관측 기반 북극 해양-대기경계층-구름-표층기온 상호작용 기작 규명

Measurement-based study on the interactions among ocean, PBL, cloud, and surface temperature over the Arctic

KOPRI
극지연구소

서울대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “지구시스템모델 기반 북극-한반도 통합 재해기상 예측 시스템(KPOPS-Earth)의 개발 및 활용” 과제의 위탁연구 “관측 기반 북극 해양-대기경계층-구름-표층 기온 상호작용 기작 규명” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

KOPRI
극지연구소

2026. 01. 31

(본과제) 총괄연구책임자 : 김 주 홍

위탁연구기관명 : 서울대학교

위탁연구책임자 : 김 상 우

위탁참여연구원 : 김 만 해

“ : 조 연 수

“ : 박 수 진

“ : 남 지 현

보고서 초록

<table>
<tr><td>위탁연구과제명</td><td colspan="5">관측 기반 북극 해양-대기경계층-구름-표층기온 상호작용 기작 규명</td></tr>
<tr><td>위탁연구책임자</td><td>김 상 우</td><td>해당단계
참여연구원수</td><td>4</td><td>해당단계
연구비</td><td>147,000,000원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속부서명</td><td colspan="2">서울대학교 지구환경과학부</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">-</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="5">상대국명 : -　　상대국연구기관명 : -</td></tr>
<tr><td colspan="4">요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)</td><td>보고서
면수</td><td>62</td></tr>
<tr><td colspan="6">● 북극은 지구 평균보다 2배 이상 빠르게 온난화되는 지역으로, 해빙 감소와 표면 온도 상승이 대기경계층 구조와 구름 형성에 미치는 영향을 규명할 필요가 있음. 본 연구는 지상·선상·위성 관측을 종합적으로 활용하여 북극 구름과 대기경계층 특성, '해양-대기경계층-구름-지표 온도' 간 상호작용 기작을 규명하고, 기후모델 개선과 기후변화 대응 정책 수립에 과학적 근거를 제공하고자 수행됨.
● 북극 다산과학기지(니알슨)와 아라온호 선상에서 지상·선상·위성 관측 자료를 종합적으로 수집·분석하여 북극 구름 및 대기경계층의 구조와 계절적 특성을 규명함. 하층운은 여름철 운저고도와 액체수함량이 높고 겨울철에 낮은 뚜렷한 계절성을 보였으며, 대기경계층 내 풍속은 여름에 약하고 겨울에 강한 특성을 나타냄. 북극 구름은 장파복사에 큰 영향을 미쳤으며, 특히 액체 구름이 표면 복사수지와 지표 온도 조절에 핵심적 역할을 수행함을 확인함.
● 니알슨 하층운 운저 부근 하강기류가 88%로 우세하며 여름철에 높은값 보임(90%).Mt. Zeppelin CDP 관측에서는 구름 입자 수농도와 LWC가 여름에 높고 겨울에 낮았으며, 하층운 운저 부근 상승기류 발달 시 수농도와 LWC가 낮게 나타남.
● 2024년 7~8월 아라온호 선상 관측(척치해)에서도 하층운 운저고도 1 km 이내에서 지속적으로 발생하며, 운저고도 부근에서 상승기류가 83%로 우세하고 상승속도는 0~0.4 m/s 범위에 집중됨. 또한, 라디오존데와 스캐닝 라이다 바람 벡터 일치로 풍속 산출 신뢰성 확인.
● CESM2 및 CAM6 모델 검증 결과, 겨울철 구름 비율은 해빙 위 낮고 해빙 녹은 해양 위 높았으나 모델은 과대 모의, 여름철에는 해빙과 해양 조건에 따라 공간 분포를 충분히 재현하지 못함. 모델 분석에서 해빙 농도가 높을수록 하층운 운저고도가 낮아지고, 하층운 발생이 많을수록 지표온도가 높게 나타나는 경향 확인. 모델 기반 분석을 통해 계절별 해빙 비율과 하층운, 운저고도, 지표온도 간 상관 관계를 확인함.
● 구축된 관측 기반 데이터베이스와 모델 검증 결과는 북극 기후모델 입력·검증 자료로 활용 가능하며, 구름 미세물리 과정과 해양-대기경계층-구름 상호작용 이해를 심화하여 북극 기후 변화 예측 불확실성 감소와 기후변화 대응 정책 수립에 과학적 근거 제공 가능.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">북극, 구름, 대기경계층, 해빙, 복사효과, 표층 기온</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Arctic, Cloud, Boundary layer, Sea ice, Radiative effect, Surface temperature</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

북극 지역 ‘해양-대기경계층-구름-지표기온’ 간의 상호작용 기작 규명

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

북극은 지구 평균보다 두 배 이상 빠르게 온난화되는 북극 증폭 현상이 두드러지는 지역이다. 급격한 온난화로 인한 해빙과 적설 감소에 따른 개방해양 확대는 지표에서 대기로의 열 및 수증기 플럭스를 증가시켜 대기경계층의 열역학 구조와 하층운 형성을 변화시킬 수 있다. 이는 다시 표면 복사수지를 조절하며 복잡한 ‘해양-대기경계층-구름’ 간 비선형 피드백을 강화한다. 이러한 상호작용은 북극 기후 민감도를 결정하는 핵심 과정이지만, 구름 미세물리 과정의 복잡성과 고품질 관측 자료의 부족으로 인해 전지구 및 지역 규모 기후모델과 재분석 자료 모두에서 충분히 재현되지 못하고 있으며, 구름 기하학적 및 미세물리적 특성과 복사 플럭스에 대한 모델과 관측 사이 및 모델 간의 큰 불확실성이 지속되고 있다. 그럼에도 불구하고, 제한적인 지상, 선상, 위성 관측을 활용한 선행 연구들은 구름이 하향 장파복사를 증강시키고, 해빙 변화가 대기경계층 구조와 하층 구름 분포를 조절함으로써 북극 표면 에너지 수지와 기온 변화에 결정적 역할을 한다는 점을 밝혀왔다. 본 연구는 이러한 관측 기반 연구의 흐름을 확장하여, 지표 상태 변화(해양 또는 해빙)가 대기경계층과 구름 특성, 나아가 복사수지에 이르는 연계 메커니즘을 보다 체계적으로 규명함으로써, 북극 기후 변화의 핵심 물리과정에 대한 이해를 심화하고 기후모델 개선에 기여하고자 한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 위탁 연구는 지상, 선상, 위성 관측자료를 활용하여 관측 기반 북극 지역의 ‘해양-대기경계층-구름-지표기온’간의 상호작용 기작을 분석 및 규명하는 것을 최종 목표로 한다. 이를 위해 본 위탁 연구에서는 (1) 북극 다산기지(니알슨)에서 장기간 활용가능한 원격(레

이더, 라이다, 윈드 도플러 라이다, 운고계, MWR 등) 및 직접(라디오 존데) 관측자료와 위성 관측자료를 수집 및 종합 활용하여 북극 지역 대기경계층 구조와 하층운의 기하학적 및 미세물리적 특성을 분석하고자 한다. (2) 북극 척치해 부근에서 아라온호 선상 관측 수집 및 자료 수집을 통해 라이다, 윈도 도플러 라이다, 라디오 존데 등을 이용하여 해상에서의 대기경계층 및 하층운 특성을 분석하고자 한다. 또한, (3) 전지구 모델(CESM, CAM6)의 구름 모의 성능을 비교·검증한다. (4) 관측 및 전지구 모델을 통합 활용하여 북극 지역에서의 '해양-대기경계층-구름-지표 온도'간의 상호작용 기작을 규명하고자 한다. 이러한 세부 연구를 통해, 중장기 예측 시스템(KPOPS-Earth) 개발을 통한 북극 온난화와 한반도 재해기상 발생의 재현 및 예측 기술 고도화를 목적으로 하는 본과제에 기여하고자 한다.

Ⅳ. 연구개발결과

북극 다산과학기지(니알슨)에서 구름 레이더, 운고계, 스캐닝 윈드 도플러 라이다, 마이크로 라디오미터, 라디오존데 관측 자료를 수집하여, 북극 구름 및 대기경계층 특성에 대해 분석을 수행하였다. 북극 구름, 특히 하층운의 운저고도는 여름에 높고 겨울에 낮은 계절성을 보였으며, 구름의 액체수함량도 동일한 변동성을 나타냈다. 북극 대기경계층 내 풍속은 여름에 약하고 겨울에 강하게 나타나는 계절적 특성을 보였다. 구름의 복사효과를 분석한 결과, 구름은 장파 복사에 미치는 영향이 컸으며, 액체 구름의 영향이 가장 크게 나타났다.

북극 니알슨 지역에서 마이크로 펄스 라이다(MPL) 분석 결과, 운저 고도 1 km 이내 하층운이 빈번하게 발생하였다. 스캐닝 윈드 도플러 라이다와 동시 분석에 따르면, 하층운 운저고도 부근에서의 바람장은 하강기류(88%)가 상승기류에 비해 빈번하게 관측되었으며, 하강기류의 비율은 여름철에 90%, 겨울철에 85%을 차지하는 계절에 따른 차이를 보였다.

북극 니알슨 지역의 Mt. Zepplin(해발고도 474 m) 관측소에서의 구름 입자 프로브(Cloud Droplet Probe; CDP) 관측 자료를 활용한 구름의 미세물리 특성을 분석한 결과, 구름 입자 수농도와 액체수함량(LWC)은 여름철에 높고 겨울철에 낮은 계절성을 보였다. 니알슨에서 발생한 구름의 기저고도 부근에 상승기류가 발달했을 때, Mt. Zepplin에서 관측된 구름 입자 수농도와 액체수함량이 더 낮은 평균 및 중앙값을 나타내었다.

2024년 북극항해 제1항차(ARA15A) 아라온호 선상 관측이 2024년 7월 31일부터 8월 26일 동안 북극 척치해(Chukchi Sea) 부근에서 성공적으로 수행되었고, 마이크로 펄스 라이다(MPL), 이동식 스캐닝 도플러 라이다, 존데 등의 관측 결과를 수집하였다. 스캐닝 윈드 도플러 라이다에서 라디오존데와 일치하는 바람 벡터를 성공적으로 산출하였으며, 에어로졸이 적은 북극해 환경으로 인해 최하층 및 구름 기저고도 부근에서만 풍속 산출이 가능하였다.

아라온호 선상 관측 기간 동안, 약 1 km 이내 운저고도를 갖는 하층운이 지속적으로 관측되었다. 여름철 개방해양에서의 플럭스 증가와 관련하여 운저고도 부근에서 상승기류가 현저하게 우세했으며(83%), 그 크기는 0-0.4 m/s에 집중되었다.

전지구 규모 모델 CESM2와 CAM6로 각각 모의된 겨울철과 여름철 장기간 평균 북극 구름 비율을 위성 관측 자료, MODIS, CloudSat & CALIPSO,를 이용해 비교 및 검증을 수행함. 그 결과, 관측과 모델에서 모두 겨울철 북극 구름 비율은 해빙 위에서 낮고 해빙이 녹는 해양 위에서 높은 공간적 분포를 보였다. 그리고 모델이 관측에 비해 겨울철 북극 구름을 과대 모의하는 경향이 있었다. 반면에, 여름철 평균 북극 구름 비율은 모델과 관측 사이 상반된 공간 분포를 보였다. 모델은 해빙 위에서, 관측은 해양 위에서 높은 구름 비율을 나타내었다. 즉, 모델이 여름철 구름 비율에 대해 해빙에서는 과대 모의 해양에서는 과소 모의하는 경향이 있었다.

전지구 규모 모델 CESM2와 CAM6 모델 기반으로 해양-대기경계층-구름 간의 상호작용 기작에 대한 분석을 수행하였다. 모델 결과에 따르면, 겨울철엔 해빙 비율이 낮을수록, 여름철엔 해빙 비율이 높을수록 하층운이 더 많이 모의되는 경향이 있었다. 이는 여름철 해빙 위에서 하층 대기의 높은 안정도에 의한 하층운의 과대 모의와 관련되었을 것으로 추측한다. 두 계절 모두에서 해빙 농도가 높을수록 구름의 운저고도가 낮아지는 경향이 있었다. 또한, 계절에 상관없이 하층운 발생이 많을수록 지표온도의 분포가 더 높은 쪽으로 치우쳐 나타나며, 하층운 발생과 지표온도 상승의 관련성을 시사하였다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

KOPRI 극지연구소

본 연구에서는 지상·위성·선상 관측 자료를 종합적으로 활용하여 북극 지역 구름 및 대기경계층의 특성을 규명하였다. 이를 통해 구축된 관측 기반 데이터베이스는 향후 북극 지역 기후모델링 연구의 입력자료 및 검증자료로 활용될 수 있다. 또한 관측 자료를 기반으로 기후모델의 북극 구름 모의 성능을 평가함으로써, 구름 미세물리 과정과 관련된 물리·열역학적 모의 과정 개선에 기여할 것으로 기대된다. 나아가 '해양-대기경계층-구름-지표 온도' 간 상호작용에 대한 이해를 증진시켜, 북극 지역 해빙 감소 및 온도 상승 등 기후변화 예측의 불확실성 저감과 기후변화 대응 정책 수립을 위한 과학적 근거 제공에 활용될 수 있다.

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Measurement-based study on the interactions among ocean, PBL, cloud, and surface temperature over the Arctic

II. Purpose and Necessity of R&D

KOPRI 극지연구소

The Arctic is a region where Arctic amplification drives warming at more than twice the global average. Rapid warming and the consequent reduction of sea ice and snow cover expand open ocean areas, enhancing heat and moisture fluxes from the surface to the atmosphere, which can alter the thermodynamic structure of the atmospheric boundary layer and promote low-level cloud formation. These processes, in turn, modulate the surface radiation budget and reinforce the complex nonlinear feedbacks among the ocean, atmospheric boundary layer, and clouds. While these interactions are critical in determining Arctic climate sensitivity, the complexity of cloud microphysical processes and the scarcity of high-quality observations have prevented their adequate representation in both global and regional climate models, as well as in reanalysis datasets, resulting in substantial uncertainties between models and observations regarding cloud macrophysical and microphysical properties and radiative fluxes. Nevertheless, limited in situ, shipborne, and satellite-based observational studies have demonstrated that clouds enhance downward longwave radiation and that changes in sea ice modulate boundary layer structure and low-level cloud distribution, thereby playing a decisive role in the Arctic surface energy budget and temperature variability. Building on this observational previous studies, the present study aims to systematically elucidate the coupled mechanisms through which surface condition changes (ocearn or sea ice) influence the atmospheric boundary layer, cloud properties, and surface radiation budget,

thereby deepening our understanding of the key physical processes governing Arctic climate change and contributing to improved climate model representation.

III. Contents and Extent of R&D

The primary objective of this commissioned study is to analyze and elucidate the observationally based interaction mechanisms among the ocean, atmospheric boundary layer, clouds, and surface temperature in the Arctic region. To achieve this, the study will: (1) collect and comprehensively utilize long-term remote sensing (radar, lidar, wind Doppler lidar, ceilometer, microwave radiometer, etc.) and in situ (radiosonde) observations at the Ny-Ålesund Arctic research station, along with satellite data, to analyze the structure of the Arctic atmospheric boundary layer and the macrophysical and microphysical properties of low-level clouds; (2) conduct ship-based observations near the Chukchi Sea using the research vesse lARAON, employing lidar, wind Doppler lidar, radiosonde, and other instruments to characterize the atmospheric boundary layer and low-level clouds over the ocean; (3) evaluate and compare cloud simulation performance in global climate models (CESM and CAM6); and (4) integrate observational and modeling data to elucidate the mechanisms governing interactions among the ocean, atmospheric boundary layer, clouds, and surface temperature in the Arctic. Through these detailed investigations, this study aims to contribute to the development of the mid- to long-term prediction system (KPOPS-Earth) and to advance the capability to reproduce and forecast Arctic warming and associated extreme weather events on the Korean Peninsula.

IV. R&D Results

Several observational data were collected at the Arctic Dasan Research Station (Ny-Ålesund), including cloud radar, ceilometer, scanning wind Doppler lidar, microwave radiometer, and radiosonde measurements, and were analyzed to investigate Arctic cloud and atmospheric characteristics. Arctic clouds, particularly low-level clouds, exhibited clear seasonal variability, with higher cloud base heights in summer and lower cloud base heights in winter. Liquid water content also showed a similar seasonal pattern. Wind speed within the Arctic atmospheric boundary layer was weaker in summer and stronger in winter, indicating pronounced seasonal variation. Analysis of cloud radiative effects revealed that clouds exerted a strong influence on longwave radiation, with liquid

clouds having the largest impact.

Micro-pulse lidar (MPL) observations at the Ny-Ålesund station in the Arctic indicated that low-level clouds frequently occurred below approximately 1 km cloud base height. Concurrent analysis with scanning wind Doppler lidar revealed that, near the cloud base, downdrafts (88%) were observed more frequently than updrafts, with a seasonal variation of 90% in summer and 85% in winter.

Microphysical properties of clouds were analyzed using Cloud Droplet Probe (CDP) observations at the Mt. Zeppelin (474 m above sea level) observatory in Ny-Ålesund. The results showed a clear seasonal cycle, with higher cloud droplet number concentrations and liquid water content (LWC) in summer and lower values in winter. When updrafts developed near the base of clouds occurred over Ny-Ålesund, the cloud droplet number concentration and LWC observed at Mt. Zeppelin exhibited lower mean and median values.

The first Arctic voyage of the research vessel ARAON (ARA15A) was successfully conducted from July 31 to August 26, 2024, near the Chukchi Sea, collecting observations from MPL, mobile scanning wind Doppler lidar, and radiosonde. Wind vectors derived from the scanning wind Doppler lidar showed good agreement with radiosonde data. Wind retrievals were only feasible near the lowest atmospheric layers and the cloud base due to the low aerosol environment of the Arctic Ocean.

During the ARAON expedition in summer, low-level clouds with cloud bases below approximately 1 km were continuously observed. Related to enhanced fluxes over the summer open ocean, updrafts near the cloud base were predominant (83%), with magnitudes concentrated between 0 and 0.4 m/s.

Long-term seasonal mean Arctic cloud fractions simulated by the global climate models CESM2 and CAM6 were evaluated against satellite observations from MODIS and CloudSat & CALIPSO. In both observations and models, winter Arctic cloud fractions were spatially lower over sea ice and higher over ice-free ocean areas. However, the model tended to overestimate winter mean cloud fractions in the Arctic compared to observations. In contrast, summer mean cloud fractions exhibited contrasting spatial patterns between models and observations: the model showed higher cloud fractions over sea ice, whereas observations indicated higher cloud fractions over the ocean. This suggests that the model overestimated cloud fraction over sea ice and underestimated it over open ocean in summer.

Analyses of ‘ocean-atmospheric boundary layer-cloud’ interactions were performed using CESM2 and CAM6 outputs. Model results indicated that, in winter, lower sea ice

concentrations were associated with increased low-level cloud occurrence, while in summer, higher sea ice concentrations corresponded to more low-level clouds. The overestimation of low-level clouds over summer sea ice is likely related to the strong stability of the lower atmosphere over these regions in the model. In both seasons, higher sea ice concentrations tended to be associated with lower cloud base heights. Additionally, regardless of season, increased low-level cloud occurrence was linked to higher surface temperatures, suggesting a relationship between low-level cloud formation and surface warming.

V. Application Plans of R&D Results

In this study, ground-based, satellite, and shipborne observational data were integrally utilized to investigate cloud and atmospheric properties in the Arctic. The observation-based database established through this study can be used as input and validation data for future Arctic climate modeling studies. In addition, the performance of climate models in simulating Arctic clouds was evaluated based on observational data, which is expected to contribute to improvements in the representation of cloud microphysical processes as well as related physical and thermodynamic processes in climate models. Furthermore, by enhancing the understanding of the complex interactions among the ocean, atmospheric boundary layer, clouds, and surface temperature in the Arctic, this study can help reduce uncertainties in projections of Arctic climate change, including sea ice decline and temperature increase, and provide a scientific basis for climate change adaptation and mitigation policy development.

KOPRI 극지연구소

목 차

제 1 장 서론 ····· 11
제 1 절 연구개발 목적 ····· 11
제 2 절 연구의 필요성 ····· 12

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 16

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 ····· 18
제 1 절 관측·모델을 이용한 북극 대기경계층 구조 및 하층운 물리 특성 분석 ····· 18
1. 북극 다산과학기지의 원격, 직접, 지상 관측자료 수집 및 분석 ····· 18
2. 지상 관측 자료를 이용한 북극 대기경계층 및 하층운 특성 분석 ····· 30
3. 아라온호에서 선상 관측 수행 및 분석 ····· 33
제 2 절 관측·모델을 이용한 북극 지역 '해양-대기경계층-구름' 간의 상호작용 분석 ····· 38
1. 관측 기반의 연관성 분석 ····· 38
2. 기후 모델의 구름 모의 검증 ····· 45
3. 모델 기반의 연관성 분석 ····· 48

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 ····· 51
제 1 절 연구개발목표의 달성도 ····· 51
1. 정성적 성과 ····· 51
가. 1차년도 정성적 성과 ····· 51
나. 2차년도 정성적 성과 ····· 52
다. 3차년도 정성적 성과 ····· 54
2. 정량적 성과 ····· 55
제 2 절 관련 분야 기여도 ····· 55

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획 ····· 56
제 1 절 추가연구의 필요성 ····· 56
제 2 절 타 연구에의 응용 ····· 56

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학 기술정보 ····· 57

제 7 장 참고문헌 ····· 58

KOPRI 극지연구소

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발 목적

본 위탁 과제는 원격 및 직접 관측자료를 활용하여 관측 기반 북극 지역의 '해양-대기경계층-구름-지표기온'간의 상호작용 기작을 분석 및 규명하는 것을 최종 목표로 한다. 이를 통해 중장기 예측 시스템(KPOPS-Earth) 개발을 통한 북극 온난화와 한반도 재해기상 발생의 재현 및 예측 기술 고도화를 목적으로 하는 본과제에 기여하고자 한다.

이를 위해 본 위탁 과제는 세부적으로 다양한 관측자료를 수집하여 북극 대기경계층 구조 및 하층운 물리 특성을 분석하고, 관측과 모델의 통합 활용을 통해 '해양-대기경계층-구름' 연관성을 규명하고자 한다. 첫 째, 북극에서 장기간 지상 관측이 수행되고 있는 북극 다산기지(니알슨)에서의 원격(레이더, 라이다, 윈드 도플러 라이다, 운고계, MWR 등) 및 직접(라디오존데) 관측자료와 위성 관측자료를 종합 활용하여, 북극 지역 대기경계층의 열역학 및 물리적 구조와 하층운의 기하학적 및 미세물리적 특성 등을 상세 분석하고자 한다. 둘 째, 아라온호에서의 라이다, 윈도 도플러 라이다, 라디오 존데 등 선상 관측 수행을 통해 대기경계층 및 하층운 특성을 분석하고자 한다. 셋 째, 전지구 모델(CESM, CAM6)에서의 구름 모의 성능을 위성 관측자료를 이용해 검증하는 것을 목표로 한다. 넷 째, 관측 및 전지구 모델을 각각 이용하여 북극 지역 '해양-대기경계층-구름-지표 온도'간의 상호작용 기작을 규명하고자 한다. 관측자료에 기반하여 '해양-대기-구름' 연관성을 조사하고, 이를 바탕으로 모델이 구름 및 관련 상호작용을 모의하는 능력을 검증함으로써 향후 지구시스템 모델링 활용 체계 구축에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 그림 1.1의 추진 체계 모식도는 이와 같은 본 위탁 과제의 연차별 상세 연구 목표 및 내용을 나타낸다.

KOPRI 극지연구소

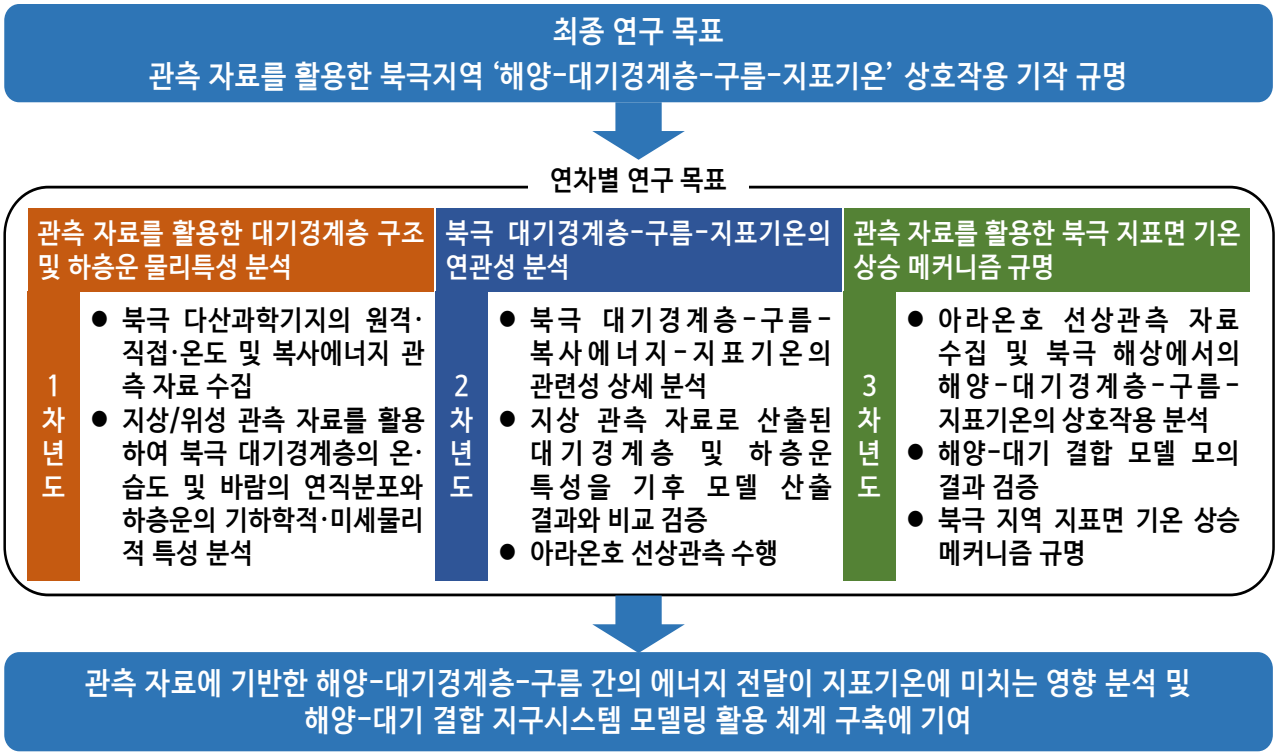


그림 1.1. 본 연구개발의 추진 체계 모식도.

