

원격탐사자료를 활용한 북극지역 구름의  
미세물리 특성 이해

Study on Arctic Cloud Microphysical  
Properties using Remote Sensing Data



서울대학교

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “기후변화/기상재해 예측을 위한 극지 예측 시스템(KPOPS)의 개발 및 활용 연구” 과제의 위탁연구 “원격탐사자료를 활용한 북극지역 구름의 미세 물리 특성 이해에 관한 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자	:	김 주 흥
위탁연구기관명	:	서울대학교
위탁연구책임자	:	김 상 우
위탁참여연구원	:	여 희 동
“	:	남 지 현
“	:	박 수 진
“	:	박 현 주

## 보고서 초록

위탁연구과제명	원격탐사자료를 활용한 북극지역 구름의 미세물리 특성 이해				
위탁연구책임자	김상우	해당단계 참여연구원수	5	해당단계 연구비	283,000,000 원
연구기관명 및 소속부서명	서울대학교 지구환경과학부		참여기업명	-	
국제공동연구	상대국명 : -		상대국연구기관명 : -		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	68
<p>● 니알슨 과학기지의 지상 원격관측 결과 단층(single-layer) 구름과 다층(multi-layer) 구름은 모두 약 40%의 빈도로 나타났으며, 구름의 상(phase)은 얼음(49.0%), 혼합상(41.6%), 액체(15.0%)의 순으로 나타남.</p> <p>● 니알슨 과학기지에서 운저고도가 지상 2 km 이하인 하층운의 약 80%는 2.5일 이내로 유지되었으며, 하층운은 주로 아이스란드 저기압(Icelandic low)이 강하게 발달하면서 남풍-남서풍이 강하게 유입될 때 관측되어 종관 기상장과의 연관성을 확인함.</p> <p>● 니알슨 과학기지에서는 에어로졸 라이다와 윈드 도플러 라이다를 이용하여 전선이 유입됨에 따라 지상 3 km 이상에서부터 구름이 점차 낮아진 것을 에어로졸 라이다로 확인할 수 있었으며, 전선 이동 전후로 바람이 동풍→남풍→서풍으로 바뀌는 것을 확인함.</p> <p>● 니알슨 과학기지 인근 제플린(Zeppelin) 정상(해발고도 474 m)에 설치된 직접(in-situ) 장비(Cloud Droplet Probe(CDP))를 이용하여 2017년 9월부터 2018년 2월까지의 구름 미세물리 특성을 분석함. 2017년 9월과 10월에 액체상과 혼합상의 구름 입자 수농도가 매우 높았고, 유효직경(effective diameter)은 얼음상과 혼합상 구름의 경우 11월까지 감소하다가 12월부터 증가하는 것으로 나타남.</p> <p>● CALIPSO, CloudSat, MODIS를 이용한 북극 지역 구름 관측 결과 세 위성 모두 유사한 공간 분포를 보임. 다만 관측 원리에 따라 CloudSat은 CALIPSO에 비해 약 0.2 - 0.3 낮게 운량을 산출하였으며, MODIS는 CALIPSO에 비해 해빙이 없거나 낮은 지역(15% 이하)에서는 운량이 높았지만, 해빙이 많은 곳은 운량이 최대 0.2 가량 낮았음.</p> <p>● 극지에 최적화된 Polar-optimized Weather Research and Forecasting Model(PWRF) 모델의 구름 모의 결과를 니알슨 과학기지의 지상 원격관측자료와 비교한 결과, 빙정수함량(ice water content)은 모든 구름 미세물리 스킴(scheme)에서 낮게 모의하였으나, 액체수함량(liquid water content)은 스킴에 따라 과대모의(Morrison), 과소모의(WDM6, NSSL) 하였음. 한편, 북극 전역(북위 70° 이상)에 대한 PWRF 모델과 CALIPSO-CloudSat 위성 관측 결과 비교 시, 모델이 겨울철 하층운을 더 많이 모의하여 전반적으로 운량이 높은 것으로 나타남.</p> <p>● CALIPSO를 이용한 북극 지역(북위 60° 이상) 내 에어로졸 광학적 두께(Aerosol Optical Depth)를 분석한 결과, 평균 에어로졸 광학적 두께는 0.04였으며, 겨울철에 가장 높고, 여름철에 가장 낮은 것으로 나타남.</p>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	북극, 구름, 원격관측, 기하학적 특성, 미세물리적 특성			
	영 어	Arctic, Cloud, Remote sensing, Macrophysical property, Microphysical property			

# 요 약 문

## I. 제 목

원격탐사자료를 활용한 북극지역 구름의 미세물리 특성 이해

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

다양한 관측자료와 모델링 결과를 통해 북극 지역의 구름이 지표면에 도달하는 복사에너지 수지를 변화시켜 해빙과 지표면의 얼음 등에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 구름에 의한 복사에너지 수지 변화는 구름의 특성에 의해 결정되기 때문에 정확한 구름의 특성을 파악할 필요가 있다. 한편, 기후모형에서 모의되는 북극 지역 구름은 다른 기상요소들에 비해 정확도가 떨어지는 편이며, 이는 기후모형에 활용 가능한 관측 자료가 부족하기 때문인 것으로 알려져 있다. 따라서 북극 지역 구름의 정확한 기후효과를 파악하기 위해서는 관측을 통한 북극 지역 구름의 기하학적·미세물리적 특성에 대한 이해가 필요하다.

이에 본 연구는 지상 원격관측자료를 활용하여 니알슨 과학기지의 구름 특성을 분석하고, 위성 원격관측자료를 통해 북극 전 지역 구름의 변동 특성을 파악하고자 하였다. 또한 지상 및 위성 원격관측자료로 산출된 구름 특성의 데이터베이스를 구축하여 모델링 및 재분석자료의 구름 모의 결과와 비교하는 것을 목표로 하였다.

## III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 위의 연구 목적을 달성하기 위해 (1) 니알슨 북극과학기지의 지상 원격자료를 통합적으로 분석해 구름의 기하학적(고도, 두께, 운량 등)·미세물리적(입자의 상(phase), 양(content) 등) 특성을 분석하고, (2) 구름 특성의 고도별, 계절별 변화를 살펴보았다. 또한 (3) 아라온 호와 국제관측프로그램을 통해 니알슨 과학기지 이외의 다른 북극 관측 지점들의 구름 특성을 파악하고, (4) 인공위성에서 산출된 구름 원격관측자료를 활용하여 북극 지역 구름의 시공간 분포 특성을 분석하였다. 마지막으로 (5) 북극 지역 구름의 미세물리 모수화 및 모델 검증의 기초 자료로 활용할 수 있도록 구름 관측 결과들의 데이터베이스를 구축하였다.

#### IV. 연구개발결과

니알슨 과학기지의 지상 원격관측자료를 분석한 결과 단층(single-layer)과 다층(multi-layer) 구름이 각각 40%의 빈도로 관측되었으며, 구름의 상(phase)은 얼음(49.0%), 혼합상(41.6%), 액체(15.0%)의 순으로 나타났다. 겨울철 니알슨 과학기지에서도 관측된 하층운(운저고도 2 km 이하)은 주로 아이슬란드 저기압(Icelandic low)의 발달로 북대서양에서부터 남서풍 혹은 남풍의 영향이 있을 때 발생하여 구름과 종관 기상장의 연관성이 있음을 확인하였다.

CALIPSO, CloudSat, MODIS를 통해 북극의 운량 분포를 분석한 결과 유사한 공간 분포를 보였다. CloudSat은 해빙에 무관하게 CALIPSO에 비해 약 0.2 - 0.3 낮은 운량이 산출된 반면, MODIS는 해빙 농도가 증가함에 따라 CALIPSO에 비해 운량이 적어졌다. CloudSat 관측 결과 북극 지역 구름은 대기가 불안정한 9월과 10월에 지상 1 km 내외에 높은 빙정수함량(Ice Water Content; IWC)과 액체수함량(Liquid Water Content; LWC)을 산출하였다. CALIPSO에서 산출된 구름의 광학적 두께는 9월과 10월에 크게 높지 않았는데, 이는 레이저 소산의 영향으로 파악된다.

극지에 최적화된 Polar-optimized Weather Research and Forecasting Model(PWRF) 모델의 여러 미세물리 스킴(scheme)을 이용하여 구름을 모의한 결과, 니알슨 과학기지의 지상 관측 값에 비해 빙정수함량은 모두 과소 모의하였으나 액체수함량은 스킴에 따라 다른 결과가 나타났다. 위성 관측 값과 비교한 결과 PWRF가 위성 관측에 비해 겨울철 하층운을 더 많이 모의하여 전체적으로 높은 운량을 모의하였다. 하지만 구름의 빙정수함량과 액체수함량은 모두 관측에 비해 매우 낮은 것으로 나타났다.

#### V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구의 지상 및 위성 원격관측자료로부터 산출된 구름의 특성 값들을 모델링의 단순 검증 자료 이외에도 구름 모수화 과정을 개선하는데 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 이를 통해 구름의 모의 과정이 개선되면, 향후 북극 지역 온난화에 따른 구름 변동 특성의 예측성도 향상될 것이다.

또한 구름 모의 시 구름 모수화 과정을 활용하는 현재의 기후모형에 본 연구에서 산출된 구름 특성들을 구름 모의에 활용한다면(예: 자료동화), 구름 모의 정확도가 향상될 것으로 예측된다. 향상된 구름 모의 정확도는 최종적으로 구름이 북극 지역 기후 및 증위도 겨울철에 미치는 영향을 더 정확하게 파악할 수 있을 것이다.

# S U M M A R Y

## **I. Title**

Study on Arctic Cloud Microphysical Properties using Remote Sensing Data

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

Various observations and modeling results indicate that the Arctic clouds affect the sea ice and surface ice as they change the radiant energy balance reaching the Earth's surface. Since the change in the radiant energy balance caused by the cloud is determined by the characteristics of the cloud, it is necessary to identify the exact cloud characteristics. On the other hand, Arctic clouds simulated by climate models are less accurate than other meteorological factors, which is known to be due to the lack of observational data available for climate models. Therefore, it is necessary to understand the geometric and microphysical characteristics of the Arctic clouds through observation in order to understand the exact climate effect of the Arctic clouds. The purpose of this study is to analyze the cloud characteristics of Ny-Ålesund observatory using the ground-based observations, and to identify the variation of the entire Arctic cloud through the satellite data. In addition, we aimed to establish a database of cloud characteristics calculated from terrestrial and satellite observation and compare it with the cloud simulation results of modeling and reanalysis data.

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

To achieve the above objectives, we investigate (1) the geometric (altitude, thickness etc.) and microphysical (phase of particles, content etc.) characteristics of the cloud by analyzing the ground remote data over Ny-Ålesund observatory. We also looked at (2) the changes in the altitude and seasonal variations of cloud characteristics over Arctic. In addition, (3) we identified the cloud characteristics from the research vessel Araon and the international observatory program. (4) Analysis on spatial distribution characteristics of clouds were conducted using

remote observations of clouds calculated from satellites over Arctic region. Finally, (5) a database of cloud observation results was established to serve as the basis for verification on cloud microphysics scheme in regional model.

#### **IV. R&D Results**

As a result of analyzing the ground-observation of Ny-Ålesund observatory, single-layer and multi-layer clouds were observed at 40% frequency and the phase of clouds was found in order of ice (49.0%), mixed-phase (41.6%), and liquid (15.0%). Low-cloud (under 2km) was observed at Ny-Ålesund station in winter was mainly due to the development of icelandic low, which was confirmed by the influence of southwest wind or south wind from the North Atlantic.

Analysis of the Arctic cloud distribution through CALIPSO, CloudSat, and MODIS showed similar spatial distribution. CloudSat showed cloud amount of about 0.2-0.3 lower than CALIPSO regardless of sea ice concentration, whereas MODIS yielded a higher cloud amount at low sea ice concentration compared to CALIPSO but as sea ice concentration increases low amount of cloud was observed. CloudSat observation shows that Arctic clouds produced high ice water content (IWC) and liquid water content (LWC) around 1km above the ground when the atmosphere is unstable in September and October. The optical thickness of the cloud from CALIPSO, however, was not high in September and October, which is attributed to the laser attenuation.

Simulation of clouds using a number of microphysical schemes of the WRF model optimized for the polar (PWRF), IWC was all underestimated compared to the ground observation in the Ny-Ålesund observatory. Although, LWCs showed difference results depending on the scheme. PWRF over-estimated cloud amounts in Arctic region especially low clouds in winter compared to the satellite observations, but both IWC and LWC were largely underestimated.

#### **V. Application Plans of R&D Results**

It is expected that the cloud's characteristic values calculated from the ground and satellite observation data of this study can be used to improve the cloud

hydration process in model cloud parameterization. This will improve the predictability of cloud fluctuations due to Arctic warming in the future.

In addition, the current climatic model utilizing the cloud simulation process of cloud simulation is expected to improve the accuracy of cloud simulation if the cloud characteristics calculated from this study are used in cloud simulation (e.g., data assimilation). This will ultimately provide a more accurate picture of the impact of clouds on Arctic climate and mid-latitude winter.



# 목 차

제 1 장 서론 .....	10
제 1 절 연구개발 목적 .....	10
제 2 절 연구의 필요성 .....	10
제 2 장 국내외 기술개발 현황 .....	12
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과 .....	13
제 1 절 지상 원격관측자료를 이용한 구름의 기하학적·미세물리적 특성 및 지표면 복사 수지 분석 .....	13
1. 지상 원격관측자료를 이용한 니알슨 과학기지의 구름의 특성 분석 .....	13
2. 니알슨 과학기지의 구름과 지표면 복사 및 종관 기상장과의 연관성 분석 .....	22
3. 니알슨 과학기지의 하층운과 주변 바람장 분석 .....	28
4. 아라온 호에서 관측된 구름의 특성 분석 .....	30
제 2 절 위성 원격관측자료를 이용한 구름의 기하학적·미세물리적 특성 및 에어로졸 분 포 분석 .....	32
1. 위성 원격관측자료를 이용한 구름의 특성 분석 .....	32
2. 위성 원격관측자료를 이용한 북극 지역 에어로졸 분포 분석 .....	37
제 3 절 원격관측자료와 모델 및 재분석 자료의 비교 .....	39
1. 지상 원격관측자료와 구름 모델링 결과 비교 .....	39
2. 위성 원격관측자료와 구름 모델링 결과 비교 .....	46
3. 위성 원격관측자료와 재분석자료의 구름 산출 결과 비교 .....	53
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도 .....	58
제 1 절 연구개발목표의 달성도 .....	58
1. 정성적 성과 .....	58
가. 1차년도 정성적 성과 .....	58
나. 2차년도 정성적 성과 .....	59
다. 3차년도 정성적 성과 .....	60
라. 4차년도 정성적 성과 .....	61
2. 정량적 성과 .....	62
제 2 절 관련분야 기여도 .....	62
제 5 장 연구개발결과의 활용계획 .....	63

제 1 절 추가연구의 필요성 .....	63
제 2 절 타 연구에의 응용 .....	63
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 .....	64
제 7 장 참고문헌 .....	65



# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구개발 목적

본 연구는 다양한 지상 원격관측자료(구름 레이더, 라이다, 마이크로 라디오미터 등)들을 활용하여 니알슨 과학기지의 구름 특성을 분석하고, 위성 원격관측자료를 통해 북극 전 지역의 구름 특성 시공간 변화를 파악하고자 하였다. 또한 지상 및 위성 원격관측자료로 산출된 구름 특성의 데이터베이스를 구축하여 모델링 및 재분석자료의 기초 자료 및 검증 자료로 활용하는 것을 목표로 하였다.

이를 위해 세부적으로 (1) 북극 다산기지가 위치한 니알슨 북극과학기지의 지상 원격자료를 통합적으로 분석해 구름의 기하학적(고도, 두께, 운량)과 미세물리적(입자 크기, 수농도, 상 등) 특성을 분석하고 (2) 연직분포에 따른 구름의 미세물리 특성을 살펴보았다. 또한 (3) 아라온 호와 국제관측프로그램 및 (4) 인공위성에서 산출된 구름 원격관측자료를 활용하여 북극권 구름의 시공간 분포 특성을 분석하였다. 마지막으로 (5) 북극 지역 구름의 미세물리 모수화 및 모델 검증의 기초 자료로 활용할 수 있도록 구름 특성들의 데이터베이스를 구축하였다.

## 제 2 절 연구의 필요성

○ 북극 지역 구름의 특성에 따른 북극 기후에 미치는 영향 파악 필요

북극 지역의 구름이 지표면에 도달하는 복사에너지 수지를 변화시킴에 따라 해빙, 지표면의 얼음 등에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Bennartz et al. (2013)은 2012년 7월 그린란드에서 대량의 얼음이 녹은 원인으로 수적을 포함한 하층운에 의한 지표면의 복사에너지 증가를 원인으로 지목하였고, Liu and Key (2014)는 2012, 2013년 겨울철 북극에 구름이 적었던 곳에서 이듬해 봄 해빙의 두께가 증가한 것을 통해 구름과 해빙의 관계를 분석하였다. 구름의 기하학적 특성(고도 등)과 미세물리적 특성(상, 수농도 등)에 따라 지표면의 복사에너지 수지가 바뀌기 (Shupe and Intrieri, 2004; Dong et al., 2010) 때문에 구름이 북극 기후에 미치는 영향을 산정하기 위해 정확한 북극 지역 내 구름 특성을 파악하여야 한다. 이에 본 연구에서는 니알슨 과학기지에서 다양한 지상 원격관측자료를 이용해 구름의 특성을 파악하였으며, 위성 관측자료를 이용하여 북극 전지역에 걸친 구름의 시공간 변동 특성을 파악하였다.

