가 존재하며, 해빙이 적은 여름철의 경우 해빙 거칠기가 산출되지 않기 때문에 여름에는 추정할 수가 없다.

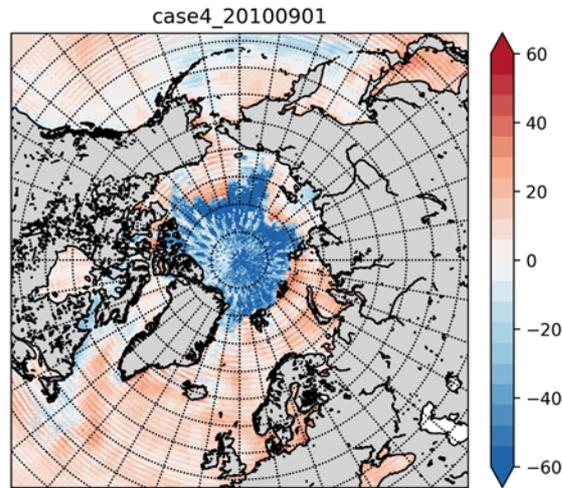


그림 3.6.5. Case 4 현열 추정 예시.

### 3. OAFlux 자료와의 상호 비교

위성 기반 자료 및 COARE 3.0 bulk 알고리즘을 이용하여 산출되는 OAFlux 현열 자료와 상호 비교 분석을 수행하였다. 해빙 지역의 경우 OAFlux가 산출되지 않는 지역이기 때문에 비교가 불가하였다. 전체기간 공간적으로 비교할 때, 대부분 본 과제 (Case2)에서 산출된 현열의 경우 OAFlux에 비해 높게 추정되는 경향이 관측되었다 (그림 3.6.6). 하지만 해빙-해양 boundary 지역에서 OAFlux가 높게 관측되며, 이는 OAFlux와 본 과제와 해빙역 구분의 차이에서 발생하는 것으로 판단된다. 전체 해역의 시계열 분포를 나타낸 그림 3.6.7에서도 똑같은 특징이 관측된다. 빨간색으로 표시된 OAFlux 현열의 high peak point가 본 과제에서 추정한 현열보다 높게 관측되었으며 low peak point의 경우 두 자료가 유사하게 관측되었다.

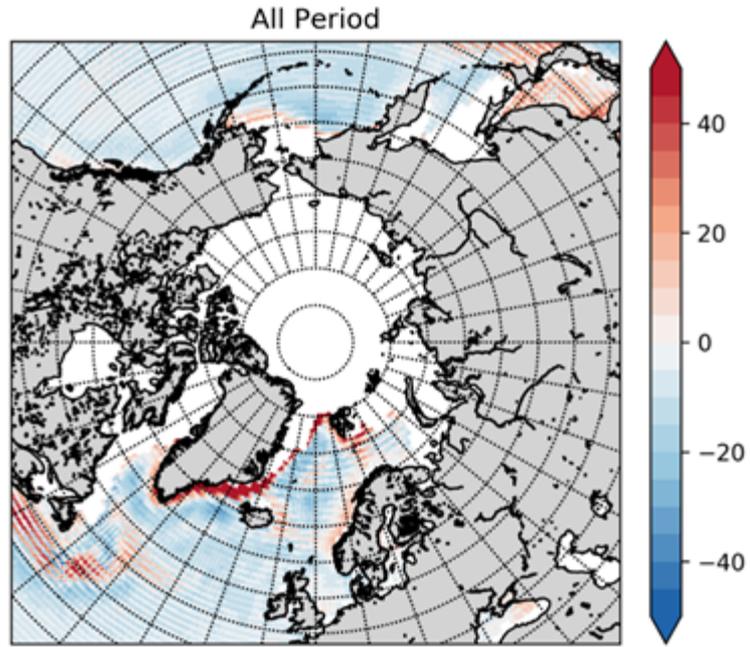


그림 3.6.6. OAFlux와 추정된 현열의 공간 차이 분포 (OAFlux - Estimated sensible heat flux, 2002 ~ 2016).

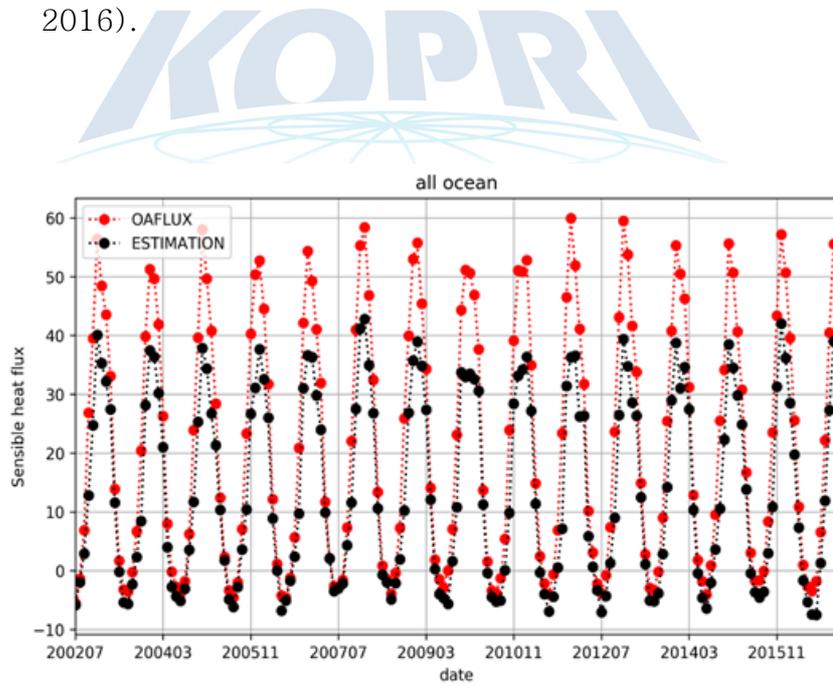


그림 3.6.7. 전체 연구영역에서 OAFlux와 추정된 현열의 시계열 분포(2002~2016)

전체 연구 영역에서 발생하는 차이가 해빙-해양 boundary에 기인한 오차인지를 알아보기 위하여 해빙 유무 조건을 엄격하게 설정하여서 비교하였다. 그림 3.6.8을 보면 왼쪽에서는 전체 해역을 비교 하였을 때의 산점도 이며 오른쪽 그림의 경우 해빙 농도가 0%인 확실한 해양 영역을 비교 했을 때의 산점도이다. 두 산점도를 비교했을 때 확실한 해양지역을 추출하여 비교하였을 때, 전체 해역에서 발생했던 과소추정 값이 제거된 것을 확인할 수 있다. 이 결과로 두 자료의 차이는 해빙 경계조건에 의해서 발생하였다는 것을 알 수 있다.

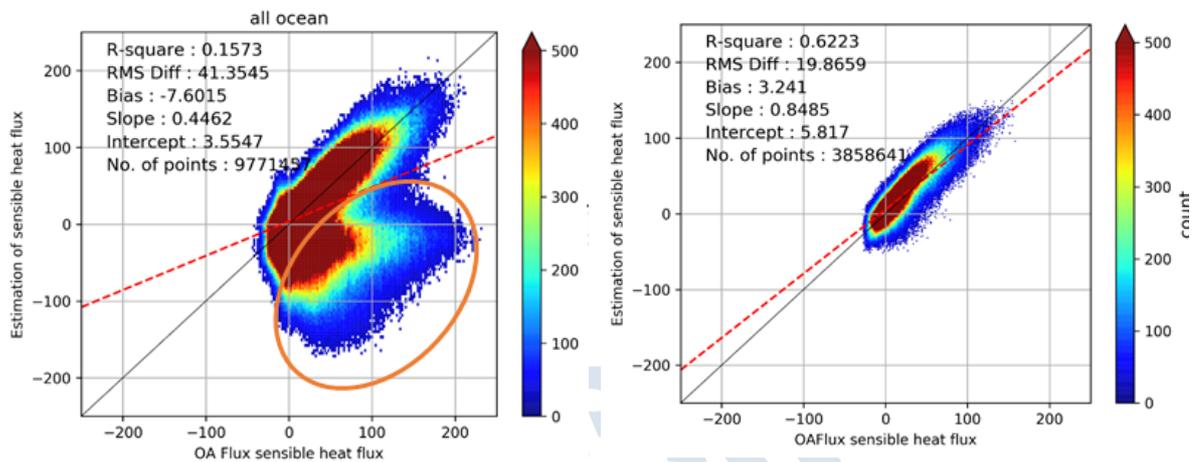


그림 3.6.8. OAFlux와 추정된 현열 사이의 산점도, all ocean(왼쪽), clearly ocean(오른쪽).