KOPRI 극지연구소

제 2 절 연구의 필요성

○ **북극 대기경계층 내 '해양-대기-구름' 간의 복잡한 상호작용**

북극은 기후 변화에 가장 민감하게 반응하는 지역 중 하나로 알려져 있다. 이에 따라, 최근 지구 온난화에 따라 전 지구 평균보다 두 배 이상 빠른 온도 상승이 관측되고 있다(Serreze and Barry, 2011; Cohen et al., 2014; AMAP, 2021). 이러한 북극 증폭(Arctic amplification)은 북극의 해빙 및 적설량 감소에 크게 기여하고 있다. 해빙 및 적설 농도 감소로 인해 개방해양(open ocean)이 증가하고 적설 아래 어두운 표층이 드러나게 되면, 지표에서 대기로의 열 및 수증기 플럭스가 증가할 수 잇따. 그 결과, 대기 하층의 열과 수분 공급이 강화되어 하층운 생성에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 '해양-대기-구름'간의 상호작용은 표면 복사 수지를 변화시켜 또 다른 피드백을 유발한다. 예를 들어, 하층운의 복사 효과는 지표면에 도달하는 단파 및 장파 복사량을 조절하여(Curry et al., 1996; Kay and L'Ecuyer, 2013; He et al., 2019) 해빙 및 적설량 변화를 야기할 수 있고(Liu and Key, 2014; Letterly et al., 2016), 이는 다시 '해양-대기-구름' 간 상호작용의 크기를 증폭 혹은 감쇠시키는 것으로 나타났다. 그림 2.1은 구름과 관련된 복잡한 피드백 과정을 제시하였다(Goosse et al., 2018). 그러나 이러한 과정은 복잡하게 얽혀 있어, 북극 대기경계층 내에서 에너지 순환 및 구름 특성의 상호 관계를 충분히 설명하는 이론

적 및 관측 기반 이해가 아직 제한적이다. 따라서 심층적인 관측 및 모델링 연구를 통해, 이 복잡한 상호작용 메커니즘을 체계적으로 파악하는 것이 현 시점에 필수적으로 요구된다. 북극에서 지표의 변화로 인한 대기로의 열 및 수증기 수송이 구름 형성 및 특성과 그로 인한 복사 수지에 미치는 영향, 그리고 다시 해빙 및 기후 시스템 전반에 미치는 피드백 과정을 규명하는 연구는 북극 기후 진단 및 예측의 정확도를 향상시켜 북극 기후 변화 연구에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

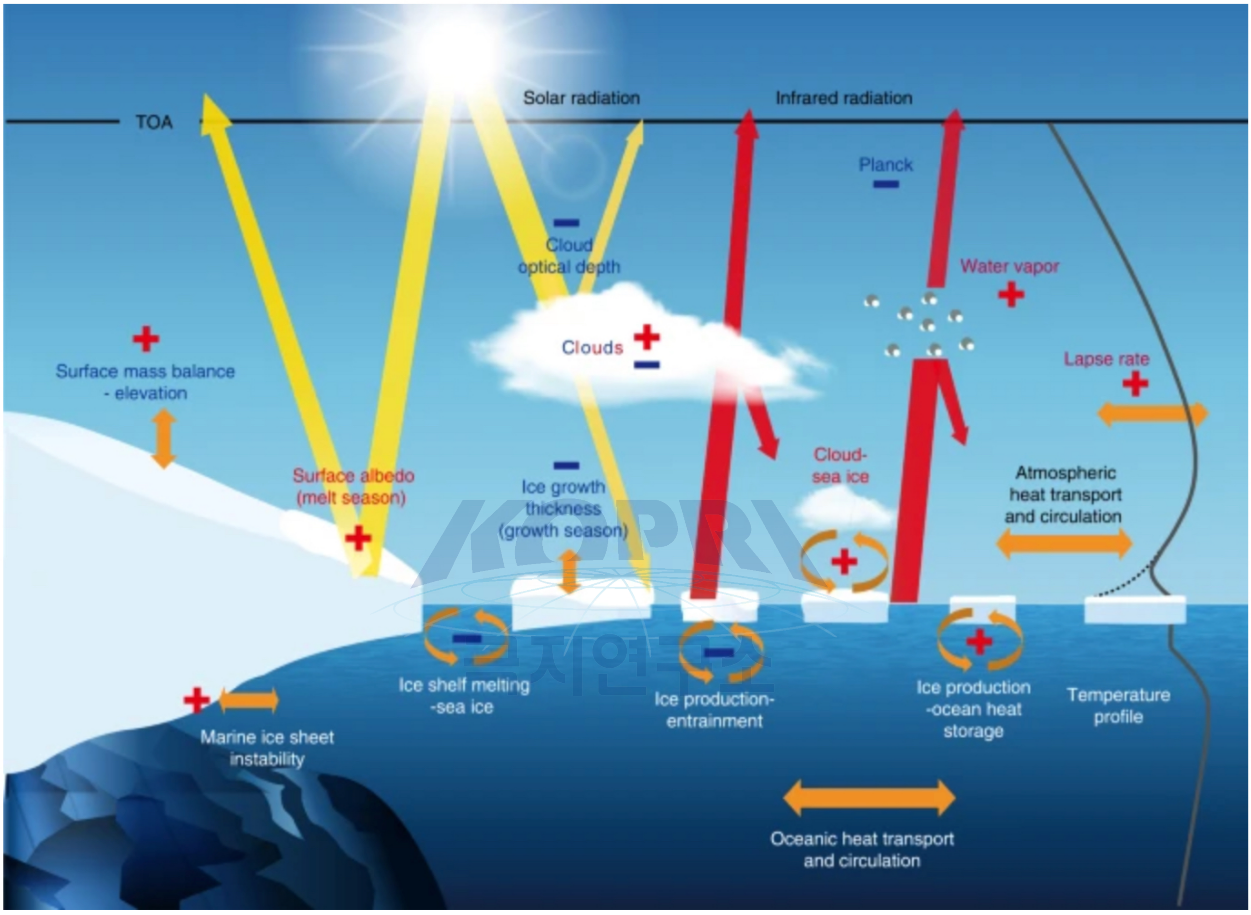


그림 2.1. 북극 지역에서 대기, 해양, 해빙과 관련된 중요한 복사 및 비복사 피드백 과정 모식도(Goosse et al., 2018).

○ 모델의 북극 내 '해양-대기경계층-구름'간 상호작용 모의 한계

본 연구에서 다루고자 하는 '해양-대기경계층-구름'간의 상호작용은 극지방 기후민감도를 결정하는 데 필수적인 핵심 과정이다. 해빙 감소와 지표 온도 상승, 이에 따른 대기 하층의 열·수증기 플럭스 변화, 그리고 구름 형성 및 복사수지 변화가 서로 얽히면서 복잡한 비선형 피드백을 형성하기 때문에, 이러한 과정을 기후 모델 내에서 단순화하여 구현하는 것은 매우 어렵다. 이전 연구들은 여러 전지구 규모 및 지역 규모 기후 모델을 이용하여 북극 구름을 모의하고 그 영향을 조사해 왔으나(Morrison et al., 2019; Lenaerts et al., 2020), 구름 미세물리

과정의 복잡성(Morrison et al., 2012; Sotriopoulou et al., 2020)과 고품질 관측자료의 부족(Kay et al., 2016; Boisvert et al., 2018)으로 인해 북극 구름을 정확하게 모의하는 것은 여전히 큰 과제로 남아 있다. 예를 들어, 대기경계층 내 하층 대기의 열역학 구조의 정확한 재현과 구름 미세물리 특성의 불완전한 모의는 구름 및 복사 효과 계산에 상당한 불확실성을 초래한다(Pithan et al., 2016; Ovchinnikov et al., 2014; Wu et al., 2025). 또한, 모델마다 구름 미세물리 과정을 처리하는 방식이 다르기 때문에, 동일한 조건에서도 모델과 관측 간의 차이뿐만 아니라 모델 간 불일치가 발생할 수 있다(Taylor et al., 2019; Nam et al. 2025). 이러한 문제는 전지구 기후 모델보다 높은 공간 해상도를 갖춘 지역 규모 모델에서도 여전히 나타나며, 구름의 기하학적 및 미세물리적 특성과 그에 따른 북극 지표 복사 수지를 정확히 재현하는 데 제한이 있다(Inoue et al., 2021).

재분석 자료도 관측 자료가 부족한 지역에서 과거 및 현재 기후 상태를 연구할 때 유용하게 활용되어 왔다. 이는 가용한 관측 자료와 수치 모의 결과를 결합하는 자료동화 기법을 기반으로 하기 때문이다. 그러나 구름과 복사 관련 자료가 충분히 동화되지 않으면 재분석 자료에도 불확실성이 존재하게 된다(Yao et al., 2020). 실제로 선행 연구들은 북극 지역에서 여러 재분석 자료의 구름 특성 및 복사 플럭스를 평가하였다. 재분석 자료와 위성 관측 간의 구름량 및 구름 수분량(CWP) 비교에서 큰 불일치가 나타났으며, 이는 복사 플럭스 결과의 오차로 직접 이어지는 것으로 확인되었다(Huang et al., 2017; Lenaerts et al., 2017; Yeo et al., 2022). 뿐만 아니라, 지상 관측과 비교했을 때에도 다섯 개 주요 재분석 자료 모두에서 구름량과 기타 구름 특성의 편향으로 인해 단파(SW) 및 장파(LW) 복사 플럭스에 유의미한 오차가 존재함을 확인하였다(Zib et al., 2012). 따라서 북극 지역에서 '해양-대기경계층-구름' 상호작용의 정확한 이해와 모의 능력 향상은, 기후 변화 평가와 북극 기후 예측 정확도 향상에 필수적이다.

○ 관측에 기반한 북극 내 '해양-대기경계층-구름' 간 상호작용 분석 필요성

기후 변화에 따른 북극 지역의 급격한 기온 상승과 해빙 감소는 북극 대기경계층과 구름, 그리고 지표 복사수지 간의 복잡한 상호작용을 통해 나타나는 중요한 피드백 과정과 직결된다. 미래 북극 기후 예측을 위해 다양한 전지구 규모 및 지역기후 모델이 활용되고 있지만, 모델 간 산출 결과에는 여전히 상당한 차이가 존재하며(Kay et al., 2016; Yeo et al., 2022), 이러한 차이를 줄이기 위해서는 관측 기반의 정확한 물리 과정 이해와 모델 평가가 필수적이다. 특히, 해양-대기경계층-구름 간 상호작용과 그로 인한 복사 효과는 극지방 표면 복사수지와 기온 변화에 큰 영향을 미치지만, 모델에서 이를 정확히 구현하는 것은 매우 어려운 과제이다.

북극 지역에서 대기경계층과 구름에 대한 관측은 시공간적으로 매우 제한적이어서, 북극 기후를 정확히 이해하고 기후 모델을 평가 및 개선할 수 있는 근거 자료가 부족한 실정이다. 이러한 관측의 부족은 특히 '해양-대기경계층-구름' 간 복잡한 상호작용과 그로 인한 표면 복사수지 변화의 이해를 어렵게 하며, 기후 모델 간 산출 결과 차이를 줄이는 데 장애가 된다(Kay et al., 2016; Yeo et al., 2022).

그럼에도 불구하고, 제한된 관측을 활용한 연구들은 북극 기후 시스템에서 구름과 대기경계층, 해양 사이의 중요한 물리적 과정들을 밝혀왔다. Cho et al. (2021)은 북극 Ny-Ålesund 지역의 지상 관측을 활용해 겨울철 구름이 하향 장파 복사를 최대 69 W m^{-2}까지 증가시켜 표면 에너지 수지에 강력한 영향을 준다는 사실을 확인하였다. 2008년 여름 동안 북극해에서 진행된 Arctic Summer Cloud Ocean Study; ASCOS) 선상 관측 결과를 활용하여, 여름철 해빙 지역 저층 구름이 지표와의 직접 상호작용보다는 외부에서 유입된 따뜻·습윤 공기와 구름 상단 복사 냉각에 의해 지배된다는 결과가 보고되기도 하였다(Shupe et al., 2013). 또한, MOSAiC 탐사에서 수집된 라디오존데 관측 자료를 통해, 해빙이 녹는 여름철에 대기경계층의 난류 및 열구조 변동성이 크게 증가함을 보여, 해양 상태가 대기경계층 안정도와 구름 형성에 미치는 영향을 확인하였다(Peng et al., 2023). 뿐만 아니라, 위성 관측 기반 연구에서도 해빙 감소 시 하층 액체 구름이 증가하고, 이는 단파 복사 반사를 통해 표면 복사 냉각을 증가시켜 북극 표면 온난화 억제에 기여함을 강조하였다(Cesana et al., 2024).

이처럼 제한적이지만 관측 기반 연구를 통해 '해양-대기경계층-구름-복사효과' 상호작용의 핵심 메커니즘이 일부 규명되었으며, 이는 북극 기후 변화와 모델 평가·개선의 중요한 기준이 된다. 따라서 향후에도 지속적인 관측 자료 수집과 이를 기반으로 한 분석 연구는 북극 지역의 지표 온도 변화, 구름 및 대기경계층의 복잡한 상호작용을 이해하고, 기후 모델의 정확도를 향상시키는 데 필수적이다.

KOPRI
극지연구소

제 2 장 국내외 기술개발 현황

○ **관측 기반 북극 지역 '해양-대기경계층-구름' 간의 상호작용 분석**

- Shupe et al. (2013) 연구에서는 2008년 여름 동안 북극 중앙 해빙 지역에서 수행된 집중 관측 (Arctic Summer Cloud Ocean Study; ASCOS) 결과를 활용하여, 해빙 위에서의 구름-대기-지표 상호작용과 연직 혼합 과정을 정밀하게 분석하였다. 그 결과, 북극 해빙 지역에서의 여름철에 흔한 저층 구름은 지표와의 상호작용 보다는, 대규모 이류에 의해 외부에서 유입된 따뜻하고 습한 공기와 구름 상단에서의 복사 냉각에 의해 지배적으로 영향을 받음을 보고하였다.
- Barrow 지역에서 10년간 수행된 관측에 따르면, 지표 장파 구름 복사 효과(CRE)는 전천(all-sky)과 청천(clear-sky) 조건의 지표 복사 플럭스 차이로 정의되며(양의 CRE는 지표 가열을 의미), 구름 밑면 고도와 음의 상관관계를 가진다. 이는 구름 고도가 증가할수록 구름에 의한 지표 온도에 대한 복사 효과가 감소하기 때문이다. 따라서 대기경계층과 관련된 구름의 수직 분포는 지표 복사 수지에 매우 중요함을 알 수 있다(Dong et al., 2010).
- 북극 다산과학기지, Ny-Ålesund 지역에서의 Cloudnet 지상 관측 결과에 따르면, 겨울철 온난 이류가 발생할 때의 구름 비율 및 미세물리 특성은 하향 장파 복사를 최대 69 W m^{-2}까지 증가시키는 것으로 나타났다(Cho et al., 2021).
- 독일 Alfred Wegener Institute (AWI)가 주도하는 세계 최대 규모의 북극 장기 관측 프로젝트인 Multidisciplinary drifting Observatroy for the Study of Arctic Climae (MOSAiC) 동안 수집된 라디오존데 관측 자료를 이용해 북극 대기경계층의 연주기를 조사하였다. 그 결과, 지표 특성과 관련된 난류 및 열 구조가 대기경계층 변화에 중요한 영향을 미치며 해빙이 녹는 여름철에는 대기경계층의 변동성이 크다는 것을 확인하였다(Peng et al., 2023).
- 능동 및 수동 센서를 장착한 3개의 위성(CloudSat, CALIPSO, CERES 등)을 이용하여, 해빙 감소에 따라 하층 액체 구름의 증가와 해빙 증가에 따른 얼음 구름의 증가를 확인하였다. 또한, 액체 구름의 증가는 단파 복사 반사를 통해 표면 복사 냉각을 증가 시켜 북극 표면 온난화 억제 효과가 있음을 강조하였다(Cesana et al., 2024).

○ **모델 기반 북극 지역 '해양-대기경계층-구름' 간의 상호작용 분석**

- Bulatovic et al. (2023) 연구는 북극 해양 상공에서 Large-eddy simulation (LES)를 이용하여 에어로졸 및 풍속 등 대기경계층 내 특성이 구름 구조와 복사 효과에 미치는 영향을 평가하였다.
- Taylor et al. (2019) 연구에서는 현재 여러 기후모델이 북극 구름의 연주기를 관측과 비교하여 잘 재현하지 못하고, 모델간에서 큰 차이가 존재한다고 보고하였다. 그 결과, 하층운이 연주기 차이의 주된 원인임을 밝히며, 얼음 응결 비율(ice condensate ratio)와 하층운 비율

의 상관 관계를 발견하였다. 모델 마다 다른 구름 미세물리 모수화 과정, 특히 구름 얼음 과정에 대한 계산 방식이 모델의 오차를 야기하는 주된 원인임을 강조하였다.

- 기후 및 수치예보 모델의 단일 모멘트 구름 미세물리가 북극 지역 하층운을 과도하게 모의하고 낮은 구름 응결핵(Cloud condensation nuclei; CCN)을 재현하지 못함을 발견하였고, 이로 인해 구름 발생 비율, 대기경계층 고도, 온도 등에서 편차가 야기됨을 보고하고 있다 (Birch et al., 2023).
- McCusker et al. (2023) 연구에서는 북극 지상(Cloudnet) 및 해상(SHEBA) 관측 결과와 비교하여 영국 기상청 통합모델(UM)과 ECMWF 통합예보시스템(IFS)의 북극 구름과 그로 인한 지표 에너지 수지 및 대기 열역학 구조를 모의하는 성능을 평가하였다. 그 결과 모델에서 북극 하층운을 과대 모의하며, 이로 인해 하층 대기의 온도 편차가 발생함을 발견하였다.

KOPRI
극지연구소

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 북극 대기경계층 구조 및 하층운 물리 특성 분석

1. 북극 다산과학기지의 원격, 직접, 지상 관측자료 수집 및 분석

북극 지역의 하층운 물리 특성 및 대기경계층 구조를 분석하기 위해 구름 레이더, 운고계, 윈드 도플러 라이다, 마이크로라디오미터, 라디오존데 및 복사 관측 등의 다양한 관측 자료를 수집하여 분석을 수행하였다. 지상 관측자료는 주로 스발바르 군도의 니알슨에 위치한 극지연구소의 북극 다산과학기지에서 관측되었으며, 이 외에도 모델링 자료와 위성 자료, 재분석 자료 및 북극 지역의 Cloudnet 관측망 자료 등을 종합적으로 이용하였다.

구름 레이더와 운고계를 이용한 구름의 물리적 특성은 그림 3.1에 나타내었다. 2017년 2월부터 2023년 2월까지 니알슨의 다산과학기지 관측 자료를 이용하였으며 액체상 구름과 빙정, 혼합상 구름의 세 유형으로 구분하여 분석하였다. 그림에서 각 상자수염도 위에 표시한 숫자는 관측 기간 내 관측된 총 자료 개수를 나타낸다. 세 유형 모두 운정 온도를 제외한 다른 특성의 계절 변동성은 뚜렷하지 않았다. 가을과 겨울철에 빙정운의 운정 고도가 높은 값을 보이기는 하지만 중앙값은 일정하게 유지되어 변동성이 두드러지지 않았다. 운정 온도는 겨울 및 봄철에 낮고 여름과 가을철에 높은 계절 변동성이 비교적 뚜렷하게 나타났는데, 일반적으로 운정 고도가 높을수록 운정 온도도 낮아지기 때문에 운정 온도의 계절 변동은 운정 고도의 변동성과 연관될 가능성이 높다. 그러나 계절별 운정 고도는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보아 운정 온도의 계절 변동성은 운정 고도와 관계없이 단순한 계절에 따른 기온의 차이로 인한 것으로 판단된다.

북극의 지역적 특성에 의해 액체상 구름의 관측 빈도는 빙정이나 혼합상 구름의 3% 이하로 낮게 나타났다. 액체상 구름의 관측 전 기간 운정 온도는 대부분 영상이거나 0℃ 부근에 분포하나 봄철과 겨울철에는 -10℃ 이하의 운정 온도를 보였다. 이는 겨울철과 봄철에는 북극으로의 에어로졸 유입이 적어 빙정핵으로 작용하는 입자가 부족해 과냉각 수적의 형태로 유지되는 구름 입자가 많기 때문으로 판단된다. 다만, 봄철과 겨울철 액체상 구름의 관측 빈도가 다른 유형에 비해 현저하게 적다는 점을 통해 대부분의 구름 입자가 빙정이나 혼합상으로 존재한다는 점을 알 수 있다.

액체상 구름은 빙정 및 혼합상 구름에 비해 상대적으로 운저 고도는 높고 운정 고도는 낮아 세 유형 중 구름의 두께가 가장 얇게 나타났다. 혼합상 구름은 세 유형 중 구름의 두께가 가장 높게 나타났으나 빙정 구름과 큰 차이를 보이지는 않았다. 액체상 구름의 운저 고도는 빙정 및 혼합상 구름에 비해 모든 계절에서 뚜렷하게 높게 나타났다. 이는 액체상 구름이 생성되기 위해서는 기온이 높아야 하며, 대기 중 수증기량이 일정하다고 가정할 때 기온이 높을수록 상승응결고도(Lifting Condensation Level; LCL)가 높아져 더 높은 고도에서 구름이 생성되기

시작하기 때문으로 판단된다.

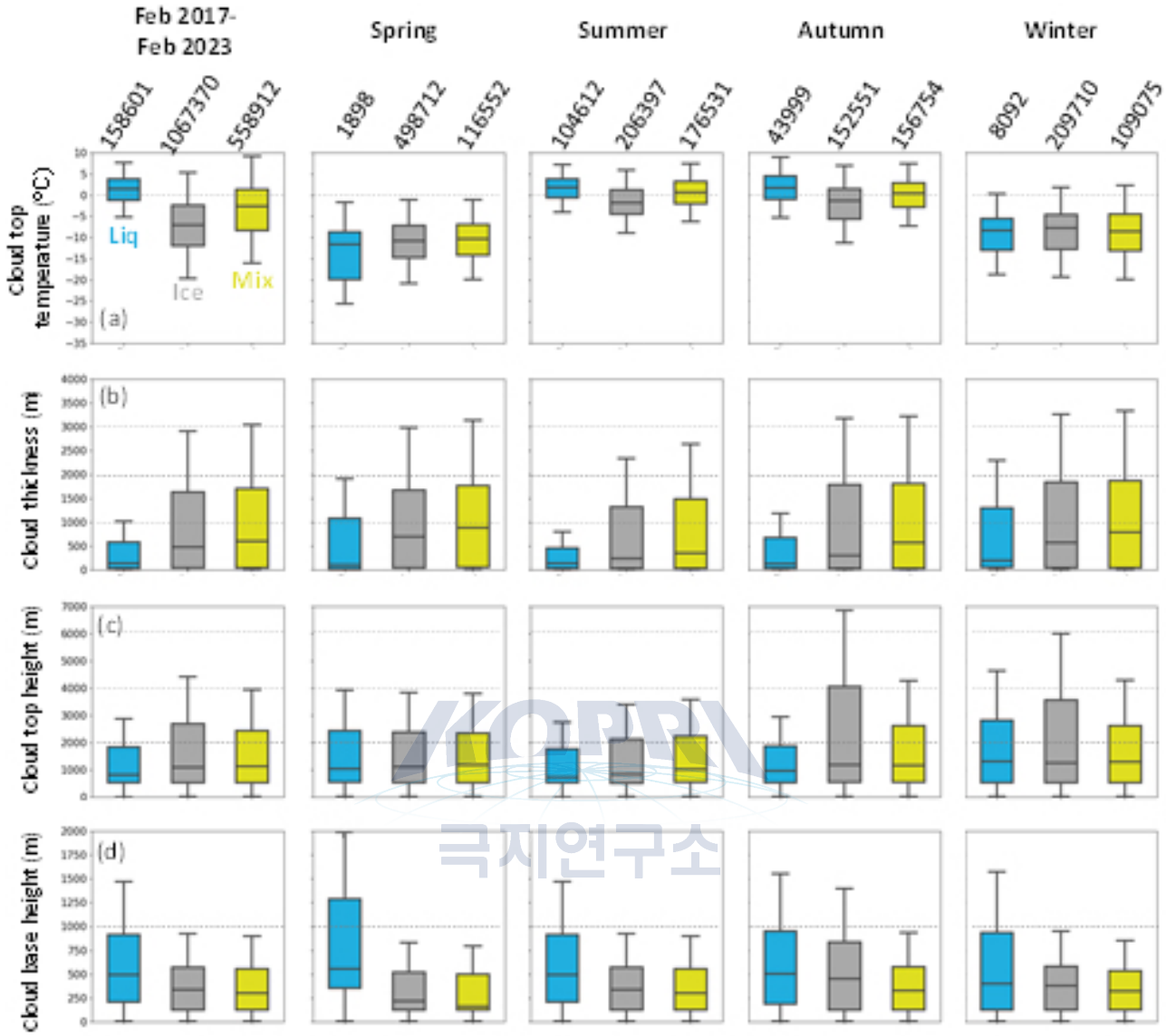


그림 3.1. 니알슨에서 관측된 2017년 2월-2023년 2월 계절별 운정 온도, 구름 두께, 운정 및 운저 고도

윈드 도플러 라이다는 발사된 레이저가 대기 중 에어로졸 등에 의해 후방산란 되는 빛의 도플러 효과를 이용해 풍속을 측정하는 관측장비로 지표면 부근 수 km의 고도별 풍속을 관측할 수 있다. 연직 방향 관측을 통해 연직 풍속 관측이 가능하나 대기 중 에어로졸 등의 입자 농도가 낮은 지역에서는 라이다의 관측 신호가 약해 관측에 어려움이 있을 수 있다. 특히, 연직 풍속은 수평 풍속에 비해 매우 낮은 수 cm/s의 범위를 갖기 때문에 이러한 문제가 극대화 될 수 있다. 그림 3.2는 2018년 9월 3일부터 9일까지 북극 다산과학기지에서 윈드 도플러 라이다로 관측한 연직 풍속의 표준편차를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 시간에 따라 다르지만 약 1-2 km 고도까지만 관측이 수행되고 특정 고도 이상에서는 관측이 되지 않는데, 이는 구름에 의해 라이다에서 발사된 레이저가 완전히 감쇄되기 때문이다. 무엇보다 연직 풍속의 표준편차가 약 1 m/s 이상 되는 경우가 빈번하며 구름 하층이나 대기경계층 부분에서는 수 m/s

이상의 값까지 가지는 것을 볼 수 있다. 일부 불안정한 대류가 있을 경우를 제외한 일반적인 연직 풍속이 수-수십 cm/s의 범위를 갖는 연직 풍속의 특성을 고려할 때, 본 연구에서 윈드 도플러 라이다를 이용해 관측된 연직 풍속은 표준편차가 매우 큰 값을 가짐을 알 수 있으며 분석 및 활용에 한계가 있었다. 이는 대기 중 후방산란을 일으키는 에어로졸 입자의 농도가 매우 낮은 지역적 특성에 의한 것으로 보인다. 이러한 관측 한계를 고려하여 본 연구에서는 윈드 도플러 라이다의 연직 풍속보다는 수평 방향 풍속에 집중하여 분석을 수행하였다.