○ 기후모형의 구름 모의 정확도 향상 필요

기후모형을 통해서 현재와 미래에 구름이 북극 기후에 미치는 영향에 대해 파악하고자 많은 연구들이 진행되고 있으나 기후모형의 구름 모의 정확도가 낮은 실정

이다. Taylor et al. (2019)는 CMIP5의 모델들을 이용하여 북극 지역 구름의 월 변화를 분석한 결과 모델에 따라 운량의 월 변동성이 다르게 나타났으며, 모델에 따라 구름의 미세물리 특성에도 차이가 있음을 확인하였다. 모델의 정확도 향상을 위해서는 관측 자료로부터 산출된 구름의 특성을 기초 자료 및 검증 자료로 활용할 필요가 있다(Kay et al., 2016). 따라서 본 연구에서는 지상 및 위성 원격관측자료로부터 북극 구름의 기하학적·미세물리적 특성을 파악하고, 모델링과 재분석자료의 구름 모의 능력을 평가하였으며, 향후 모의 능력 향상을 위해 관측 결과들을 데이터 베이스화 하였다.



## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### ○ 북극 지역 구름의 특성을 파악하기 위한 선상 및 항공관측

Surface Heat Budget of the Arctic Ocean(SHEBA; Uttal et al., 2002), Arctic Summer Cloud Ocean Study(ASCOS; Tjerström et al., 2014), Arctic Clouds in Summer Experiment(ACSE; Tjerström et al., 2015) 등의 선상 관측과 Mixed-Phase Arctic Cloud Experiment(M-PACE; Verlinde et al., 2007), Arctic Cloud Observations Using Airborne Measurements during Polar Day (ACLOUD; Wendisch et al., 2019) 등의 항공관측을 통해 북극 구름의 기하학적·미세물리적 특성과 함께 구름이 기후에 미치는 영향(복사강제력)에 대한 이해를 증진시키고자 하였다. 다만, 선상관측과 항공관측은 주로 짧게는 1개월에서 길게는 1년에 걸쳐 수행되었고, 특히 여름철에 집중되어 구름의 계절 변동성 등을 파악하기에는 어려움이 있었다. 이에 본 연구에서는 니알슨 과학기지를 중심으로 지상 원격관측자료를 종합적으로 분석하여 장기간 구름의 변동 특성을 파악하였고, 또한 위성 원격관측자료를 통해서도 시공간 변동 특성을 파악하고자 하였다.

### ○ 구름 레이더, 운고계, 마이크로 라디오미터를 활용한 북극 지역 구름의 기하학적·미세물리적 특성 관측

본 연구에서는 구름 레이더, 운고계, 마이크로 라디오미터 등의 원격관측장비들을 융합한 Cloudnet 알고리즘을 통해 니알슨 과학기지의 구름의 고도와 구름의 미세물리적 특성을 분석하였다. Cloudnet을 이용한 구름 특성 연구는 선행연구(Nomokonova et al. 2019)에서도 수행이 되었으나, 본 연구에서는 원격관측자료와 함께 제플린(Zeppelin) 정상의 Cloud Droplet Probe(CDP)를 이용한 직접 관측을 통해 하층운의 미세물리 특성을 분석하였다. 니알슨 과학기지 외에도 알래스카의 Atmospheric Radiation Measurement(ARM) North Slope of Alaska(NSA) 지점에서는 라이다, 운고계, 구름 레이더, 마이크로 라디오미터 등의 원격관측장비로 구름의 특성 및 구름 특성에 따른 복사강제력의 연구가 수행되었다(Dong et al., 2010).

### 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

#### 제 1 절 지상 원격관측자료를 이용한 구름의 기하학적·미세 물리적 특성 및 지표면 복사 수지 분석

##### 1. 지상 원격관측자료를 이용한 니알슨 과학기지의 구름의 특성 분석

본 연구는 지상 원격관측자료를 이용하여 니알슨 과학기지에서 구름 특성을 분석하였다. 표 1은 사용된 원격관측기기들(구름 도플러 레이더, 운고계, 마이크로 라디오미터)의 특성과 측정 변수들을 나타낸다(Kuchler et al., 2017, Maturilli and Ebell, 2018, Rose et al., 2005). 이들은 모두 니알슨 독일기지인 AWIPEV 관측소에서 운영되고 있다. 레이더와 라이다의 시너지를 통해 구름의 수직 구조에 대한 정보를 얻을 수 있으며, 능동 및 수동 센서를 함께 이용함으로써 구름의 다양한 미세물리 특성을 산출할 수 있다.

94 GHz 파장의 구름 도플러 레이더(Cloud Doppler Radar, CDR)는 독일 쾰른 대학교에서 2016년 6월 AWIPEV 관측소에 설치하여 2018년 10월까지 관측을 수행하였으며, 다른 프로젝트 참여 문제로 중단 이후 2019년 6월부터 현재까지 다시 운영되고 있다. 구름 도플러 레이더는 방출된 장파장의 반사도를 측정하여 구름 내 큰 입자(빗방울, 얼음 입자)의 존재와 그 농도를 감지한다. 또한, 도플러 효과를 이용하여 입자의 이동에 따른 바람 속도도 측정할 수 있다.

2011년에 AWIPEV 관측소에 설치된 운고계(Ceilometer)는 905 nm 단파장의 빛이 후방 산란 되어 오는 강도로 작은 입자(구름 물방울, 에어로졸)의 존재와 농도를 측정한다. 이러한 특성에 기초하여 운고계는 보통 구름 하부 높이와 액체층의 위치를 감지하기 위해 사용되곤 한다. 이와 같은 두 기기의 서로 다른 특성은 구름의 하부에서 상부까지, 수직 구조 관측을 가능하게 한다(그림 1).

**표 1.** Cloudnet 지상 원격관측기기 (구름 도플러 레이더, 운고계, 마이크로 라디오미터)의 특성과 측정 변수.

기기	파장	측정 변수
구름 도플러 레이더	94 GHz	Reflectivity factor Doppler-velocity Doppler spectral width Brightness temperatures
운고계	905 nm	Attenuated backscatter coefficient
마이크로 라디오미터	K-band (22.24-31.4 GHz) V-band (51.26-58.0 GHz)	Brightness temperature

마이크로 라디오미터(Microwave Radiometer)도 2011년부터 운영되어 오고 있으며, K-band (22.24 - 31.4 GHz)와 V-band (51.26 - 58.0 GHz)를 이용하는 수동 센서이다. 이는 밝기 온도를 측정하여 대기 기둥의 단위면적당 존재하는 액체상의 물의 총 양인 액체수경로(Liquid Water Path; LWP)를 산출할 수 있다.

Cloudnet은 구름 특성의 수직 정보를 고해상도로 제공하는 네트워크이다. 앞서 제시된 구름 도플러 레이더, 운고계, 마이크로 라디오미터와 같은 지상 원격관측기기들을 이용한 융합 알고리즘을 개발하여 구름의 거시 및 미세물리 특성을 산출한다. 이러한 관측 네트워크의 구축을 통한 향상된 구름 모의와 기후 예측 모델 개선을 목표로 하고 있다 (Illingworth et al., 2007).

Cloudnet은 구름 도플러 레이더와 운고계로 측정된 레이더 반사도, 도플러 속도, 후방산란계수를 동일한 시공간 해상도로 가공하여 제공하고 있다(그림 1a, 1b). 30 초마다 20 m의 구간으로 120 m부터 12000 m까지 관측값을 얻을 수 있고, 이를 하나의 프로파일이라 명명한다. 또한, 네트워크의 알고리즘을 거쳐 각 구간에서 구름의 상(phase), 액체수함량(Liquid Water Content; LWC), 빙정수함량(Ice Water Content; IWC)도 산출된다. 구름의 상은 (1) clear sky, (2) cloud droplets only, (3) drizzle or rain, (4) drizzle/rain & cloud droplets, (5) ice, (6) ice & supercooled droplets, (7) melting ice, (8) melting ice & cloud droplets, (9) aerosol, (10) insects, (11) aerosol & insects, 11가지로 분류한다(그림 1c). 본 연구에서는 이를 이용하여 구름을 액체(liquid), 얼음(ice), 혼합상(mixed-phase) 구름, 세 가지로 나누어 분석을 진행하였다. 액체수함량은 마이크로 라디오미터로부터 얻은 액체수경로로부터 산출되고, 빙정수함량은 반사도와 온도의 관계식을 통해 산출할 수 있다 (Hogan and O'Connor, 2004).

본 연구는 2년(2016년 6월 - 2018년 5월) 동안의 지상 원격관측자료를 이용하여 분석을 진행하였다. 구름에 대한 정의와 발생빈도 산출은 Nomokonova et al. (2019)과 같은 방법을 사용하였다. 수직 프로파일의 60 m 이상(연속 3개 이상의 구간)이 상 분류에서 (2), (4) - (8)로 분류된 경우에만 구름으로 정의된다. 이처럼 연속해서 이어지는 구간들이 하나의 구름층이다. (2), (4) - (8)로 분류되더라도 60 m 미만(1개 또는 2개 구간)일 경우엔 구름으로 정의하지 않는다. 그리고 구름층의 개수에 따라 단층(single-layer)과 다층(multi-layer) 구름으로 분류된다. 수직 프로파일에서 정의된 구름층이 한 개일 경우에는 단층 구름이라 하고, 구름층이 두 개 이상일 경우엔 다층 구름이라고 한다. 구름층 사이에 20m 이상 (1개 이상의 구간) (1), (9), (10)으로 분류된 것이 존재할 때 서로 다른 구름층으로 정의한다.

액체, 얼음, 혼합상 구름의 분류는 구름 구간이 아닌, 구름층을 기반으로 한다. 구름층 내에 액체상인 (2) 또는 (4)만 존재하는 경우는 액체 구름, 고체상인 (5) 또는 (7)만 존재하는 경우는 얼음 구름으로 분류된다. 그리고 과냉각 물방울을 포함하는 (6)과 (8)을 포함해서 하나의 구름층 내에 액체상과 고체상이 모두 존재하면 혼합상 구름으로 분류한다.

본 연구에서는 각 구름 종류(액체, 얼음, 혼합상)의 월별 발생빈도를 운량(cloud fraction)으로 계산하였다. 이는 구름이 존재하는 프로파일의 개수를 관측된 전체 프로파일의 개수로 나누어서 산출한다. 그리고 다층 구름의 경우는 하나의 수직 프로

파일 내에 복수의 구름층이 존재하기 때문에, 각 구름층을 중복으로 계산하였다. 예를 들어, 그림 1c에 제시된 사례에서 12시 이후 수직 프로파일에는 얼음상 구름층과 혼합상 구름층이 둘 다 존재한다. 이러한 경우에 얼음 구름과 혼합상 구름 모두에 중복으로 해당하는 것이다. 그 결과, 세 가지 구름 발생빈도의 합이 100%를 초과할 수 있다.

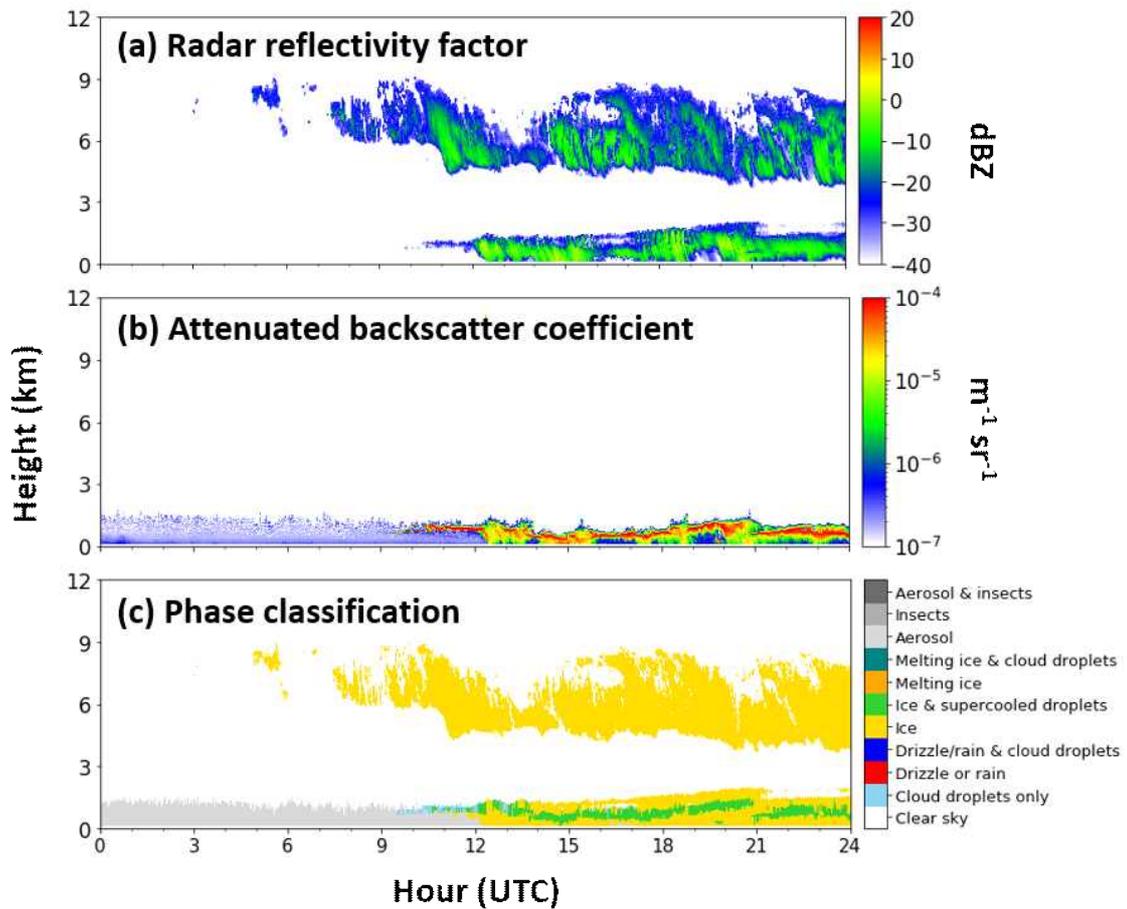


그림 1. 2016년 8월 30일 구름의 수직 구조. (a) 구름 도플러 레이더로 관측한 반사도, (b) 운고계의 후방 산란 계수, (c) 지상 원격관측기기들을 이용한 Cloudnet의 상분류 결과를 나타냄. (b) 운고계는 구름의 하부 높이까지만 관측할 수 있지만, (a) 구름 도플러 레이더는 약 9 km의 구름 상부까지 관측할 수 있음. (a)와 (b)를 혼합하여 구름 수직 구조 관측이 가능함.

분석 기간 중 구름 발생 비율은 약 78%였다. 그림 2는 단층 구름과 다층 구름의 월별 운량을 보여준다. 단층 구름과 다층 구름의 운량은 전체 계절에서 비슷하게 나타났다(약 40%). 그리고 총 구름 발생빈도가 가장 높았던 달은 10월로, 약 90%였으며, 3월은 약 60%로 가장 낮은 빈도를 보였다. 전반적으로 여름철이 겨울철에 비해 운량이 높은 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 월평균 및 연평균 운량의 연직 분포를 나타낸다. 세 가지 상의 구름을 모두 포함한 전체 구름의 발생 빈도(그림 3a)는 전 계절에 1 - 2 km에서 약 50%로 가장 높아, 하층운이 자주 관측되는 것으로 나타났다. 액체 구름(그림 3b)과 혼합상 구름(그림 3d)도 하층운이 각각 약 5%와 30%로 가장 높았지만, 얼음 구름(그림 3c)은 1 - 2 km의 하층운보다 좀 더 높은 고도인 2 - 5 km에서 더 빈번하게 나타났다. 액체 구름(그림 3b)은 온도가 높은 여름철에 가장 높고, 얼음 구름(그림 3c)은 온도가 낮은 겨울철에 자주 관측되어 온도 변화와 일치하는 뚜렷한 계절 변화를 보였다. 액체 구름은 여름에 낮은 고도(2 km 이하)에서 많이 발생했으나, 겨울에는 모든 고도에서 발생빈도가 낮았다. 반면, 얼음 구름은 겨울에는 하층운부터 중층운까지 높은 빈도로 발생했으나, 여름엔 하층운의 발생빈도는 낮았고 중층운만 비교적 많이 발생했다. 한편, 혼합상 구름은 뚜렷한 계절 변동성 없이 전 계절에 걸쳐 하층운이 많이 관측되었으며, 계절이 바뀌는 5월과 10월에 40%를 넘어 가장 많이 나타났다. 운량의 연직 분포를 합하여 계절별 구름 상의 비율을 비교할 수 있다(그림 4). 얼음 구름은 전 계절적으로 50% 내외로 꾸준히 높은 빈도를 나타냈으며, 혼합상 구름도 얼음 구름과 비슷하게 높은 빈도를 나타냈다. 반면 액체 구름은 7월을 제외하고 가장 적게 관측되었으며, 다른 계절에는 10% 내외로 나타나다가, 7월에는 40%까지 급격히 증가한 것을 확인할 수 있다. 분석 기간 중, 각 구름 상의 총 빈도는 얼음 구름이 49.0%로 가장 높았으며, 혼합상 구름(41.6%), 액체 구름(15.0%) 순서로 비율이 나타났다.

구름 도플러 레이더와 운고계의 시너지를 통해 구름의 상부와 하부 높이 측정이 가능하다. Cloudnet의 상 분류에 근거하여 분류된 세 가지 종류의 구름(액체, 얼음, 혼합상)에 대해 월평균 구름 높이와 두께의 변화를 그림 5에 나타냈다. 가장 얇은 두께로 관측된 구름은 액체 구름이었고, 연평균 약 1.5 km 높이에서 500 m보다 얇은 두께로 발생했다. 얼음 구름은 연평균 3 - 4 km 높이에서 약 1 km 두께로 나타났다. 전 계절 가장 높은 곳에서 관측되었다. 특히 겨울보다 여름에 발생 높이가 더 높아졌다. 혼합상 구름은 7월 - 9월을 제외하고 하부 높이가 1 km보다 낮았으며, 연평균 약 1.5 km로 항상 가장 두껍게 나타났다.