NSIDC Regional Mask와 OAFlux와의 상호 비교 결과, 실측 자료 인근 해양을 포함한 총 6개 권역을 우선 선정하여서 해역별 분석을 수행하였다. 처음 선정한 해역은 Okhotsk, Bering, East Greenland sea, Baffin Bay이다. 선정기준은 OAFlux와 상호 비교 검증 시, 차이가 적은 해역을 위주로 하였다. 각 해역의 검증 결과는 아래와 그림 3.6.9와 같다.

- Baffin bay (RMSD: 25.71 W m<sup>-2</sup> R: 0.78)
- Bering (RMSD: 27.88 W m<sup>-2</sup> R: 0.84)
- East Greenland sea (RMSD: 39.50 W m<sup>-2</sup> R: 0.64)
- Okhotsk (RMSD: 13.93 W m<sup>-2</sup> R: 0.83)

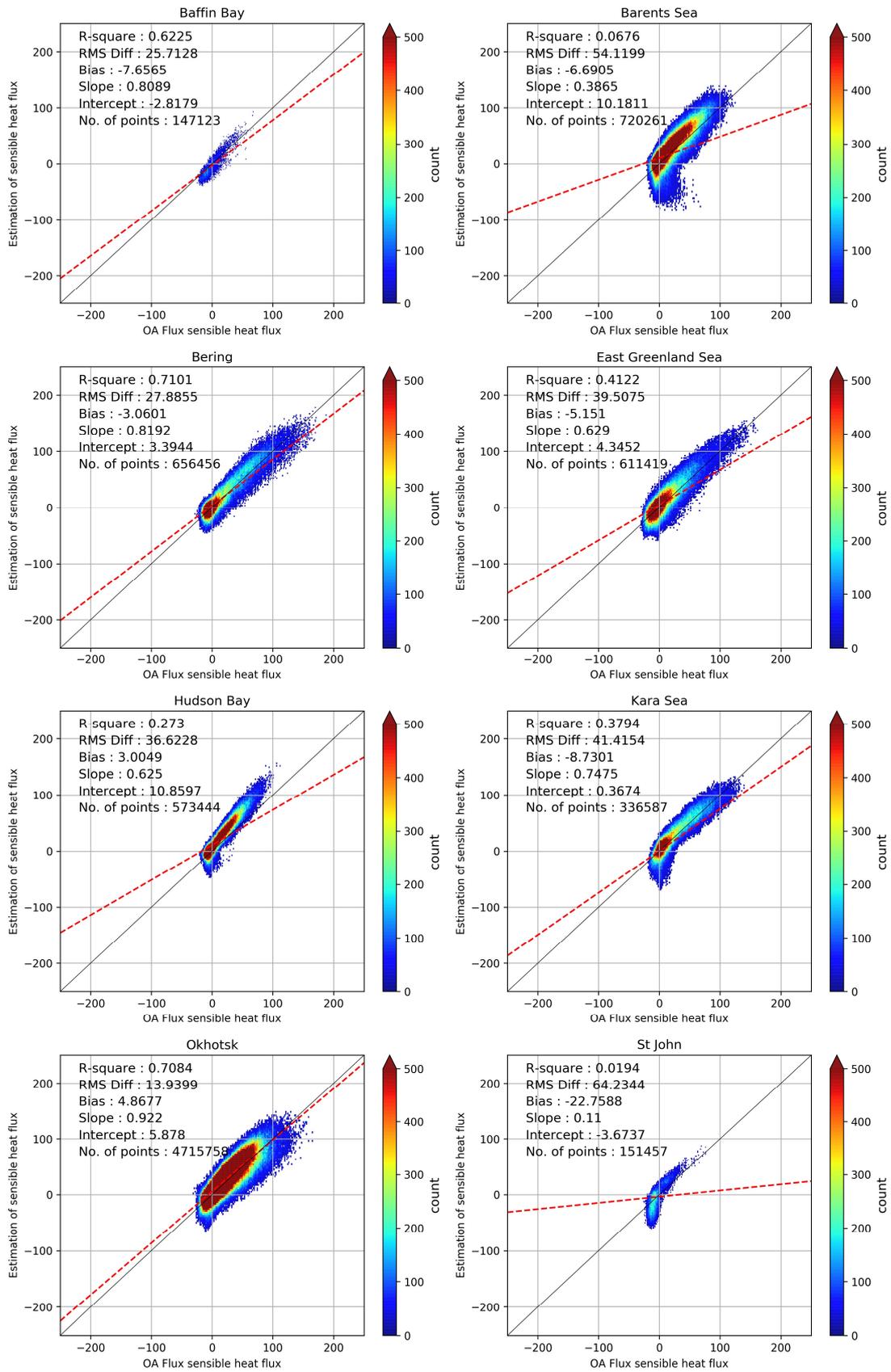


그림 3.6.9. 주요 해역별 OAFlux와 추정된 현열 사이의 산점도.

#### 4. 현열 추정의 고도화

##### (1) 정규화/표준화 수행

- 다양한 방법으로 현열 추정을 수행하였지만 해빙역에서 큰 오차가 발생하였기 때문에 이 부분을 해결하기 위하여 현열 추정의 고도화를 수행하였다. 현열 추정을 고도화하기 위하여 딥러닝 기법을 활용하였으며 현열을 추정하기 위해 사용된 입력 자료는 앞에서 사용된 자료와 동일하다. 이때 서로 서로 unit이 다른 변수를 이용하기 위해서는 정규화 혹은 표준화 수행이 필요하다. 입력 자료를 바탕으로 현열 추정 테스트 수행하였고 각 자료의 분포는 그림 3.6.10과 같은 형태로 나타난다. 본 연구에서는 자료의 정규 분포가 된 자료의 사용을 위하여 정규화된 자료를 바탕으로 현열 추정 진행을 결정하였다.

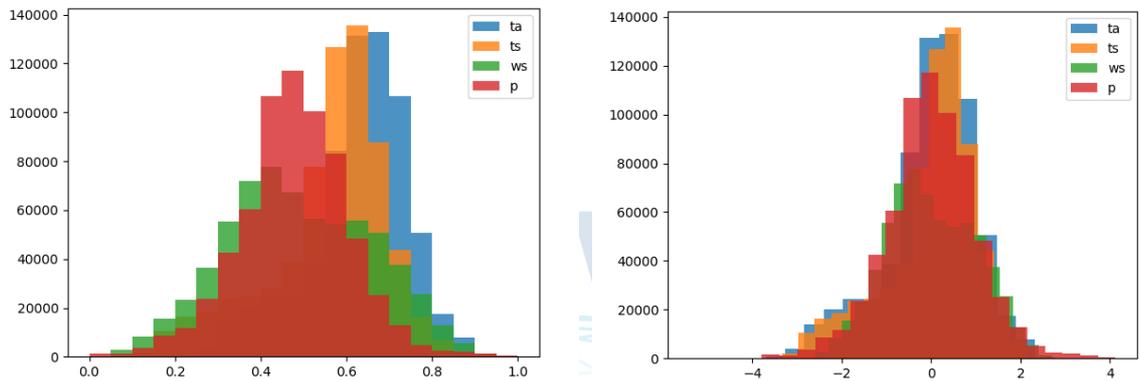


그림 3.6.10. 입력자료별 표준화(왼쪽), 정규화(오른쪽) 히스토그램 분포.