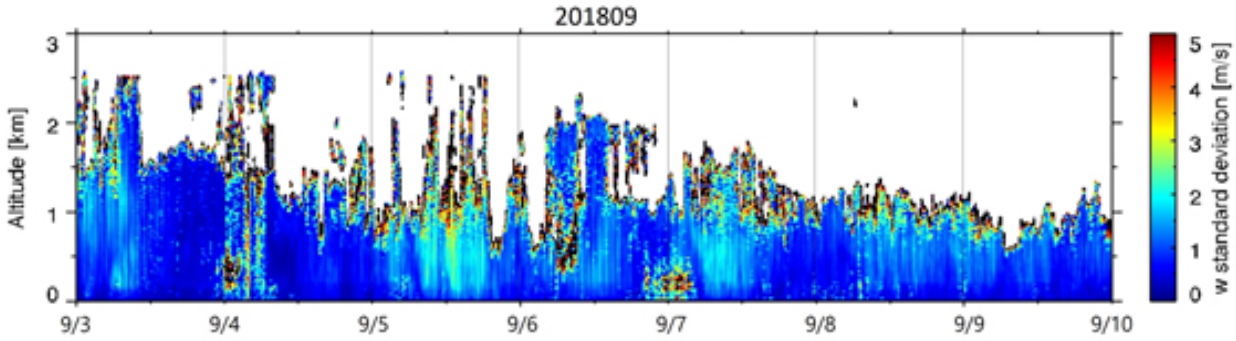


그림 3.2. 북극 다산과학기지에서 2018년 9월 3일-9일의 윈드 도플러 라이다 관측자료로부터 산출한 연직풍속 표준편차 결과 예시

그림 3.3은 윈드 도플러 라이다를 이용해 2016년 10월부터 2019년 6월까지 북극 다산과학기지에서 관측한 풍속을 고도별 구간으로 나누어 빈도를 나타낸 것이다. 그림 3.2에서 확인한 것처럼 고도가 높아질수록 구름에 의해 관측이 되지 않는 빈도가 증가하기 때문에, 그림 3.3에서도 고도 약 1 km 이상부터 총관측 빈도가 급격하게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 따라서 그림 3.3에서는 총관측 빈도보다는 구간별 관측 빈도의 분포 형태를 중점적으로 살펴보아야 한다. 먼저, 가장 하층인 500 m 이하의 고도에서는 평균 풍속이 5.4 m/s로 나타났으며 최빈값은 약 2.5 m/s 부근에 위치하였다. 이후 고도가 높아질수록 강한 풍속의 빈도가 상대적으로 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 2.5 km 이상의 고도에서는 관측이 거의 이루어지지 않아 빈도 분포를 확인하기 어려웠다.

계절(월) 변화에 따른 고도별 평균 풍속을 그림 3.4에 나타내었다. 앞에서 언급한 것처럼 2.5 km 이상의 고도의 풍속 관측 빈도는 매우 낮기 때문에, 11월과 12월을 제외한 다른 달의 월평균은 2.5 km 이하의 값만 나타내었다. 지표면 부근, 500 m 이하의 고도에서의 월평균 풍속은 겨울철에 높고 봄철에 낮아져 여름 동안 낮은 값을 유지하고 8월에 연중 최솟값을 보였다. 0.5~1.0 km 구간은 대기경계층의 상층부로 500 m 미만의 풍속보다는 강하지만 비교적 유사한 계절 변동성을 보였다. 1 km를 경계로 특히 여름철에 풍속이 급격히 증가하여 연직 바람 경도(wind shear)가 크게 나타났다. 이는 대기경계층 상부의 자유 대기층에서 풍속이 급격하게 증가함을 보여준다. 다만, 4월에는 2.5 km 이내의 모든 고도에서 고도에 따른 풍속 변화가 크지 않고 전반적으로 낮은 값을 보이는데, 이에 대해서는 자료의 개수 부족 등의 원인에 의한 것으로 추측된다.

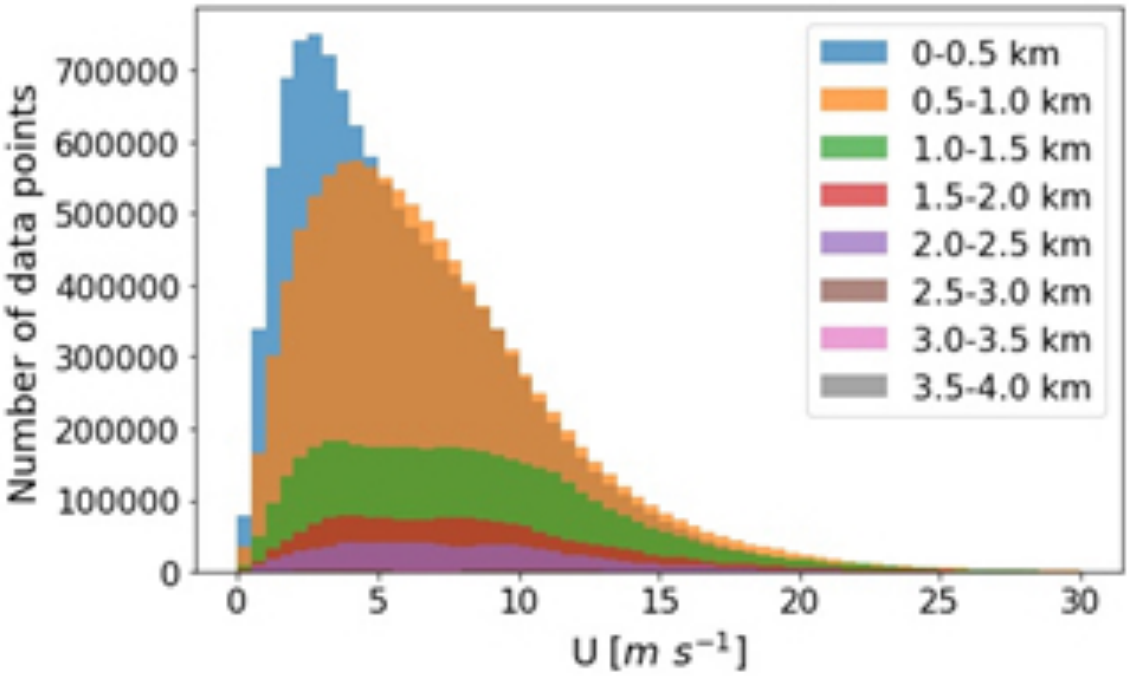
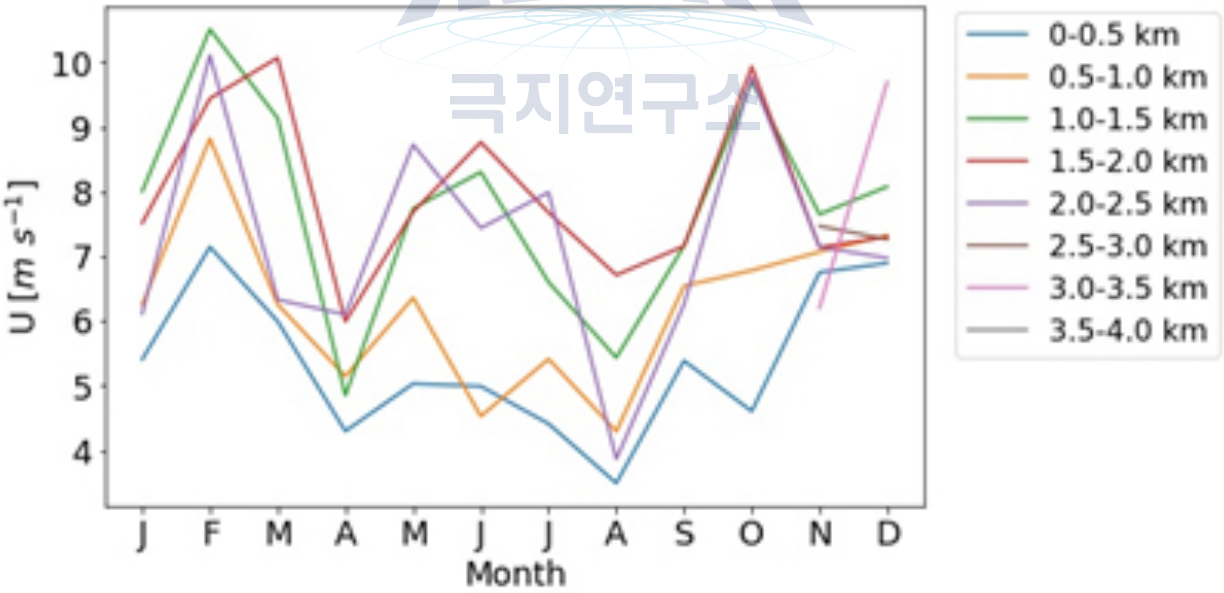


그림 3.3. 북극 다산과학기지에서 2016년 10월부터 2019년 6월까지 윈드 도플러 라이다로 관측한 풍속의 고도별 분포표



KOPRI 극지연구소

그림 3.4. 북극 다산과학기지에서 2016년 10월부터 2019년 6월까지 윈드 도플러 라이다로 관측한 고도별 풍속의 월변화

마이크로라디오미터는 대기 연직 기주의 단위 면적당 존재하는 액체상의 물의 총 양인 액체수경로(Liquid Water Content; LWC)와 얼음수경로(Ice Water Content; IWC)를 관측하는 장비로 월평균 고도별 LWC와 IWC를 그림 3.5에 나타내었다. LWC와 IWC 모두 5월부터 8월까지 봄철과 여름철에 연중 가장 높은 값을 보이며, 지상 약 2 km 이내의 지표면 부근에 집중되어 나타나는 것을 볼 수 있었다. 겨울철에는 낮은 기온으로 인해 구름의 대부분이 빙정 형태로 존재하기 때문에 LWC는 여름철에 높고 겨울철에 낮은 뚜렷한 계절 변동성을 보였다. IWC는 LWC에 비해 계절 변동성이 상대적으로 약하게 나타났으며, 봄철과 가을철의 계절이 바뀌어 얼음이 녹고 어는 시기(transition zone)에 가장 낮은 값을 보이는 것으로 판단된다. 가장 높은 값이 나타나는 고도는 IWC의 경우 약 500 m 이하의 지표면 부근이지만, LWC는 여름철 약 1.5 km 부근에 가장 높은 값이 나타났다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 액체상 구름이 생성되기 위해서는 기온이 높아야 하며, 기온이 높아짐에 따라 상승응결고도도 높아져 더 높은 고도부터 구름이 생성되기 시작하기 때문으로 판단된다.

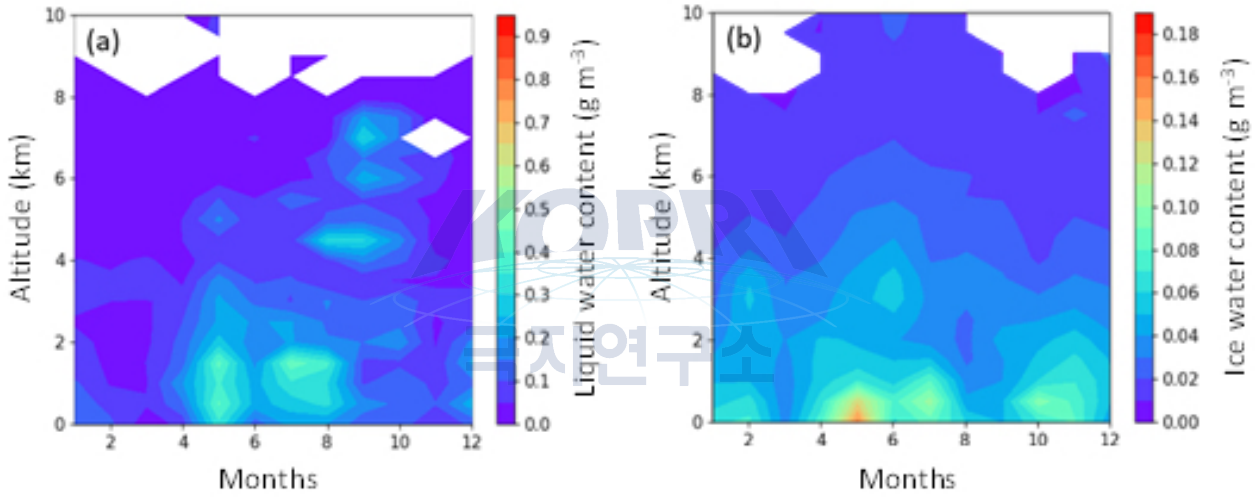


그림 3.5. 니알슨에서의 월평균 (좌) 액체수함량(LWC), (우) 얼음수함량(IWC) 연직분포

그림 3.6은 니알슨에서 라디오존데로 관측한 온도 및 습도 연직 분포의 월변동을 나타낸 것이다. 니알슨의 기온은 지표면 부근에서 여름철에 가장 높고 겨울철에 가장 낮은 전형적인 형태를 보였다. 10 km 이상의 성층권에서도 이러한 계절 변동 특성은 유사하게 나타났으나, 대류권계면인 약 10 km 부근에서는 계절에 따른 온도 변화가 크지 않은 특징을 보였다. 극주(polar day)에 해당하는 여름철에는 지표면 부근에서 약 5℃의 평균 기온을 보이고, 5 km 고도에서는 약 -20℃, 10 km 이상의 높은 고도에서는 약 -40℃ 혹은 그 이하의 기온을 보였다. 극야(polar night) 시간대에는 지표 부근에서조차 약 -15℃ 이하의 낮은 값을 보여 극주/야간 극명한 기온 차이를 보였다. 극야에서 극주에 돌입하는 시기에는 단파 복사가 대기 상부에 먼저 유입됨에 따라 대류권계면 부근의 기온이 그 하층보다 약간 상승하는 모습도 나타났다. 또한, 니알슨 지역의 산악성(orographic) 특징으로 인해 공기 덩이(air parcel)가 강제적으로 상승하며 단열 팽창에 의한 응결로 인해 대기경계층 높이 부근에서 산발적인 역전층이 나타남을 확인할 수 있었다.

상대습도도 기온과 비슷하게 지표면 부근에서 가장 높고 고도가 높아짐에 따라 감소하였다. 지표면 부근에서는 여름철이 가장 높으나 계절 변동이 뚜렷하지 않고 연중 비교적 높은 습도가 유지되었다. 이처럼 극지역 지표면 부근에서 연중 높은 상대습도가 유지되는 것은 지표면 부근 바다에서 유입되는 수증기와 낮은 기온에 의한 것으로 보인다. 대류권 중상부에서는 겨울철에 낮고 여름철에 높은 계절 변동이 매우 뚜렷하게 나타나지만, 10 km 이상의 성층권에서는 낮은 습도가 유지되며 계절 변동이 거의 나타나지 않았다.

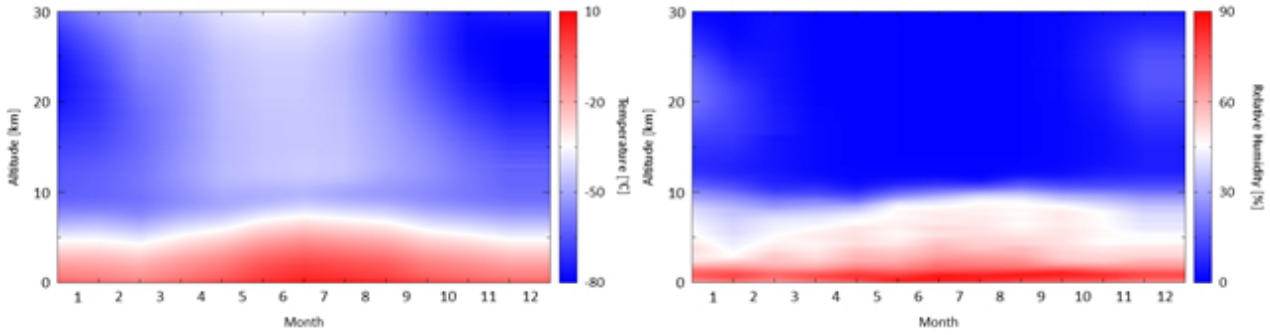


그림 3.6. 니알슨에서 라디오존데로 관측된 월평균 온도(좌), 습도(우) 연직분포

북극 니알슨 지역에서의 지상 복사 관측 자료는 그림 3.7에 나타내었다. 각 복사량은 하향 복사에서 상향 복사를 뺀 순 복사량(net flux)으로 순 복사량이 양의 값이면 입사되는 복사 에너지가 방출되는 복사 에너지보다 많다는 의미이며, 순 복사량이 음수이면 흡수보다 방출되는 에너지가 많은 것을 의미한다. 지구 시스템 전체적으로 보면, 입사되는 태양 복사 에너지의 일부를 흡수하여 온도가 높아지고, 높아진 온도에 해당하는 장파 형태의 지구 복사 에너지를 우주로 방출하여 열평형을 유지한다. 이러한 이유로 그림 3.7에서 볼 수 있듯이 태양 복사에 해당하는 단파 순 복사량은 양수, 지구 복사가 대부분을 차지하는 장파 순 복사량은 음수 값을 갖게 된다.

단파 복사량은 지표와 대기 상단(Top Of Atmosphere; TOA)에서 모두 극야에 해당하는 겨울철에 0의 값을 갖고 여름철에 높은 값을 갖는 전형적인 계절 변동성을 보인다. 형태는 동일하지만 대기 상단에서 지표면보다 더 높은 값을 가져 복사량이 가장 높은 7월에는 대기 상단과 지표면에서 각각 225 Wm^{-2}와 135 Wm^{-2}의 순 단파 복사량을 보였다. 대기 상단과 지표면에서의 순 복사량 차이는 대기에 의한 흡수나 산란, 지표면 알베도 등에 의한 결과이다.

북극 니알슨 지역의 순 장파 복사량은 지표면과 대기 상단에서 서로 반대의 경향을 보였다. 지표면에서는 5월에 가장 큰 -61 Wm^{-2}를 보였으며 대기 상단에서는 8월에 최대 -227 Wm^{-2}의 값을 가졌다. 장파 복사량은 일반적으로 대기와 지표면의 온도, 수증기 및 구름에 큰 영향을 받게 된다. 대기 상단에서 장파 순 복사량의 계절 변동은 북극 지역 기온과 밀접한 관련이 있다. 겨울철은 태양 복사가 없어 지표와 대기의 온도가 낮고 지구 복사량이 감소하게 된다. 반면, 여름철에는 태양 복사로 인한 지표 및 대기의 가열로 장파의 복사 냉각이 증가하게 되는 것이다. 지표면에서 이와 반대의 경향이 나타나는 것은 구름 및 수증기의 영향이 큰 것으로 보인다. 겨울에 비해 기온 및 수증기량, 운량이 증가하는 여름철에 지표면 부근에서 하향 장파

복사량이 상향 장파 복사량보다 더 크게 증가하기 때문에 장파의 순 복사량은 여름철에 (절대값이) 감소하는 경향을 보이는 것이다.

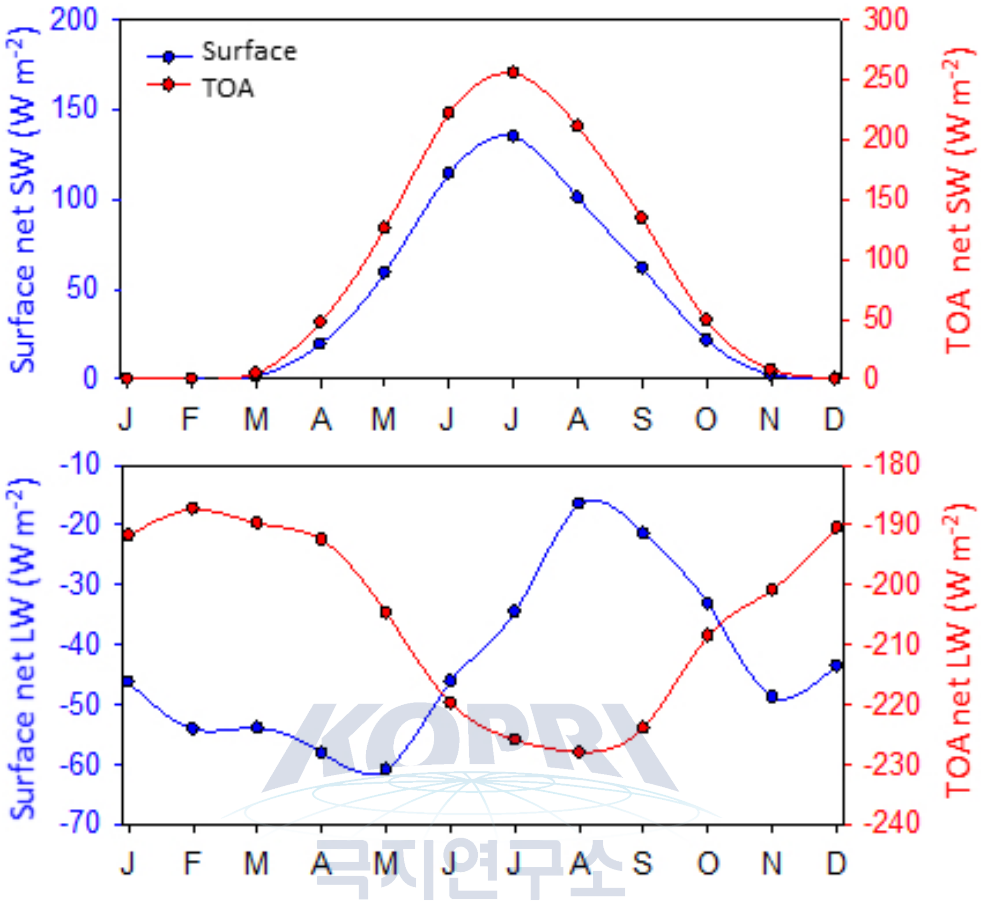


그림 3.7. ECMWF IFS forecast 모델로 모의된 니알슨에서의 (상)단파 및 (하)장파 순 복사량 월변화

복사 관측 자료와 구름 관측 자료를 동시에 이용하여 각 유형별 구름이 존재할 때의 지표면 장파 및 단파 복사량 변화를 살펴보았다(그림 3.8). 액체상 구름이 분포하고 있을 때, 상향 및 하향 장파 복사량이 평균보다 높은 빈도가 증가하였으며 빙정(얼음) 구름일 경우 낮은 장파 복사량의 빈도가 증가하였다. 즉, 액체상 구름, 혼합 구름, 빙정 구름 순서로 지표면 부근의 상향 및 하향 장파 복사량이 높게 나타났다. 이는 지표 및 대기의 온도와 밀접한 관련이 있는 것으로 보이며, 높은 기온에서 액체상 구름이 생성되고 기온이 낮으면 빙정 구름이 더 잘 생성되기 때문으로 볼 수 있다. 또한, 액체상 구름이 더 빈번한 여름철 대기 중 수증기량이 더 많은 것도 원인 중 하나로 판단된다.

단파 복사의 경우에는 혼합상이나 빙정 구름에 비해 액체상 구름일 때 더 높은 값을 갖는 빈도가 높았다. 앞에서 살펴본 바와 같이 액체상 구름은 다른 유형과 달리 평균적으로 구름의 두께가 얇고 태양 복사를 더 많이 투과하여 지표면에 도달하는 단파 복사량이 증가하기 때문으로 추측해 볼 수 있다.

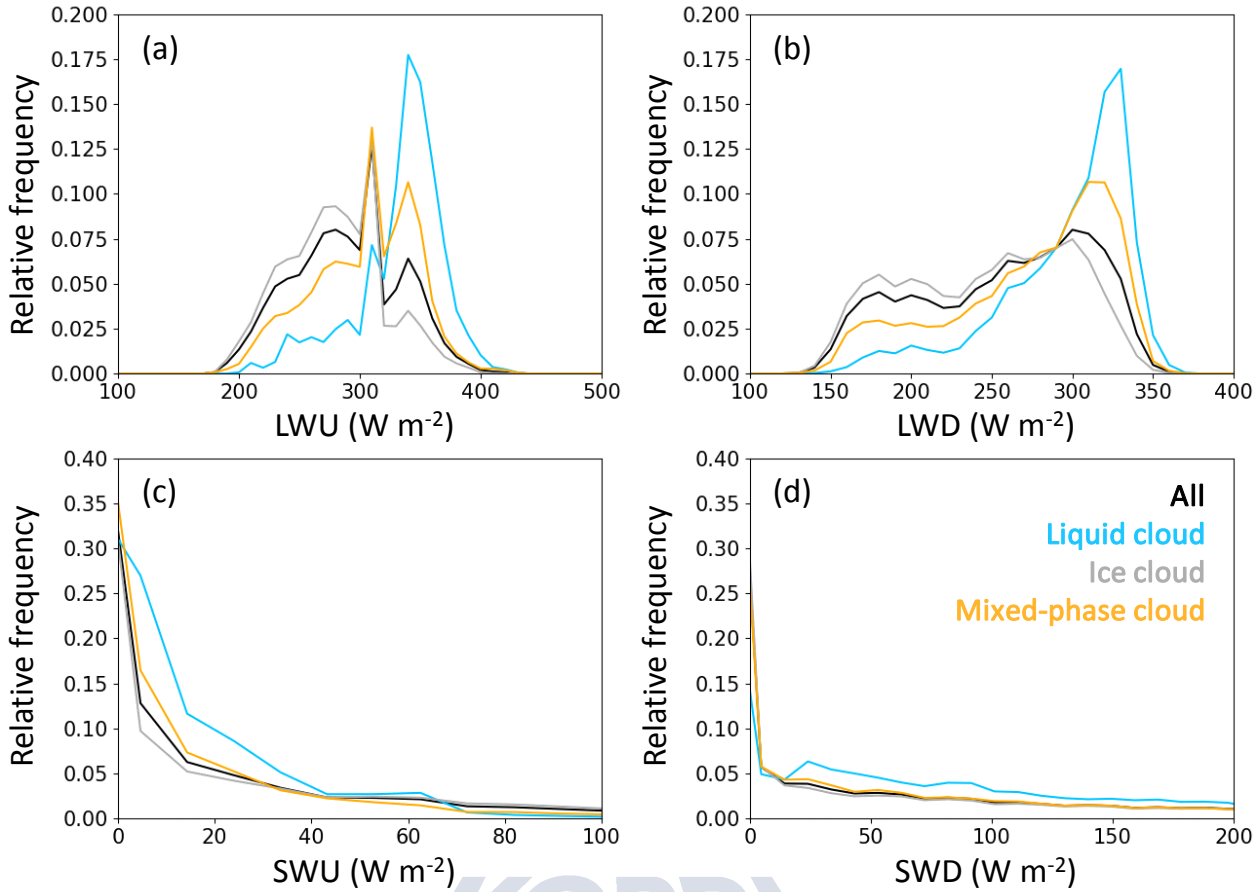


그림 3.8. 전체, 액체, 얼음, 혼합상 구름에 대한 지표에서 측정된 (상)장파의 (좌)상향과 (우)하향, (하)단파의 (좌)상향과 (우)하향 복사의 발생 빈도 분포

KOPRI 극지연구소

위와 같은 구름에 의한 복사량의 변화로 인한 대기 상단 및 지표면에서 장파와 단파의 순 복사량을 살펴보면 그림 3.9와 같다. 장파 복사의 경우 대기 상단에서는 운정 온도에 큰 영향을 받기 때문에, 상층운이 있을 때는 상향 장파 복사가 감소하여 장파 순 복사량이 증가(절대값 감소)하고, 하층운은 운정 온도가 높아 상향 장파 복사가 증가하고 대기 상단에서의 장파 순 복사량은 감소(절대값 증가)하여 냉각 효과가 강화된다. 따라서, 그림 3.9(a)에서 액체상 구름은 주로 운정 고도가 낮고 운정 온도가 높아 순 복사량의 절대값이 크게 나타나고, 빙정 구름은 반대의 경향이 나타나는 것이다. 이러한 설명은 지표면 부근에서도 동일하게 적용되지만 구름의 아래쪽이기 때문에 구름에서 방출되는 장파 복사의 방향이 대기 상단과 반대가 된다. 그림 3.9의 (a)와 (c)를 살펴보면 구름 유형별 장파 순 복사량이 대기 상단과 지표면에서 반대의 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

단파 복사에서 구름은 태양 복사를 반사하여 순 복사량을 감소시키는 역할을 한다. 일반적으로 하층운은 상층운에 비해 알베도가 더 크기 때문에 대기 상단에서의 단파 순 복사량 감소가 더 크게 나타나며, 지표면에 도달하는 태양 복사량이 감소하여 지표면에서의 단파 순 복사량도 감소하게 된다. 그러나 북극 지역, 특히 니알슨과 같이 북극 지역의 육지는 눈으로 덮여 있기 때문에 구름의 유무와 관계없이 높은 알베도를 갖게 된다. 그림 3.9(b)와 (d)를 보면, 구름이 없을 때와 빙정 구름이 있을 때의 단파 순 복사량이 대기 상단과 지표면에서 모두 유사

하게 나타났다. 즉, 니알슨 지역에서 구름은 단파 순 복사량에는 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 다만, 액체상 구름과 혼합 구름은 구름이 없을 때보다 순 복사량이 더 크게 나타났는데, 이는 구름이 발생하는 계절적 특성에 의한 것으로 보인다. 빙정 구름은 모든 계절에 나타날 수 있지만, 혼합 구름이나 액체상 구름은 주로 기온이 높은 여름철에 더 빈번히 생성된다. 따라서 그림에서 액체상 구름이나 혼합 구름은 여름철 관측 빈도가 상대적으로 많기 때문에 단파 순 복사량이 다른 유형이나 구름이 없을 때보다 높게 나타난 것으로 판단된다.