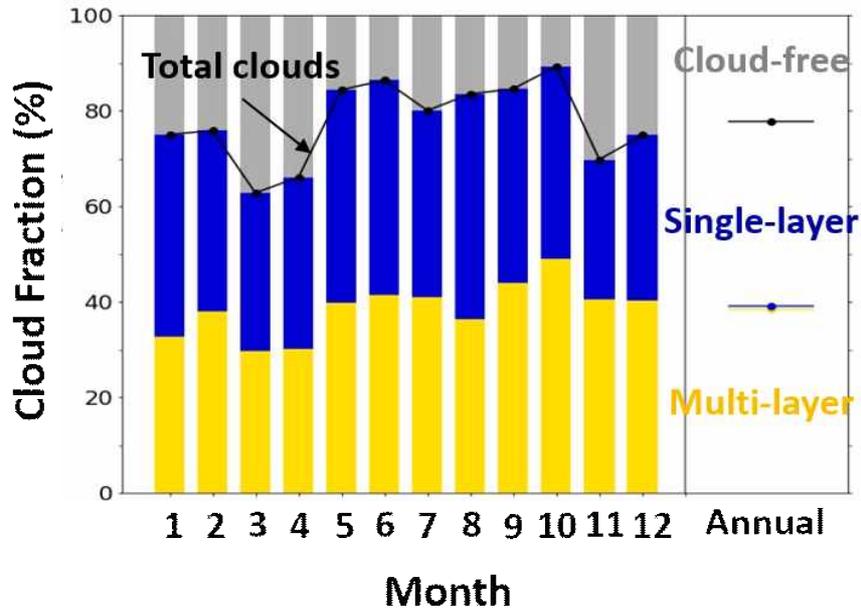


그림 2. 2016년 6월부터 2018년 5월까지의 단층(single-layer) 구름(파랑) 및 다층(multi-layer) 구름(노랑)의 월 변화. 검은 실선은 총 운량을 의미하고, 회색 막대그래프는 구름이 없는 맑은 날의 비율을 나타냄.

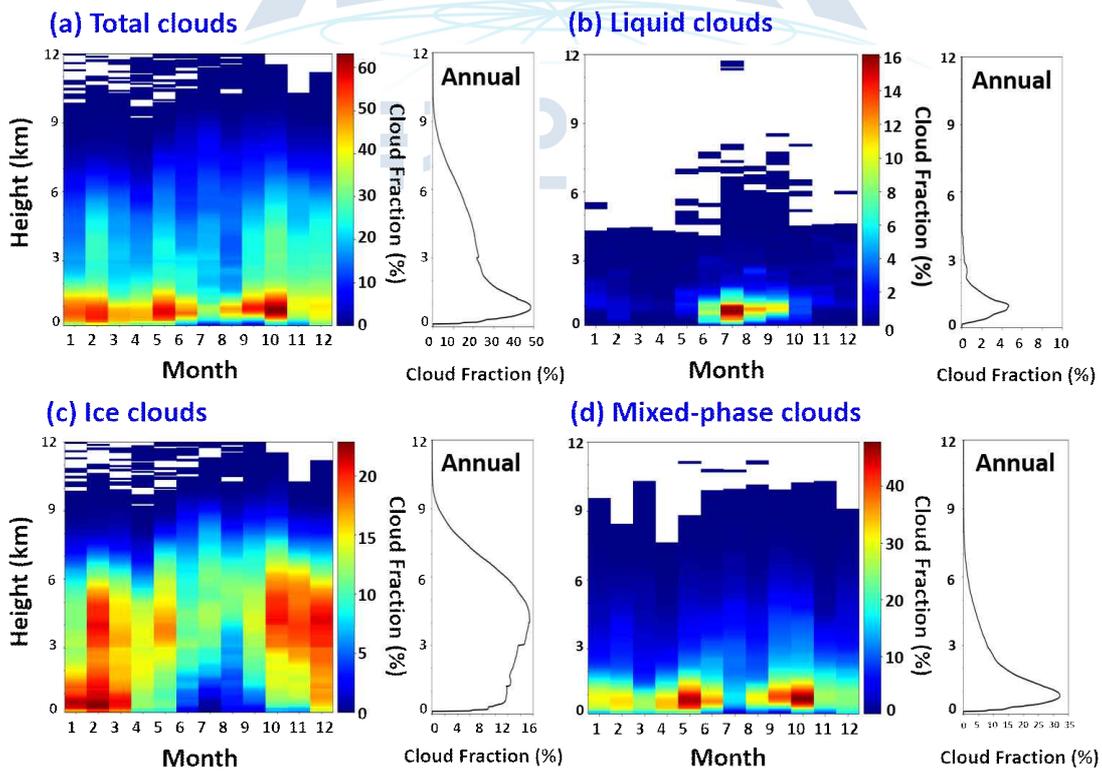


그림 3. 2016년 6월부터 2018년 5월까지의 (a) 전체 구름 (Total clouds), (b) 액체 구름(Liquid clouds), (c) 얼음 구름(Ice clouds), (d) 혼합상 구름(Mixed-phase clouds)의 높이에 따른 월평균 운량과 연평균 운량(선 그래프).

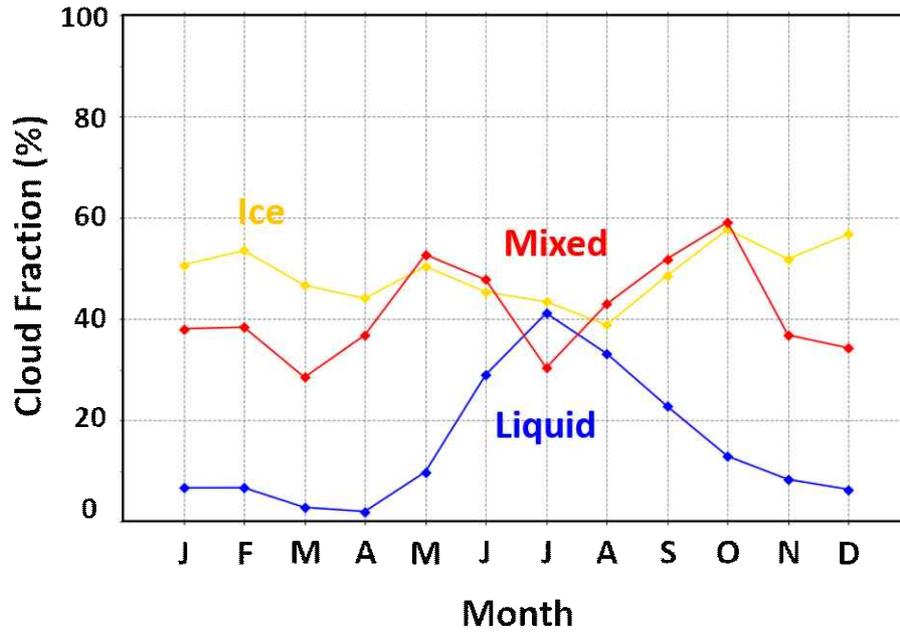


그림 4. 2016년 6월부터 2018년 5월까지의 액체(Liquid, 파랑), 얼음(Ice, 노랑), 혼합상(Mixed, 빨강) 구름의 월별 발생빈도.

니알슨 구름의 미세물리 특성을 분석하기 위해 Cloudnet에 의해 산출된 액체수경로와 빙정수경로를 이용하였다. 액체수경로는 마이크로 라디오미터로부터 측정되었으며, 빙정수경로는 식을 통해 계산된 빙정수함량을 높이에 대해 적분하여 얻었다. 액체수경로는 연평균 약  $101.37 \text{ g m}^{-2}$ 로 나타났으며, 9월에  $393.42 \text{ g m}^{-2}$ 으로 가장 높은 값이 관측되었다(그림 6a). 빙정수경로는 연평균 약  $56.91 \text{ g m}^{-2}$ 로 액체수경로와는 정반대의 계절 변동성을 보였다(그림 6b). 여름(6월 - 8월)엔  $30 \text{ g m}^{-2}$  미만의 액체수경로가 존재했으며, 가을에 증가하기 시작해 겨울, 2월에 최고값( $102.60 \text{ g m}^{-2}$ )을 보였다.

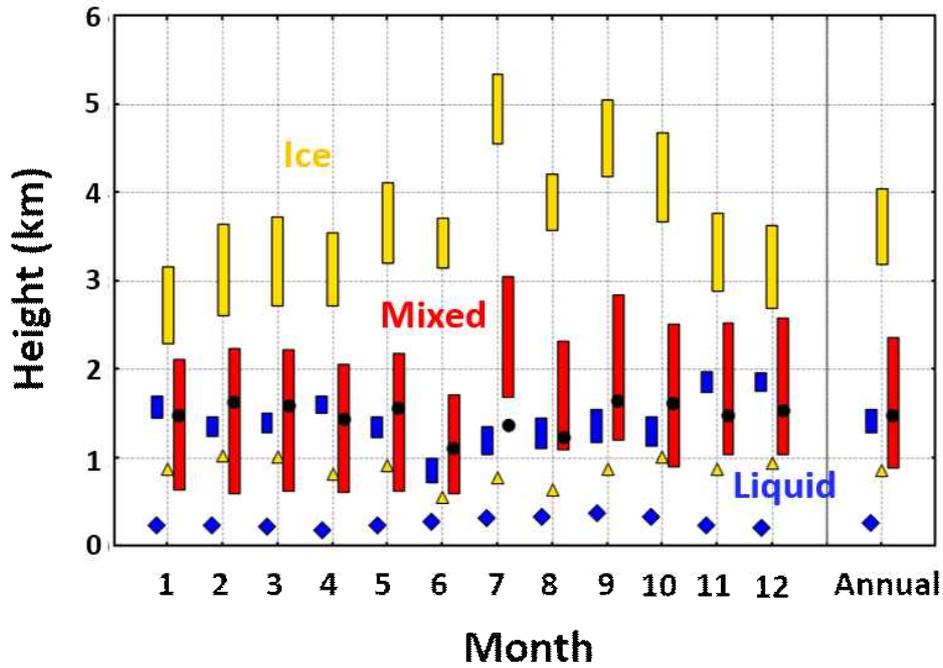


그림 5. 2016년 6월부터 2018년 5월까지의 액체(Liquid, 파랑), 얼음(Ice, 노랑), 혼합상(Mixed, 빨강) 구름의 월별 높이와 두께 변화. 막대그래프의 꼭대기는 구름의 상부 높이의 평균, 바닥은 구름 하부 높이의 평균을 의미함. 다이아몬드, 세모, 원은 각각 액체, 얼음, 혼합상 구름의 두께를 의미함.

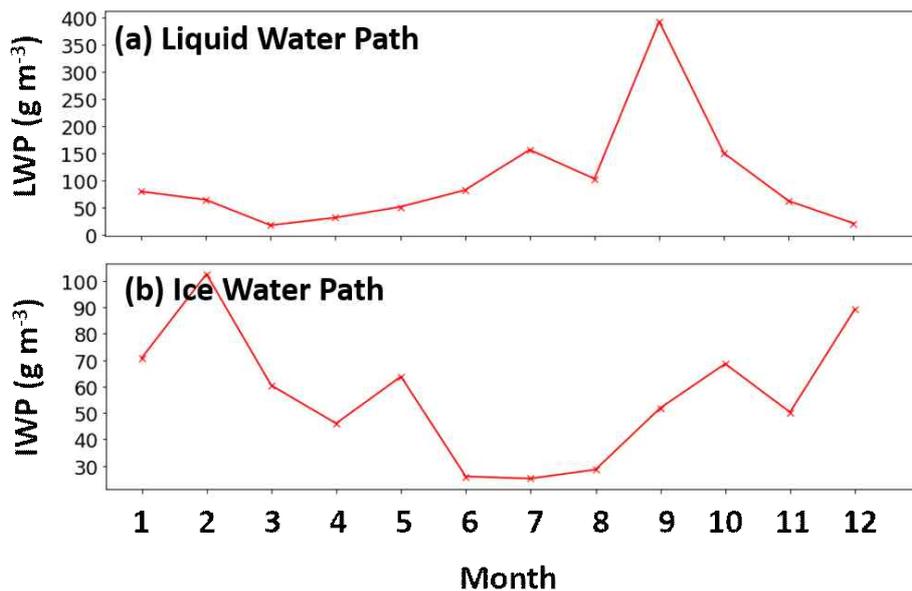
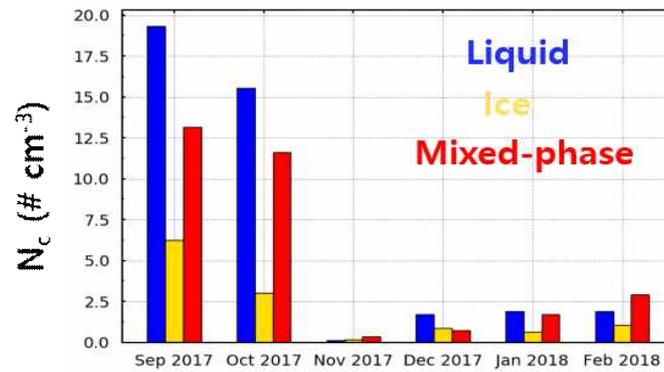


그림 6. 2016년 6월부터 2018년 5월까지 Cloudnet에서 산출된 (a) 액체수경로(liquid water path)와 (b) 빙정수경로(ice water path)의 월 변화.

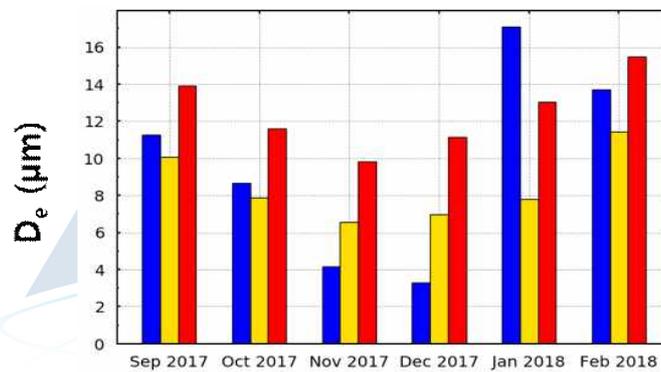
한편, 본 연구에서는 지상 원격장비 이외에도 Cloud Droplet Probe(CDP) 관측자료를 통해 구름의 미세물리 관측을 수행하였다. CDP는 주변 공기를 흡입하여, 공기 내 존재하는 구름 입자의 미세물리 특성을 측정하는 직접(in-situ) 측정 기기로서, 니알슨의 제플린(Zeppelin) 산 정상에 있는 제플린 관측소에 설치되었다. 기기가 설치된 고도의 공기를 흡입하여 관측을 수행하기 때문에, 제플린 관측소의 고도인 474 m (해발고도)에서의 구름 특성에 대한 정보를 얻을 수 있다. 그리고 흡입된 공기로 방출된 658 nm 레이저를 이용하여 구름 입자의 크기 분포(size distribution), 수 농도(number concentration,  $\text{cm}^{-3}$ ), 유효 직경(effective diameter,  $\mu\text{m}$ ), 체적 중간 직경(median volume diameter,  $\mu\text{m}$ ), 액체수함량(LWC,  $\text{g m}^{-3}$ )을 측정한다. 이때 직경 2 - 50  $\mu\text{m}$  범위의 구름 입자만 감지할 수 있으며, 30개 구간으로 나누어 각각의 구간에 해당하는 입자의 수를 계산한다. 2017년 9월 CDP가 설치된 이후 2018년 3월까지 관측을 수행하였으며, 일정 기간 장비 정비 후 2018년 8월부터 다시 관측을 시작하였다.

본 연구는 2017년 9월부터 2018년 3월의 관측 결과만 이용하였고, 2018년 3월은 데이터 개수의 부족으로 분석에서 제외하였다. 그림 7은 CDP로부터 산출된 변수들의 월평균 변화를 보여준다. Cloudnet 자료를 이용하여 474 m 고도에서 상을 3가지로 분류하였고, 그에 따라 변수들의 특성을 나타내고 있다. 상 분류는 앞서 설명한 구름층이 아닌 474 m 고도 하나의 구간에 근거하기 때문에, 해당 고도에서의 상(액체상, 얼음상, 혼합상)으로 정의한다. 그림 7a에서 수농도는 2017년 9월과 10월에 액체상과 혼합상이 다른 월보다 4배 이상 높게 나타났으며, 얼음상은 항상 가장 낮게 관측되었다. 니알슨의 9월과 10월 높은 강수량과 같은 특별한 사건에 의해 높은 수농도가 나타났을 것으로 추정한다. 유효 직경은 얼음상과 혼합상의 경우에 2017년 11월까지 감소하다가 2018년 2월까지 다시 증가하는 경향을 보였다 (그림 7b). 이는 겨울철 낮은 온도에 의해 큰 입자의 비율이 증가한 것으로 추정된다. 그리고 혼합상의 평균 유효직경은 항상 크게 나타났다. 입자 크기의 관측 범위가 제한되기 때문에 50  $\mu\text{m}$  이상의 큰 입자들은 측정되지 않아서, 얼음상의 직경이 예상보다 낮게 나타나는 것으로 생각된다. 마지막으로 액체수함량은 전반적으로 낮게 관측되었고, 특별한 월별 특성이 발견되진 않았다(그림 7c). 이처럼 CDP 관측은 앞서 제시하였던 지상 원격관측(구름 도플러 레이더, 운고계, 마이크로 라디오미터)으로 산출할 수 없었던 구름 입자의 미세물리 특성을 분석하는 데 유용하게 사용될 수 있다. 그러나 CDP 관측을 이용한 분석은 몇 가지 한계점을 가지고 있다. 우선 관측 결과가 474 m의 특정 고도에만 한정된 것이기 때문에 니알슨 구름의 특성을 대표하기는 어렵고, 474 m에서의 총 구름 발생빈도, 특히 액체상의 빈도는 비교적 낮으므로 적은 수의 데이터가 월평균 특성을 대표하게 되는 문제도 발생한다.