##### (2) 에포크 설정

본 연구에서 에포크 진행 상태에 따른 모델 향상도 분석을 분석하였다. 에포크 설정은 반복횟수에 따른 훈련 상태 점검할 수 있는 과정이며 그림 3.6.11에서 에포크 횟수에 따른 MAE를 바탕으로 분석 및 에포크 횟수를 설정하였다. 아래의 결과를 보면 500번의 반복횟수 동안 계속 모델의 향상되는 것을 알 수 있으며 이를 기반으로 하여 에포크 횟수를 더 높게 설정하였다. 각각 에포크는 DNN의 경우 4000번(h2o), 1000번(keras)으로 설정하였다.

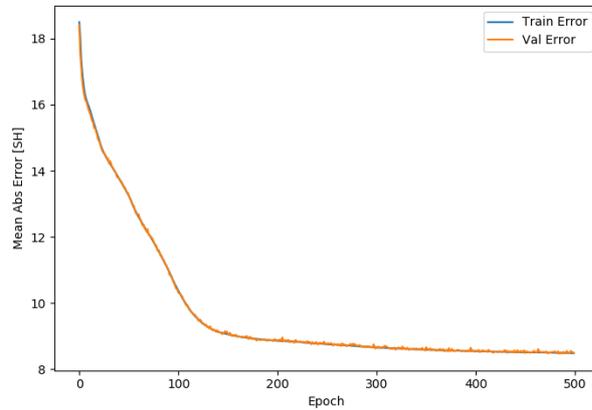


그림 3.6.11. 에포크 설정을 위한 MAE 분포.

### (3) 해빙특성을 고려한 현열 추정 고도화

참고자료를 활용하여 추정된 현열 결과는 그림 3.6.12~13과 같다. 참고자료와 비교하였을 때, DNN으로 추정된 현열의 경우 상관계수 0.87, RMSE는  $13.53 \text{ W m}^{-2}$ 의 앞선 추정 방법에 비해 높은 정확도가 관측되었다. 두 자료의 산점도를 비교하였을 때 일대일 선에 fitting되는 것을 확인하였으며, bias 또한  $-0.26$ 으로 향상된 값을 보여주었다. 하지만 현열 추정 시, 해빙 표면 온도를 MODIS IST자료를 이용하였는데 해당 자료의 경우 겨울철 결측이 다수 존재하기 때문에 그림 3.6.13에서 관측되는 것처럼 극점 구간에서 결측이 발생한다. 이런 결측 부분의 경우 표면 온도의 추가 자료를 활용하여 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

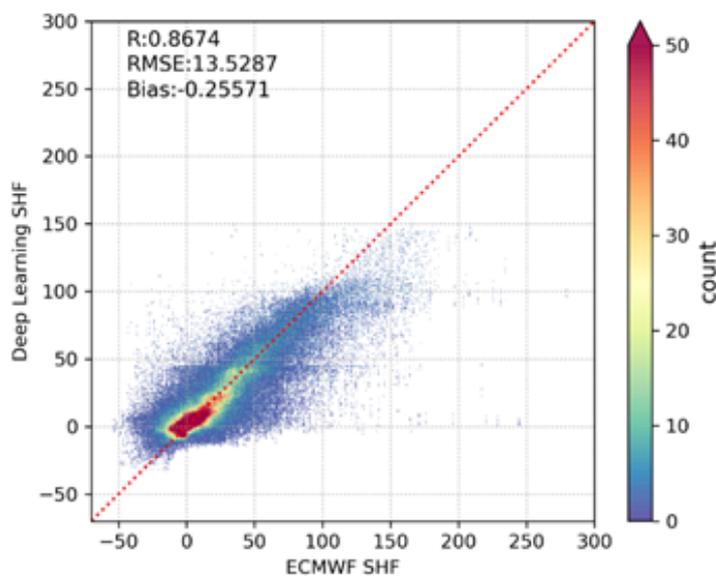


그림 3.6.12. DNN으로 추정된 현열의 참고자료를 활용한 검증.

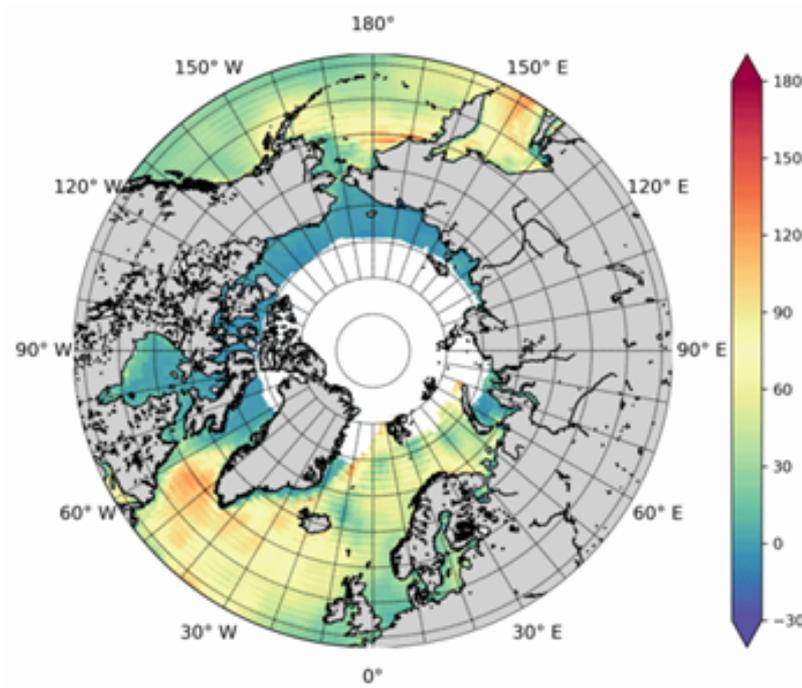


그림 3.6.13. DNN으로 추정된 현열의 예시

## 5. 현열 경향성 변화 분석

### (1) 공간 변화 분포

대부분 연구지역에서 연간  $\pm 1 \text{ W m}^{-2}$  이하의 낮은 변화 경향이 관측되었으며 해빙 지역 혹은 Central Arctic 지역에서 현열의 증가 경향이 두드러지게 관측되었다. 하지만 Bering, Baffin, 동 그린란드해역의 경우 해역 경계를 따라서 현열이 감소하는 경향이 관측되었으며 나머지 영역에서는 약한 증가 경향이 관측되었다. 현열의 강한 증가 패턴이 보이는 영역은 대부분 다년빙이 존재하는 영역이었으며, 융빙이 자주 일어나거나 항상 해양인 영역에서는 약한 증가경향이 관측되었다.

Annual changes of sensible heat flux

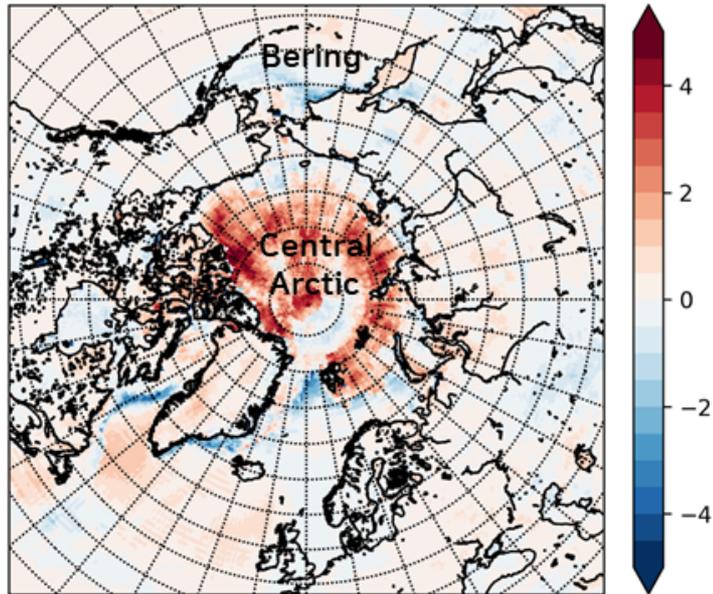


그림 3.6.14. Case 2 현열 장기간 변화의 공간분포.