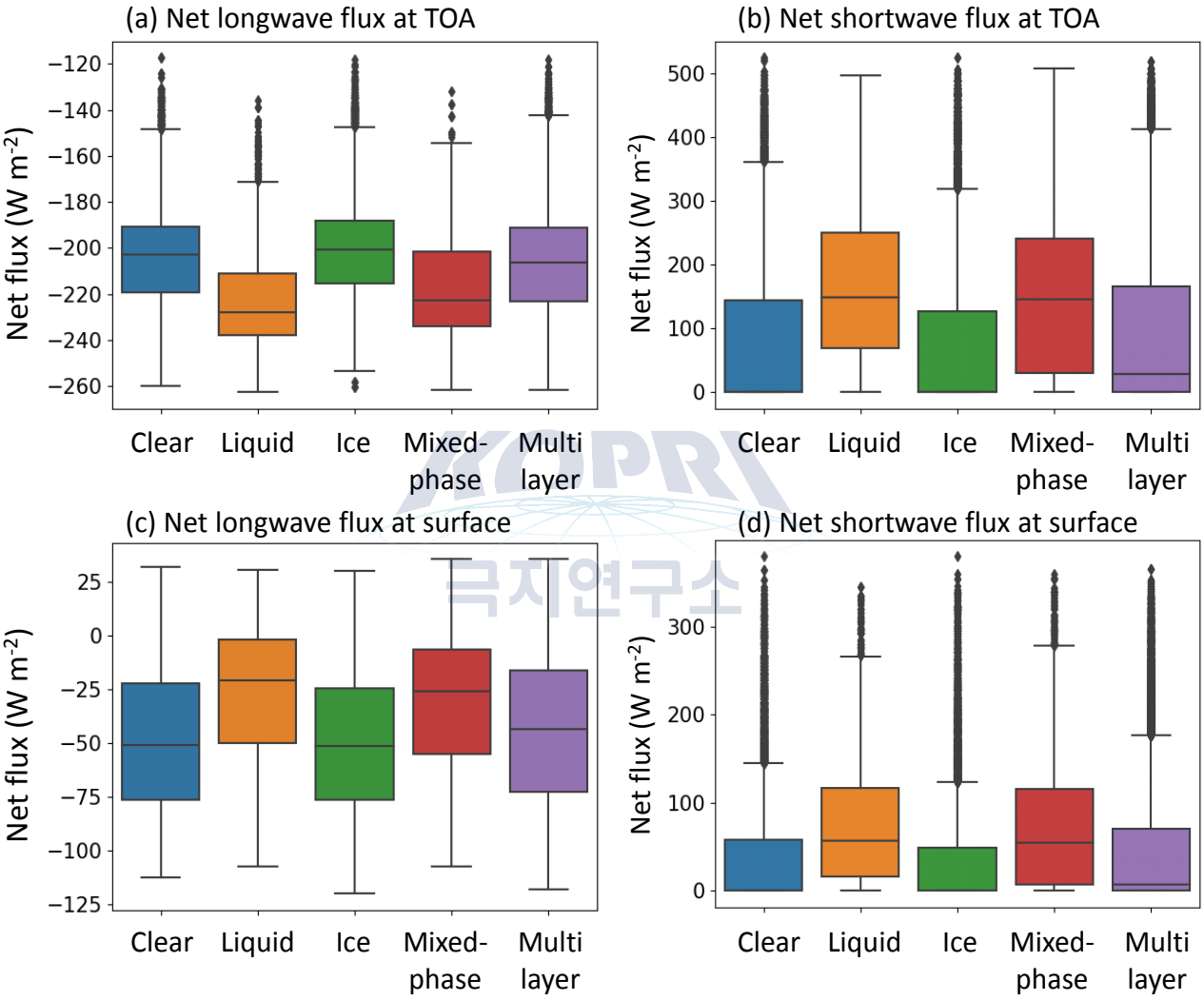


그림 3.9. 니알슨에서 구름 유형별 지표 및 TOA에서의 단파 및 장파 복사 에너지

그림 3.10은 ACLOUD 캠페인 기간 동안 혼합상 구름 발생 사례에 대해 모델을 통해 모의된 복사 에너지를 지표 관측(BSRN)과 비교한 결과이다. 모델에 이용된 스킴 사이의 차이는 크지 않으나 지상 관측 자료와의 차이가 매우 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 전반적으로 모델은 지상 관측에 비해 장파 복사를 과소 모의하고, 단파 복사는 과대 모의하는 경향이 나타났다. 상향 장파 복사는 모델에 비해 지상 관측 결과가 높은 값을 보였으며 값의 편차도

크게 나타났다. 이는 모델 특성상 지표면 특성을 그리드화 하여 지표면 온도 변화가 크지 않은 반면, 지상 관측은 지표면 상태의 변화에 민감하게 반응하여 짧은 시간 내에서도 변동폭이 크기 때문으로 보인다. 이에 반해, 하향 장파 복사는 모델이 관측에 비해 매우 큰 변동 폭을 보였는데, 이는 모델의 구름 모의 정확도에 한계가 있기 때문으로 추측된다. 단파 복사도 이와 같은 이유로 모델의 구름 모의 결과에 변동이 크기 때문에 태양 복사의 구름에 의한 반사 및 투과도에 영향을 미쳐 지상 관측 자료에 비해 큰 변동폭을 보였다.

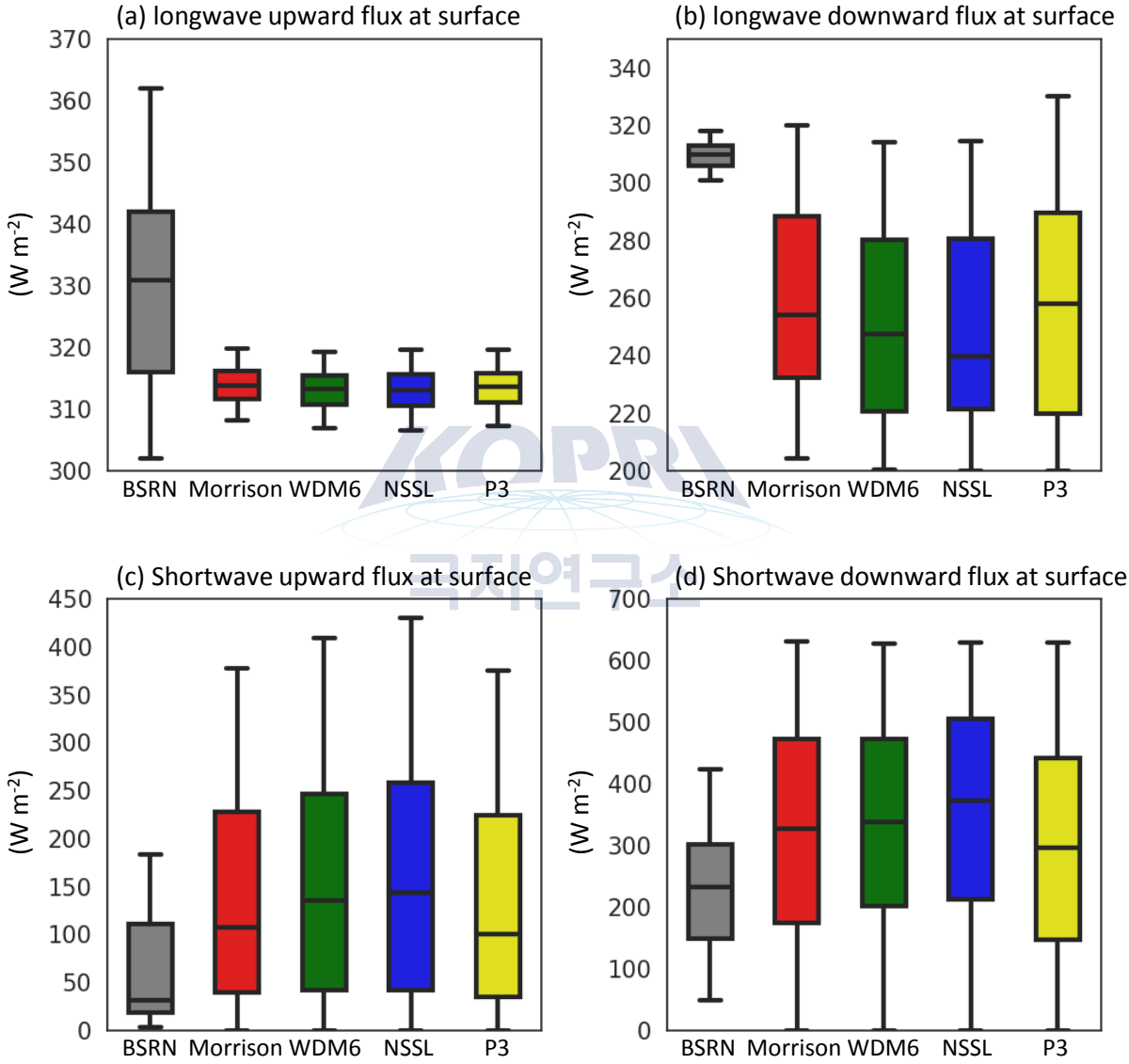


그림 3.10. Polar-WRF 4가지 스킴과 지상 복사관측(BSRN)을 통해 모의 및 관측된 지표에서의 상향 및 하향 장파 및 단파 복사

북극 지역의 니알슨 다산과학기지를 중심으로 한 지상 관측 자료 분석에 더불어 Cloudnet과 같은 북극 지역 지상 원격 관측망과 CloudSat과 CALIPSO와 같은 위성 관측 자료를 추가 수집하였다. 이를 통해 북극 지역의 구름 미세물리 특성의 공간 분포 특성을 분석하고자 하였다. 그림 3.11은 북극 지역 Cloudnet 관측소들의 위치와 이용 가능한 자료의 기간을 나타낸 그림이다. 북위 60° 이상의 북극권 내에서 1년 이상 관측을 진행한 관측소는 노르웨이 니알슨(Ny-Ålesund), 핀란드 휘티알라(Hyytiälä), 그란란드 서밋(summit), 스웨덴 노룬다(Norunda)를 포함한다. 네 관측소 모두 2016년부터 2023년까지 최소 2년 이상의 관측 자료를 확보할 수 있기 때문에, 앞서 니알슨 지역에서 구름 기하학적 및 미세물리적 특성의 장기간 특성을 분석한 것처럼 다른 지역에서도 동일한 분석을 진행할 수 있다. 이에 따라, 지상 관측을 기반으로 한 북극권 구름 특성의 공간 분포에 대한 이해를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

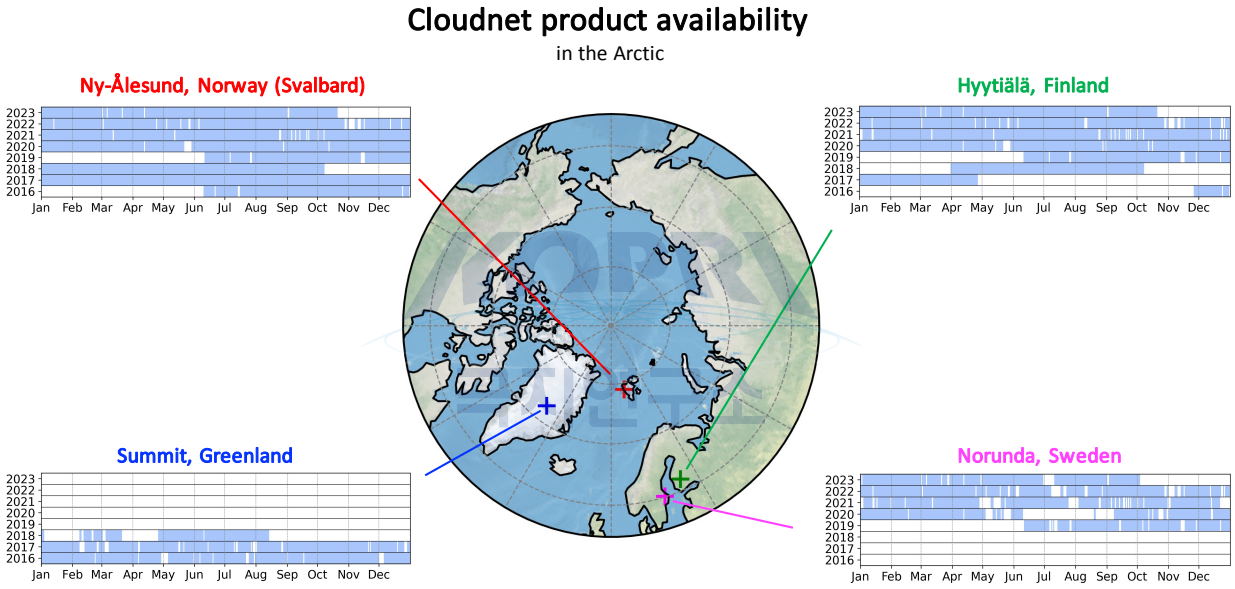


그림 3.11. 북위 60°이상의 북극권 내에서 1년 이상 관측을 진행한 Cloudnet 관측소에서의 이용 가능한 관측 데이터 (구름 레이더, 운고계, 마이크로라디오미터)

북극 지역 구름의 공간 분포 파악을 위해 극궤도 위성인 CALIPSO로 산출된 구름의 운정 고도의 계절 평균을 그림 3.12에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 북위 60도 이상 북극 지역의 평균 운정 고도는 뚜렷한 계절적 특성을 보였다. 전반적으로 북극 지역 운정 고도는 겨울과 봄철에 낮고 여름과 겨울에 높은 계절적 특성을 보였으며, 위도가 높아질수록 운정 고도는 낮아지는 특성도 확인할 수 있었다. 이는 대류권계면의 높이 변화와 관계가 있을 것으로 보이는데 일반적으로 대류권계면은 북극 고위도로 갈수록 낮아지고 여름보다 겨울철에 낮게 나타난다. 구름이 생성되는 고도에 계절적, 공간적 차이가 두드러지지 않다면 운정 고도는 구름이 발생할 수 있는 최대 고도인 대류권계면의 높이에 의해 제한되기 때문에 이처럼 대류권계면의 시간적, 공간적 변동 특성과 유사한 경향을 갖게 되는 것이다.

봄, 여름 및 가을에는 위도가 높아질수록 운정 고도는 낮아져 북극점을 중심으로 하는 동심원의 분포 형태를 보이나 겨울철에는 경도에 따라 운정 고도가 달라지는 매우 특이한 공간 분포 형태를 보였다. 특히, 북대서양과 유럽 방향의 북극권에서는 운정 고도가 여름철보다도 높아 연중 가장 높은 값을 가짐을 알 수 있었다. 이는 겨울철 따뜻한 북대서양 난류의 영향으로 저기압성 폭풍이 빈번하게 북극 지역으로 유입되기 때문으로 추측해 볼 수 있다. 따뜻한 해류의 영향으로 발생하는 저기압은 강한 상승기류로 때때로 대류권계면 이상의 고도까지 발달할 수 있다(overshooting). 실제로 겨울철 북대서양 지역의 북극권에서의 CALIPSO 관측 자료를 살펴보면, 대류권계면 이상의 고도까지 구름이 분포하는 사례가 자주 나타남을 확인하였다.

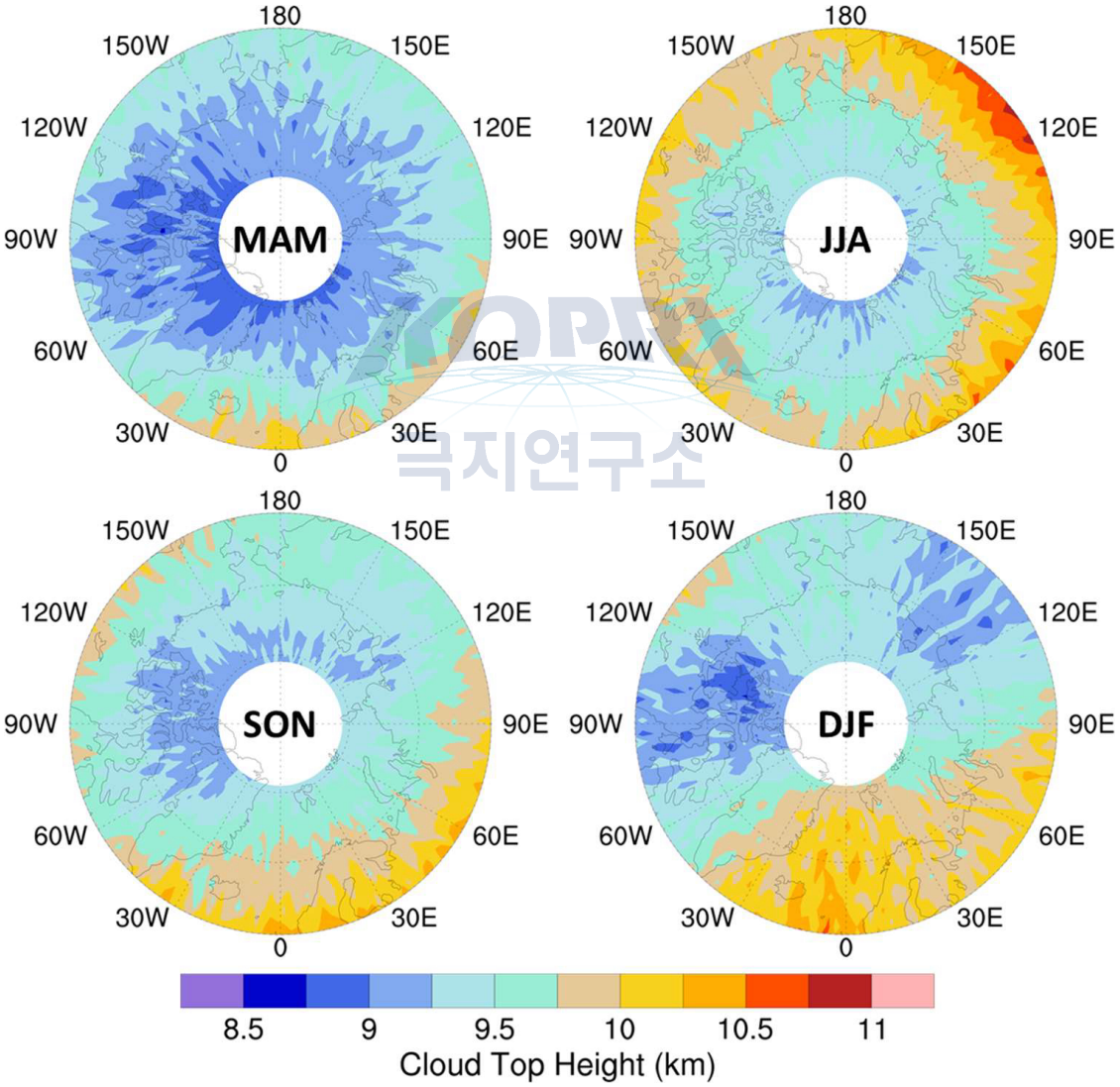


그림 3.12. CALIPSO-CloudSat 위성 관측자료로 산출된 북극지역 계절 평균 운정 고도

2. 지상 관측 자료를 이용한 북극 대기경계층 및 하층운 특성 분석

북극 다산과학기지를 포함한 북극 지역에서 수집된 대기, 구름 관측 자료를 이용하여 지표면 부근 하층운과 대기경계층의 열역학적, 물리적 구조 및 시간 변동 특성을 분석하였다. 그림 3.13은 북극 다산과학기지에서 라디오존데로 관측한 기온과 상대습도의 고도별 월평균을 지표면에서 5 km까지 나타낸 결과이다. 다산과학기지의 지표면 부근 기온은 모든 계절에서 고도에 따라 비교적 일정하게 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났으며 5 km 이내의 모든 고도에서 7월에 가장 높고 3월에 가장 낮은 값을 보였다. 상대습도는 지표면이 아닌 지상 약 1 km 부근에서 가장 높은 값을 보이며, 겨울철(12~3월)에 가장 낮고 여름철(6~9월)에 가장 높은 값을 보였다. 지상이 아닌 약 1 km 상공에서 가장 높은 상대습도를 보이는 것은 온도의 영향인 것으로 판단된다. 고도 약 1 km 이내의 대기경계층 내에서 수증기량이 일정하다면, 기온이 낮을수록 상대습도는 높아지기 때문에, 지표면보다 기온이 낮은 약 1 km 상공에서 가장 높은 상대습도가 나타나는 것이다.

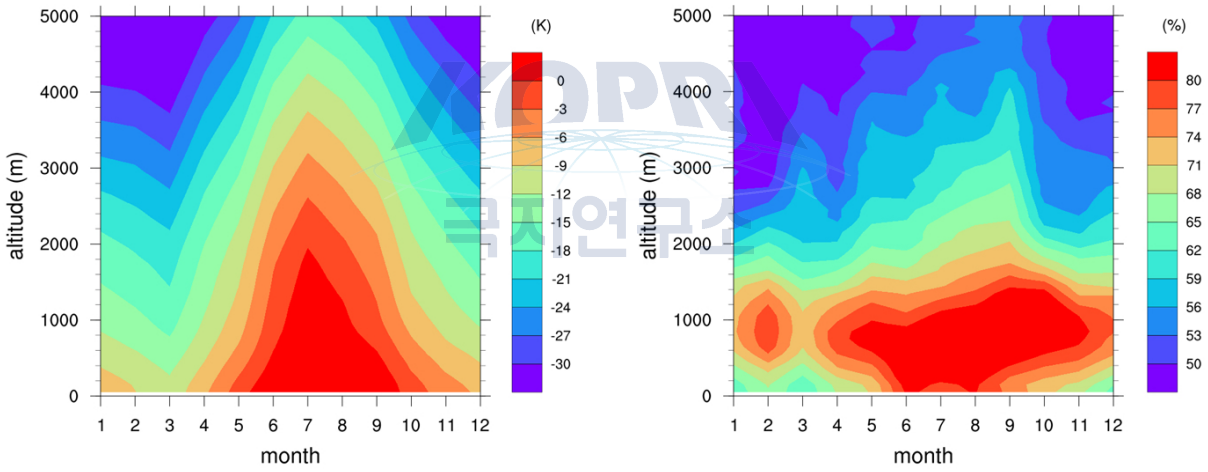


그림 3.13. 북극 다산과학기지에서 라디오존데로 관측한 월평균 기온(좌)과 상대습도(우)의 연직분포

북극 다산과학기지에서의 라디오존데 관측으로 얻은 기온과 습도의 연직 분포를 이용하여 산정한 대기경계층 고도의 월평균을 그림 3.14에 나타내었다. 기온이 가장 낮은 3월에 대기경계층 고도도 가장 낮은 값을 보였다. 가장 높은 값을 보이는 달은 뚜렷하지 않고 3월을 제외한 연중 비교적 일정한 대기경계층 고도를 가짐을 알 수 있었다. 일반적으로 북극 지역은 지표면 가열 효과가 약하기 때문에 중위도나 저위도에 비해 지표면 부근에서 연직 혼합이 활발하지 않다. 따라서, 대기경계층 내에서는 연직 혼합이 활발하다고 가정하여 온도 및 습도의 연직 분포를 이용하여 대기경계층을 산정하는 방법은 북극 지역에 적용하기 어려울 수 있다는 점을 고려해야 할 것이다.