(a) Number concentration



(b) Effective diameter



(c) Liquid water content

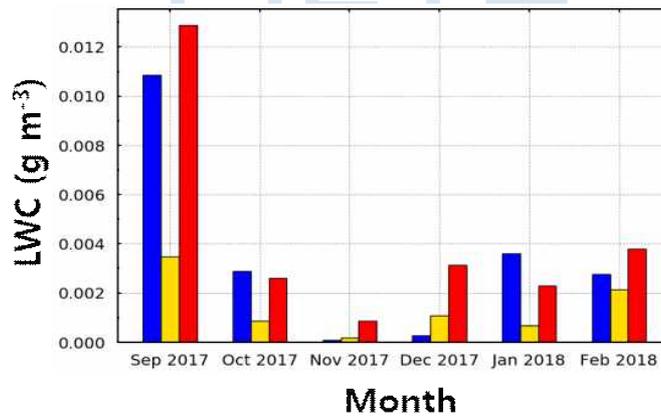


그림 7. 2017년 9월부터 2018년 2월 제플린 관측소(해발 고도 474 m)에서 측정한 월평균 (a) 수농도, (b) 유효 직경, 그리고 (c) 액체수함량(liquid water content)의 변화를 보여주고 있음. Cloudnet 상 분류에 근거하여 입자를 3가지 상, 액체(파랑), 얼음(노랑), 혼합상(빨강)으로 나누어 나타냄.

## 2. 니알슨 과학기지의 구름과 지표면 복사 및 종관 기상장과의 연관성 분석

니알슨 과학기지에서 관측된 일본 NIPR(National Institute of Polar Research)의 마이크로펄스 라이다(Micro Pulse Lidar; MPL)와 극지연구소의 지상 복사관측자료를 활용하여 구름과 지표면 복사의 관련성 및 구름과 종관 기상장의 연관성을 분석(Yeo et al. 2018)하였다. 그림 8은 10년 간(2004 - 2013년)의 겨울철(11월 - 2월) 니알슨 과학기지의 라이다 관측 결과 구름이 없는 경우와 운저고도가 1 km 미만의 하층운이 존재할 때의 하향장파복사(Downward longwave radiation, LWD) 및 상향장파복사(Upward longwave radiation, LWU)의 분포를 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 여름철 태양복사에 의한 지상 온도 변화가 장파복사에 영향을 미칠 수 있으므로, 태양복사가 입사하지 않는 겨울철 자료만 사용하여 분석하였다. 구름이 없을 때에는 상향장파복사는 평균  $237 \text{ W m}^{-2}$ , 하향장파복사는  $182 \text{ W m}^{-2}$ 였으나, 지상 1 km 이하의 하층운이 존재할 때에는 상향장파복사(LWU)가  $277 \text{ W m}^{-2}$ , 하향장파복사는  $265 \text{ W m}^{-2}$ 로 증가하였다. 구름은 대기 중에서 지표면으로 장파복사를 방출하기 때문에 하향장파복사가  $83 \text{ W m}^{-2}$  증가한 것에 비해 상향장파복사는  $40 \text{ W m}^{-2}$  증가하였다. 북극에는 겨울철에 태양 에너지가 입사하지 않고 상향장파복사가 하향장파복사에 비해 더 높기 때문에 에너지의 방출이 발생하지만, 하층에 구름이 존재하는 경우에는 맑을 때에 비해 평균적으로 지표면에 유입되는 에너지가 더 크게 증가하여 방출되는 복사에너지가 줄어드는 것으로 나타났다.

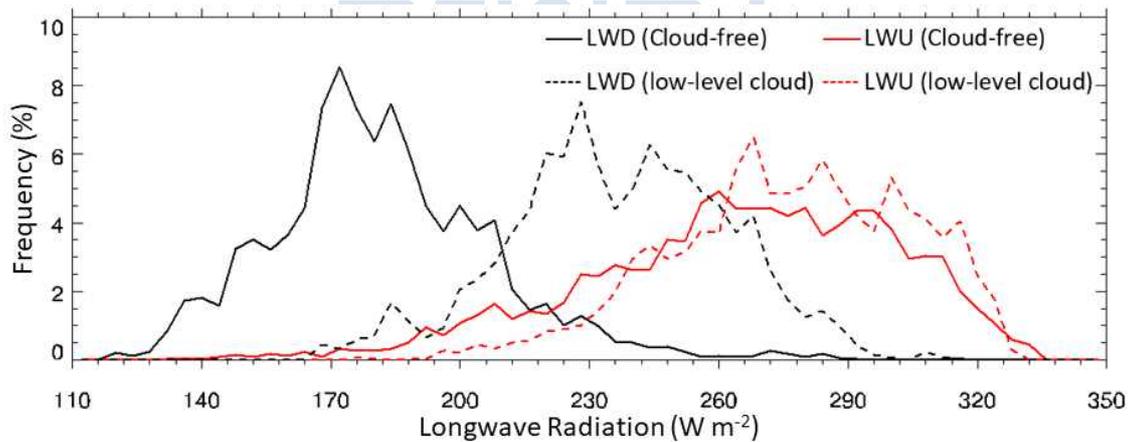


그림 8. 2004년부터 2013년 겨울철 구름이 없는 맑은 날(cloud-free; 실선)과 운저고도가 1 km 이하인 하층운(low-level cloud; 점선)일 때의 니알슨 과학기지에서 관측된 하향장파복사(LWD; 검정색)와 상향장파복사(LWU; 빨간색)의 분포.

그림 9는 그림 8과 같은 기간 월 운량과 하향장파복사, 상향장파복사의 관계를 나타낸 그림이다. 본 연구에서는 라이다를 이용하여 운량을 산출하였으며, 라이다는 연직 상단으로 레이저를 통해 구름의 관측 여부를 판단하므로 앞서 다른 지상 원격 관측자료와 동일하게 한 달간 총 관측 횟수와 구름이 관측된 횟수의 비율로 운량을 정의하였다. 월 운량과 장파복사의 관계를 살펴본 결과 월 평균 하향장파복사와 상향장파복사 모두 운량과 양의 상관관계를 보였다. 이는 구름이 자주 관측됨에 따라 평균적으로 장파복사 에너지가 증가함을 의미하며, 운량 증가에 따른 하향장파복사의 증가량이 더 커서 구름이 많이 관측될수록 지표면에서 방출되는 총 복사에너지가 줄어드는 것은 그림 8의 결과와 일치한다.

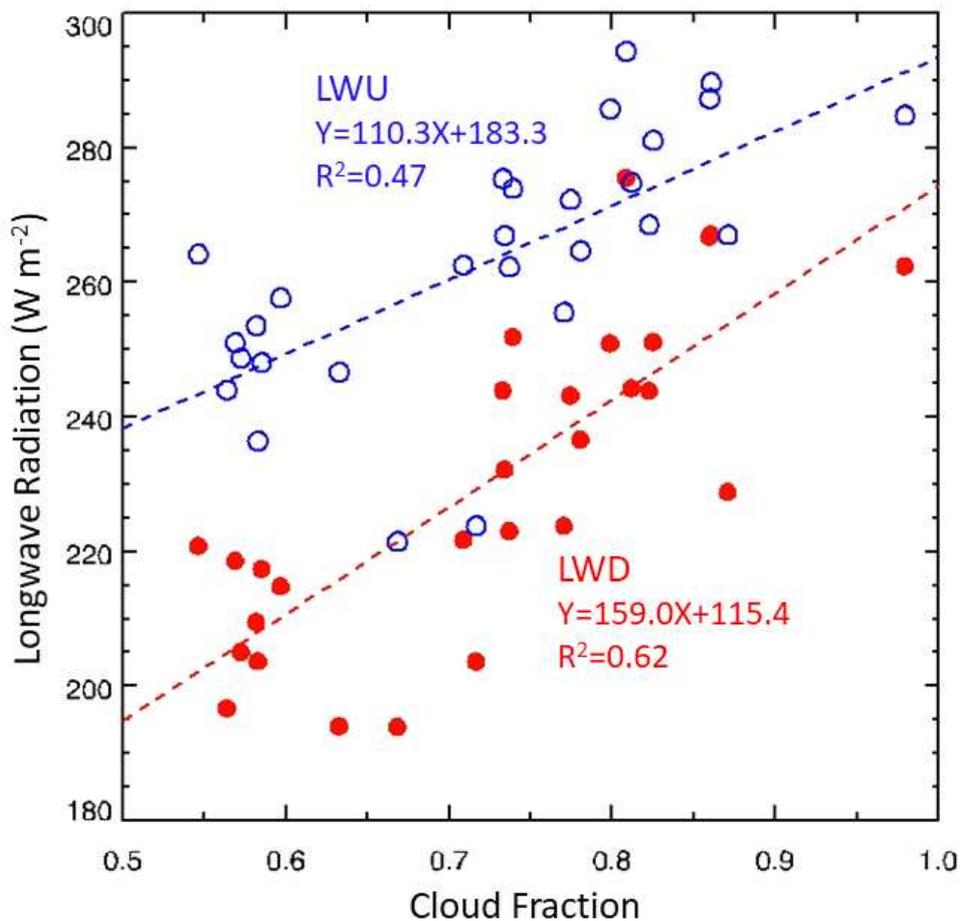


그림 9. 2004년부터 2013년 겨울철 니알슨 과학기지에서 산출된 월 평균 운량과 월 평균 하향장파복사(LWD; 빨간색)와 상향장파복사(LWU; 파란색)의 산포도.

그림 10은 그림 8과 같은 기간의 지표면 온도 편차와 지표면 장파복사의 편차의 관계를 나타낸 그림으로, 본 연구에서는 온도와 장파복사의 편차를 30분 관측값과 관측 월 중에 구름이 없는 시기(cloud free)의 월 평균값의 차이로 정의하였다. 두 변수들의 관계를 통해 구름의 존재 유무에 따른 지표면 온도 변화와 장파복사의 변화를 파악할 수 있다. 상향장파복사는 지표면 온도의 영향을 크게 받기 때문에, 온도 편차와 상향장파복사의 편차(그림 10b)는 월 평균(검은색 원)과 30분 관측 결과 모두 회귀선에 매우 일치하는 결과를 보인다. 반면 온도 편차와 하향장파복사 편차(그림 10a)는 양의 상관관계를 보이지만, 상향장파복사에 비해 다소 산개된 분포를 보이며, 특히 30분 관측 값을 살펴보면, 온도 편차가  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  내외, 하향장파복사 편차가  $\pm 20 \text{ W m}^{-2}$  내외인 구역(검은색 사각형, group 1)과 온도 편차가  $5 - 15^{\circ}\text{C}$ , 하향장파복사 편차가  $40 - 120 \text{ W m}^{-2}$ 인 구역(붉은색 사각형, group 2)으로 나뉘는 것을 확인할 수 있다. Group 1은 맑을 때의 평균 온도와 하향장파복사와 유사한 값이 관측된 시기로, 맑거나 지표면의 복사에너지에 영향을 미치지 어려운 구름(운저고도가 높은 구름 등)이 존재할 때이며, group 2는 구름이 없을 때에 비해 온도와 하향장파복사가 증가한 시기로 하층운 등의 구름이 관측된 시기에 하향장파복사 및 온도가 높아졌음을 의미한다. 이처럼 장기 자료의 평균뿐만 아니라 단기적인 관측 자료에서도 구름에 의해 지표면의 하향장파복사 및 온도가 변하는 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 겨울철 니알슨 과학기지의 라이다로 산출된 하층운(운저고도 2 km 미만), 상층운(운저고도 2 km 이상), 맑은 시기의 지속 시간을 누적하여 나타낸 그림이다. 하층운이 상층운과 맑은 상태보다 더 오래 지속되기는 하지만, 약 80%의 하층운은 2.5일보다 짧게 지속되어 매우 짧게 유지되는 것으로 나타났다. 앞서 구름과 장파복사의 관계를 고려하면, 하층운이 하향장파복사를 증가시켜 지표면의 복사에너지 수지를 바꿀 수는 있지만, 영향을 주는 시간이 수 일 정도로 짧음을 의미한다.

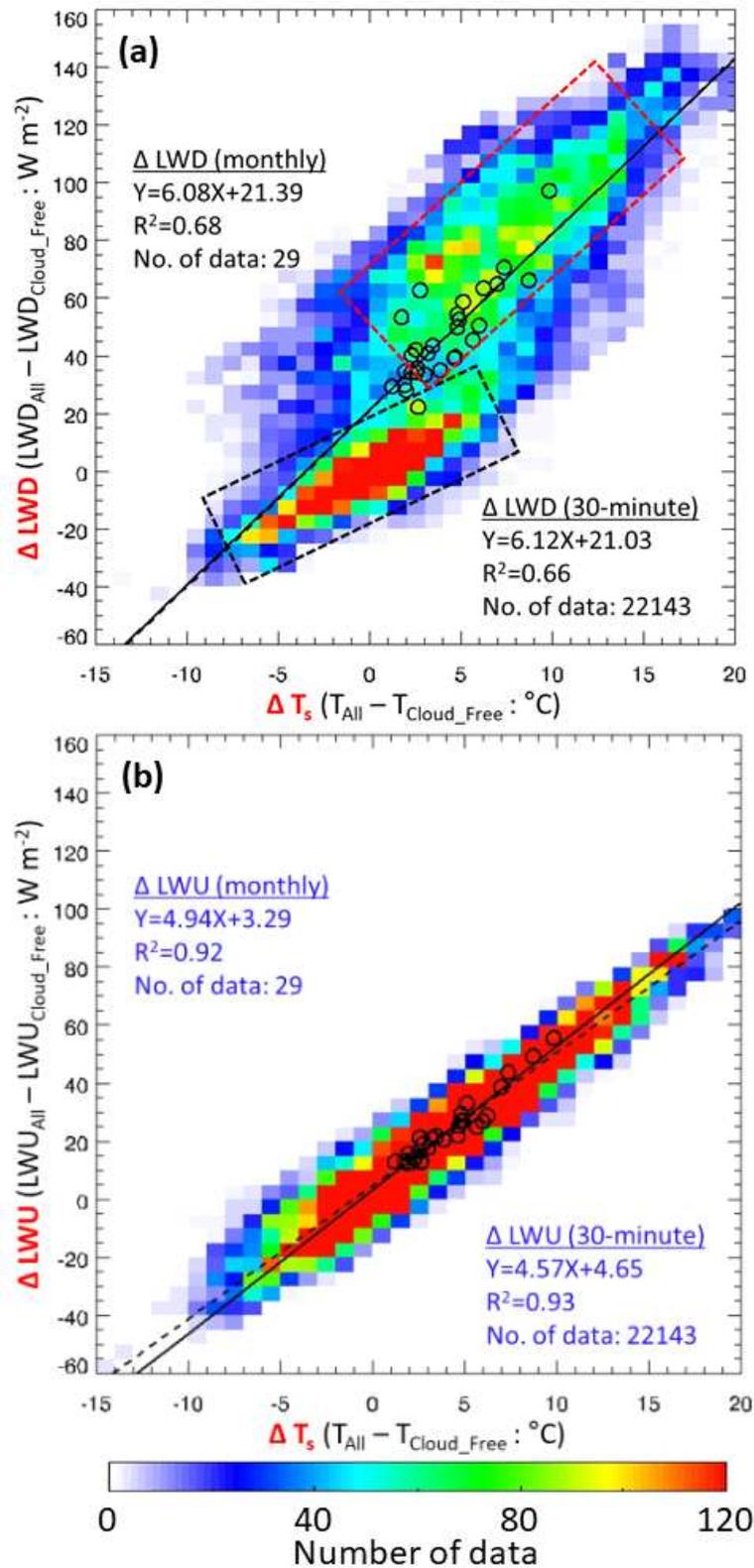


그림 10. 2004년부터 2013년의 겨울철 온도의 편차와 (a) 하향장파복사(LWD)의 편차 및 (b) 상향장파복사(LWU)의 편차의 상관관계.

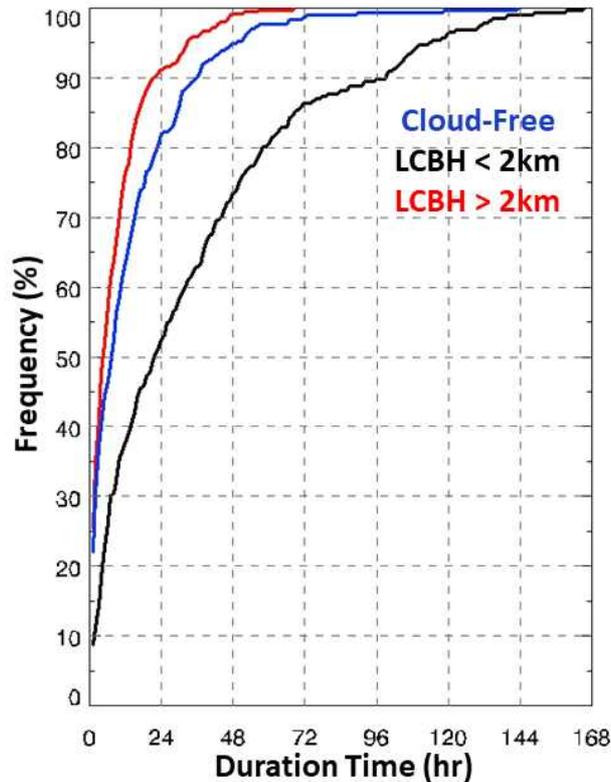


그림 11. 2004년부터 2013년까지 겨울철 구름이 없는 맑은 상태(Cloud-free, 파란색), 운저고도가 2 km 미만인 구름이 존재하는 상태(LCBH < 2 km, 검은색), 운저고도가 2 km 이상인 구름이 존재하는 상태(LCBH > 2km, 빨간색)의 지속 시간 누적분포도.

그림 12는 겨울철 니알슨 과학기지 주변의 850 hPa 지위고도와 바람장을 나타낸 그림으로, 평균적으로(그림 12a) 겨울철에는 그린란드 남쪽에 아이슬란드 저기압(Icelandic low)이 자리 잡고 있으며, 그린란드에는 고기압이 자리 잡고 있는 것으로 나타났다. 니알슨 과학기지과 그린란드 사이의 Fram strait는 저기압이 형성(cyclogenesis)되는 지역으로 알려져 있으며, 니알슨 과학기지 주변에 약한 저기압성 순환이 나타난다. 하층운이 관측된 시기(그림 12b)에는 아이슬란드 저기압이 발달하면서 북대서양에서 니알슨 과학기지로 강한 남풍/남서풍이 유입되는 것을 확인할 수 있으며, 반대로 구름이 없는 맑은 경우(그림 12c)에는 그린란드 고기압의 강화, 아이슬란드 저기압의 약화 및 노르웨이 북쪽의 저기압 강화로 북풍/북동풍이 우세한 것으로 나타났다. 즉, 온난한 북대서양으로부터 따뜻하고 습윤한 공기가 유입되는 시기에는 온도가 상승하고 낮은 구름이 발생하기 좋으며, 반대로 북쪽의 차고 건조한 공기가 유입되는 시기에는 춥고 맑은 상태가 됨을 의미한다. 이 결과는 앞서 구름이 존재할 때 지표면의 온도 및 상향장파복사가 증가하는 것과 일치하며, 니알슨 과학기지에서 관측된 구름은 중관 기상장의 영향으로 유입되는 것으로 추정된다.