(2) 계절별 변화 분포

추정된 현열의 계절별 시계열 변화 경향을 관측하였으며 각각의 시계열 분포는 그림 3.6.15와 같다. 겨울의 경우 10년 동안  $1.72 \text{ W m}^{-2}$ 로 현열이 증가하는 경향을 보였으며 2012~2013기간에 급격한 증가가 관측되었다. 봄철의 경우 10년 동안 변화  $2.02 \text{ W m}^{-2}$ 의 변화하였으며 겨울과 마찬가지로 2012~2013 기간에 현열이 급격하게 증가하였다. 반면 여름의 경우 10년 동안 변화:  $-0.95 \text{ W m}^{-2}$ 의 변화 경향과 전반적으로 음의 값이 분포하였으며 2012~2013년도에 두드러지는 변화는 관측되지 않았다. 가을의 경우 10년 동안  $2.50 \text{ W m}^{-2}$ 의 변동성을 보였으며 다른 시기 보다 증가 경향이 두드러지게 관측되었다.

일반적으로 에너지 수지의 변화에서 눈이나 얼음이 감소하게 되면 지표면 알베도가 감소하게 된다. 알베도가 감소하는 것은 반사되는 에너지의 양이 줄어들고 흡수되는 에너지가 증가하는 것을 의미하며, 이 과정이 진행될 경우 지표면의 순 복사는 증가하게 된다. 지표의 에너지는 다시 대기로 방출되는데 이때 현열이 증가할 경우 대기가 가열되는 현상을 관측할 수 있으며 잠열이 증가할 경우 대기가 냉각되는 과정을 거치게 된다. 그림 3.6.16과 이 메커니즘을 비교하였을 때, 9월을 기준으로 해빙 면적이 크게 감소하였을 때(2012년), 현열이 증가하는 패턴이 관측되며 해빙 면적이 회복되었을 때 현열이 감소하는 패턴이 관측된다. 이는 본 연구에서 추정된 현열이 기후 메커니즘과 동일한 흐름을 나타낸다고 볼 수 있다.

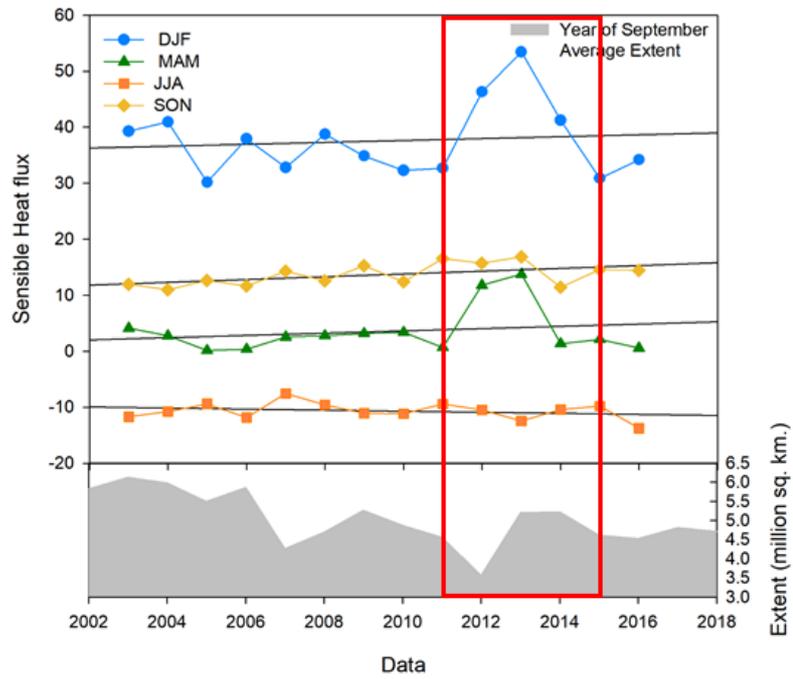


그림 3.6.15. 추정된 현열의 계절별 시계열 변화와 해빙 면적 변화의 시계열 비교.



## 제 7 절 에너지 수지 변화

### 1. 기온의 변화

#### (1) 전체기간

아래의 그래프는 Arctic circle (AC) 지역에서 자료별 기온의 시계열 분포를 관측하였으며 그림 3.7.1과 같다. 3가지 자료 모두 증가 경향이 관측되었으며 정량적으로 10년간  $0.4 \sim 0.8^{\circ} \text{C}$  증가하였다. 기온의 증가와 유사하게 지표온도의 증가도 관측되었으며 이는 북극의 온난화를 관측하는 하나의 요소로 사용가능하다. 각각 자료를 비교했을 때 ECMWF 자료의 경우 CMIP5 자료와 비교 시, 온도를 과대 추정하는 경향을 보였으며 증가 경향도 더 크게 관측되었다.

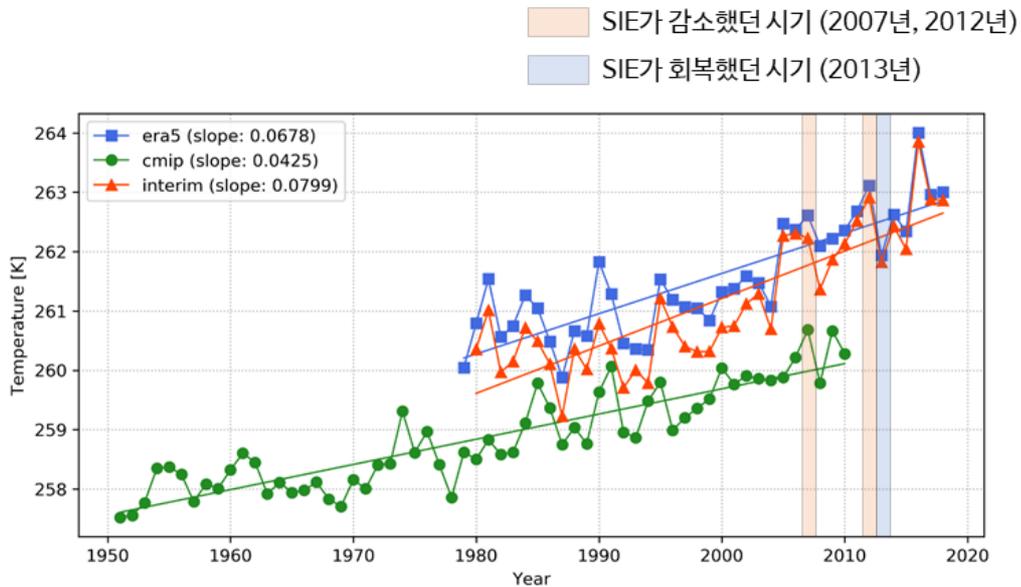


그림 3.7.1. 북극권 지역에서 다양한 공간자료의 기온 변화.

#### (2) 계절별

Sea ice extent가 급격하게 감소(2012)하였다가 회복(2013)했던 시기의 특징이 뚜렷하게 관측되었으며 가을과 겨울의 기온 증가가 뚜렷하게 관측되었다. 봄철의 경우 10년간  $0.4 \sim 0.5^{\circ} \text{C}$  증가하였으며 여름 동안에는 10년간  $0.1 \sim 0.2^{\circ} \text{C}$  증가, 가을에는 10년간  $0.9 \sim 1.0^{\circ} \text{C}$  증가, 겨울에는 10년간  $0.6 \sim 1.1^{\circ} \text{C}$  증가하였다. 모든 계절에서 온도의 증가가 관측되었으며 북극의 온난화가 지속해서 발생하는 것을 관측하였다.