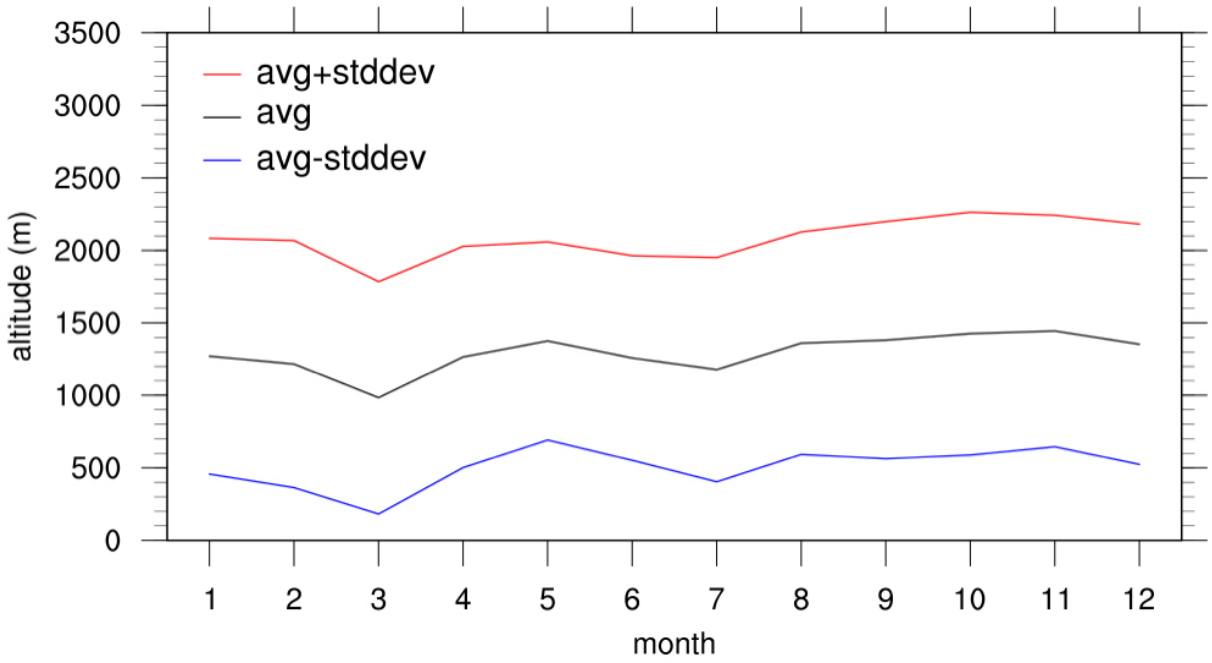


그림 3.14. 북극 다산과학기지에서 라디오존데 관측 결과를 이용하여 산정한 대기경계층 고도의 월변화

그림 3.15는 북극 지역 구름의 운저 고도를 월별로 나타낸 것이다. 북극 지역에서 활발한 대류에 의한 키가 큰 구름의 발생 빈도가 상대적으로 많지 않은 점을 고려하면, 약 1~2 km 이내의 운저 고도는 하층운의 운저 고도로 생각할 수 있다. 그림에서 볼 수 있는 것처럼 북극 지역의 운저 고도는 겨울철에 낮고 여름철에 높은 계절적 특성이 두드러졌다. 여름철 운저 고도가 높아지는 것은 앞에서 언급한 것처럼 상승응결고도와 밀접한 관련이 있다. 즉, 여름철 기온이 높아지면 상승응결고도도 높아지기 때문에, 공기괴가 상승하여 단열 냉각될 때 더 높은 고도에서 응결이 시작되고 운저 고도도 높아지게 되는 것이다. 뿐만 아니라, 일반적으로 구름은 대기경계층 이상의 고도에 생성되기 때문에, 하층운의 운저 고도의 월변동은 대기경계층의 월변동과 유사한 경향을 보일 것으로 기대되며, 여름에 높고 겨울에 낮은 대기경계층 고도의 계절 변동성을 추측해 볼 수 있다.

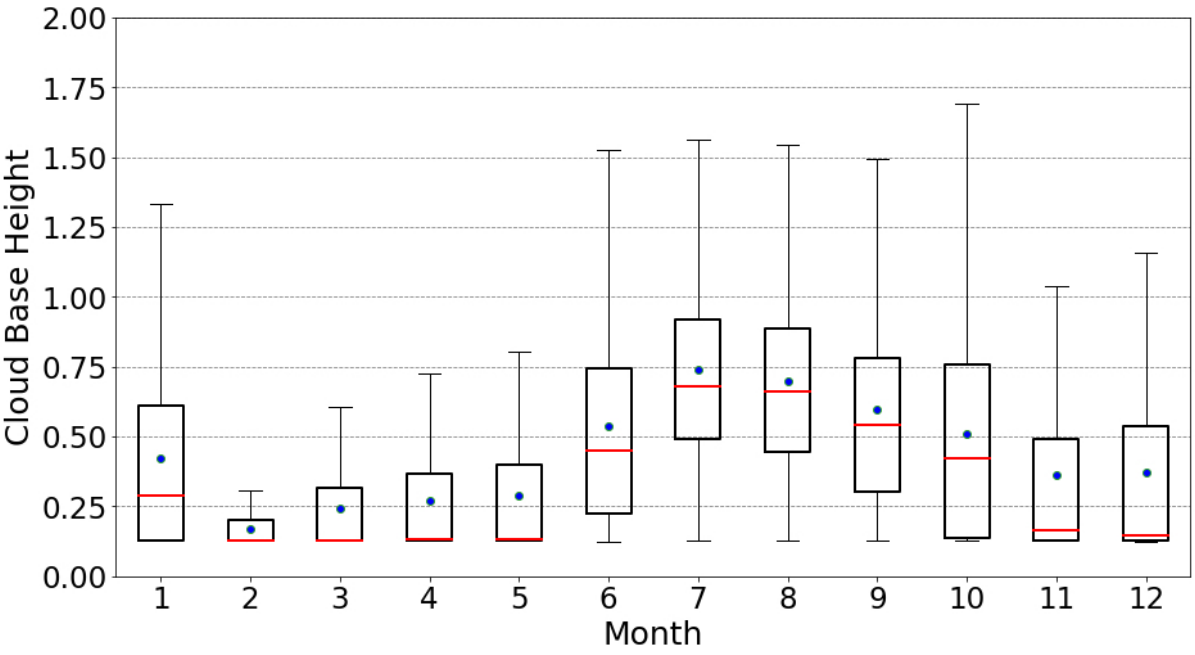


그림 3.15. 북극 지역 하층운 운저 고도의 월변화

북극 지역 하층운의 결정 유형은 그림 3.16에 나타내었다. 그림에서 확인할 수 있듯이 모든 계절에 대해 빙정 구름의 비율이 가장 높게 나타나 북극 지역 구름은 대부분 빙정으로 이루어져 있음을 알 수 있다. 혼합 구름은 약 10-20% 정도의 비중을 차지하며 연중 큰 차이를 보이지 않았다. 액체상 구름은 겨울과 봄철에는 거의 나타나지 않고, 여름철에 증가하는 것으로 나타났으며 7월에 최대 약 30% 이상까지 증가하였다.

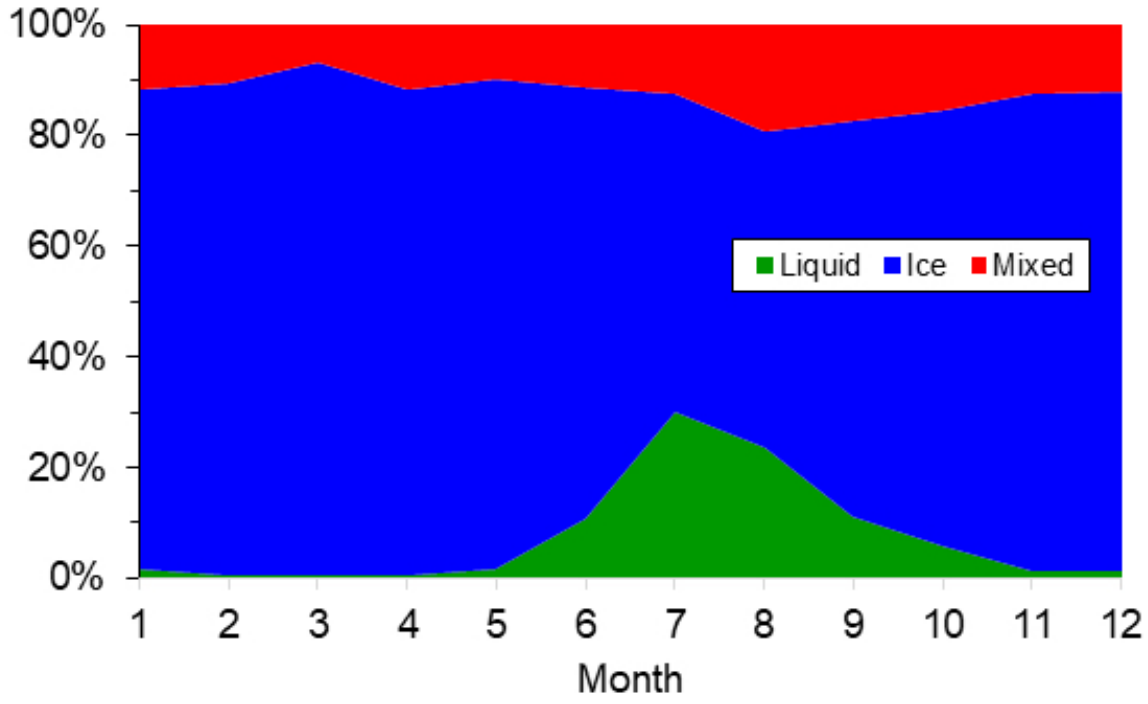


그림 3.16. 북극 지역 하층운의 액체상 구름, 빙정, 혼합상 구름의 비율 월변화

3. 아라온호 선상 관측 수행 및 분석

극지연구소의 국내 유일 쇄빙선인 아라온호의 2024년 여름 북극항해 제1항차(ARA15A)가 2024년 7월 31일부터 8월 26일 동안 북극의 척치해(Chukchi Sea)부근에서 성공적으로 수행되었다. 그림 3.17은 관측기간동안 아라온호 선상 관측의 경로를 보여준다. 아라온호 선상 관측 동안 마이크로 펄스 라이다(Micro pulse lidar; MPL), 라디오 존데(Radiosonde), 이동식 도플러 라이다(Wind doppler lidar; WDL)를 이용하여 북극해상 위에서의 구름 및 대기의 열역학 및 기하학적 특성이 관측되었다. 특히, 본 위탁과제를 수행하고 있는 서울대 김상우교수님 연구팀에서 이동식 윈드 도플러 라이다를 지원하였고 관측 자료 처리를 수행하였다. 그림 3.18은 윈드 도플러 라이다의 아라온호 설치 전경을 보여준다.

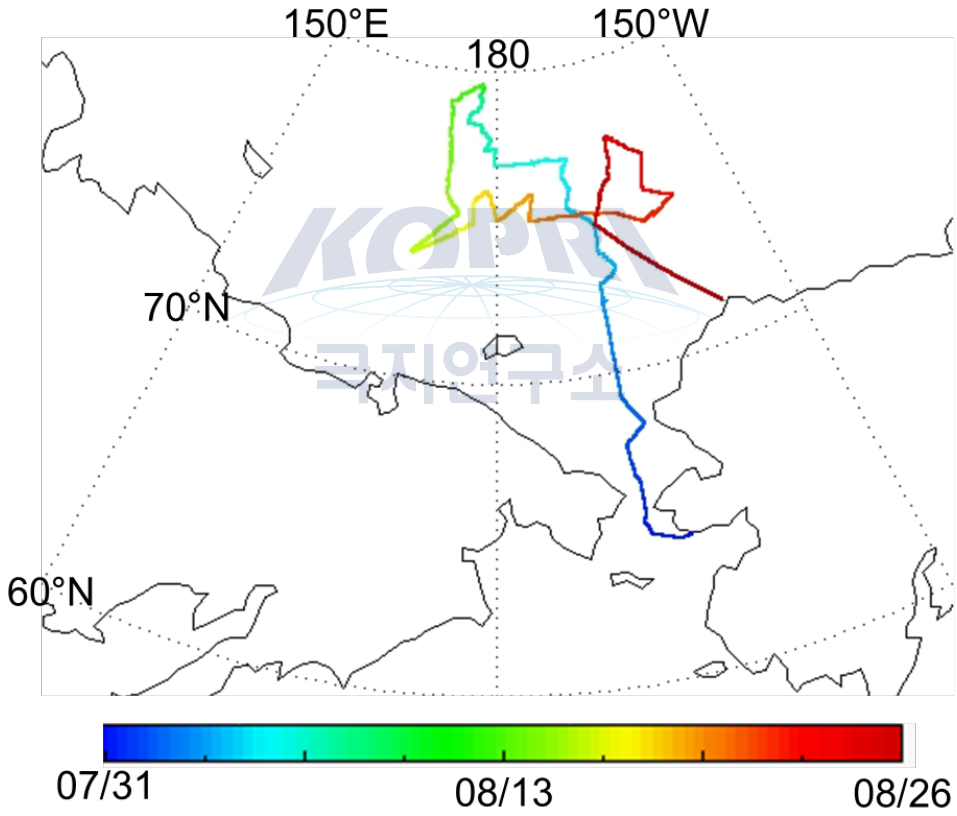


그림 3.17. 2024년 하계(ARA15A, 기간: 7월 31일-8월 26일) 북극해에서 진행된 아라온호 선상 관측 경로

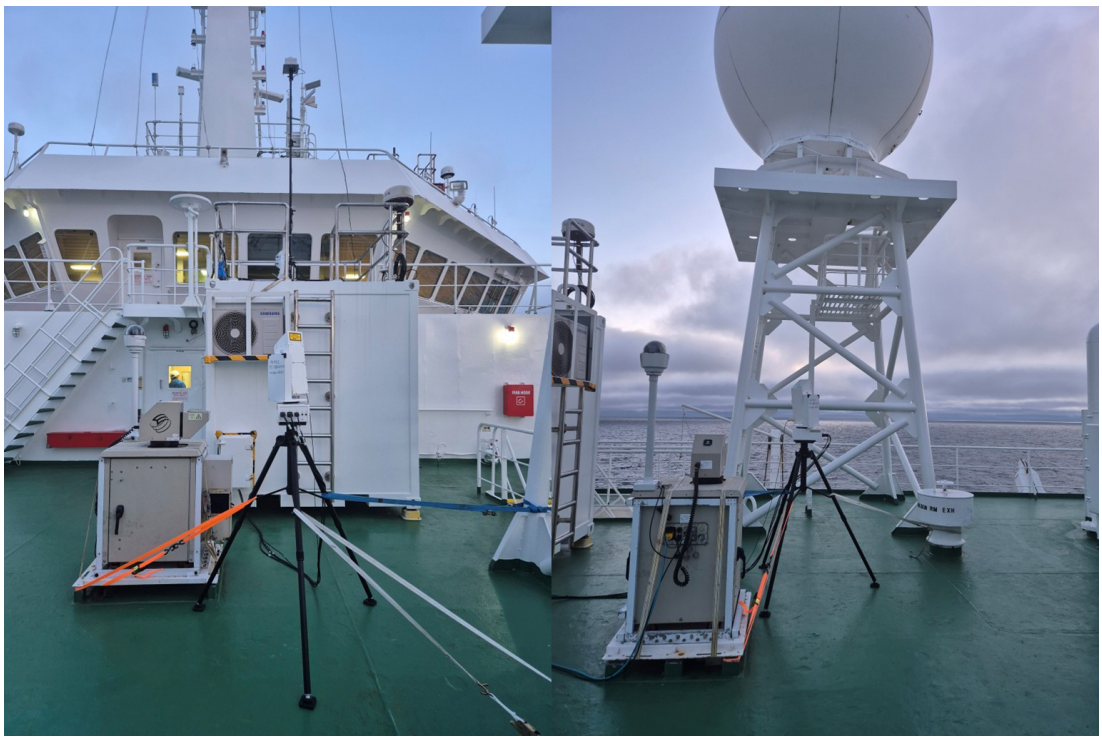


그림 3.18. 스캐닝 윈드 도플러 라이다의 아라온호 선상 설치 전경

스캐닝 윈드 도플러 라이다는 도플러(Doppler) 효과를 활용하여 바람의 방향과 속도(풍향, 풍속)을 측정하는 원격 관측기기이다. 그림 3.19a는 도플러 효과의 원리와 공식을 상세하게 보여준다. 도플러 효과란 라이다의 송신 주파수는 대기 중 존재하는 미세입자의 움직임에 의해 변화하는 것을 의미한다. 스캐닝 윈드 도플러 라이다는 이러한 원리를 이용하여 기존 송신 주파수와 미세입자에 의해 반사되어 돌아오는 수신 주파수와의 차이를 통해, 바람 벡터의 시야각 방향 성분인 시야각 속도를 측정한다. 이때, 바람의 수평 및 수직 성분을 측정하기 위해 서로 다른 여러 방향에서 시야각 속도를 관측하는 스캐닝관측을 수행한다. 그림 3.19b에서 보여주는 것처럼 3가지 또는 4가지 방향에서 관측하는 Doppler Beam Swinging (DBS)모드와 고정된 고도각에서 원추형을 그리며 관측하는 Velocity-Azimuth Display (VAD)모드를 이용할 수 있다.

측정된 시야각 속도와 레이저의 방향정보(방위각과 고도각)를 이용해 바람벡터를 산출하는 두 가지 방법이 있다. 첫 번째는 시야각 속도가 고정된 고도각에서 방위각에 대해 Sine함수 모양을 가지는 원리를 이용한 Sine-fitting method (Werner, 2005)이다. 360도 방위각에 대해 측정된 시야각을 Sine함수에 Fitting하여 얻은 상수들을 통해 바람벡터(u, v, w)를 계산할 수 있다. 두 번째는 최소제곱법(method of least squares) 중에서 Singular value decomposition (SVD) 방법을 이용하는 것이다(Paschke et al., 2014). 시야각 속도는 방향각 정보와 바람벡터의 곱으로 나타낼 수 있다. 이때, SVD를 이용하여 방향각 행렬을 변형하여 바람벡터를 계산할 수 있다. 그림 3.20은 두 가지 방법을 이용해 산출된 풍속과 라디오 존데로 관측된 값 사이 비교 결과를 보여준다. 두 방법은 서로 대체로 일치하게 풍속을 계산하였지만, Sine-fitting method가 SVD method에 비해 풍속을 약간 크게 모의하였다. 또한, 라디오 존데와 비교하여

SVD method가 상대적으로 더 낮은 편차와 평균제곱근을 보였다. 따라서 본 연구에서는 SVD method를 통해 스캐닝 윈드 도플러 라이다의 풍속을 산출하여 분석을 진행하였다.

그림 3.21은 8월 20일과 21일 아라온호에서 관측한 스캐닝 윈드 도플러 라이다의 신호 대 잡음비의 연직 구조를 보여준다. 스캐닝 윈드 도플러 라이다로부터 풍속 산출의 정확도 향상을 위해, 신호 대 잡음비(Signal to noise)가 7 dB 이상인 신호에 대해서만 풍속을 산출하였다. 이러한 과정을 통해 최종 산출한 스캐닝 윈드 도플러 라이다의 고도별 풍속을 아라온호에서 동시 관측한 라디오 존데의 결과와 비교 분석한 결과, 풍속 산출 결과가 잘 일치함을 알 수 있다(그림 3.22).

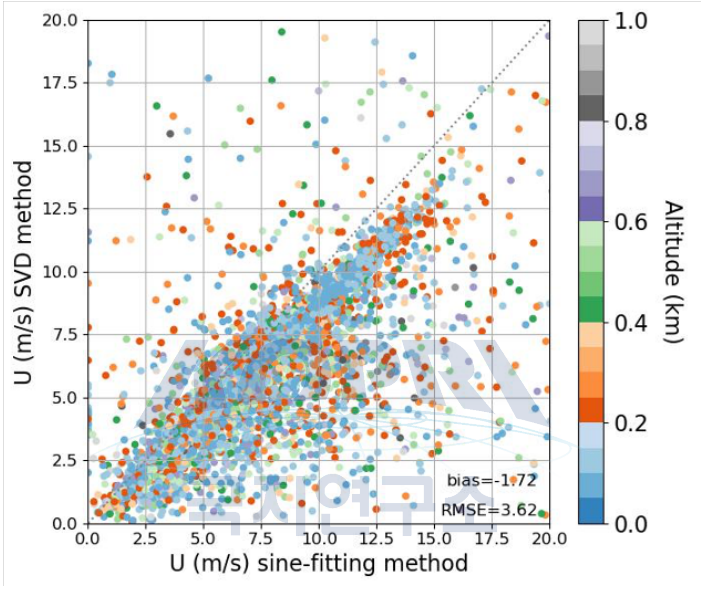


그림 3.20. 2024년 아라온호 선상관측 동안 스캐닝 윈드 도플러 라이다로 측정된 시야각 속도로부터 Sine-fitting method(빨강)와 SVD method(파랑)을 통해 산출된 고도별 풍속의 상호 비교 결과

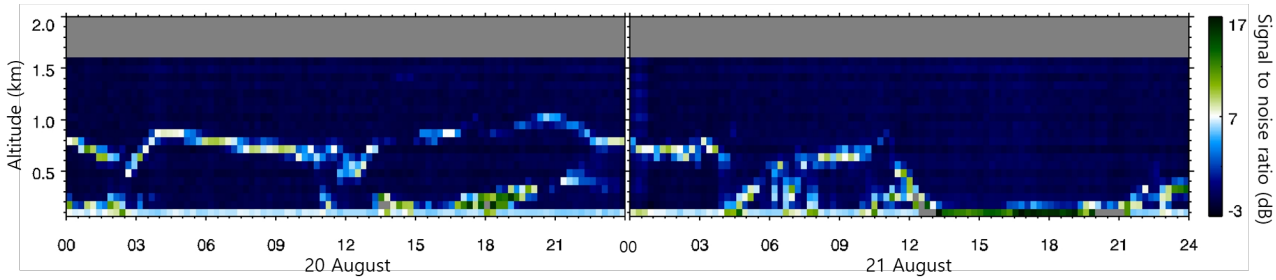


그림 3.21. 8월 20일~21일 아라온호에서 관측한 스캐닝 윈드 도플러 라이다의 신호 대 잡음비 연직 분포

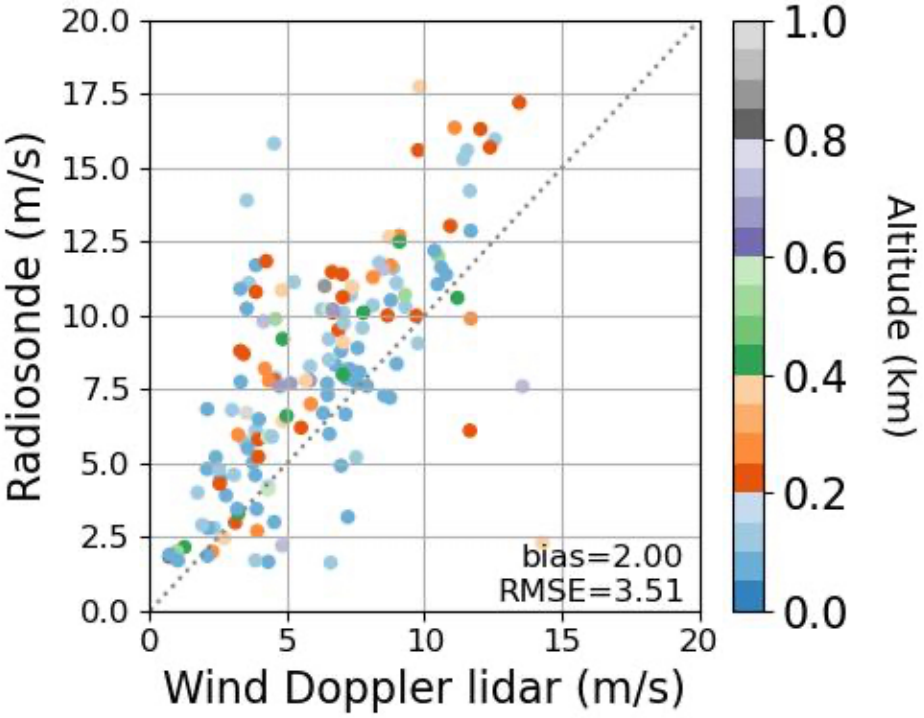


그림 3.22. 아라온호에서 스캐닝 위드 도플러 라이다와 라디오 존데로부터 관측된 풍속을 비교하는 산포도

KOPRI 극지연구소

아라온호 2024년 북극항해 기간동안 마이크로 펄스 라이다 관측도 수행되었다. 이는 레이저의 후방 산란 신호를 측정하여 대기 중 에어로졸 연직 구조 및 구름의 기저고도를 관측할 수 있다. 그림 3.23은 아라온호 관측기간 동안의 마이크로 펄스 라이다로 관측된 Normalized Relative Backscatter 연직 분포를 나타낸다. 신호가 강할수록 에어로졸 및 구름이 존재함을, 약할수록 깨끗한 대기를 의미한다. 특히, 가장 강한 신호가 나타나는 위치는 구름의 운저고도를 나타낸다. 이에 웨이브릿 공분산 변환 방법을 이용하면, 이러한 라이다 신호가 급격히 변하는 수직 고도를 찾을 수 있다. 이 고도를 운저고도로 정의하게 된다.

그림 3.24는 아라온호 북극 항해 기간 동안의 스캐닝 윈드 도플러 라이다와 마이크로 펄스 라이다로부터 측정 및 산출된 바람 및 후방산란강도의 연직구조를 보여준다. 두 관측 결과는 비슷한 연직 구조를 부여주었으며, 북극해는 라이다 신호의 강도를 높일 수 있는 에어로졸이 매우 적은 환경임을 알 수 있다. 그렇기 때문에 대기의 최하층이나 구름의 기저고도 부근에서만 풍속 산출이 가능하였다. 또한, 앞서 설명한 마이크로 펄스 라이다로부터 산출한 운저고도 결과에 따르면, 선상 관측 대부분의 기간동안 해양 위에서 구름이 발달하였으며, 특히 1 km 이내의 운저고도를 갖는 하층운이 빈번하게 관측되었다.