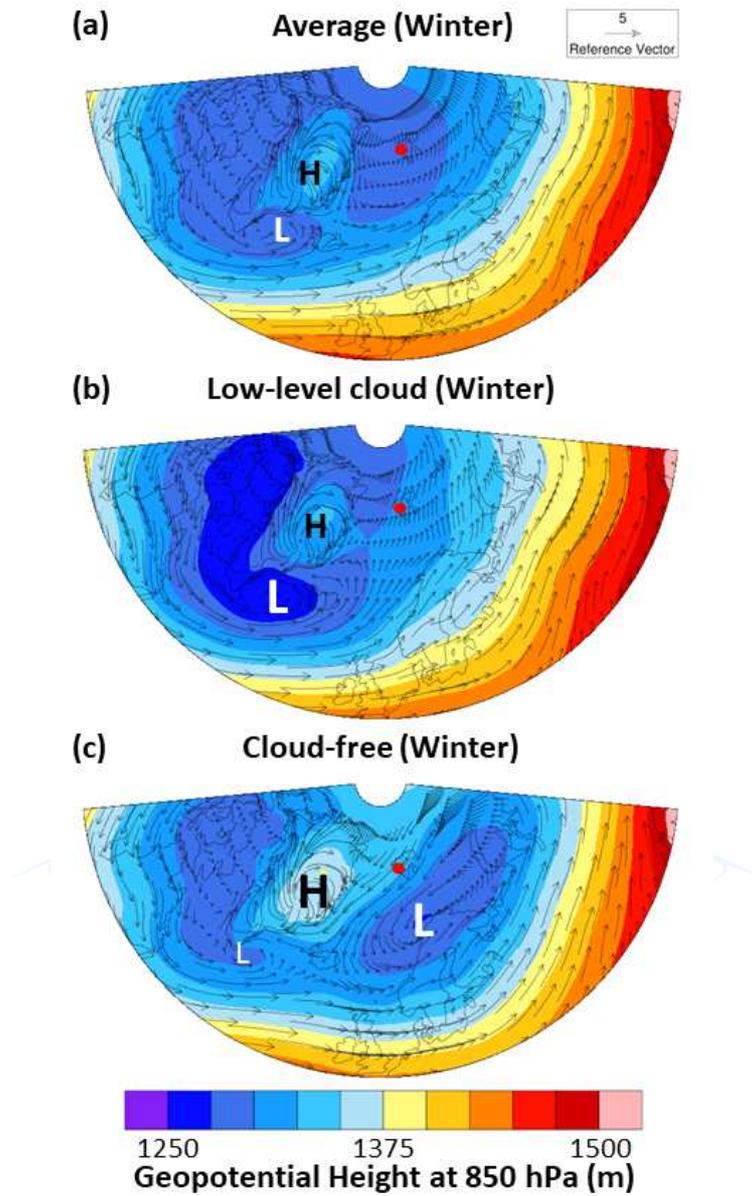


그림 12. 2004년부터 2013년까지 니알슨 과학기지 주변의 겨울철(11월 - 2월) (a) 전기간, (b) 운저고도 2 km 미만의 하층운(low-level cloud) 관측 시, (c) 구름이 없는 경우(cloud-free)의 평균 850 hPa 지위고도와 바람장.

### 3. 니알슨 과학기지의 하층운과 주변 바람장 분석

극지 연구소는 윈드 도플러 라이다(Wind doppler lidar, WDL)를 니알슨 과학기지에 설치하여 2016년 10월부터 관측을 시작하였다. 표 2는 사용된 윈드 도플러 라이다 기기 특성과 관측 정보를 나타내고 있다. 윈드 도플러 라이다에서 방출된 1.54  $\mu$ m 파장의 빛은 입자의 이동에 의한 진동수의 변화(도플러 효과)를 감지하며, 시선 속도  $v_r$  (입자 속도 또는 풍속)을 측정한다 (Weitkamp, 2006). 윈드 도플러 라이다의 스캔 모드에 따라 시선 속도를 측정하는 방법이 다르다. 본 연구에서 사용한 기기는 표 2에 제시된 4가지의 스캔 모드를 이용하며, 이들이 하나의 주기를 이루어 약 30분마다 반복 순환한다.

첫 번째 DBS(Boppler Beam Swinging)모드는 주기 내에서 4분간 진행되며, 5 개 (동, 서, 남, 북, 수직)의 방향에서 관측을 수행하는 모드이다. 75°의 고정 고도각에서 방위각을 90° 주기로 회전하면서 동, 서, 남, 북 방향의 시선 속도를 측정하고, 마지막으로 고도각을 90°로 변경하여 수직 속도를 측정한다.

두 번째 PPI(Plan Position Indicator) 모드는 3분 동안 5°의 고정된 고도각에서 방위각을 1°씩 이동하며 360° 스캔하는 방식이다. 세 번째 RHI(Range Height Indicator) 모드는 앞의 두 모드와 달리 방위각을 90°로 고정하고 고도각을 1°씩 이동하며 180° 수직으로 스캔한다. 이는 6분 동안 진행된다.

마지막으로 pointing 모드는 방위각 180°, 고도각 90°로 모두 고정한다. 이처럼 천정을 향하게 고정한 채 20분 동안 시선 속도를 측정한다. 이렇게 4가지 모드가 약 30분 동안 수행되고, 이를 하나의 주기로 하여 반복하며 관측을 수행한다.

본 연구는 니알슨 기지의 바람장 분석을 위해 DBS 모드로 관측된 결과만 이용하였다. DBS 모드에 의해 측정된 동, 서, 남, 북, 수직 시선 속도를 이용한

$u = \frac{v_{r1} - v_{r3}}{2 \sin(1-\Phi)}$ ,  $v = \frac{v_{r2} - v_{r4}}{2 \sin(1-\Phi)}$ ,  $w = \frac{v_{r1} + v_{r3} + v_{r2} + v_{r4}}{4 \cos(1-\Phi)}$  세 가지 식을 통해, 각각  $u$ ,  $v$ ,  $w$  속도를 산출한다. 이때 연직 풍속은  $w$ 와 같고, 수평 풍속은  $\sqrt{u^2 + v^2}$ 로 계산할 수 있다. 그리고  $u$ 와  $v$ 를 이용하여 수평 풍향(0° - 360°)을 추정할 수 있다.

표 2. 윈드 도플러 라이다 기기의 특성과 관측 정보.

파장	1.54 $\mu$ m		
해상도	25 m		
스캔 모드	시간	방위각( $\Theta$ )	고도각( $\Phi$ )
DBS (Doppler Beam Swinging)	4 분	0° - 180° ( $d\Theta = 90^\circ$ )	75°, 90°
PPI (Plan Position Indicator)	3 분	0° - 360° ( $d\Theta = 1^\circ$ )	5°
RHI (Range Height Indicator)	6 분	90°, 165°	0° - 180° ( $d\Phi = 1^\circ$ )
Pointing	20 분	180°	90°

윈드 도플러 라이다로 산출한 수평 풍속, 연직 풍속, 수평 풍향 데이터를 마이크로펄스 라이다(MPL)와 비교하여, 구름, 강수, 전선 유입과 같은 특정 기상 상황을 감지할 수 있다. 그림 13은 2017년 12월 27일부터 12월 28일까지 마이크로펄스 라이다와 윈드 도플러 라이다의 수직 프로파일을 보여준다. 해당 사례에서 마이크로펄스 라이다로 관측한 구름 고도를 윈드 도플러 라이다에서도 확인할 수 있다. 그리고 상층에서 하층으로 하강하는 구름이 보이는 27일 15시경에 윈드 도플러 라이다의 수평 풍향이 북풍계열에서 남풍계열로 바뀌는 것으로 보아 전선이 유입된 것으로 추측할 수 있다.

북극 지역에서 해당 기기를 이용한 풍속과 풍향의 장기간 분석은 한계가 있다. 윈드 도플러 라이다는 입자의 움직임을 감지하여 풍속과 풍향을 측정하는 원리이기 때문에, 대기 중 존재하는 입자가 적은 깨끗한 하늘에선 관측이 되지 않는다. 이에 따라 상대적으로 깨끗한 대기 상태를 가진 북극에서는 장기간 관측 데이터 취득에 어려움이 있다. 그러므로 니알슨 지역의 윈드 도플러 라이다를 이용한 바람장 관측은 장기간 분석보다는 그림 13과 같이 사례분석에 유용하게 사용될 수 있다.

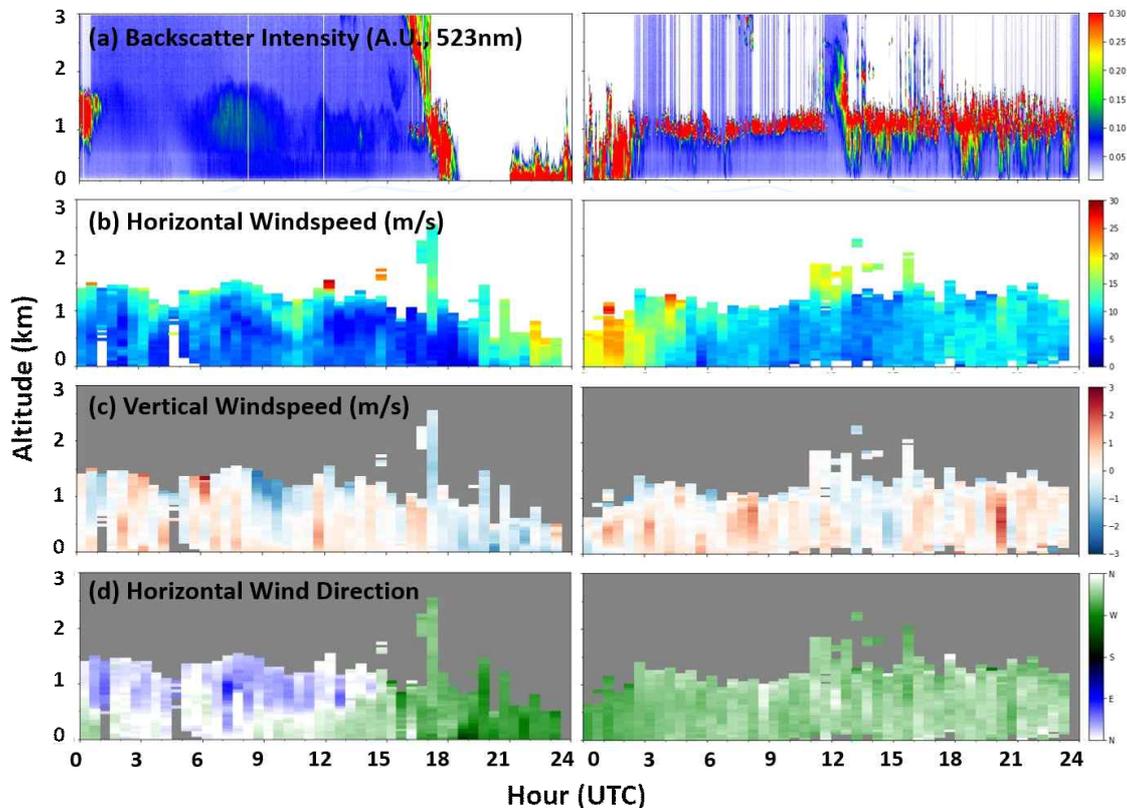


그림 13. 2017년 12월 27일부터 12월 28일 사례에 마이크로펄스 라이다(MPL)로 관측한 (a) 후방산란강도와 윈드 도플러 라이다(WDL)로 측정된 (b) 수평 풍속, (c) 연직 풍속, (d) 수평 풍향.

#### 4. 아라온 호에서 관측된 구름의 특성 분석

그림 14는 2017년 북극 하계 관측 중 2017년 8월 27일부터 9월 4일까지 알래스카 북쪽에서 아라온 호의 라이다로 관측한 후방산란강도(그림 14a)와 편광소멸도(그림 14b) 및 해당 기간 아라온 호의 관측 경로(그림 14c)를 나타낸 그림이다. 9일 간의 관측 기간 중 8월 27일 Barrow 부근에 정박했던 아라온 호는 8월 28일부터 동쪽으로 이동한 후 북위 70° 내외, 서경 135° - 140° 부근에서 구름을 관측하였다. 관측 기간 내내 지상 1 km 이내에 높은 후방산란강도 및 높은 편광소멸도를 보이는 층이 있으며, 본 연구에서는 웨이블릿 법(wavelet method)을 이용하여 운저고도를 산출한 결과 해당 층들은 대체로 구름으로 판별되었다. 광학적으로 두꺼운 하층운에 레이저 신호가 모두 소산되어 구름 위로는 관측이 되지 않은 것으로 나타났다. 대체로 강수가 없는 구름은 편광소멸도가 0.1 내외를 보이는 액체상 구름이 우세하였으며, 강수가 존재할 때에는 산란 등에 의해 편광소멸도가 0.3까지 높게 나타났다. 또한 9월 3일과 9월 4일에는 고도 300 m 내외의 매우 낮은 구름들이 관측이 되었으나 라이다 관측 특성 상 지표면 부근의 후방산란강도는 낮게 나타나 운저고도 산출에 어려움이 있었다.

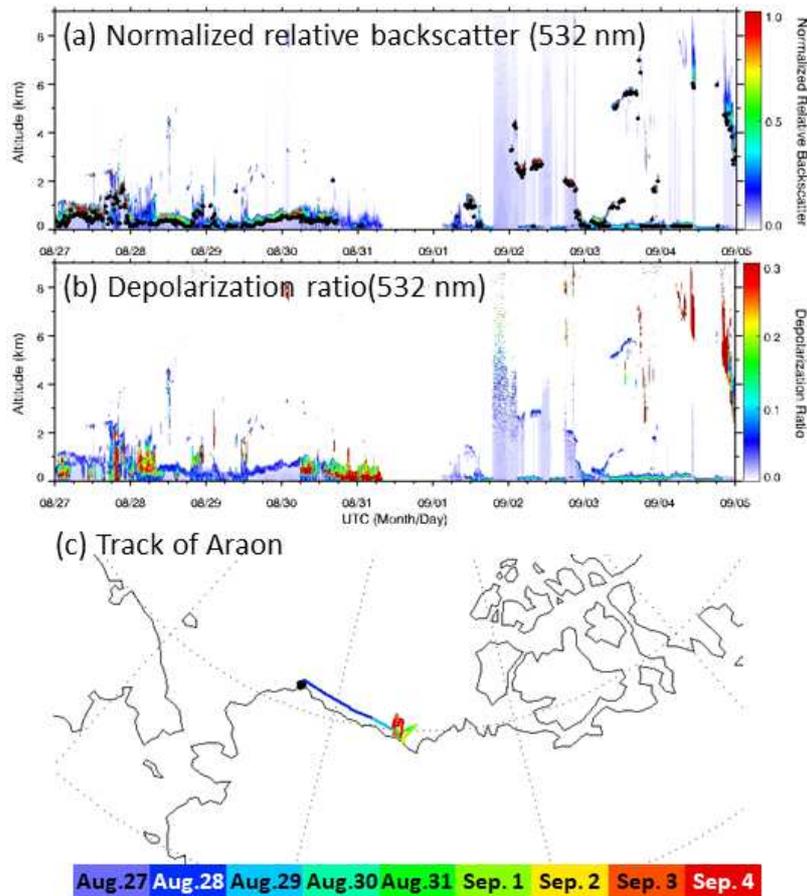
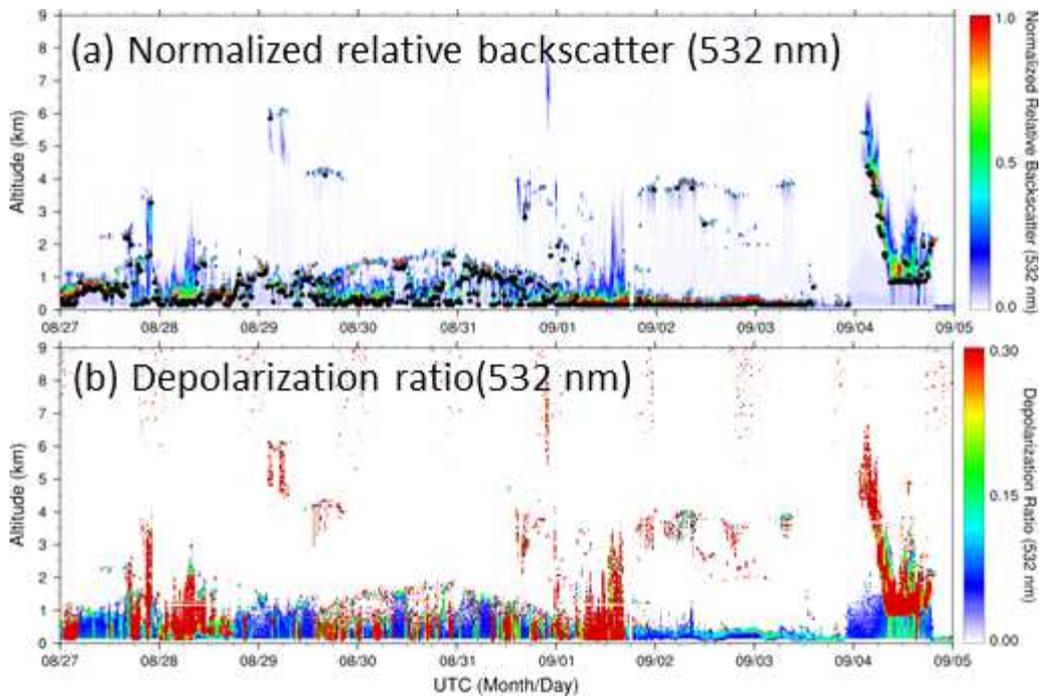


그림 14. 2017년 북극 하계 관측 중 2017년 8월 27일부터 9월 4일까지 아라온 호 라이다로 관측된 (a) 후방산란강도와 (b) 편광소멸도와 (c) 아라온 호 관측 경로. 후방산란강도로 산출된 운저고도는 (a)에 검은색 점으로 표시함.