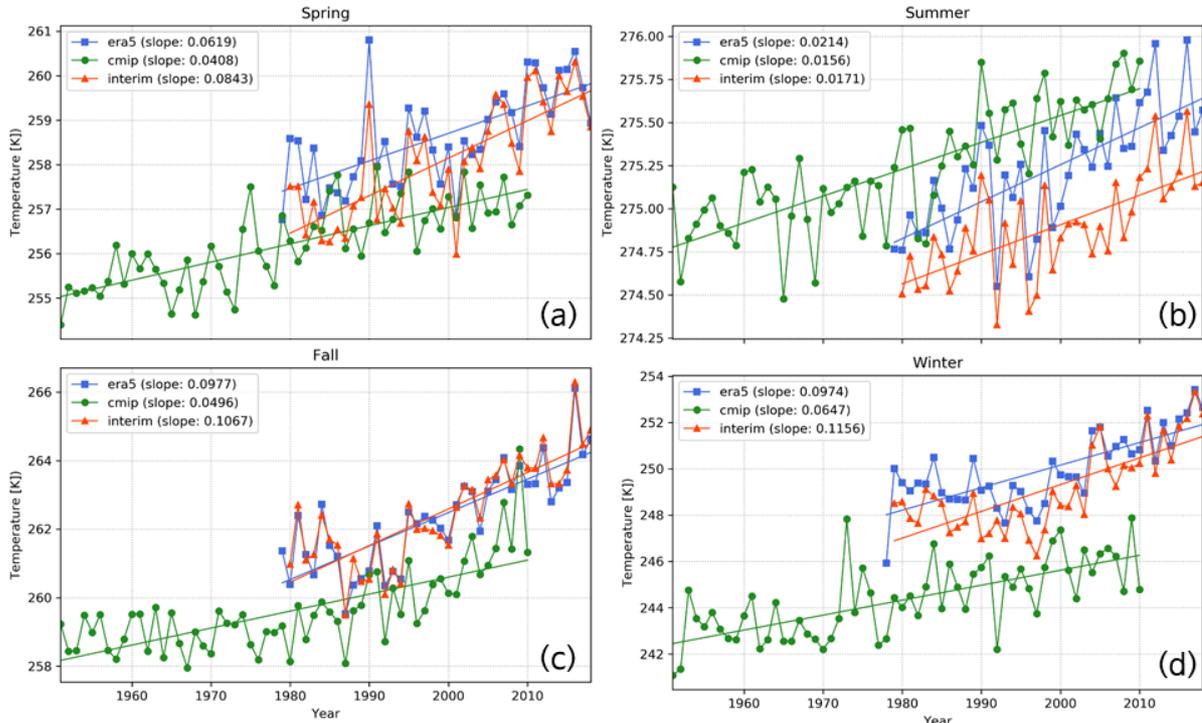


그림 3.7.2. 계절별 북극권 지역의 기온 변화; (a) 봄, (b) 여름, (c) 가을, (d) 겨울.

## 2. 에너지 수지 변화 prototype 모델 구축

### (1) 구축 환경

총 3년간의 연구를 바탕으로 에너지 수지 변화의 prototype 모델을 그림 3.7.3의 개념도를 기반으로 구축하였다. 순복사, 현열, heat contents 3가지를 기본으로 구축되었다. 순복사의 경우 위성자료만이 아닌 재분석 자료를 추가하여 진행하였고, 현열의 경우 딥러닝을 활용하여 고도화된 추정값을 이용하였다. 또한 다양한 기온자료를 활용하여 heat contents를 추가하여 모델을 구축하였다.

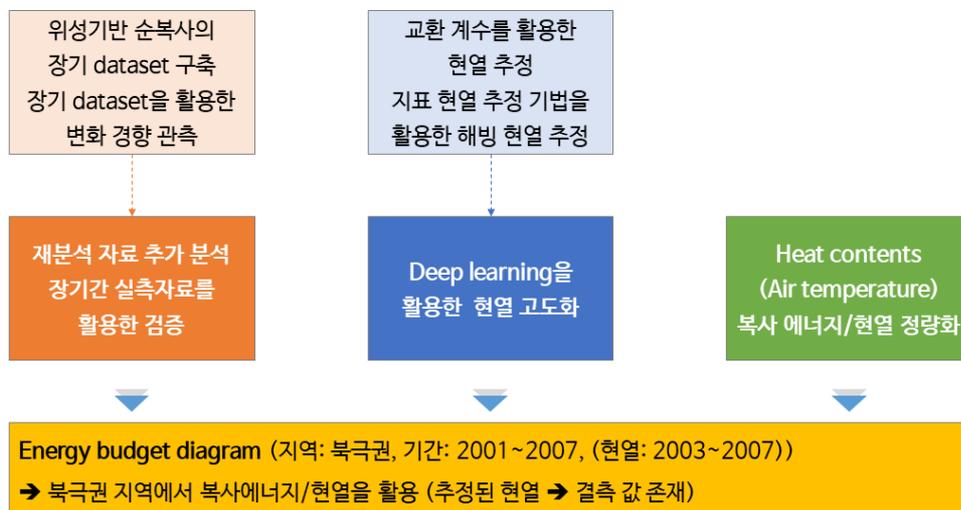


그림 3.7.3. 에너지 수지 초기 모델 생성을 위한 개념도.

(2) 북극권 지역에서의 에너지 수지

Energy budget diagram을 구축하였으며 그림 3.7.4와 같이 나타낼 수 있다. 구축된 지역은 북극권 (위도 65° N 이상)으로 기간은 2001~2007, (현열: 2003~2007)으로 설정되어 있다. 본 연구에서 추정한 북극권 지역의 복사에너지와 현열을 활용하여 구축하였으며 현열의 경우 극점을 중심으로 결측이 발생하여 현열이 과대 추정되는 되는 경향이 관측할 수도 있다.

북극권(위도 65°N 이상 지역) & 2001 ~ 2007 기준(현열: 2003-2007)

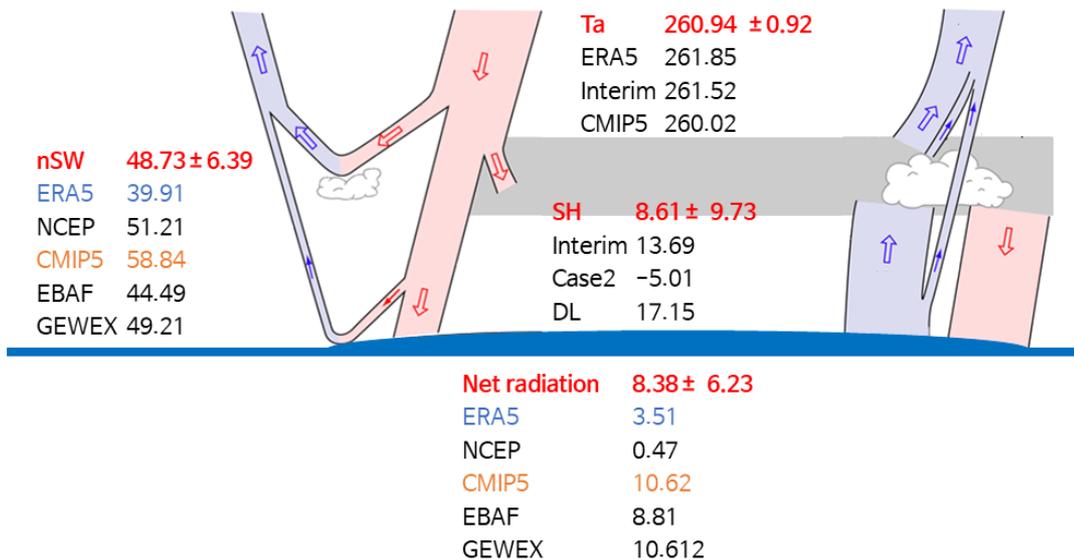


그림 3.7.4. 에너지 수지 초기 모델 예시.