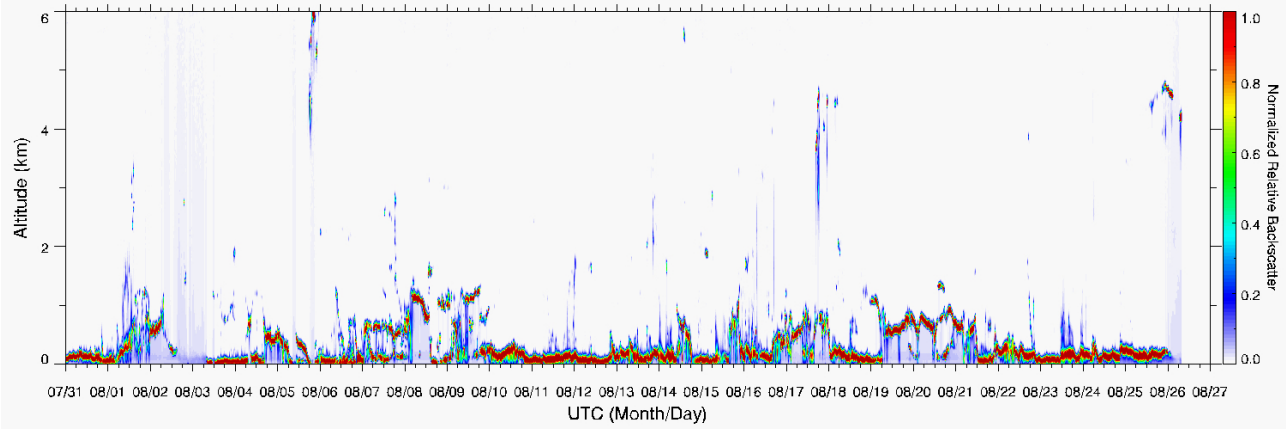


그림 3.23. 아라온호 선상 관측(ARA15A) 동안 마이크로 펄스 라이다(Micro Pulse Lidar; MPL)로 관측된 Normalized Relative Backscatter의 시간-고도 분포

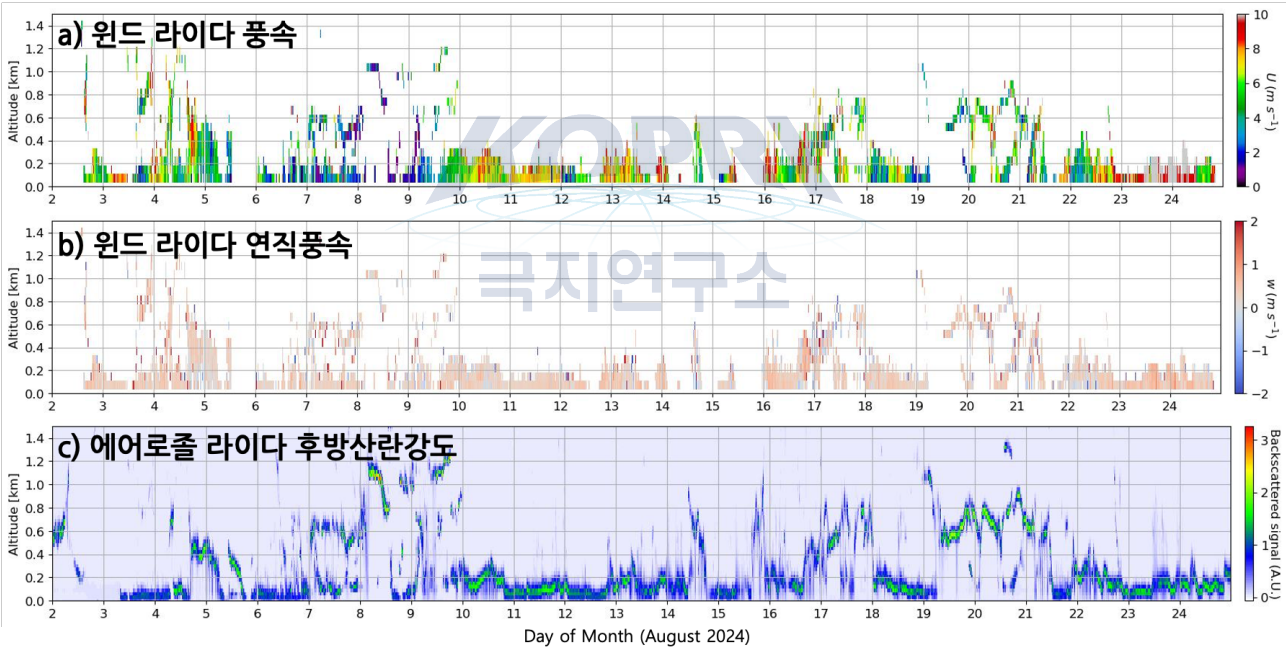


그림 3.24. 8월 2일부터 24일까지 아라온호에서 스캐닝 도플러 라이다로부터 관측된 (상) 수평 및 (중) 연직 풍속의 고도별 분포와 (하)마이크로 펄스 라이다의 후방산란강도의 연직 분포

제 2 절 북극 '해양-대기경계층-구름' 상호작용 분석

1. 관측 기반 '해양-대기경계층-구름' 연관성 분석

북극 다산과학기지 니알슨에서는 운고계, 윈드 도플러 라이다, 구름 입자 직접 관측 장비를 활용한 장기간 연속 관측이 수행되고 있으며, 이를 통해 북극 대기 구조와 물리적 특성을 종합적으로 분석할 수 있는 기반이 마련되어 있다. 특히, 이러한 자료를 결합함으로써, 구름의 기하학적 특성과 함께 기저 고도에서의 바람장을 동시에 파악할 수 있다는 장점이 있다.

2017년부터 현재까지 축적된 운고계 관측 결과를 이용해, 그림 3.25는 2017년 8월부터 2023년 11월까지 니알슨에서 관측된 구름의 운저고도 분포와 운저고도의 월별 분포를 보여준다. 북극 니알슨 지역에서는 약 1 km 부근의 운저고도가 가장 빈번하게 나타났으며, 전체적으로 운저고도 2 km 이하의 하층운이 우세하게 발생하는 특성을 보였다. 이는 북극의 높은 대기 안정도와 관련되며, 많은 선행연구에서 보고되는 것과 일치하는 결과이다(Gierens et al., 2020, refs). 계절별로 살펴보면, 겨울철(12월, 1월)의 운저고도는 여름철에 비해 상대적으로 더 높은 값을 보였으며, 그 분포 또한 넓게 관측되었다. 이는 운고계가 겨울철 북극 대기에서 강수 및 강설에 의해 하층 구름을 탐지하지 못한 것과 관련이 있을 수 있다.

구름 내부 및 경계에서의 연직 운동은 구름의 기하학적 및 미세물리 특성과 수명에 영향을 미치는 중요한 요인으로 알려져 있다(Shupe et al., 2008). 하지만 운저고도에서 연직운동을 정량적으로 분석한 장기간 관측 연구는 드물고 모델 모의에도 한계가 존재하기 때문에, 관측 확장 및 모델 개선을 통해 활발한 연구가 필요한 분야이다(Tonttila et al., 2011). 그림 3.26은 2021년 8월과 11월에 윈드 도플러 라이다로 산출된 연직 바람 속도와 운고계로 산출된 운저고도를 동시에 보여준다. 이처럼 운고계와 윈드 도플러 라이다의 대기 연직 구조에 대한 관측 결과를 종합적으로 이용하여, 하층운 운저고도에서의 연직 바람장을 조사하였다. 그 결과, 니알슨에서는 하층운 운저고도 부근에서 하강기류가 전체의 약 88%를 차지하여 상승기류에 비해 지배적으로 관측되었으며, 하강기류의 크기는 주로 -0.2 m/s에서 -0.6 m/s 범위에 집중되어 있었다(그림 3.27). 계절별로는 여름철에 하강기류의 비율이 약 90%까지 증가한 반면, 겨울철에는 약 85%로 다소 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 향후 수치모델 및 위성 관측 자료와의 비교를 통해 북극 구름-경계층 상호작용에 대한 이해를 심화하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

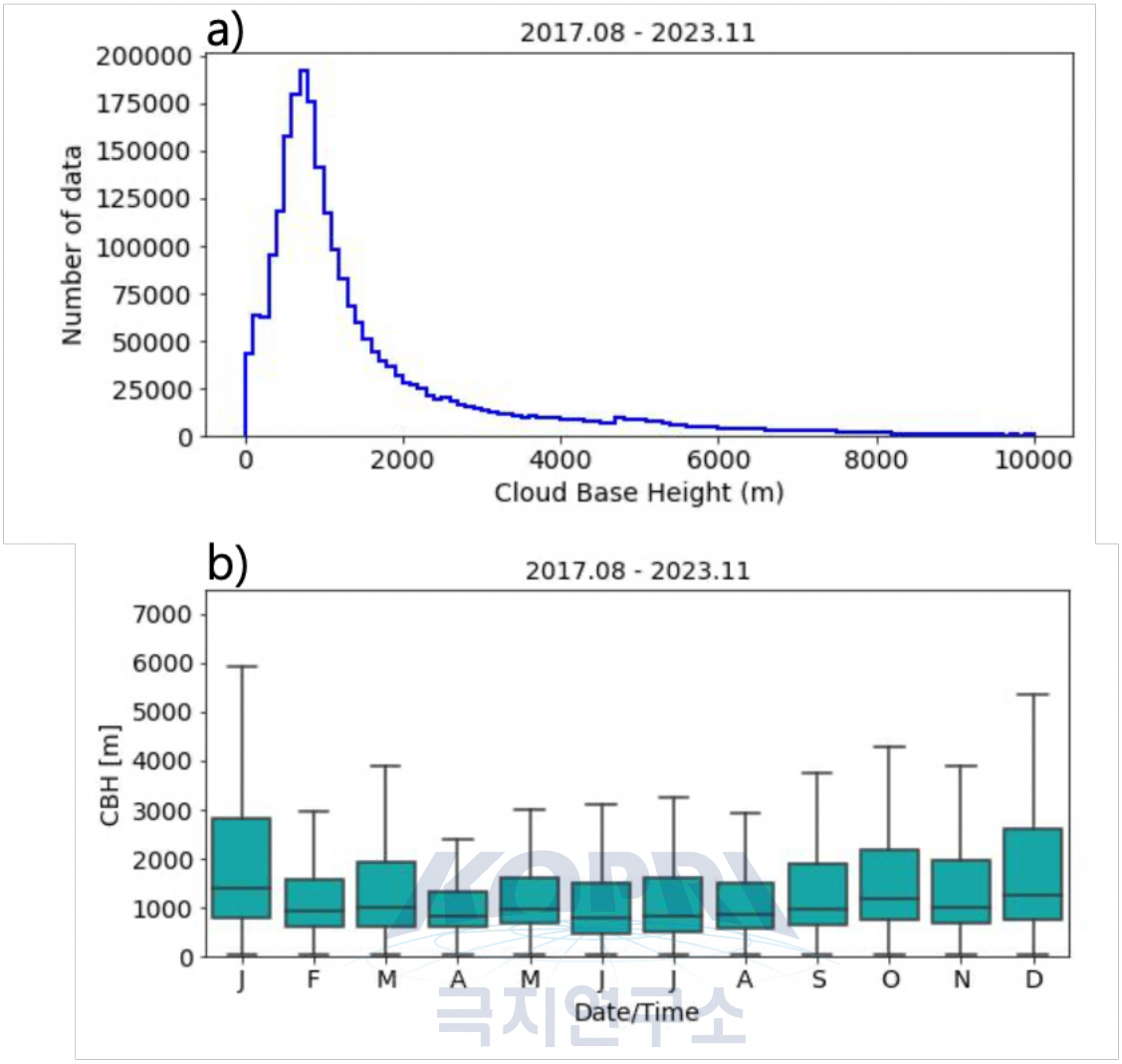


그림 3.25. (상) 2017년부터 2023년까지 북극 다산과학기지(니알슨) 관측소에서 관측한 운고계의 운저고도 분포표, (하) 운저고도의 월별 분포표

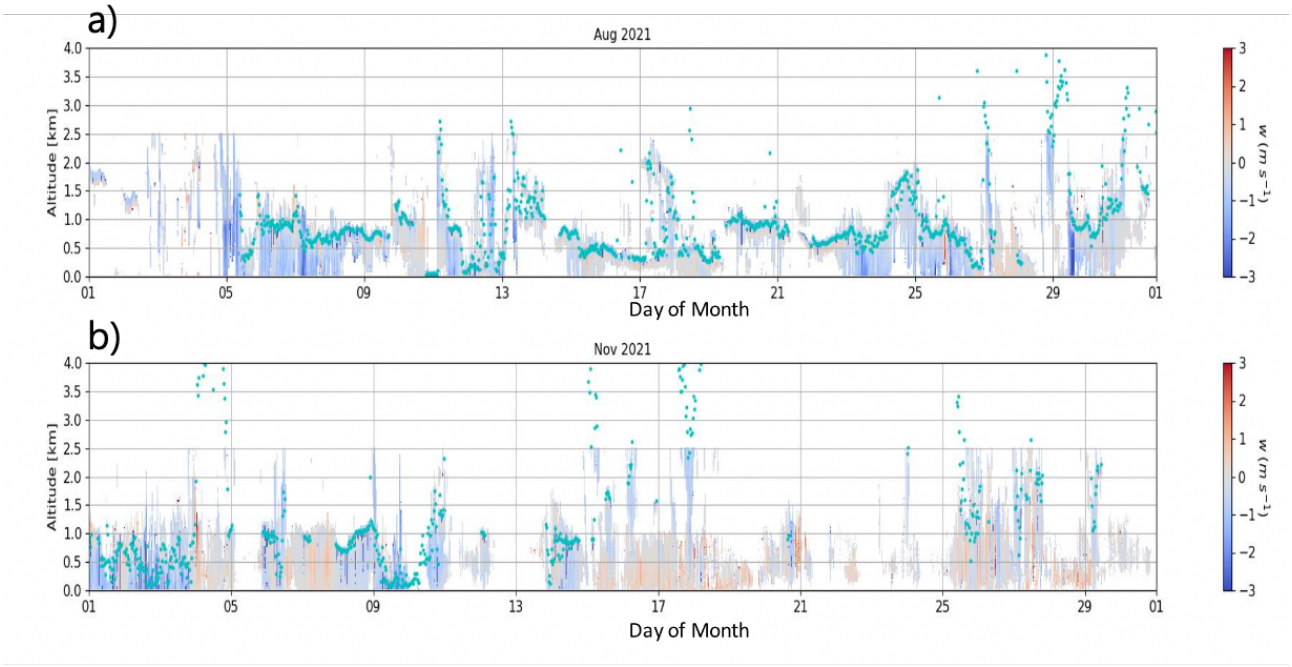


그림 3.26. (상) 2021년 8월, (하) 2021년 11월에 관측된 연직 바람 풍속(컬러바) 및 운저고도(초록색 점)

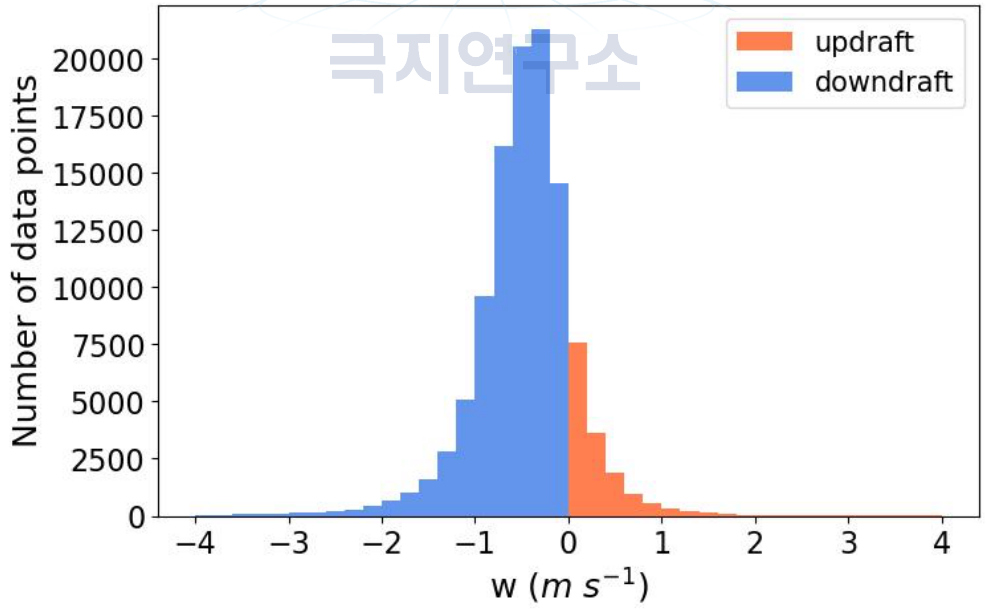


그림 3.27. 운저고도 부근에서의 연직 풍속 빈도분포표

북극 다산과학기지 니알슨의 제플린 관측소(Mt. Zepplin; 해발고도 474 m)에서 Cloud Droplet Probe (CDP)와 Back-scatter Cloud Probe with Polariztion Detection (BCPD) 장비를 활용하여 구름의 미세물리 특성(구름 입자의 수농도, 구름 입자 크기 분포, 액체수함량, 편광 소멸도 등)을 관측해 오고 있다. CDP는 2019년 9월부터 2023년 9월까지, BCPD는 2019년 6월부터 2024년 3월까지의 관측 자료를 수집하여 분석에 활용하였다. 제플린 관측소는 해발고도 474 m에 위치하며 직접 관측이기 때문에, 구름이 관측기기 고도에 위치한 경우에만 관측을 수행할 수 있다. 이러한 지상 직접 관측은 실제 구름 입자의 실제 분포와 농도를 정밀하게 파악할 수 있다는 장점이 있다. 관측 결과에 따른 구름 입자 수농도(Number concentration)와 액체수함량(Liquid water content; LWC)의 약 3년간의 시계열을 그림 3.28에 나타내었다. 이때, 2021년 말부터 2022년 초까지 관측은 수행되지 않았다. 시계열 분석 결과, 구름 입자 수농도는 여름에는 약 500 cm^{-3}를 상회하는 높은 값을, 겨울에는 200 cm^{-3} 이하로 감소한 낮은 값을 보이는 계절 변동성을 나타내었다. 액체수함량은 구름 입자 수농도 보다 계절 변화의 폭이 작았으나, 여름에 상대적으로 높고 겨울에 낮은 동일한 계절 경향을 보여주었다. 제플린 관측소에서 관측된 북극 구름의 액체수함량은 전반적으로 1 g m^{-3}을 넘지 않는 비교적 낮은 범위였으나, 2022년 7-8월 경에는 액체수함량과 구름 입자 수농도가 동시에 크게 증가하는 모습이 확인되었다.

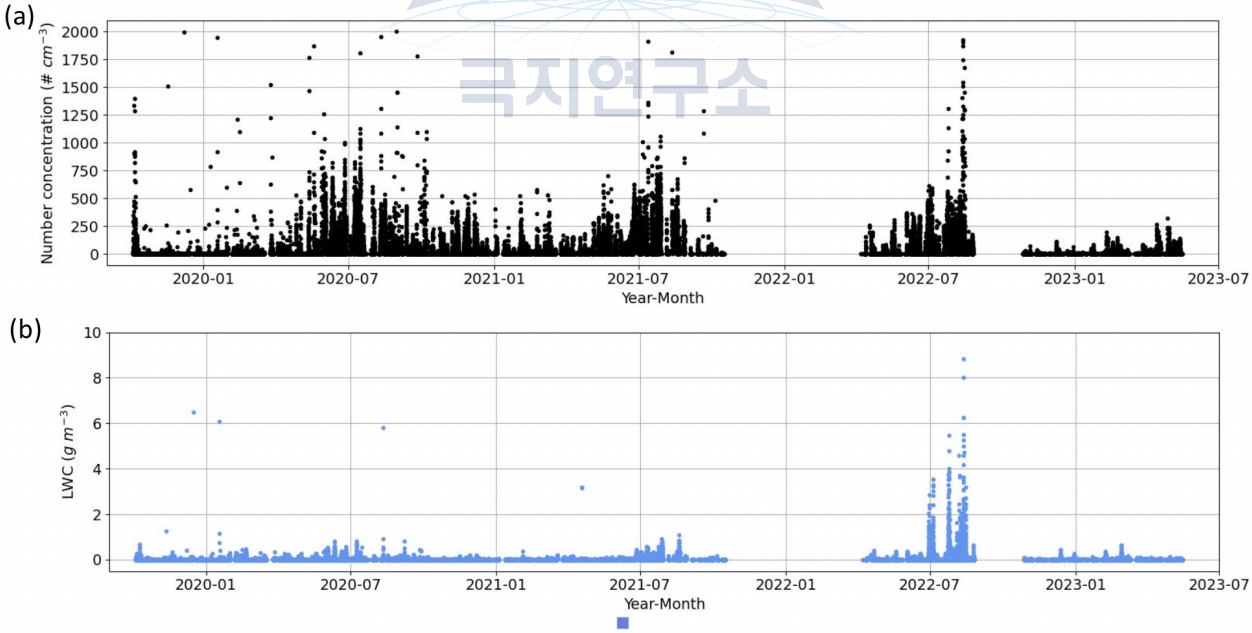


그림 3.28. Mt. Zepplin 관측소에서 2019년 9월부터 2023년 6월까지 관측한 (상) 구름 입자 수농도와 (하) 액체수함량

북극 니알슨 지역에서 운고계와 윈드 도플라 라이다의 종합적인 분석을 통해 구름 운저고도 부근의 연직 바람 방향(상승/하강 기류) 및 속도를 분석한 것처럼, 니알슨에서 관측된 구름을 기준으로 제플린 관측소에서 관측된 구름의 미세물리 특성과의 관계를 분석하였다. 그림 3.29는 구름 운저고도 부근에서의 연직 바람 방향에 따른 구름 입자 수농도와 액체수함량의 분포를 보여준다. 운저고도 부근에서 상승기류가 발달한 구름에서 관측된 입자 수농도와 액체수함량의 평균과 중간값은, 하강기류가 발달한 경우보다 전반적으로 더 낮은 값으로 나타났다. 이러한 결과는 선행연구에서 보고된 일반적인 경향과는 상반된다. 기존 연구에 따르면, 상승기류는 공기의 단열 상승과 냉각을 통해 과포화도를 증가시키고, 더 많은 에어로졸 입자를 구름물방울로 활성화시켜 구름 입자 수농도와 액체수함량, 나아가 구름의 수명을 증가시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Shupe et al., 2008). 그러나 본 연구에서는 상승기류 조건에서 오히려 상대적으로 낮은 입자 수농도와 액체수함량이 관측되었다. 이러한 차이는 니알슨 지역의 지상 원격 관측 자료와 제플린 관측소의 직접 관측 자료를 통합하여 분석한 데에서 기인했을 가능성이 있다. 두 관측소는 지리적으로 비교적 가까운 거리에 위치하고 있으나, 구름은 수평 및 수직 방향으로 작은 규모에서도 매우 큰 변동성을 가지며 변화한다. 따라서 동일 시각에 두 관측소에서 관측된 구름이 반드시 동일한 구름 시스템을 대표한다고 보장할 수 없다. 즉, 운저고도에서의 연직 바람 특성은 니알슨 지상 관측소 상공의 구름을 반영하는 반면, 제플린 관측소에서 관측된 메세물리 특성은 국지적인 구름 구조를 반영했을 가능성이 존재한다. 이러한 공간적·시간적 비동시성은 상승 및 하강 기류에 따른 구름 미세물리 특성의 관계를 약화시키거나 왜곡시켜, 본 연구에서 기존 연구와 상반된 결과가 도출되는 데 기여했을 것으로 판단된다. 아울러, 해당 지역의 연직 운동 특성과 구름 미세물리 과정 간의 상호작용에 대한 이해는 아직 충분하지 않으며, 이를 보다 명확히 규명하기 위해서는 향후 추가적인 관측 자료 확보와 함께 모델을 활용한 정량적인 분석이 병행될 필요가 있다.

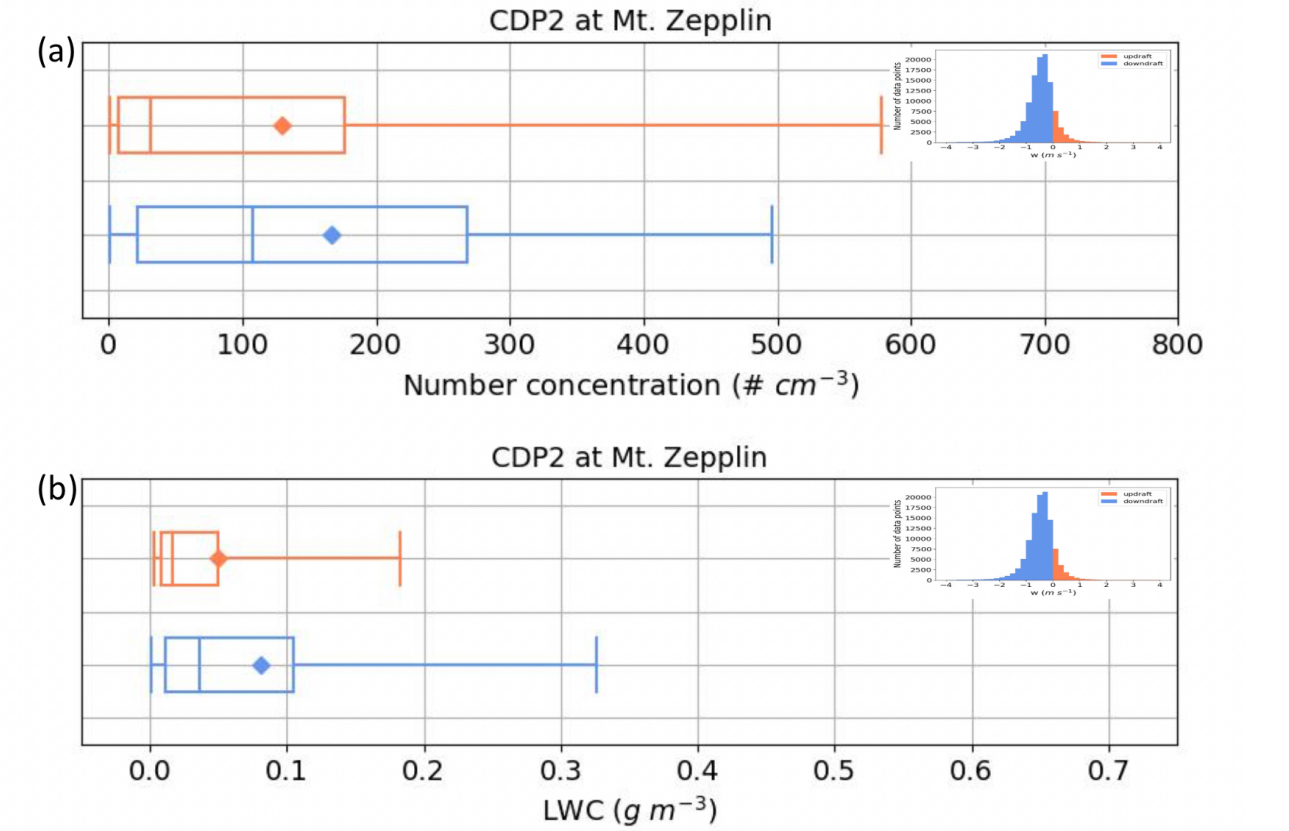


그림 3.29. 운저고도 부근의 연직 바람 방향에 따른 (상) 구름 입자 수농도, (하) 액체수함량 분포표

KOPRI 극지연구소

2024년 북극항해 제1항차(ARA15A) 동안 아라온호 선상에서는 2024년 7월 31일부터 8월 26일까지 북극 척치해(Chukchi Sea) 인근 해역에서 다양한 대기 원격 관측 장비를 활용한 종합적인 구름 및 대기 구조 관측이 수행되었다(3장-1절-3 참조). 해당 관측 기간 동안 마이크로펄스 라이다(Micro Pulse Lidar, MPL)를 이용한 연속 관측 결과를 이용해 운저고도를 산출하였다. 그 결과에 따른, 2024년 여름 북극 해상에서는 약 1 km 이내에 위치한 하층운이 빈번하게 발생하는 것을 확인하였다(그림 3.30a). 하층운은 여름철 북극에서 흔히 나타나는 구름 유형으로, 해빙 감소로 인한 개방해양(open ocean) 증가와 표면 열 및 수증기 플럭스의 영향으로 형성 및 유지되는 것으로 알려져 있다.