아래의 호에서 라이다 관측 결과와 비교를 위해 인근에 위치한 ARM(Atmospheric Radiation Measurement)의 NSA(North Slope of Alaska) 지점(그림 14c의 검은색 점)의 라이다 관측 결과(그림 15)를 살펴보았다. 배가 NSA 지점 부근에 정박한 8월 27일에는 동일한 구름의 고도 변화를 보였으며, 배가 동쪽으로 이동한 8월 28일부터는 아래 호와 NSA 모두 하층운이 관측되었지만 구름의 고도 등에 차이가 있었다. 9월 4일 오전 NSA에 약 6 km 고도의 구름이 관측된 이후 점차 구름의 고도가 낮아지며 기압골의 통과를 확인할 수 있었으며, 아래 호에서는 NSA에 비해 약 15시간 늦게 6 km 상공의 구름이 관측되었다.



**그림 15.** 그림 14와 동일한 시기 ARM의 North Slope of Alaska(NSA) 관측소의 라이다로 관측한 (a) 후방산란강도와 (b) 편광소멸도. 아래 호 관측 자료와 동일하게 후방산란강도에 운저고도를 검은색 점으로 표시함. NSA는 그림 14c에 검은색 점으로 표시한 지점에 위치함.

## 제 2 절 위성 원격관측자료를 이용한 구름의 기하학적·미세 물리적 특성 및 에어로졸 분포 분석

### 1. 위성 원격관측자료를 이용한 구름의 특성 분석

그림 16a-c는 CALIPSO, CloudSat, MODIS에서 2006년 6월부터 2018년 10월까지 관측된 북극 구름의 운량 분포를 나타낸 그림이다. CALIPSO와 CloudSat은 각각 라이다와 레이더를 이용하여 구름의 연직분포를 파악할 수 있는 위성이지만 시야(field-of-view)가 좁아 일반적인 운량의 정의와 같은 관측을 하기에는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 CALIPSO와 CloudSat에서 산출된 운량을 한 달 동안  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  격자에서의 총 관측 횟수와 구름이 관측된 횟수의 비율로 정의하였다. 반면 MODIS는 지표면과 구름에 의해 반사된 태양 복사에너지 혹은 장파복사에너지를 측정하여 구름을 측정하는 수동센서로 넓은 시야(field-of-view)를 가지고 있기 때문에 격자 내의 구름의 면적을 비율로 계산하는 일반적인 운량 계산이 가능하다. 관측 원리에 따른 운량 정의에 다소 차이가 있지만 그림 16에서 산출된 운량의 분포는 난류가 유입되는 북대서양 부근(노르웨이 해, 바렌츠 해 및 카라 해)에 높고, 그린란드와 캐나다 북부의 제도에 낮은 유사한 공간분포를 보인다. 관측된 평균 운량(북위  $60^{\circ}$  - 북위  $82^{\circ}$ )은 CALIPSO, CloudSat, MODIS가 각각 0.75, 0.57, 0.69로 CALIPSO가 가장 높았으며, CloudSat이 가장 낮은 것으로 나타났다.

CALIPSO 관측 결과를 중심으로 각 위성들의 운량 차이를 계산하면, CloudSat(그림 16d)은 북극 전역에 걸쳐 더 낮은 운량을 보였다. 이러한 두 위성 간의 운량 차이는 우선 상대적으로 긴 파장의 CloudSat(94 GHz; 약 3.2 mm)이 CALIPSO(532 nm)에 비해 광학적 두께가 작은 구름의 관측에는 어려움이 있기 때문이다. 또한 CloudSat은 지상 1 km 부근 이하에서는 지표면에 의한 신호로 인해 구름 산출이 어려운 점도 운량이 낮게 산출되는 원인 중 하나이다. MODIS(그림 16e)는 해빙 농도가 15%를 기준으로 CALIPSO에 비해 운량 산출 결과가 반대로 나타났다. 해빙 농도 15%가 넘는 지역은 주로 해빙이 덮여있는 지역으로 정의되기 때문에 해빙의 존재 유무에 따라 CALIPSO와 MODIS의 운량 산출 결과에 차이가 있음을 의미한다. MODIS는 구름에 반사된 태양복사나 구름에서 방출되는 장파복사를 관측함으로써 구름 존재 유무를 파악하는데, 해빙이 존재하면 지표면의 반사도와 구름의 반사도에 큰 차이가 없으며, 해빙의 온도가 낮아 구름의 온도와 비슷할 경우 장파복사라도 구분이 어렵기 때문에 해빙이 존재할 때 구름을 관측하기에 어려운 점이 있다. 이 때문에 해빙이 존재하는 지역에서는 CALIPSO에 비해 운량이 더 낮게 산출된 것으로 파악된다.

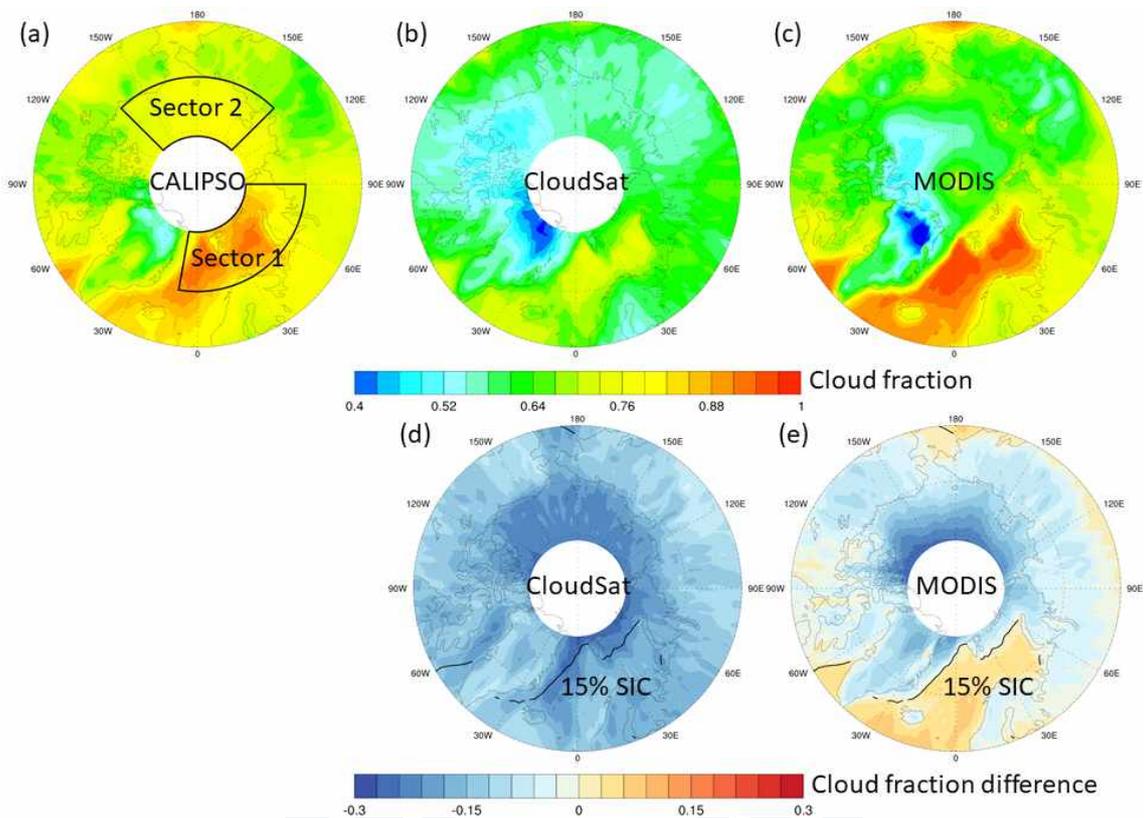


그림 16. 2006년 6월부터 2018년 10월까지 (a) CALIPSO, (b) CloudSat, (c) MODIS에서 산출된 운량의 분포와 CALIPSO 기준 (d) CloudSat과 (e) MODIS의 운량 차이 분포.

극지연구소

그림 17은 북위 70° 이상의 북극 전역과 대서양 부근의 sector 1, 태평양 부근의 sector 2 지역에서 해빙 농도에 따라 CALIPSO와 CloudSat, MODIS의 운량 차이를 나타낸 그림이다. CloudSat(그림 17a)은 CALIPSO에 비해 북극 전역과 sector 1, sector 2에서 해빙 농도에 관계없이 모두 운량이 낮았다. 이는 앞서 그림 16d에서 CloudSat이 CALIPSO에 비해 북극 전역에 걸쳐 운량이 모두 낮은 것과 일치한다. 해빙 농도에 따른 운량 차이에는 큰 변화가 없는 점은 두 위성 모두 능동 센서를 이용하여 구름을 관측하기 때문에 상대적으로 지표면의 상태에 영향을 덜 받음을 유추할 수 있다. 반면 MODIS(그림 17b)는 앞서 그림 16e의 결과와 유사하게 해빙의 농도가 15 - 20% 이하일 때에는 운량이 더 높았다가 해빙의 농도가 높을수록 운량이 CALIPSO에 비해 낮은 것을 알 수 있다.

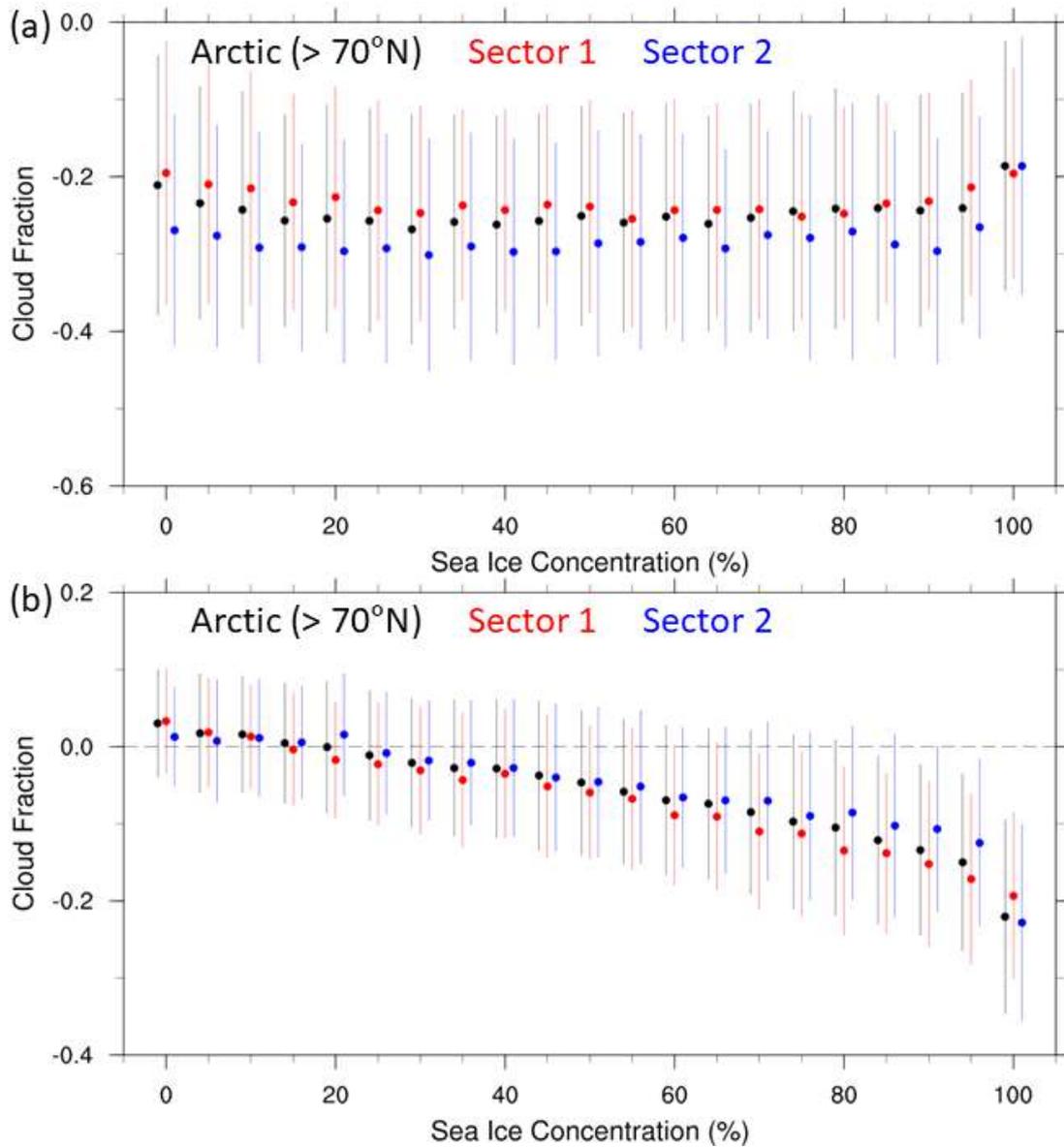


그림 17. 2006년 6월부터 2018년 10월까지 북위 70° 이상, Sector 1(대서양 지역), Sector 2(태평양 지역)에서의 해빙 농도에 따른 (a) CloudSat과 CALIPSO의 운량 차이 및 (b) MODIS와 CALIPSO의 운량 차이. Sector 1과 Sector 2는 그림 16a에 표시되어 있음.

그림 18은 2006년 6월부터 2018년 10월까지 북위 70° 이상의 북극 전역에서 관측된 해빙 농도, CALIPSO에서 관측된 운량과 구름의 광학적 두께, CloudSat에서 관측된 운량과 빙정수함량, 액체수함량 연직 분포의 월 변화를 나타낸 그림이다. 해양은 대기에 비해 큰 열용량에 의해 해빙 농도는 9월에 연중 최저치를 보이는 것으로 나타났다. 앞서 운량의 수평 분포와 유사하게, CALIPSO에서 산출된 운량이 CloudSat에 비해 더 높은 것을 확인할 수 있으며, 특히 겨울철이나 지상 3 km 이상의 구름에서 그 차이가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 극지역 겨울철이나 상층에는 수증기가 매우 적어 구름 입자의 성장이 활발하지 않기 때문에 상대적으로 긴 파장의 CloudSat에서 구름 관측이 힘들기 때문에 나타난 것으로 파악된다. 또한 CloudSat은 지표면의 신호로 인해 지상 500 m 이내의 운량은 매우 낮게 산출되는 것도 확인된다. 두 위성의 겨울철 운량은 다소 차이를 보이지만, 여름철 적은 구름과 10월 지상 1 km 부근에 운량이 가장 높은 점은 유사한 결과를 보인다. 여름철의 상대적으로 낮은 대기 안정도로 인해 하층의 수증기가 상층으로 확산되기에 좋은 조건이 형성되어 여름철 하층운과 중층운이 상대적으로 적은 것으로 판단된다(Liu et al. 2012). 반면 가을철에 해양은 큰 열용량으로 인해 해빙이 적고 따뜻한 상태를 유지하지만 대기는 입사되는 태양복사에너지가 줄어들며 점차 온도가 낮아져 상하층의 온도 차이가 커진다. 이로 인해 불안정도가 증가하여 해양에서 대기 중으로 수증기 방출이 증가하고 하층에 구름이 증가하는 것으로 알려져 있다.

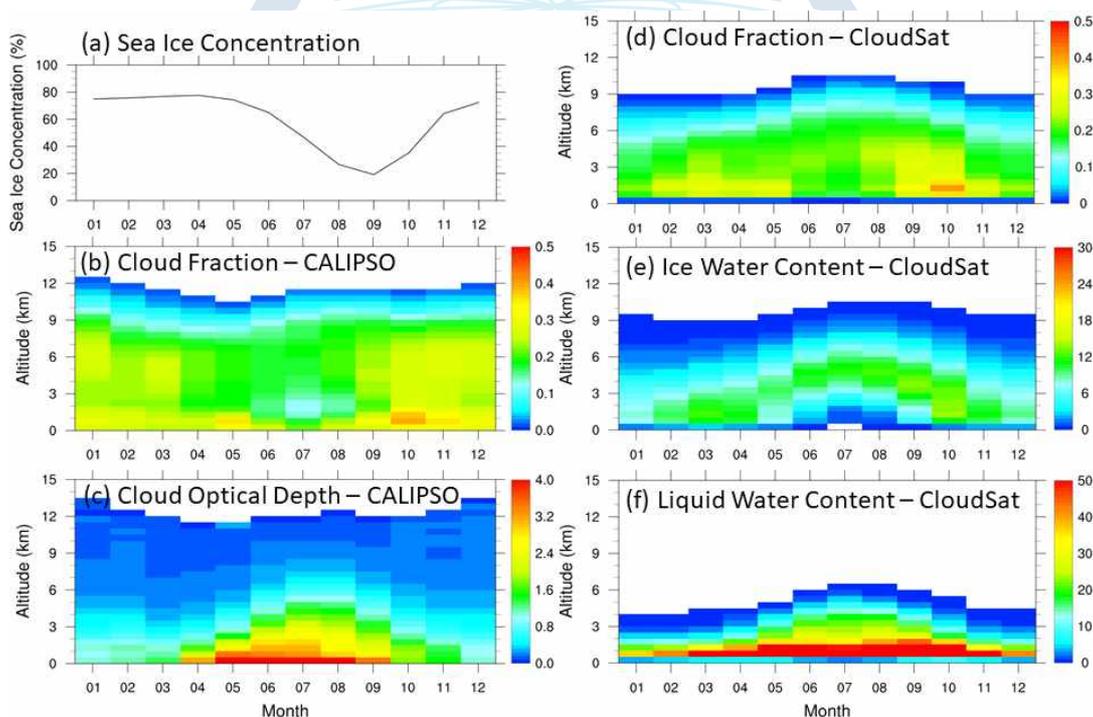


그림 18. 2006년 6월부터 2018년 10월까지 북위 70° 이상 북극 지역에서의 (a) 해빙 농도, CALIPSO에서 산출된 (b) 운량과 (c) 구름의 광학적 두께의 연직 분포 월 변화와 CloudSat에서 산출된 (d) 운량과 (e) 빙정수함량(ice water content), (f) 액체수함량(liquid water content) 연직 분포의 월 변화.