(3) 에너지 수지 모델의 prototype을 활용한 북극 해빙의 변동 요인 분석

그림 3.7.5는 복사 에너지와 해빙 면적 이벤트와 비교한 그림이다. 2012년 (해빙 면적 급감) & 2013년(해빙 면적 회복) 시기를 기준으로 분석을 수행하였다. 이때, GEWEX, CMIP5의 경우 해당 시기에 자료가 없어서 분석 불가능하여 ERA5, EBAF, NCEP 3 가지 자료를 분석하였다. ERA5, NCEP, EBAF 모두 해빙 면적이 증가하였던 2013년도에 순복사가 전년도에 비해 급감하는 패턴을 보였다. 이는 표면에 흡수되는 에너지양의 감소를 의미하며 흡수되는 에너지 감소로 인하여 전년도에 비해서 대기의 가열이 적은 것을 나타낸다. 이러한 결과는 앞서 그림 3.7.1에서 다양한 공간자료의 기온 패턴과 일치하는 부분이다. 또한 해빙면적이 급감하였던 2012년의 경우 3 가지 자료 모두 순복사의 증가가 관측되었다. 2007년의 경우 해빙 면적이 감소하는 시기였으며, NCEP, GEWEX을 제외한 나머지 자료에서 높은 순 복사가 관측되었다.

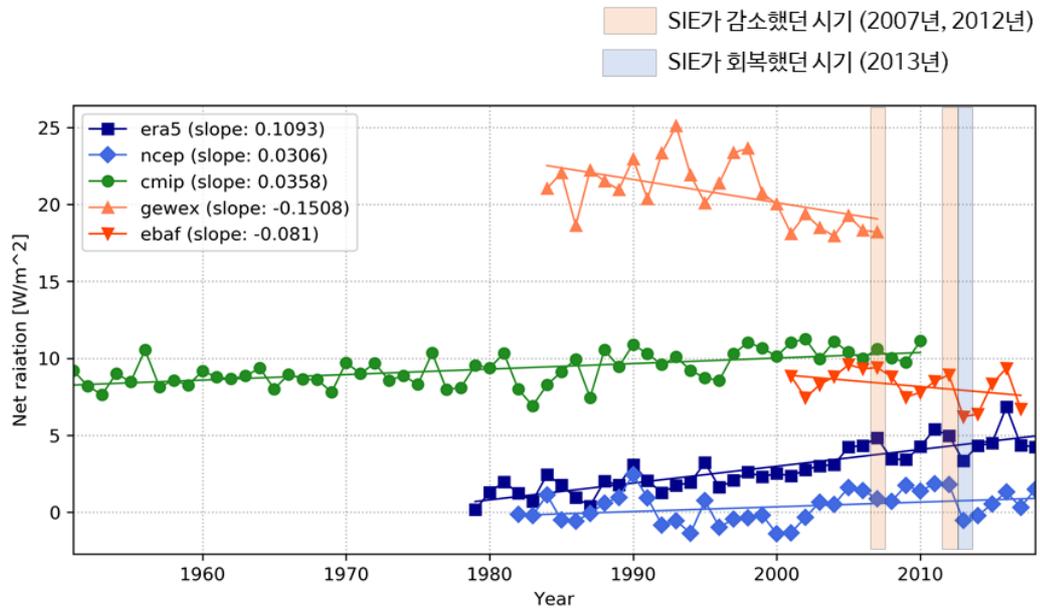


그림 3.7.5. 에너지 수지 초기 모델 중, 순 복사 변화 시계열 변화와 해빙 면적 이벤트와의 비교.





연구개발목표 달성도 및

극지연구소 대외기여도

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

### 제 1 절 연구개발목표의 달성도

#### 1. 연구 성과목표 및 달성도

표 4.1.1은 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 기반 에너지 변수 품질 분석 및 특성 분석으로 선정하였으며 총 2가지의 세부목표를 설정하였다. 위성 기반 에너지 변수의 수집 및 전처리와 수집된 에너지 변수별 품질 분석을 수행하고 장기간의 자료를 취득하였다. 다음으로 극지방에 최적화된 자료로 사용하기 위해 전처리 과정을 수행하였다. 다음으로 수집된 변수들의 품질 분석을 위하여 현장자료와의 정량적 검증을 수행하였고, 기관별 위성 자료 기반 에너지 변수 자료 간의 정량적·정성적 비교검증을 수행하였다. 그 결과를 바탕으로 북극 지역의 복사 에너지 변동 및 특성을 분석하였다. 이때, 두 가지 이상의 위성 자료의 상호 비교검증 결과를 바탕으로 30년 이상의 순 복사 data set을 구축하고 이를 바탕으로 장기변화 분석을 수행하였다.

두 번째 목표는 북극 지역의 위성 기반 현열 산출 및 민감도 분석을 목표로 설정하였다. 그리고 이를 수행하기 위해 선진기관 현열 산출 기법 정리, 현열 산출을 위한 전처리 및 시험 산출, 입력자료의 민감도 분석 및 현열 정확도 분석의 3가지 세부 과정을 진행하였다. 이후 산출된 장기간 현열 변화 분석을 세 번째 성과목표로 지정하였으며, 현열의 시·공간적 변화 경향 분석 및 다양한 조건에 따른 연구 권역 분류 및 세부 권역의 정량적 변화를 도출하였다.

네 번째로 북극 해빙 지역의 현열 추정 알고리즘의 고도화 및 heat content 추정을 성과목표로 설정하였다. 전년도에 산출했던 현열의 경우 얼음 지역에서 과소 추정이 강하게 발생하여 해빙특성을 고려한 현열 추정의 필요성이 제기되었으며 이를 위하여 알고리즘 고도화를 진행하였다. 다음으로 본 연구의 최종목표였던 에너지 수지 분석을 위하여 heat content를 추정하였으며 이를 위하여 자료 수집 및 전처리, 다양한 공간 자료를 활용한 추정을 수행하였다. 마지막으로 에너지 수지 모델 시험 개발을 성과목표로 설정하였다. 이를 위해서 북극 지역의 에너지 수지 추정을 통한 에너지 수지 모델의 시험 개발을 진행하였으며 이를 활용하기 위하여 해빙 변동성 및 변동 요인 분석을 수행하였다.

표 4.1.1. 연구개발 목표 및 달성도

성과목표	세부목표	달성 주요내용	달성도 (%)
위성기반 에너지 변수 품질 분석 및 특성 분석	위성기반 에너지 변수 수집 및 전처리	- 충분한 기간의 자료 취득 - 극지방에 최적화된 projection으로 변환 - Quality control을 이용한 최적자료 sampling	100%
	에너지 변수별 품질 분석	- 현장자료와의 정량적/정성적 검증 - 다양한 위성자료간의 정량적/정성적 비교 검증	100%
	북극 지역의 Radiative flux 변동 특성 분석	- 에너지 변수 별 변화 경향 도출 - 30년 이상의 장기간 net radiation 변화 관측 - Net radiation 산출 및 장기 변화 분석	100%
북극지역의 위성 기반 현열 산출 및 민감도 분석	선진기관 현열 산출 기법 정리	- 선진기관 및 선행 연구에서 수행된 위성기반 현열 산출 기법 정리 - 해양/해빙 구역 경계 분류 방식 정리	100%
	현열 산출을 위한 전처리 및 산출	- 해빙/해빙 구역 구분 - input 자료 분류(위성/모델) - 위성기반 현열 산출	100%
	input 자료의 민감도 분석 및 현열 정확도 분석	- input 자료의 민감도 분석 - 타 산출물 자료와 inter-comparison	100%
산출된 장기간 현열 변화 분석	시·공간적 변화 경향 분석	- 변화 경향을 정량적으로 도출 - 대표 장기 주기성 산출	100%
	다양한 조건에 따른 연구 권역 분류 및 세부 권역분석	- 지역적, 기후적 특성이 반영된 권역 분류 - 권역별 정량적 변화 도출	100%
북극 해빙지역의 현열 추정 알고리즘 고도화 및 Heat content 추정	해빙지역에서의 현열 추정 알고리즘 고도화	- 해빙특성을 고려한 현열 추정	100%
	에너지 수지 추정을 위한 자료 수집 및 전처리	- 충분한 기간의 자료 취득 - 극지방에 최적화된 projection으로 변환	100%
	위성자료 및 재분석 자료를	- 해빙/개빙 구역 구분 - input 자료 분류(위성/모델)	100%