앞서 니알슨 및 제플린 관측소에서 진행했던 분석처럼, 아라온호 선상관측 동안 관측된 구름의 운저고도 부근에서 바람 구조를 분석하기 위해 이동식 스캐닝 도플러 라이다와 마이크로펄스 라이다 관측 자료를 함께 활용하였다. 아라온호 이동식 스캐닝 도플러 라이다의 관측 방법 및 바람 벡터 산출 과정에 대해서는 이미 논의한바 있으며, 동시 관측된 라디오 존데 결과와 잘 일치함을 이미 확인하였다. 그림 3.30b와 3.30c에 따르면, 아라온호 선상관측 기간 동안 운저고도 부근에서는 상승기류가 하강기류에 비해 현저히 우세하게 나타났으며, 전체 관측 사례 중 약 83%에서 상승류가 관측되었다. 그리고 상승기류의 크기는 주로 0 m/s에서 0.4 m/s까지 범위에 집중되어 있었다. 이와 같은 결과는 그림 3.27에 나타난 니알슨 관측소에서의 경

향성과 정반대였다. 이는 지표면 특성과 대기 경계층 특성과 밀접한 관련이 있는 것으로 해석된다. 아라온호 선상관측은 여름철 해빙이 감소한 개방해양에서 진행되기 때문에, 해수면으로부터의 감열 및 잠열 공급이 증가함에 따라 하층 대기의 연직 혼합과 상승기류가 강화될 수 있따. 이러한 상승기류는 하층운의 형성 및 유지, 그리고 구름의 미세물리적 특성 변화에 중요한 역할을 할 수 있다. 반면, 니알슨 관측소는 육지 및 주변 산악 지형의 영향으로 지표 복사냉각이 강화되어 비교적 안정적인 대기 경계층이 형성될 수 있다. 이에 따라 아라온호 해상 관측 결과에 비해 운저고도에 하강기류가 더 빈번하게 관측될 수 있다. 이러한 관측 결과는 북극 해역에서의 구름-경계층 상호작용을 이해하는 데 중요한 기초 자료로 활용될 수 있으며, 향후 선상 관측 자료와 미세물리 관측, 수치모델 결과를 결합한 추가 분석을 통해 '지표(육지 및 해양)-대기경계층-구름' 상호관계를 보다 정량적으로 규명할 필요가 있다.

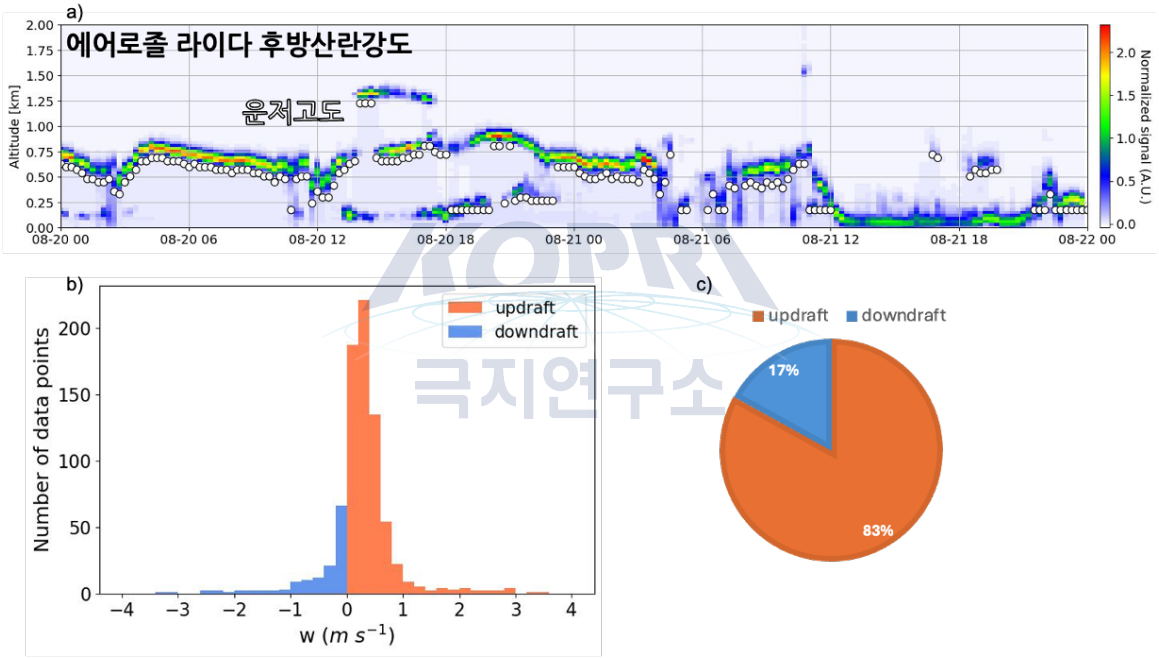


그림 3.30. (상) 2차년도(2024년) 8월 20일부터 22일까지 아라온호에서 마이크로 펄스 라이다(MPL)로 관측된 후방산란강도와 웨이브릿 공분산 변환을 통해 산출한 운저고도(하얀색 점). (하) 아라온호 관측 기간동안 이동식 스캐닝 도플러 라이다로 관측된 운저고도 부근 바람장 분포와 비율

2. 기후 모델의 구름 모의 검증

본 연구에서는 기후모델이 북극 구름의 구름 특성을 얼마나 현실적으로 모의하는지를 평가하는 것을 목적으로 한다. 일반적으로 기후모델에서 나타나는 구름 특성의 편차는 복사 에너지 수지의 오차로 이어지며, 이는 다시 표면 및 대기 온도의 편차를 유발하여 북극 기후 모의의 불확실성을 증폭시키는 주요 요인으로 작용한다(Yeo et al., 2022). 따라서 다양한 관측 자료를 활용하여 모델의 구름 특성 재현 능력을 체계적으로 검증하고, 그 한계와 개선 가능성을 분석하는 것은 매우 중요하다.

이를 위해, 본 연구에서는 대기, 해양, 해빙, 지표 과정이 상호 결합된 전지구 지구시스템 모델인 Community Earth System Model version 2 (CESM2)와 CESM2의 대기 구성요소로서, 에어로졸-구름-복사 과정을 높은 정확도로 모의하는 Community Atmosphere Model version 6 (CAM6)의 장기간 모의 결과를 분석에 활용하였다(표 1). CESM2를 이용해 2006년부터 2016년까지 겨울철 구름 특성을 모의하였으며, CAM6를 이용해 2006년부터 2020년까지의 여름철 북극 구름 특성을 모의하였다. 이후 여름 및 겨울철 장기간 평균 구름 비율을 산출하고, 이를 두 종류의 위성 관측 자료를 기준으로 검증을 수행하였다. 관측 자료로는 먼저 NASA의 Terra 및 Aqua 위성에 탑재된 수동형 센서인 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) 자료를 활용하였다. MODIS는 넓은 관측 범위와 비교적 높은 시공간 해상도를 바탕으로 구름 비율의 장기적 공간 분포 및 변동성을 분석하는 데 널리 사용되고 있다. 또한, 94 GHz의 클라우드 레이더(Cloud Radar)를 탑재한 CloudSat 위성과 라이다 기반의 Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation (CALIPSO) 위성 자료를 결합한 자료를 함께 사용하였다. 이 두 능동형 센서는 구름의 연직 구조를 보다 상세히 관측할 수 있어, 모델의 구름 수직 구조 재현 능력을 평가하는 데 중요한 기준 자료로 활용되고 있다.

표 3.1. 구름 모의 검증 및 '해양-대기경계층-구름'간 상호작용 연구에 사용된 전지구 모델 정보 요약

Community Earth System Model version 2 (CESM2)	Community Atmosphere Model version 6 (CAM6)
대기, 해양, 해빙, 지표 결합 기후 모델	대기 모델
2006년 - 2016년, 겨울	2006년 - 2020년, 여름

그림 3.31은 2006년부터 2016년까지 겨울철 평균 북극 구름 비율의 공간 분포에 대한 CESM, MODIS, CloudSat & CALIPSO (CC)의 결과를 비교하여 제시한 것이다. 기후 모델과 두 위성 관측 자료 모두에서 겨울철 구름 비율은 해빙이 없는 해양 지역에서 상대적으로 높았고, 해빙이 분포하거나 육지의 적설로 덮인 지역에서는 낮은 공간적인 패턴을 보였다. 특히 저기압이 빈번하게 지나가는 북대서양 해안 지역에서는 구름 비율이 0.9 이상으로 가장 높은 값을 나타냈다. 이는 겨울철에도 해빙이 형성되지 않는 개방해양에서 지표로부터의 수분 및 열 플럭스가 증가하여, 이로 인해 구름 형성이 활발해진 결과로 해석된다. 그러나 이러한 공간 분포의 유사성에도 불구하고, 모델과 관측 간 구름 비율의 절대값에서는 뚜렷한 차이가 확인되었다. 그림 3.31의 두 번째 행에 제시된 편차 지도에 따르면, CESM2는 전반적으로 관측에 비해 겨울철 구름 비율을 과대모의하는 경향을 보였다. 이는 선행연구에서 보고하고 있는 CESM2의 대기 모델인 CAM6에서 사용되는 난류와 구름 통합 스킴이 차갑고 건조한 북극 환경에서 구름을 과대 모의하는 경향과 일치한다(Bae et al., 2023). 특히 시베리아 내륙, 그린란드 및 캐나다 해안 인근에서 모델과 관측 간의 편차가 가장 크게 나타났으며, 반대로 모델과 관측 모두에서 높은 구름 비율을 보였던 북대서양 해안 지역에서 상대적으로 작은 편차가 확인되었다. 이러한 편차의 공간 분포는 MODIS와 CC 위성 관측 자료에서 전반적으로 일치하였으나, MODIS가 CC에 비해 모델과의 차이를 더 크게 나타내는 경향을 보였다.

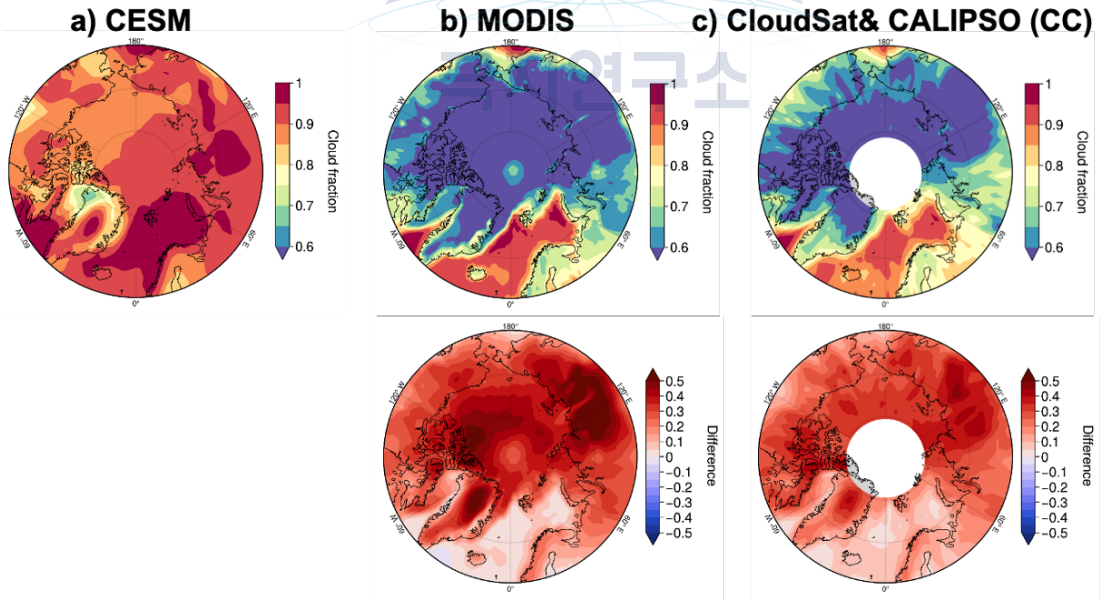


그림 3.31. 2006년부터 2016년까지 북극 겨울철 평균 구름 비율의 (좌) CESM 모의 결과, (중) MODIS, (우) CloudSat & CALIPSO (CC) 관측 결과. 두 번째 줄은 모델 결과와 각각 관측 결과의 차이

그림 3.32는 2006년부터 2020년까지 여름철 평균 북극 구름 비율의 공간 분포에 대한 CAM6, MODIS, CloudSat & CALIPSO (CC)의 결과를 보여주고 있다. 겨울철과 달리, 여름철 장기간 평균 북극 구름의 공간적인 분포는 모델과 관측 사이에서 뚜렷하게 상반된 양상을 나타냈다. CAM6 모델 모의 결과에서는 해빙 비율이 높은 북극해 중심부에서 구름 비율이 가장 높고,, 북대서양 및 육지 지역에서 상대적으로 낮은 값을 보여주었다. 반면에, MODIS와 CC 위성 관측 자료에서는 겨울철과 유사하게 북대서양에서 구름 비율이 가장 높게 나타났으며, 북극해 중심부와 육지 지역에서는 상대적으로 낮은 구름 비율이 관측되었다. 이러한 차이는 그림 3.32의 두 번째 행에 제시된 모델과 관측 사이 편차 지도에서 더욱 명확하게 확인된다. 관측에 비해, CAM6는 북대서양 지역에서는 구름 비율을 과소모의하는 반면, 북극해와 그 외 다른 지역들에서는 전반적으로 과대모의하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 여름철 북극에서 해빙 분포, 표면 에너지 플럭스 및 구름 미세물리 과정 등에 대한 모델 계산이 관측과 차이를 보일 가능성을 시사한다. 또한, 겨울철 CESM2 결과와 유사하게, 여름철 북극 구름에 대한 CAM6의 편차 역시 CC보다 MODIS 위성 관측 자료와의 비교에서 더 크게 나타났다.

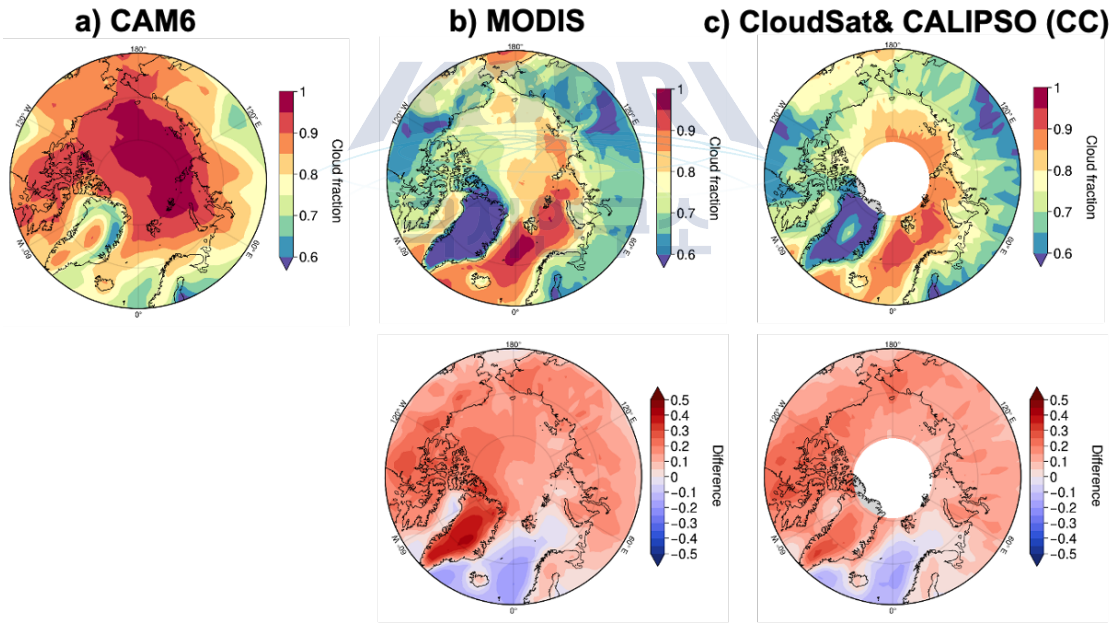


그림 3.32. 2006년부터 2020년까지 북극 여름철 평균 구름 비율의 (좌) CAM6 모의 결과, (중) MODIS, (우) CloudSat & CALIPSO (CC) 관측 결과. 두 번째 줄은 모델 결과와 각각 관측 결과의 차이

3. 모델 기반 '해양-대기경계층-구름' 연관성 분석

본 연구에서는 앞서 관측 기반으로 분석한 '해양-대기경계층-구름' 간의 상호작용에 대해, 장기간 모델 모의 결과를 활용해 모델 기반 상호 연관성을 분석하고자 한다. 이를 통해 지표와 대기 간의 물리 과정을 이해할 수 있을 뿐만 아니라, 모델 구름 모의와 관측 사이 편차를 감소시키기 위한 실마리를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

북극 구름과 관련된 물리과정의 겨울철 특성은 CESM2의 결과를, 여름철 특성은 CAM6의 결과를 활용하여 분석을 진행하였다. 그림 3.31과 그림 3.32에서 제시되는 것처럼 구름 비율의 공간적인 분포나 모델과 위성 관측 결과 사이 차이는 지표 특성에 따라 다른 모습을 보였다. 이에 따라 지표 해빙 농도 비율과 하층운의 발생 비율의 관계를 그림 3.33에서 살펴보았다. 겨울철에는 해빙 비율이 증가할수록 하층운 비율이 감소하는 경향이 나타나는 반면에, 여름철에는 해빙 비율이 감소할수록 하층운이 증가하는 상반된 관계를 보였다. 이는 모델 내에서 구름을 형성하는 열역학적 과정과 관련된 결과로 생각된다. 겨울철에는 해빙이 없는 개방 해양의 온도가 대기 온도보다 상대적으로 따뜻하여, 지표에서 열 및 수분 플럭스의 증가가 하층운 발생에 유리한 조건이 형성하게 된다. 이에 따라, 해빙 농도가 작을수록 하층운 비율이 증가하는 결과로 이어질 수 있다. 여름철에도 개방 해양에서 수분 및 열 플럭스로 인해 구름 형성이 유리하다. 하지만 강한 단파 복사가 존재하기 때문에, 해빙의 차가운 표면에서 하층 대기 안정도가 증가하게 된다. 이로 인해 안정된 경계층 내에서 해빙 위에서 하층운이 오래 유지되게 된다. 따라서 여름철에 관측과는 다르게 해빙 농도가 큰 지역에서 하층 구름이 과대 평가되어 상반된 관계가 나타나는 것으로 추측된다.

KOPRI 극지연구소

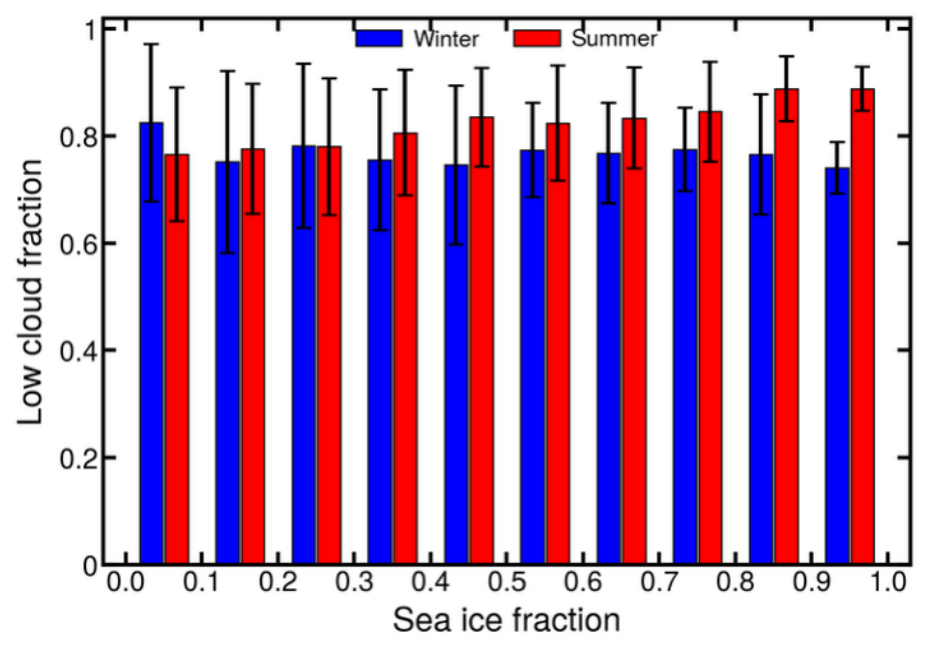


그림 3.33. CESM과 CAM6로 각각 모의된 겨울(파랑), 여름철(빨강) 동안 지표 해빙 비율에 따른 하층운 발생 비율의 분포

그림 3.24는 겨울과 여름철에 각각 지표 해빙 농도에 따른 하층운 발생 높이의 변화를 제시하고 있다. 이를 통해 지표, 대기경계층, 구름 간의 상호 연관성을 보다 자세히 살펴볼 수 있다. 겨울과 여름에 모두 지표 해빙 농도가 높을수록 하층 구름이 빈번하게 발생하는 운저고도가 낮아지는 경향을 보였다. 해빙 농도가 높은 곳에서 상대적으로 차가운 표면으로 인해 안정한 대기 경계층이 형성되기 때문에, 하층운이 높은 고도까지 성장하는 것이 어렵게 된다. 반면에, 해빙 농도가 낮아질수록 개방 해양의 비율이 증가하게 되어, 상대적으로 활발한 난류 및 수분 공급으로 인해 하층운이 더 높은 고도에 형성될 수 있다. 이러한 현상은 계절에 상관없이 동일하지만, 여름철에 해빙 농도에 따른 하층운의 발생 고도의 변화가 잘 나타난다. 따라서 겨울과 여름 모두에서 해빙 농도는 하층운 발생 높이를 결정짓는 중요한 요소이며, '해빙-대기경계층-하층운' 간의 상호작용을 이해하는 데 중요한 지표가 될 수 있다.

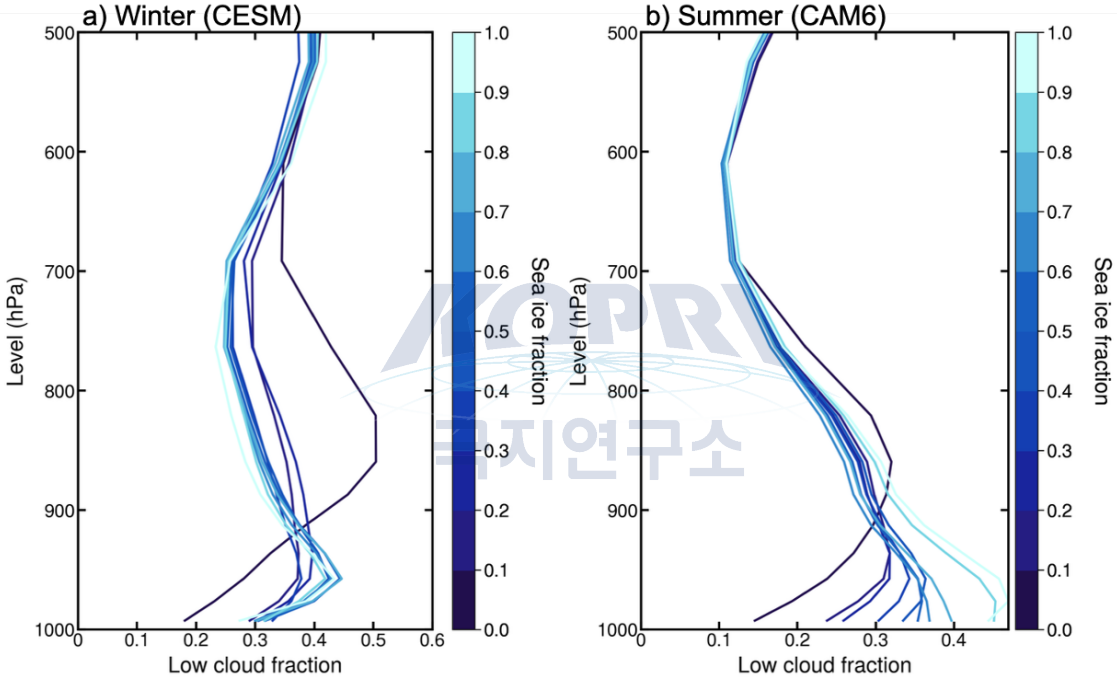


그림 3.24. CESM과 CAM6로 각각 모의된 (좌) 겨울, (우) 여름철 동안 지표 해빙 비율에 따른 구름 발생 수직 분포

그림 3.25는 모델에서 모의된 겨울과 여름철 동안 하층운 발생 비율에 따른 지표 온도 분포를 보여준다. 계절에 상관없이 나타난 특징은, 하층운 발생 비율이 적을 때보다 하층운이 많이 발생할 때 지표온도의 분포가 상대적으로 높은 온도 쪽으로 치우친다는 점이다. 이는 하층운의 하향 장파복사가 지표 냉각을 억제하고 지표 에너지 수지에 기여함으로써, 구름이 많을수록 지표 온도가 높아지는 현상을 반영한다. 즉, 하층운이 '해빙-대기경계층-하층운-지표온도' 간의 복합적인 상호작용에서 핵심적인 역할을 수행한다는 것을 시사한다. 이러한 결과는 북극에서 구름을 정확히 모의하는 것이 모델의 지표 온도 편차를 줄이고 장기 예측 정확도를 높이는 중요한 요인임을 보여준다. 동시에, 각 모델이 구름, 난류, 복사과정 등 물리과정을 구현하는 방

식이 다르기 때문에, 다양한 북극 관측 자료와 여러 모델을 활용한 정량적인 비교 분석이 필수적이다. 이러한 비교를 통해 '해빙-대기경계층-하층운-지표온도' 간의 상호작용에 대한 물리적 이해를 심화하고, 북극 기후 모의의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

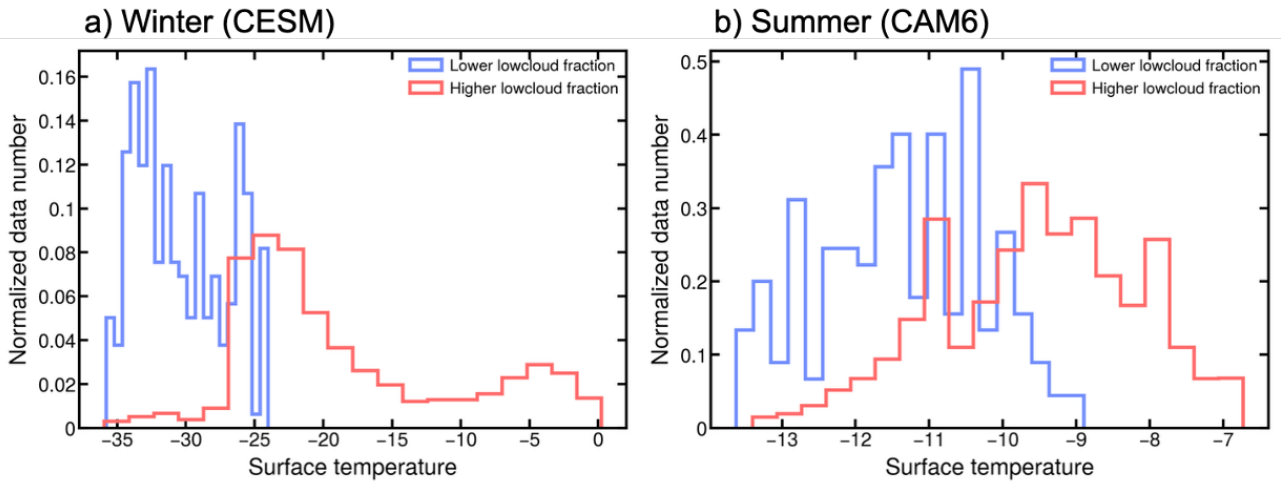


그림 3.25. CESM과 CAM6로 각각 모의된 (좌) 겨울, (우) 여름철 동안 하층운 발생 비율이 20% 이하(파랑), 80% 이상(빨강)일 때의 표층 온도 분포도