구름의 미세물리적 특성(빙정수함량 및 액체수함량)을 살펴보면, CloudSat에서 얼음과 액체를 기온에 따라 구분하기 때문에 대체로 액체수함량은 기온이 높은 하층에 집중되고, 빙정수함량은 여름철 3 km 이상의 고도 혹은 봄/가을의 하층에 높게 산출되었다. 다만 앞서 운량과 마찬가지로 가을철 해양에서부터 많은 수증기가 공급되어 가을철 하층에 빙정수함량과 액체수함량이 가장 높은 것으로 나타났다. 한편, CALIPSO에서 산출된 구름의 광학적 두께를 살펴보면, 구름의 광학적 두께는 5월부터 7월까지 늦봄과 초여름에 높은 것으로 나타났다. 이는 구름의 광학적 두께를 산출할 때 관측된 구름의 평균적인 광학적 두께를 계산하였기 때문에 여름철에 구름이 적게 관측되었지만 구름의 광학적 두께는 두꺼운 것으로 분석할 수 있다. 한편 가을철 구름의 광학적 두께는 높은 빙정수함량과 액체수함량에 비해 낮은 것으로 나타났으며, 이는 가을철 구름의 높은 광학적 두께에 의해 구름 내부에서 레이저 신호가 소산되어 구름의 일부만 산출되었기 때문으로 추정된다.



## 2. 위성 원격관측자료를 이용한 북극 지역 에어로졸 분포 분석

그림 19는 CALIPSO 위성을 이용하여 2006년 7월부터 2019년 6월까지 총 13년 동안 관측된 북극 지역 내 에어로졸 광학적 두께(Aerosol Optical Depth; AOD)의 평균 분포와 계절별 분포 특성을 나타낸 그림이다. 전체 평균 에어로졸 광학적 두께 분포(그림 19a)를 살펴보면, 아이슬란드 부근과 시베리아 내륙에 높은 에어로졸 광학적 두께가 나타나며, 그린란드에 낮은 에어로졸 광학적 두께가 관측되었다. 계절별로 살펴보면, 대체로 아이슬란드와 북대서양 인근은 다른 북극 지역들에 비해 높은 에어로졸 광학적 두께가 나타났고, 시베리아 지역은 겨울철과 여름철에 특히 높은 에어로졸 광학적 두께가 나타난 것을 확인할 수 있다. 반면, 북극 중심부는 전반적으로 에어로졸 광학적 두께가 낮았으나 여름철에 특히 에어로졸 광학적 두께가 낮아 상당히 깨끗한 지역임을 알 수 있다.

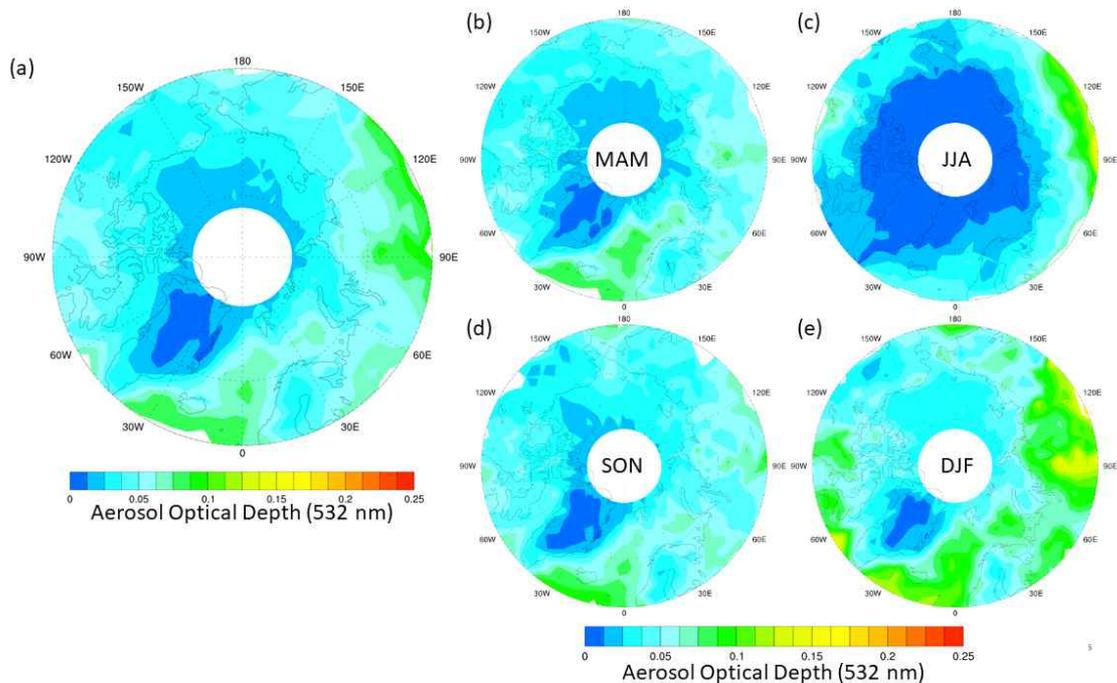


그림 19. 2006년 7월부터 2019년 6월까지 13년 간 CALIPSO에서 관측된 (a) 전 기간 평균, (b) 봄, (c) 여름, (d) 가을, (e) 겨울의 에어로졸 광학적 두께(AOD, 532 nm)의 분포.

그림 20은 북위 60° 이상 지역의 에어로졸 광학적 두께 월 평균 변화를 나타낸 그림으로, 에어로졸 광학적 두께는 12월부터 1월까지 약 0.06으로 연중 최고를 보이다가, 점차 감소하여 6월에 약 0.015로 가장 낮은 것으로 나타난다. 북극 전체 평균 에어로졸 광학적 두께는 약 0.04로 북극 지역 내 8개의 에어로넷 관측 자료의 평균 에어로졸 광학적 두께(0.08; Xie et al., 2018)에 비해 약 절반 정도의 값을 보였다. 본 연구에서는 위성 관측을 통해 북극 전 지역에 걸쳐 에어로졸 광학적 두께(AOD)의 평균값을 산출함으로써 에어로졸의 영향이 매우 적은 북극 중심부까지 포함되었기 때문에 선행연구의 결과보다 낮은 것으로 판단된다. 본 연구에서 산출된 에어로졸 광학적 두께 평균값이 매우 낮기는 하지만, 겨울과 봄에 최고치를 보이는 점은 기존 선행연구들의 결과와 일치한다(Wang et al., 2011). 선행연구들에서는 중위도 지역의 오염물질이나 북아메리카, 시베리아에서의 산불이 장거리 수송되어 북극 지역의 에어로졸 농도를 높이는 것으로 지목하고 있다. 특히 겨울철과 봄철에는 저기압 활동에 의한 에어로졸 수송이 활발하기 때문에(Xie et al., 2018) 에어로졸 광학적 두께가 높아질 수 있다고 알려져 있다. 이는 겨울철에 유라시아 대륙에 인접한 시베리아 지역이나 저기압 활동이 활발한 북대서양 지역에 에어로졸 광학적 두께가 높은 것을 설명할 수 있다.

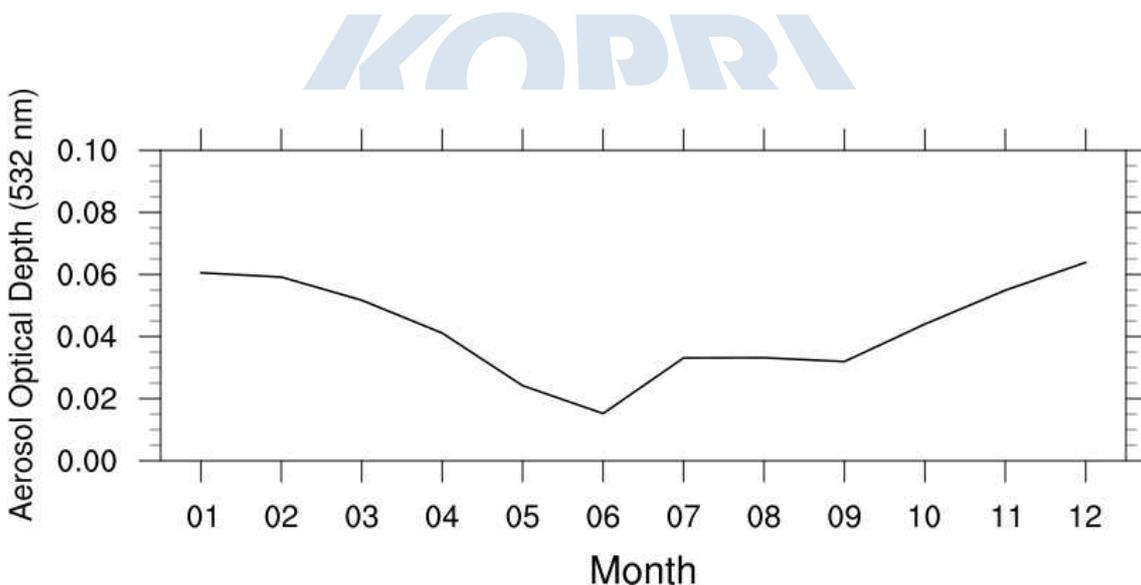


그림 20. 2006년 7월부터 2019년 6월까지 CALIPSO에서 산출된 북위 60° 이상 지역의 평균 에어로졸 광학적 두께(AOD, 532 nm)의 월 변화.

### 제 3 절 원격관측자료와 모델 및 재분석 자료의 비교

#### 1. 지상 원격관측자료와 구름 모델링 결과 비교

극지 최적화 WRF version 4.1.1 (Polar-optimized Weather Research and Forecasting Model version 4.1.1; PWRF)는 Noah 지표면 모델(Barlage et al., 2010)의 눈과 얼음 업데이트를 통해 극지 최적의 표면 에너지 균형과 열전달 시뮬레이션 환경을 만들었다(Hines and Bromwich, 2008; Hines et al., 2015). 가변적인 해빙의 두께, 눈 깊이, 알베도 등의 정보도 추가되어 있다. 극지에 최적화된 PWRF의 옵션은 Ohio State University's Byrd Polar and Climate Research Center에서 개발되었으며 WRF의 표준 모델에 접합할 수 있게 되어있다.

구름 모델링 결과를 도출하기 위해 72개의 수직 해상도, 4개의 등지 격자(nesting)를 통하여 27 km, 9 km, 3 km, 1 km의 수평 해상도로 설정(그림 21)하였으며, 대기 경계층과 대기 표면층 그리고 장 단파 복사에너지에 필요한 극지 환경에 맞는 물리적 파라미터(physical parameter)를 설정하였다(그림 22). 니알슨 기지(78.92°N, 11.53°E)에서 수집된 자료와 PWRF 모델에서 모의된 구름 값을 비교하기 위해 최대한 가까운 PWRF 지점(78.91°N, 11.54°E)과 비교를 진행하였다.

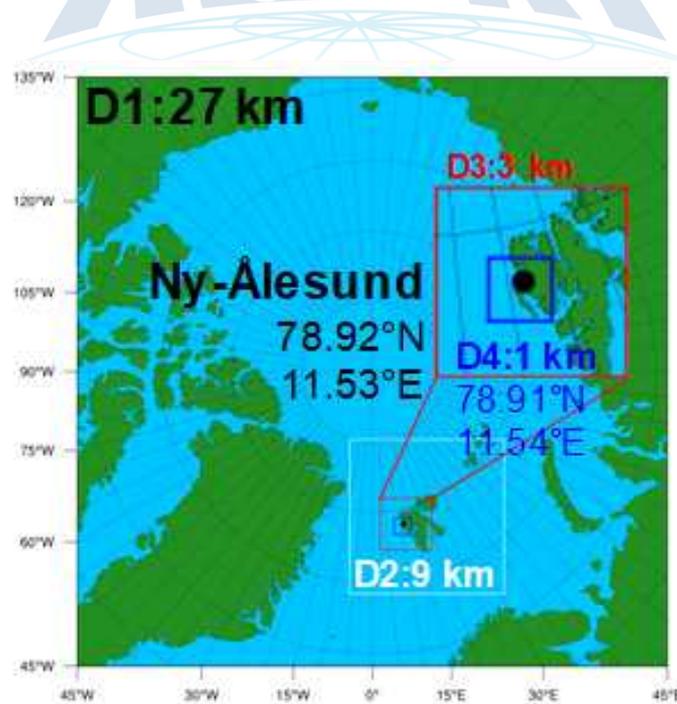


그림 21. 지상 관측 자료와 비교를 위한 PWRF 모델 도메인 설정.

벌크 미세물리(Bulk microphysics) 스킴(scheme) 중 구름 입자 크기 분포 및 미세 물리학적 프로세스를 개선하여 산출하는 이중 모멘트(double moment) 접근방법을 가진 3가지 스킴을 선정하였다(표 3). MORR 스킴(Morrison et al., 2009)와 WDM6 스킴(Lim and Hong, 2010)의 경우 구름(qc), 비(qr), 얼음(qr), 눈(qs), 싹눈(qh)의 혼합비(mixing ratio)를 산출하며, NSSL 스킴(Mansell et al., 2010)의 경우 여기에 우박(qh)까지 산출하고 있다. 구름 입자 수농도는 다양하게 비(Nr), 얼음(Ni), 눈(Ns), 싹눈(Ng), ccn(Nn), 구름(Nc), 우박(Nh)을 계산한다.

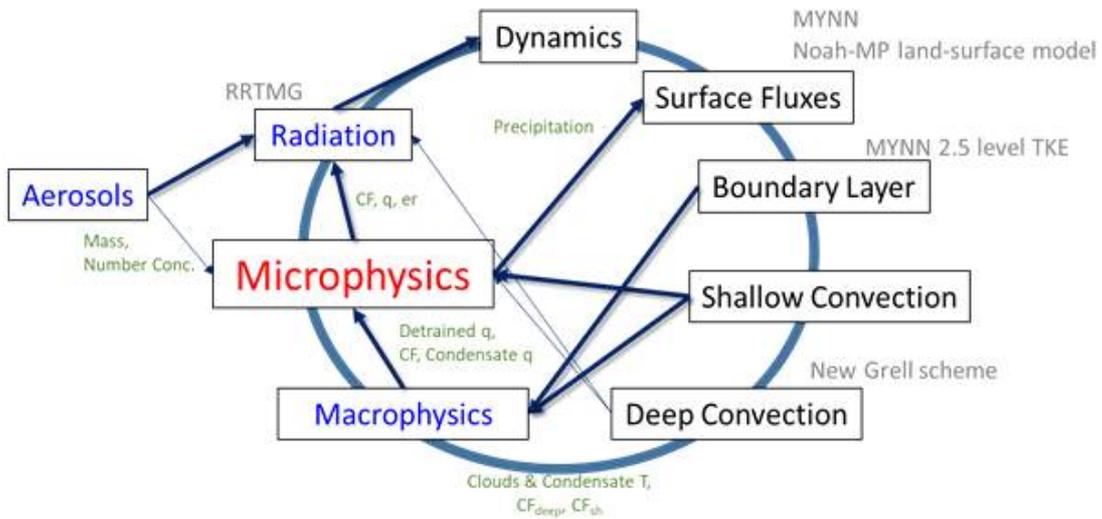


그림 22. PWRP 모델 물리적 파라미터(physics parameter) 설정.

표 3. 본 연구에서 사용된 구름 미세물리 과정을 모의하는 벌크 미세물리 스킴(scheme).

Acronym	Scheme	Mass Variables	Number Variables
MORR	Morrison, Thompson and Tatarskii, 2009	qc qr qi qs qg	Nr Ni Ns Ng
WDM6	Lim and Hong 2010	qc qr qi qs qg	Nn(ccn number) Nc Nr
NSSL	Mansell, Ziegler and Bruning, 2010	qc qr qi qs qg qh	Nc Nr Ni Ns Ng Nh

PWRF 모델의 경우 일반적으로 24시간의 초기구동(spin-up)을 통해 물리과정이 안정화되는 과정을 거치며, 구름 모델링 결과를 관측자료와 비교하기 이전에, 초기장 시작 시각에 대한 감도 실험을 진행하였다(그림 23). 실험은 초기 24시간(20161104 00 UTC), 12시간(20161104 12 UTC), 0시간(20161105 00 UTC) 초기구동을 진행하였다. 초기장이 00 UTC, 12 UTC임에 따라 모의 되는 액체수경로(Liquid water path, LWP)가 매우 다른 것을 볼 수 있다. 12시간 초기구동을 진행한 3일 예보결과가 관측과 상관관계가(0.51) 제일 잘 맞는 것으로 보이며 24시간(0.50), 0시간(0.49) 순으로 나타났다. 11월 6일 17시 이후에 강수로 인하여 관측자료가 없는 상태이지만 모델에서는 다량의 액체수경로가 모의 되고 있다.