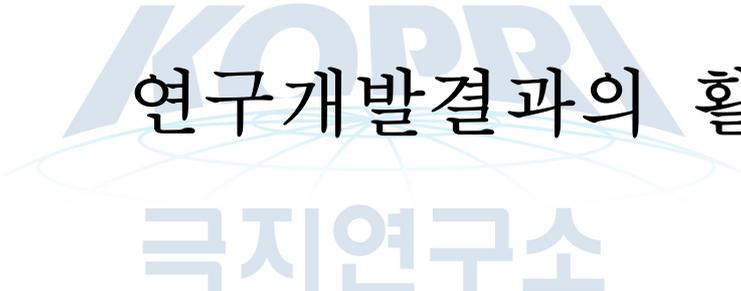
	활용한 Heat content 추정	- 북극 지역의 heat content 추정	
에너지 수지 모델 prototype 개발	북극 지역의 에너지 수지 추정을 통한 에너지 수지 모델 prototype 개발	- 해빙/개빙 구역 구분 - 이전 연구 자료(2017,2018) 자료 활용하여 에너지 수지 추정	100%
	북극 해빙 변동성 및 변동 요인 분석	- 계절별, 경년변화 등 다양한 시간 규모에 따른 변동성 - 권역별 정량적 변화 도출 - 변화 경향을 정량적으로 도출 - 대표 장기 주기성 산출	100%

## 2. 연구 성과목표 및 평가의 착안점

연구 성과목표 및 목표에 따른 세부목표, 목표들의 가중치, 해당 연구의 평가 착안점 및 척도에 관해 정리하였다(표 4.1.2). 성과목표와 세부목표에 관련된 자세한 내용은 표 4.1.1과 본문에 설명하였다. 위성 기반 에너지 변수의 품질 분석 및 특성을 분석하기 위하여 위성 기반 에너지 변수의 수집 및 에너지 변수별 품질 분석, 북극 지역의 radiative flux 변동 특성을 분석하였다. 위성 기반 에너지 변수의 수집 및 전처리 시, 평가의 착안점 및 척도로는 2개 이상의 다양한 변수를 수집하고, 전처리 과정에서 QC를 사용한 품질 높은 자료를 이용하는 것이다. 다음으로 에너지 변수별 품질 분석 시, 품질에 따른 정량적인 검증 score가 평가의 척도가 될 수 있다. 이를 위하여 본 연구에서는 RMSE, Bias와 같은 통계적 수치를 활용하였다. 북극 지역의 순 복사 변동 특성을 분석할 때, 영향변수 산출 및 정량적 변화를 산출과 같은 부분을 바탕으로 평가의 착안점 및 척도를 가늠할 수 있다. 그리고 수행된 내용을 바탕으로 학술대회와 같은 공신력 있는 기관에서 발표를 통해서 본 연구의 논리성을 검증하였다. 2차연도에 진행된 연구의 평가 착안점 및 척도는 3개 이상의 선진기관 현열 산출 기법 정리와 정량적인 검증 결과를 바탕으로 북극 지역의 위성 기반 현열 산출 및 민감도 분석을 평가하였다. 다음으로 장기간 현열 변화 분석을 위해 10년 이상의 자료와 장기변화에서 변화 주기 및 영향변수 추출 및 학술대회 발표를 평가의 착안점으로 선정하였다. 3차연도에서 5가지 세부목표에 따라 평가 척도를 지정하였다. 해빙 지역에서의 현열 알고리즘 고도화는 타 기관 자료와 정량적 비교 분석 결과를 기준으로 하였고 에너지 수지 추정을 위한 자료 수집 및 전처리의 경우 10년 이상의 자료를 이용하고 전처리 시, 물리량 손실이 적은 변환 기법 활용을 평가의 척도로 지정하였다. 위성 자료 및 재분석 자료를 활용한 heat content 추정은 10년 이상의 자료 산출 및 학술회의 발표로 기준을 지정하였다. 북극 지역의 에너지 수지 시험 모델 개발의 경우 정량적인 검증 결과와 10년 이상의 자료 산출 및 분석을 평가의 착안점으로 지정하였다.

표 4.1.2. 전체 연구 기간의 성과목표 및 평가의 착안점

년도	성과목표	세부목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1차년도 (2017)	위성기반 에너지 변수 품질 분석 및 특성 분석	위성기반 에너지 변수 수집 및 전처리	30	- 다양한 변수 수집 - QC 자료사용
		에너지 변수별 품질 분석	35	- 정량적인 검증 score
		북극 지역의 Radiative flux 변동 특성 분석	35	- 정량적 변화 산출 - 학술대회 발표
2차년도 (2018)	북극지역의 위성 기반 현열 산출 및 민감도 분석	선진기관 현열 산출 기법 정리	10	- 3개 이상의 기관 조사
		현열 산출을 위한 전처리 및 산출	40	-정량적인 score
	산출된 장기간 현열 변화 분석	input 자료의 민감도 분석 및 현열 정확도 분석	20	- 10년 이상의 자료 - 주기 및 영향변수 - 학술회의 발표
		다양한 조건에 따른 연구 권역 분류 및 세부 권역분석	15	
3차년도 (2019)	북극 해빙지역의 현열 추정 알고리즘 고도화 및 Heat content 추정	해빙지역에서의 현열 추정 알고리즘 고도화	10	- 타 기관 자료와 비교 분 석 결과(정량적)
		에너지 수지 추정을 위한 자료 수집 및 전처리	10	- 10년 이상의 자료 - 물리량의 손실이 적은 변환
		위성자료 및 재분석 자료를 활용한 Heat content 추정	30	- 10년 이상의 자료 생성 - 학술회의 발표
	에너지 수지 모델 prototype 개발	북극지역의 에너지 수지 모델prototype 개발	35	- 정량적인 score - 10년 이상의 자료
북극 해빙 변동성 및 변동 요인 분석		15	- 정량적인 score - 10년 이상의 자료	

The image features a large, light blue watermark of the KORRI logo in the background. The logo consists of the word 'KORRI' in a bold, sans-serif font, with a stylized globe or network diagram below it. The text '연구개발결과의 활용계획' is overlaid on the right side of the logo.

연구개발결과의 활용계획

극지연구소

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 제 1 절 추가연구의 필요성

#### 1. 북극 지역의 복사강제력 연구

본 위탁과제는 에너지 수지에 초점을 맞춰서 진행하였으며 에너지 수지의 경우 표면의 에너지 입·출입의 변화를 수평적으로 분석할 수 있었다. 하지만 에너지 평형의 유지만이 아닌 변화시키는 영향력을 분석함으로써 북극 온난화 변화의 정량적인 영향력 평가가 필요하다. 이를 분석할 수 있는 요소 중 하나가 복사강제력이다. 복사강제력이란 어떤 인자가 갖는 지구-대기 시스템에 영향을 주어 에너지 평형 유지 및 변화시키는 영향력의 척도이며, 잠재적인 기후변동 메커니즘의 지표로 활용할 수 있다. 양의 복사강제력을 가지면 지구가 흡수하는 에너지가 지표면 온도의 상승을 유발하며, 음의 강제력을 가지면 반대로 온도를 하강시키는 역할을 한다. 기본적으로 에너지 수지와 마찬가지로 복사강제력도 모델 자료를 활용하여 연구가 진행되었지만 극지역의 원격탐사 및 다양한 공간자료를 사용한다면 자료 활용 효과를 극대화하고 북극 빙권 변화 표현하는 중요한 속성자료로 활용할 수 있다. 또한 이를 활용하여 북극 빙권 변화 특성 이해를 위한 복사강제력 자료 산출물 개발 및 복사강제력을 활용하여 북극 온난화에 대한 정량적 이해 향상 및 북극예측모형의 입력자료 활용과 예측 정확도 향상에 기여할 수 있을 것이다.