KOPRI 극지연구소

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연도별 연구 목표 달성도

1. 정성적 성과

가. 1차연도 정성적 성과

연구개발목표	달성내용	달성도	
북극 다산과학기지(니알슨)에서의 대기경계층, 구름, 지상 온도 및 복사에너지 관측 자료 수집 및 분석	○ 구름 레이더, 운고계를 통한 북극 지역 구름의 연직분포 관측자료 수집 및 분석 - 북극 지역 구름의 물리적 두께나 고도는 뚜렷한 계절 변화를 보이지 않으며, 액체상 구름이 빙정이나 혼합 구름에 비해 운저가 높고 두께가 얇은 특성을 보임 ○ 윈드 도플러 라이다의 (대기경계층 내) 바람의 연직분포 관측자료 수집 및 분석 - 북극 지역 대기경계층 내 풍속은 여름에 약하고 겨울에 강하게 나타남. 대기경계층 상부에서 풍속이 급격히 증가함 ○ 마이크로라디오미터 관측자료를 이용하여 액체수경로 (Liquid Water Path; LWP) 자료 수집 및 분석 - 북극 지역 LWC는 여름에 높고 겨울에 낮은 계절 변동 특성이 뚜렷하며 지상 약 1 km 부근에서 최댓값을 보임 ○ 라디오존데 관측자료로 관측된 온도 및 습도 연직분포 자료 수집 및 분석 ○ 지상 복사관측자료(상/하향 장파 및 단파 복사에너지) 수집 및 분석 - 북극 지역 단파 복사는 지상/TOA 모두 하향 복사가 크게 나타나고 여름철에 증가하는 비슷한 양상을 보임. - 북극 지역 순 장파 복사는 지상과 TOA에서 반대의 계절 변동성이 나타남 - 구름은 단파보다는 장파 복사에 미치는 영향이 크며 액체상 구름이 존재할 때 복사량의 변화가 가장 크게	100	%

	나타남		
지상 관측 자료를 활용한 북극 대기경계층 열역학적·물리적 구조 파악 및 하층운의 기하학적·물리적 특성 분석	○ 수집된 북극 다산과학기지에서의 자료를 종합 분석하여 북극지역 대기경계층의 열역학적, 물리적 구조 및 일·계절 변화 특성 분석 - 북극 지역은 낮은 온도에 의해 라디오존데로 대기경계층이 뚜렷하게 나타나지 않음. 대기경계층 고도는 겨울철에 낮고 여름철에 높으나 계절 변동성이 크지 않음 - 대기경계층 내 기온은 고도가 높아짐에 따라 감소하지만, 습도는 지상 약 1 km에서 최댓값을 보임 ○ 북극지역 하층운의 기하학적·미세물리적 특성 및 계절별 연직분포 특성, 계절·장기변동 경향 분석 - 북극 지역 하층운은 빙정 입자가 대부분이며, 액체상 구름은 겨울철에는 거의 나타나지 않고 여름철에 증가해 7월에 최대 약 30%까지 비율이 높아짐. 혼합 구름은 연중 약 10~20%의 일정한 비율을 나타냄 - 하층운 운저 고도는 겨울에 낮고 여름에 높은 매우 뚜렷한 계절 변동성을 보임	100	%
지상원격관측망 및 위성 관측자료를 활용한 북극지역 구름의 미세물리 특성 자료 수집 및 분석	○ 다산과학기지에서의 관측자료 외에도 Cloudnet과 같은 지상원격관측망 및 위성 관측자료를 추가 수집을 통한 북극지역 구름 미세물리 특성의 공간 분포 특성 분석	100	%

KOPRI 극지연구소

나. 2차연도 정성적 성과

연구개발목표	달성내용	달성도	
관측 및 모델 기반 북극 대기경계층-구름-지표기온의 연관성(피드백) 상세 분석	○ 북극 니알슨 관측소에서의 구름 운저 고도의 구조적, 미세물리 특성 분석 - 북극 니알슨 지역에서 운저 고도 1 km 이내 하층운이 빈번하게 발생함 ○ 북극 니알슨에서 관측된 하층운의 운저 고도 부근의 바람장 분석 및 계절 특성 파악 - 하층운 운저고도 부근에서의 바람장은 하강기류(88%)	100	%

	가 상승기류에 비해 빈번하게 관측되며, 하강기류의 비율은 여름철에 90%, 겨울철에 85%을 차지하는 계절에 따른 차이를 보임 ○ 니알슨에 위치한 Mt. Zepplin(해발고도 474 m) 관측소에서의 구름 입자 프로브(Cloud Droplet Probe; CDP) 관측 자료를 활용한 구름의 미세물리 특성 분석 - 구름 입자 수농도와 액체수함량(LWC)은 여름철에 높고 겨울철에 낮음 ○ 하층운 운저 고도 부근에서 상승 기류와 하강 기류가 관측 될 때 각각의 구름의 미세물리 특성(구름 입자 수농도, 액체수액함량; LWC) 분석 - 운저고도 부근에 상승기류가 발달한 구름의 경우, 구름 입자 수농도 및 액체수함량(LWC)이 하강기류가 발달한 구름보다 더 낮은 평균 및 중앙값을 보임		
다양한 관측자료를 활용한 기후 모델의 대기경계층 및 하층운 산출 결과 비교검증 수행	○ 니알슨 관측소에서의 하층운의 발달 과정 및 미세물리 특성에 영향을 끼치는 주요 인자 분석 - 구름 미세물리 특성에 영향을 미치는 주요 요인으로서 이류에 따른 온도 및 습도 변화를 제시 ○ 종관기상장에 따른 온난/한랭 이류 사례 선정을 위한 니알슨 지역 대기경계층 온도 프로파일 및 종관기상장 분석 수행 ○ 관측 자료 기반 선정한 온난/한랭 이류 사례들에 대한 모델 결과의 검증을 수행하기 위한 대기경계층 내 바람장 및 하층운 구조적·미세물리적 특성 파악 - 북대서양으로부터 남서풍의 온난 이류 사례일 때, 하층운 발생 및 액체수함량 증가를 확인	100	%
아라온호 선상 관측(라이다, 윈드 도플러 라이다, 존데 등) 수행 및 분석	○ 북극해에서의 아라온호 선상 관측 수행 및 관측 결과 분석 - 2024년 북극항해 제1항차(ARA15A) 아라온호 선상 관측이 2024년 7월 31일부터 8월 26일 동안 북극 척치해(Chukchi Sea) 부근에서 성공적으로 수행되었고, 마이크로 펄스 라이다(MPL), 이동식 스캐닝 도플러 라이다, 존데 등의 관측 결과를 수집함 - 스캐닝 윈드 도플러 라이다로부터 풍속 산출의 정확도 향상을 위해, 신호 대 잡음비가 7 dB 이상인 신호에 대해서 풍속을 산출함. 라이다 후방산란 신호의 강도를 높일 수 있는 에어로졸이 적은 북극해 환경으로 인해, 최하층과 구름 기저고도 부근에서만 풍속 산출이 가능함	100	%

KOPRI 극지연구소

	- 마이크로 펄스 라이다 관측 결과에 따르면, 관측 기간 대부분 해양 위에서 구름이 발달하였으며, 특히 약 1 km 이내 운저고도를 갖는 하층운이 빈번하게 관측됨. 스캐닝 도플러 라이다와 비슷한 연직 구조를 보여줌 - 아라온호에서 동시 관측한 라디오 존데와 스캐닝 윈드 도플러 라이다 관측자료를 비교 분석한 결과, 풍속 산출 결과가 잘 일치함		

다. 3차연도 정성적 성과

연구개발목표	달성내용	달성도
아라온호 선상 관측 실험 수행 및 관측 결과 기반 대기경계층, 구름, 기온 등의 대기 연직 특성 상세 분석	○ 2024년 북극항해 제1항차(ARA15A) 아라온호 선상 관측 기간(2024.07.31.-08.26) 동안 북극 척치해 부근에서 스캐닝 윈드 도플러 라이다와 마이크로 펄스 라이다(MPL)를 이용한 관측 기반 상호작용 분석 - 1 km 이내의 운저고도를 갖는 하층운이 빈번하게 관측됨 - 운저고도 부근에서는 상승기류가 하강기류에 비해 현저히 우세함(83%). 상승기류 속도는 0 m/s-0.4 m/s에 집중됨	100 %
관측자료를 활용한 해양-대기 결합 모델 모의 결과 검증	○ 위성 관측 자료들(MODIS, CloudSat & CALIPSO)을 활용해 모델(CESM2, CAM6)에서 모의된 장기간 평균 북극 구름 비율을 비교 및 검증함. - 모델과 관측에서 모두 겨울철 구름 비율은 해빙이 없는 해양 위에서 높고, 해빙 위에서 낮은 공간 다패턴이 나타남 - 전반적으로 CESM2 모델이 관측에 비해 겨울철 구름 비율을 과대모의함 - 여름철 구름 비율은 CAM6 모델에서는 해빙 위에서, 관측에서는 해양 위에서 높은 값이 나타나는 상반된 양상을 보임. 즉, 해빙에서는 과대, 해양에서는 과소 모의함	100 %
북극지역 해양-대기경계층-구름 상호작용 및	○ CESM2와 CAM6 모델로 모의된 겨울철 및 여름철 북극 구름의 지표 특성(해양 및 해빙)과의 관련성을 분석함 - 단파 복사가 없는 겨울 동안 해빙 비율이 낮을수록 하	100 %

이로 인한 지표면 기온 상승 메커니즘 규명	층운을 조금 더 모의함. 반대로, 여름 동안엔 해빙 비율이 높을 때 하층운을 더 많이 모의함. 이는 해빙 위에서 하층 대기의 높은 안정도에 의한 하층운의 과대모의와 관련됨 - 해빙 농도에 따른 구름의 운저고도는 두 계절 모두 지표 해빙 농도가 높을수록 낮아지는 경향이 있음 ○ CESM2와 CAM6 모델로 모의된 겨울철 및 여름철 북극 구름의 복사효과로 인한 지표온도 변화 메커니즘 규명 - 계절과 관계없이 하층운 발생이 많을 때가 적을 때보다 지표온도의 분포가 더 높은 쪽으로 치우쳐 나타나며, 하층운 발생이 지표온도 상승과 관련있음을 시사함.	

2. 정량적 성과

해당없음

KOPRI 극지연구소

제 2 절 관련분야의 기술발전에의 기여도

본 연구에서는 북극 다산과학기지의 구름 레이더, 운고계, 스캐닝 윈드 도플러 라이다, 마이크로 라디오미터, 라디오 존데, 복사 관측자료와 제플린 관측소(Mt. Zepplin)에서 CDP 관측자료를 수집하였고, 2024년 여름철 북극 척치해 부근에서 아라온호 선상관측을 수행하여 해상에서의 스캐닝 윈드 도플러 라이다, 마이크로 펄스 라이다, 라디오 존데 관측자료를 수집하였다. 이처럼 북극 지역에서의 구름 및 대기경계층에 대한 관측기반 데이터베이스를 구축하였다. 또한, 이를 종합적으로 분석함으로써 북극 지역 장기간 대기와 구름의 물리적 특성을 이해하고 북극 기후에 미치는 영향에 대한 이해를 증진하는데 기여하였다. 또한, 전지구 CESM2와 CAM6 모델의 장기간 북극 구름 모의 결과를 확보하였고, 이를 위성 관측 자료(MODIS, CloudSat & CALIPSO)를 활용하여 검증하였다. 관측과 모델 결과를 활용하여 북극 지역에서 '해양-대기경계층-구름' 간의 복잡한 상호작용 기작에 대해 규명하였다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 추가연구의 필요성

본 연구에서 북극 지역에서 활용가능한 다양한 지상, 위성, 선상 관측 자료를 수집하여 대기, 구름 및 대기경계층의 물리적 특성을 분석하였다. 본 연구는 지상 및 선상 관측을 통한 북극 일부 지역에서의 북극 및 대기 특성 분석에 집중되었는데, 현재 활용가능한 타 지역에 대한 분석을 통한 공간규모 특성을 파악할 필요가 있다. 하지만 북극 지역에서의 관측 자료는 여전히 시·공간적 한계를 가지고 있기 때문에, 추가적인 관측 수행 및 지속적인 관측 자료 수집을 통해 확장 연구가 필요하다.

본 연구에서는 전지구 기후, 대기 모델로 모의된 장기간 평균 북극 구름의 비율을 위성 관측 자료들을 활용하여 검증하였다. 이에 더해, 북극 구름의 기하학적 및 미세물리적 연직 특성에 대해 추가적인 검증이 필요하다. 또한, 검증을 바탕으로 모델의 구름 미세물리 스킴 및 대기의 물리적·열역학적 과정이 개선되어 모델 예측성 및 정확도 향상을 도모할 필요가 있다. 궁극적으로는 북극 지역의 대기, 에어로졸, 구름 등의 상호작용을 통한 복사효과를 규명하고 이를 통해 북극 지역의 기후변화 및 미래 기후예측 연구로 확대 진행할 필요가 있다. 그리고 이러한 북극 지역 기후변화가 한반도 및 동아시아, 중위도 지역에 미치는 영향 분석 연구도 추가로 진행될 필요가 있다.

KOPRI 극지연구소

제 2 절 타 연구에의 응용

본 연구에서는 지상, 위성, 선상 관측 자료를 종합적으로 활용하여 북극 지역에서의 구름 및 대기경계층의 특성을 파악하였다. 본 연구를 통해 수집, 분석, 축적된 데이터베이스는 북극 지역 기후모델링 연구에 입력 및 검증자료로 응용되어 활용될 수 있다. 또한, 관측을 기반으로 기후모델들의 북극 구름 모의 성능을 평가하였으며, 이는 향후 모델에서의 구름 미세물리 특성 및 구름 관련 물리적 및 열역학적 대기 과정 모의 과정 개선에 기여할 것으로 기대된다. 또한, 관측과 모델을 기반으로 북극 지역에서의 '해양-대기경계층-구름-지표 온도' 간의 복잡한 상호작용 기작에 대한 이해도를 향상시킴으로서, 향후 기후변화에 따른 해빙 감소 및 온도 상승 등 북극 지역 기후요인들의 변화 예측의 불확실성 감소에 기여할 수 있다. 이를 통해 북극 지역 기후요인들의 상호작용에 대한 이해는 기후변화 대비를 위한 정책 설정에까지 중요한 역할을 할 수 있다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구에서 활용된 북극 다산과학기지(Ny-Ålesund) 지역의 구름 관측 자료는 유럽 중심 지상 기반 구름 관측 네트워크인 Cloudnet에서 얻을 수 있다. 구름 레이더, 라이다, 마이크로파 복사계 등 다양한 원격 탐사 장비를 종합 활용하여, 구름 물리적 특성의 연직 구조를 관측한다. 이는 전세계에 위치한 관측소에 표준화된 자료 처리 알고리즘을 적용하여, 구름 유형 분류 및 구름 미세물리 변수를 일관되게 산출 가능하다. 이러한 Cloudnet 관측 자료는 예보 모델 및 기후모델 검증에 널리 활용되고 있며, 구름 관측 및 모의에 핵심적인 역할을 수행하고 있는 해외 선진 관측 인프라이다. 또한, Ny-Ålesund에 위차한 제플린 관측소에 설치된 Cloud droplet probe (CDP) 관측기기는 공기를 흡입하고 658 nm 파장의 레이저를 이용하여, 구름의 입자 수 농도, 크기 분포, 유효 직경, 액체수함량 등을 측정할 수 있다. Arctic Cloud Observations Using Airborne Measurements (ACLOUD)는 북극 구름 미세물리적 특성을 정밀하게 관측하기 위해 독일 주도로 수행된 항공기 기반 관측 캠페인이다. 특히 위성 관측이 한계가 있는 북극 지역에서 고해상도 현장 관측 자료를 제공함으로써, 위성 자료 및 수치모델 검증에 중요한 기준 자료로 활용되고 있다. 본 연구에서 모델 검증에 활용된 CALIPSO와 CloudSat은 각각 라이다와 레이더를 탑재한 위성으로, 두 위성의 결합 관측 자료는 구름의 연직 구조와 미세물리적 특성을 정밀하게 분석하는 데 활용된다. 또한, MODIS 센서는 광범위한 공간 범위에서 구름의 수평 분포 특성을 제공한다.

KOPRI 극지연구소

제 7 장 참고문헌

AMAP: Arctic Climate Change Update 2021: Key Trends and Impacts. Summary for Policy-makers, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Tromsø, Norway, 16 pp.

Bae, J., Sung, H. J., Baek, E. H., Choi, J. H., Lee, H. J., & Kim, B. M. (2023). Reduction in the Arctic Surface Warm Bias in the NCAR CAM6 by Reducing Excessive Low-Level Clouds in the Arctic.*Atmosphere*,*14*(3), 522.

Boisvert, L. N., Webster, M. A., Petty, A. A., Markus, T., Bromwich, D. H., & Cullather, R. I. (2018). Intercomparison of precipitation estimates over the Arctic Ocean and its peripheral seas from reanalyses.*Journal of Climate*,*31*(20), 8441-8462.

Cesana, G. V., Pierpaoli, O., Ottaviani, M., Vu, L., Jin, Z., & Silber, I. (2024). The correlation between Arctic sea ice, cloud phase and radiation using A-Train satellites.*Atmospheric Chemistry and Physics*,*24*(13), 7899-7909.

Cho, Y., Park, S. J., Kim, J. H., Yeo, H., Nam, J., Jun, S. Y., ... & Kim, S. W. (2021). Investigating Wintertime Cloud Microphysical Properties and Their Relationship to Air Mass Advection at Ny-Ålesund, Svalbard Using the Synergy of a Cloud Radar-Ceilometer-Microwave Radiometer.*Remote Sensing*,*13*(13), 2529.

Cohen, J., Screen, J. A., Furtado, J. C., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., ... & Jones, J. (2014). Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather.*Nature geoscience*,*7*(9), 627-637.

Curry, J. A., Schramm, J. L., Rossow, W. B., & Randall, D. (1996). Overview of Arctic cloud and radiation characteristics.*Journal of Climate*,*9*(8), 1731-1764.

Gierens, R., Kneifel, S., Shupe, M. D., Ebell, K., Maturilli, M., & Löhnert, U. (2020). Low-level mixed-phase clouds in a complex Arctic environment.*Atmospheric Chemistry and Physics*,*20*(6), 3459-3481.

Goosse, H., Kay, J. E., Armour, K. C., Bodas-Salcedo, A., Chepfer, H., Docquier, D., ... & Vancoppenolle, M. (2018). Quantifying climate feedbacks in polar regions.*Nature communications*,*9*(1), 1919.

He, M., Hu, Y., Chen, N., Wang, D., Huang, J., & Stamnes, K. (2019). High cloud coverage over melted areas dominates the impact of clouds on the albedo feedback in the Arctic.*Scientific reports*,*9*(1), 9529.

Huang, Y., Dong, X., Xi, B., Dolinar, E. K., Stanfield, R. E., & Qiu, S. (2017). Quantifying the uncertainties of reanalyzed Arctic cloud and radiation properties using satellite surface observations.*Journal of Climate*,*30*(19), 8007-8029.

Illingworth, A. J., Hogan, R. J., O'connor, E. J., Bouniol, D., Brooks, M. E., Delanoë, J., ... & Wrench, C. L. (2007). Cloudnet: Continuous evaluation of cloud profiles in seven operational models using ground-based observations.*Bulletin of the American Meteorological Society*,*88*(6), 883-898.

Inoue, J., Sato, K., Rinke, A., Cassano, J. J., Fettweis, X., Heinemann, G., ... & Webster, S. (2021). Clouds and radiation processes in regional climate models evaluated using observations over the ice-free Arctic Ocean.*Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,*126*(1), e2020JD033904.

Kay, J. E., & L'Ecuyer, T. (2013). Observational constraints on Arctic Ocean clouds and radiative fluxes during the early 21st century.*Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,*118*(13), 7219-7236.

Kay, J. E., L'Ecuyer, T., Chepfer, H., Loeb, N., Morrison, A., & Cesana, G. (2016). Recent advances in Arctic cloud and climate research.*Current Climate Change Reports*,*2*(4), 159-169.

Lenaerts, J. T., Gettelman, A., Van Tricht, K., van Kampenhout, L., & Miller, N. B. (2020). Impact of cloud physics on the Greenland ice sheet near-surface climate: A study with the community atmosphere model.*Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,*125*(7), e2019JD031470.

Lenaerts, J. T., Van Tricht, K., Lhermitte, S., & L'Ecuyer, T. S. (2017). Polar clouds and radiation in satellite observations, reanalyses, and climate models.*Geophysical Research Letters*,*44*(7), 3355-3364.

Letterly, A., Key, J., & Liu, Y. (2016). The influence of winter cloud on summer sea ice in the Arctic, 1983-2013.*Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,*121*(5), 2178-2187.

Liu, Y., & Key, J. R. (2014). Less winter cloud aids summer 2013 Arctic sea ice return from 2012 minimum.*Environmental Research Letters*,*9*(4), 044002.

Lu, C., Liu, Y., Niu, S., & Vogelmann, A. M. (2012). Observed impacts of vertical velocity on cloud microphysics and implications for aerosol indirect effects.*Geophysical Research Letters*,*39*(21).

McCusker, G. Y., Vüllers, J., Achtert, P., Field, P., Day, J. J., Forbes, R., ... & Brooks, I. M. (2023). Evaluating arctic clouds modelled with the unified model and integrated forecasting system.*Atmospheric Chemistry and Physics*,*23*(8), 4819-4847.

Morrison, A. L., Kay, J. E., Frey, W. R., Chepfer, H., & Guzman, R. (2019). Cloud response to Arctic sea ice loss and implications for future feedback in the CESM1 climate model.*Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,*124*(2), 1003-1020.

Morrison, H., De Boer, G., Feingold, G., Harrington, J., Shupe, M. D., & Sulia, K. (2012).

Resilience of persistent Arctic mixed-phase clouds.*Nature Geoscience*,*5*(1), 11-17.

Nam, J., Cho, Y., Lim, K. S., Jun, S. Y., Kim, J. H., Park, S. J., & Kim, S. W. (2024). Evaluation of four cloud microphysical schemes simulating arctic low-level clouds observed during the ACLOUD experiment.*Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*,*60*(5), 727-740.

Ovchinnikov, M., Ackerman, A. S., Avramov, A., Cheng, A., Fan, J., Fridlind, A. M., ... & Sulia, K. (2014). Intercomparison of large-eddy simulations of Arctic mixed-phase clouds: Importance of ice size distribution assumptions.*Journal of Advances in Modeling Earth Systems*,*6*(1), 223-248.

Päschke, E., Leinweber, R., & Lehmann, V. (2015). An assessment of the performance of a 1.5 µm Doppler lidar for operational vertical wind profiling based on a 1-year trial.*Atmospheric Measurement Techniques*,*8*(6), 2251-2266.

Peng, S., Yang, Q., Shupe, M. D., Xi, X., Han, B., Chen, D., ... & Liu, C. (2023). The characteristics of atmospheric boundary layer height over the Arctic Ocean during MOSAiC.*Atmospheric Chemistry and Physics*,*23*(15), 8683-8703.

Pithan, F., Ackerman, A., Angevine, W. M., Hartung, K., Ickes, L., Kelley, M., ... & Zadra, A. (2016). Select strengths and biases of models in representing the Arctic winter boundary layer over sea ice: the Larcform 1 single column model intercomparison.*Journal of Advances in Modeling Earth Systems*,*8*(3), 1345-1357.

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.

Shupe, M. D., Kollias, P., Persson, P. O. G., & McFarquhar, G. M. (2008). Vertical motions in Arctic mixed-phase stratiform clouds.*Journal of the Atmospheric Sciences*,*65*(4), 1304-1322.

Shupe, M. D., Persson, P. O. G., Brooks, I. M., Tjernström, M., Sedlar, J., Mauritsen, T., ... & Leck, C. (2013). Cloud and boundary layer interactions over the Arctic sea ice in late summer.*Atmospheric Chemistry and Physics*,*13*(18), 9379-9399.

Sotiropoulou, G., Sullivan, S., Savre, J., Lloyd, G., Lachlan-Cope, T., Ekman, A. M., & Nenes, A. (2020). The impact of secondary ice production on Arctic stratocumulus.*Atmospheric Chemistry and Physics*,*20*(3), 1301-1316.

Taylor, P. C., Boeke, R. C., Li, Y., & Thompson, D. W. (2019). Arctic cloud annual cycle biases in climate models.*Atmospheric Chemistry and Physics*,*19*(13), 8759-8782.

Tonttila, J., O'Connor, E. J., Niemelä, S., Räisänen, P., & Järvinen, H. (2011). Cloud base vertical velocity statistics: a comparison between an atmospheric mesoscale model and remote sensing observations.*Atmospheric Chemistry and Physics*,*11*(17), 9207-9218.

KOPRI 극지연구소

Werner, C. (2005). Doppler wind lidar. In*Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*(pp. 325-354). New York, NY: Springer New York.

Wu, P., Ovchinnikov, M., Xiao, H., Lackner, C. P., Geerts, B., Tornow, F., & Elsaesser, G. (2025). Effect of ice number concentration on the evolution of boundary layer clouds during Arctic marine cold-air outbreaks.*Journal of Geophysical Research: Atmospheres*,*130*(3), e2024JD041282.

Yao, B., Liu, C., Yin, Y., Liu, Z., Shi, C., Iwabuchi, H., & Weng, F. (2020). Evaluation of cloud properties from reanalyses over East Asia with a radiance-based approach.*Atmospheric Measurement Techniques*,*13*(3), 1033-1049.

Zib, B. J., Dong, X., Xi, B., & Kennedy, A. (2012). Evaluation and intercomparison of cloud fraction and radiative fluxes in recent reanalyses over the Arctic using BSRN surface observations.*Journal of Climate*,*25*(7), 2291-2305.

KOPRI
극지연구소

뒷 면

주 의

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

KOPRI 극지연구소