### 제 2 절 타 연구에의 응용

#### 1. 타 위탁연구와의 연계

본 연구의 경우 북극 지역의 에너지 수지 분석 및 빙권 변동 특성을 분석하고자 한다. 이를 위해서 북극 지역의 순복사 및 현열, 에너지 경향 파악이 필요하며 추후 이러한 부분을 보완하여 분석이 필요하다. 이러한 정보들은 북극에 특화된 에너지 수지 정보를 제공하며 이를 통해서 북극 해빙 예측 모형의 입력자료로 활용, 북극 해방탐지를 위한 기초자료로 활용할 수 있어, 북극 지역의 원격탐사 자료 활용 효과를 극대화할 수 있어서 본 과제와의 연계 분석이 가능하다. 또한, 본 과제에서 제공되는 다양한 해빙 산출물은 에너지 변수 산출 시 정확도 향상에 기여할 수 있으며 해빙의 특성에 따른 에너지 변화를 관측할 수 있어서 본 연구의 질적 향상에 기여할 수 있을 것이다. 북극 지역의 순 복사의 변화 경향을 분석하였다. 순 복사의 경우 에너지 균형에 기초적 변수로 기후변화 연구와 관련하여 활용 가능성이 큰 변수이다. 그러므로 본 연구에서 산출된 북극 지역의 정량적 순 복사 변화는 기후 예측에 활용될 가능성이 크다. 또한, 순 복사는 현·잠열을 추정할 때 사용되는 기초적 변수이기 때문에, 선행 연구의 turbulent flux의 정확도 향상에 기여할 수 있다. 순 복사 에너지만이 아닌 기존 연구에서 활용된 바람장, 기온, 해류, 해수면 온도 등의 다양한 기후자료와의 연계 분석을

통해 북극 지역의 기후변화 메커니즘을 이해하는 데 도움이 될 것이다. 이러한 다양한 기존 연구를 위해서 본 연구의 결과의 보완을 통해서 다양한 선진 연구자들과의 협업 및 교류를 위한 기초자료로 활용 가능할 것으로 사료된다.





## 제 6 장 참고문헌

하호경과 김백민, 2014, 극지 과학자가 들려주는 기후변화 이야기, 지식노마드

Brodzik, M. J., Billingsley, B., Haran, T., Raup, B., & Savoie, M. H. (2012). EASE-Grid 2.0: Incremental but significant improvements for Earth-gridded data sets. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 1(1), 32-45.

Chapin, F.S., M. Sturm, M.C. Serreze, J.P. McFadden, J.R. Key, A.H. Lloyd, A.D. McGuire, T.S. Rupp, A.H. Lynch, J.P. Schimel, J. Beringer, W.L. Chapman, H.E. Epstein, E.S. Euskirchen, L.D. Hinzman, G. Jia, C.-L. Ping, K.D. Tape, C.D.C. Thompson, D.A. Walker, and J.M. Welker, 2005. Role of Land-Surface Changes in Arctic Summer Warming, *Science*, 310(5748): 657-660.C

CM SAF, 2016a, CM SAF Cloud, Albedo, Radiation dataset, AVHRR-based, Edition 2 (CLARA-A2) Surface Radiation Products Validation Report (DOI: 10.5676/EUM\_SAF\_CM/CLARA\_AVHRR/V002)

CM SAF, 2016b, CM SAF Cloud, Albedo, Radiation data record, AVHRR-based, Edition 2 (CLARA-A2) Surface Albedo (DOI: 10.5676/EUM\_SAF\_CM/CLARA\_AVHRR/V002)

Comiso, J. C., & Hall, D. K. (2014). Climate trends in the Arctic as observed from space. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 5(3), 389-409.

Davis, C. H., Li, Y., McConnell, J. R., Frey, M. M., & Hanna, E. (2005). Snowfall-driven growth in East Antarctic ice sheet mitigates recent sea-level rise. *Science*, 308(5730), 1898-1901.

GEWEX [https://gewex-srb.larc.nasa.gov/common/php/SRB\\_validation.php](https://gewex-srb.larc.nasa.gov/common/php/SRB_validation.php)

IPCC, (2014). *Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Jiang, H., Yang, Y., Bai, Y., & Wang, H. (2019). Evaluation of the Total,

Direct, and Diffuse Solar Radiations From the ERA5 Reanalysis Data in China. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.

Laine, V. (2008). Antarctic ice sheet and sea ice regional albedo and temperature change, 1981-2000, from AVHRR Polar Pathfinder data. *Remote Sensing of Environment*, 112(3), 646-667.

Munneke, P. K., Van den Broeke, M. R., Reijmer, C. H., Helsen, M. M., Boot, W., Schneebeli, M., & Steffen, K. (2009). The role of radiation penetration in the energy budget of the snowpack at Summit, Greenland. *The Cryosphere*, 3(2), 155.

NASA, [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov)

NSIDC, <https://nsidc.org/cryosphere/seaice/data/terminology.html>

Nicolaus, M., Katlein, C., Maslanik, J., & Hendricks, S. (2012). Changes in Arctic sea ice result in increasing light transmittance and absorption. *Geophysical Research Letters*, 39(24).

Perovich, D. K., Light, B., Eicken, H., Jones, K. F., Runciman, K., & Nghiem, S. V. (2007). Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas, 1979-2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback. *Geophysical Research Letters*, 34(19).

Polyakov, I. V., Bekryaev, R. V., Alekseev, G. V., Bhatt, U. S., Colony, R. L., Johnson, M. A., ... & Walsh, D. (2003). Variability and trends of air temperature and pressure in the maritime Arctic, 1875-2000. *Journal of Climate*, 16(12), 2067-2077.

Riihelli, A., Key, J. R., Meirink, J. F., Kuipers Munneke, P., Palo, T., & Karlsson, K. G. (2017). An intercomparison and validation of satellite-based surface radiative energy flux estimates over the Arctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*.

Seo, M., Lee, K. S., Choi, S., Lee, D., Kim, H., Kwon, C., ... & Han, K. S. (2017). Analysis of net radiative changes and correlation with albedo over Antarctica. *KOREAN JOURNAL OF REMOTE SENSING*, 33(2), 249-255.

- Simpkins, G. R., Ciasto, L. M., Thompson, D. W., & England, M. H. (2012). Seasonal relationships between large-scale climate variability and Antarctic sea ice concentration. *Journal of Climate*, 25(16), 5451–5469.
- Studinger, M., Bromwich, D., Csatho, Bea., Muench, R., Parish, T., and Stith, J., 2005. Science Opportunities for a Long-Range Antarctic Research Aircraft, *Eos*, 86(4): 39–40
- Van Den Broeke, M., C. Reijmer, and R. Van De Wal, 2004. Surface radiation balance in Antarctica as measured with automatic weather stations, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D9).
- Wendler, G., B. Moore, B. Hartmann, M. Stuefer, and R. Flint, 2004. Effects of multiple reflection and albedo on the net radiation in the pack ice zones of Antarctica, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D6).
- Zhang, Y., Seidel, D. J., Golaz, J. C., Deser, C., & Tomas, R. A. (2011). Climatological characteristics of Arctic and Antarctic surface-based inversions. *Journal of Climate*, 24(19), 5167–5186.
- Zwally, H. J., Abdalati, W., Herring, T., Larson, K., Saba, J., & Steffen, K. (2002). Surface melt-induced acceleration of Greenland ice-sheet flow. *Science*, 297(5579), 218–222.

## 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.