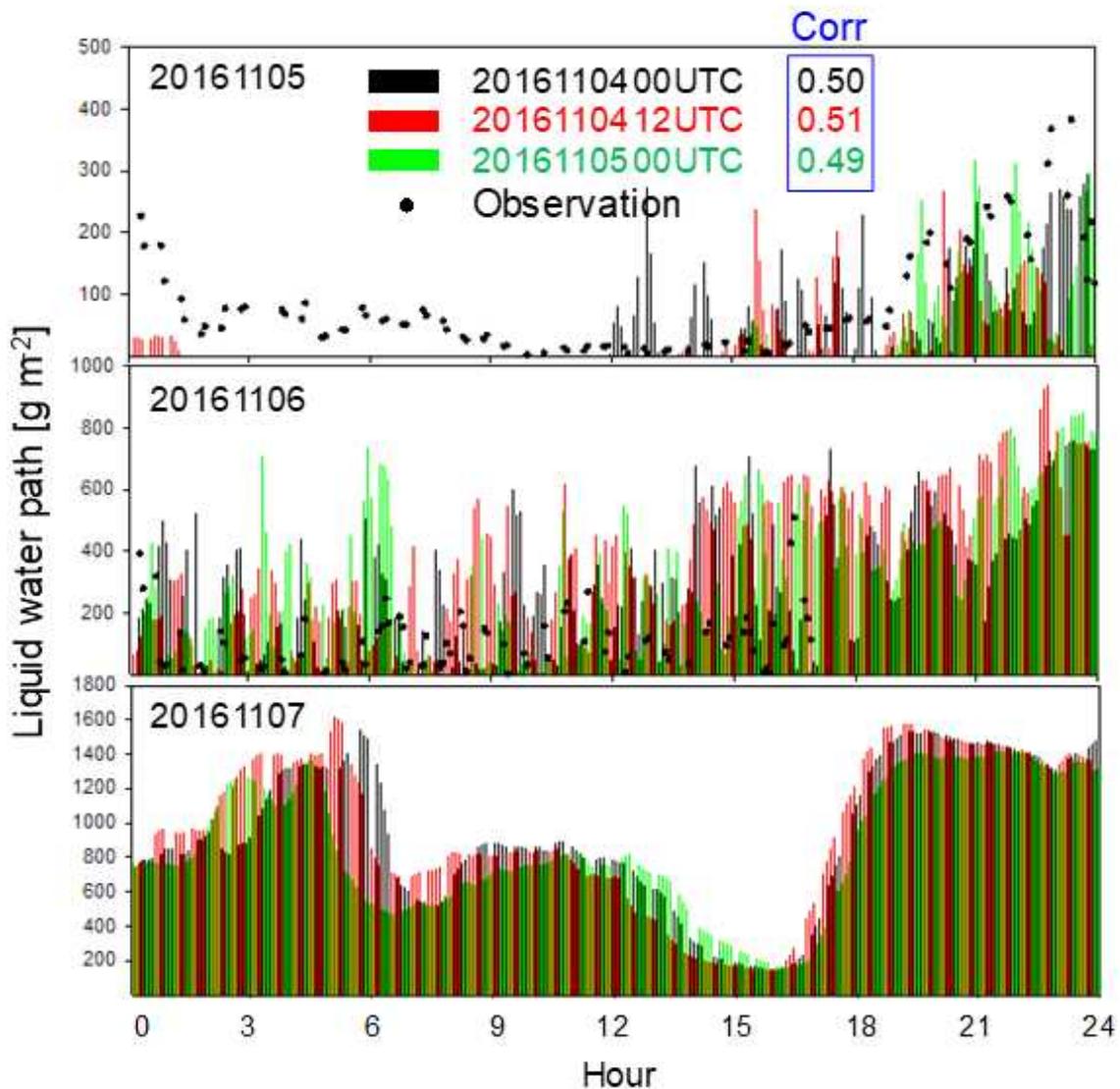


그림 23. Cloudnet에서 관측된 액체수경로(liquid water path)를 20161104 00 UTC (검정), 20161104 12 UTC(빨강), 20161105 00 UTC(초록) 날짜를 기준으로 초기구동(spin-up)을 진행한 모델값과 비교.

PWRF를 통한 북극 구름 산정 및 사례 분석을 통한 스킴 모의 성능 검증을 위하여 니알슨 과학기지에서 지상 원격관측자료(레이더, 운고계, 마이크로 라디오미터)로부터 산출된 액체수함량과 빙정수함량 값을 PWRF 모델 스킴별 예측 값과 비교하였다(그림 24, 그림 25). 액체수함량과 빙정수함량의 수직 분포 패턴에 대한 모델 시뮬레이션은 관측된 값과 유사한 패턴을 나타내지만 구름의 높이가 더 높게 산출된 것을 볼 수 있다. 강수가 발생하기 이전인 11월 6일 16시 이전에는 2 km 이하의 낮은 구름층이 지속해서 니알슨 관측소 위에 끼어 있으며 WDM6나 NSSL 스킴보다 MORR 스킴이 조금 더 빨리 하층운을 모의하기 시작하였다. 앞서 비교를 진행한 액체수경로의 경우 관측된 값은 없으나 모델에서는 약 6 km(MORR), 4 km(WDM6), 5 km(NSSL)까지 구름이 존재하는 것으로 산출되었다. PWRF의 각 스킴별 빙정수함량 모의결과를 살펴보면 모두 관측값보다 약 6시간 먼저 상층(4 - 10 km)의 얼음 구름을 산출하고 있으나 높은 빙정수함량이 보이는 하층(0 - 2 km)의 경우 비슷한 값과 시기에 구름이 형성되었다 예보하고 있는 것으로 보이며, 다층 구름의 패턴을 잘 모의하고 있는 것으로 보인다.

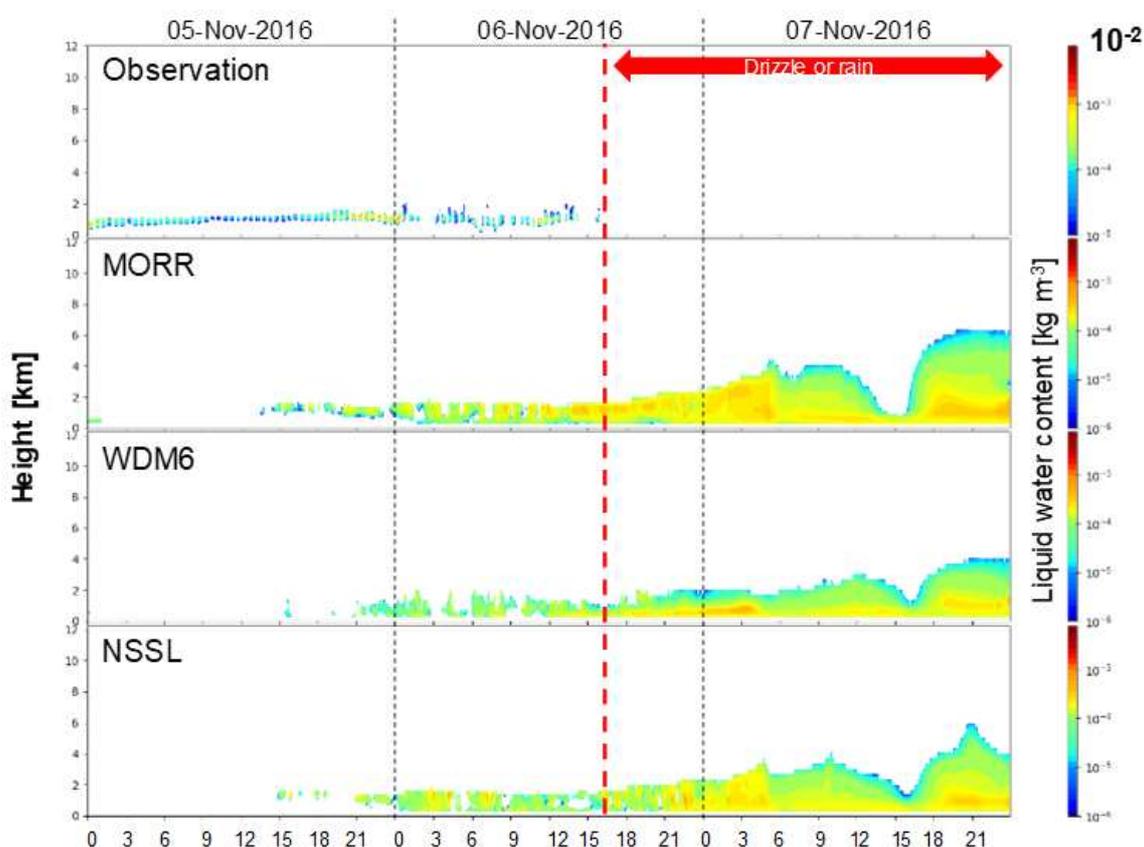


그림 24. 모델 실험 수행 기간에 실시간으로 관측된 액체수함량(liquid water content)과 모델 예측 결과 비교.

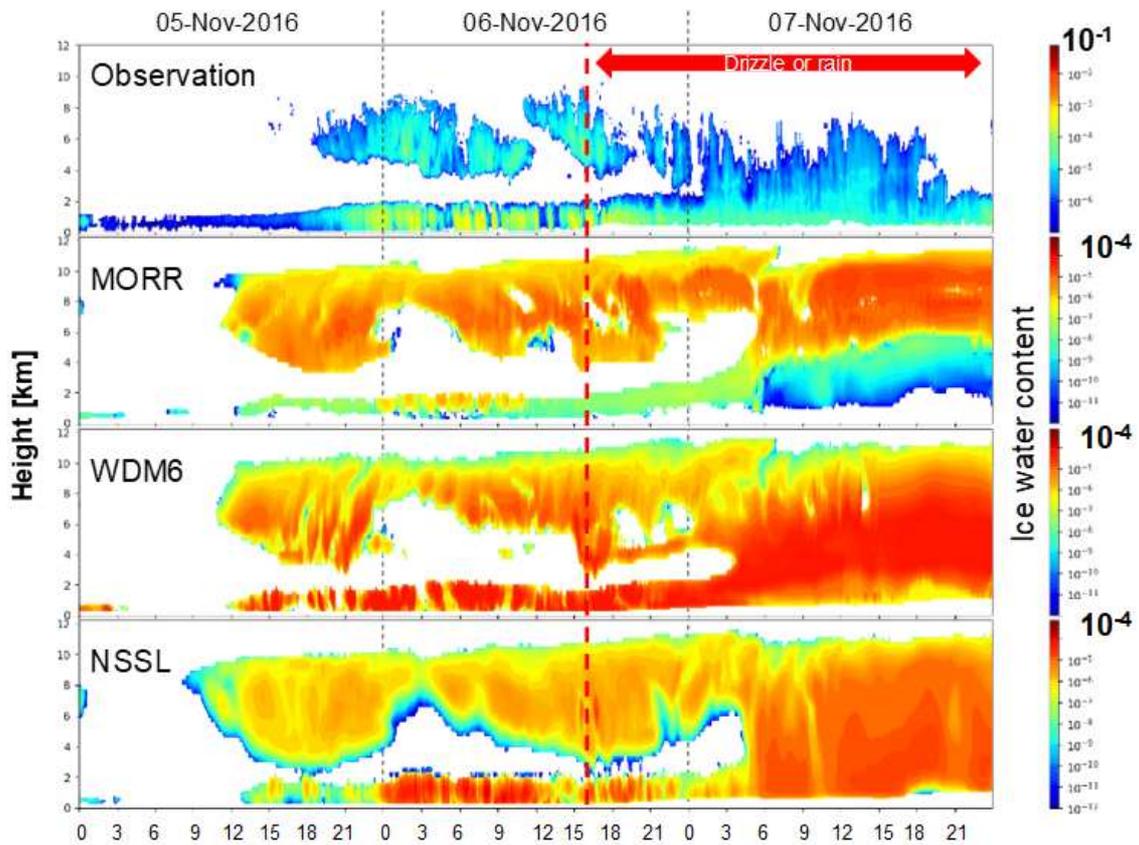


그림 25. 그림 24와 동일. 단, 빙정수함량(ice water content) 결과.

## 극지연구소

강수에 따라 스킵별 모의 능력을 살펴보기 위해 강수량이 없는 시기와 강수가 발생하는 시기를 나누어 액체수함량과 빙정수함량 관측 값과 모델 모의 값을 비교하였다(그림 26). 이론적으로 액체 구름은  $0^{\circ}\text{C}$  이상, 혼합 구름은  $-40^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C}$ , 그리고 얼음 구름은  $-40^{\circ}\text{C}$  이하로 구분하며, 두 기간 모두 하층에 액체 구름과 중층에 혼합 구름 그리고 상층에 얼음 구름이 일부 존재하는 것으로 보인다. 모델에서 액체와 얼음 분할 시 온도에 크게 의존적인 경향을 보이며 각 스킵별로 분할되는 온도의 경계는 다르나 전체적으로 하층운의 빙정수함량이 감소하는 반면 액체수함량은 증가하는 것으로 보인다. 강수 이전에는 1.5 km 이후부터 온도가  $0^{\circ}\text{C}$  이하로 떨어졌으며 높은 빙정수함량 값을 산출하였다. 강수가 발생하는 시기에 높이 3 km 까지  $0^{\circ}\text{C}$  이상 온도로 상당히 따뜻한 상태이며 스킵 모두 높은 액체수함량 값을 모의하고 있다. 관측과 비교해 보았을 때 하층에서 빙정수함량이 과소 모의 되나 상층에 NSSL을 제외한 MORR과 WDM6의 경우 관측값과 비슷하게 모의하는 것으로 보인다.

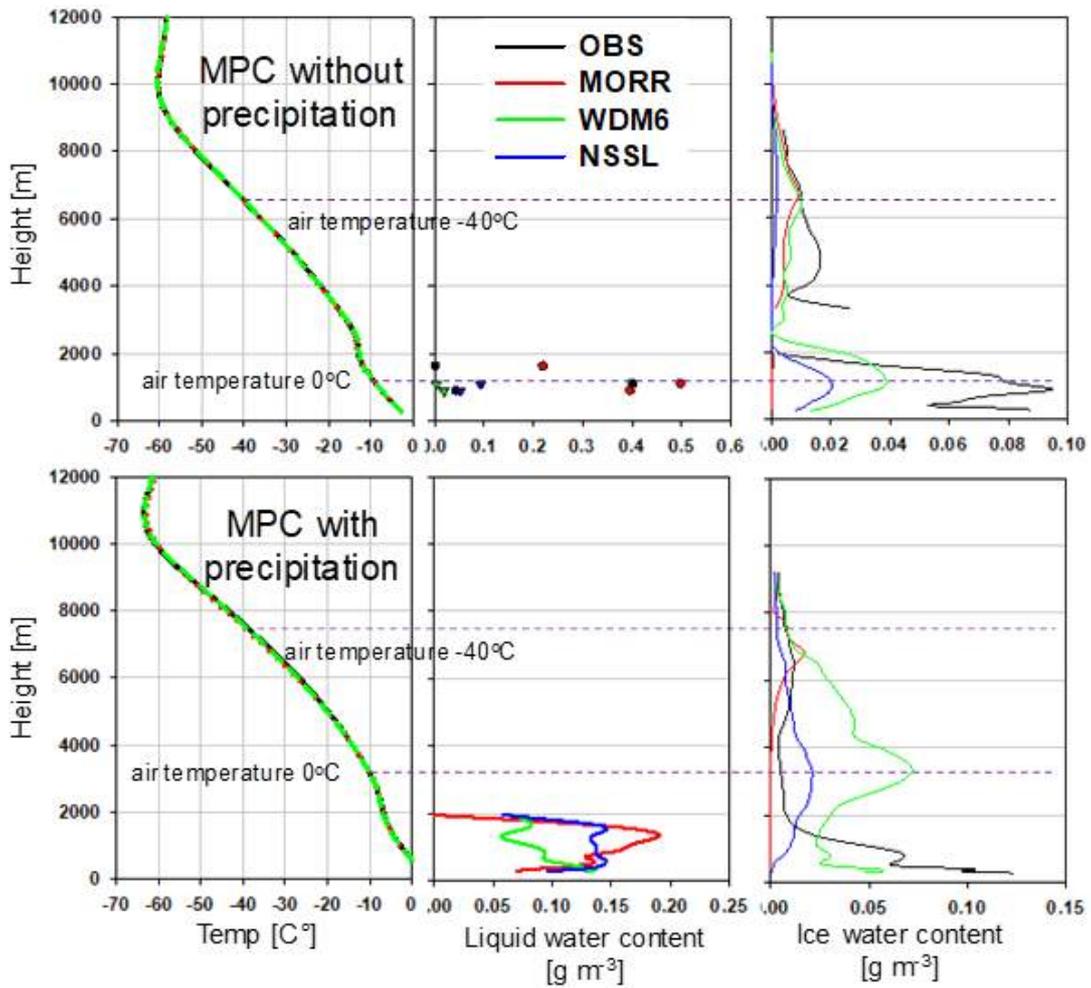


그림 26. 관측(검정) 및 스킴(빨강: MORR, 초록: WDM6, 파랑: NSSL)에 따라 모의된 온도, 액체수함량(liquid water content), 빙정수함량(ice water content)을 (위) 강수 이전(2016년 11월 05일 00시 - 11월 06일 16시)과 (아래) 강수 발생(2016년 11월 6일 17시 - 11월 7일 24시) 시기로 나누어 평균한 값.

PWRF 모델 내 구름 스킴의 모의 능력을 검증하기 위해 액체수함량과 빙정수함량의 예측 기술의 성능 점수(performance scores)로 평균 경향 오류(mean bias

$$\text{error} = \frac{\sum_i (PWRF_i - OBS_i)}{N} \text{와 표준 오차 (root mean square error) =}$$

$$\sqrt{\frac{\sum_i (PWRF_i - OBS_i)^2}{N}} \text{를 분석하였다. 강수가 없는 시기의 혼합 구름 내 액체수함}$$

량 평균 경향 오류를 보면 MORR는 과대모의 하며 WDM6와 NSSL는 과소 모의하는 것으로 보인다(그림 27). 각 스킴의 얼음 형성 모수화 과정에서 얼음을 적게 모의하는 경향을 띠고 있으며, MORR의 경우 얼음과 액체 사이의 변환 과정에서 더 많은 액체가 발생하여 액체수함량은 과대모의 되고 빙정수함량은 더 적게 모의된 것으로 보인다. 강수가 발생하는 구름의 경우 WDM6이 빙정수함량을 과대 모의하

며 강수가 없을 때와는 다른 경향을 보인다(그림 28). 절대적인 평균 경향 오류 값만을 비교해 보았을 때 WDM6이 강수 구름의 얼음량을 잘 모의했다고 볼 수 있다. 표준오차의 경우 액체수함량과 빙정수함량 모두 스킴별 큰 차이가 없는 것으로 보아 모델 결과와 실측값과의 차이가 매우 적어 비교적 정확하게 모의 되었다고 볼 수 있다. 하지만 평균 경향 오류의 경우 스킴별 과대 과소 모의하는 경향이 강수 발생 여부에 따라 다르므로 구름 미세물리 스킴 선택에 따라 모의 되는 구름의 특성(액체 구름, 혼합상 구름, 얼음 구름)이 다르게 나타난다고 볼 수 있다.

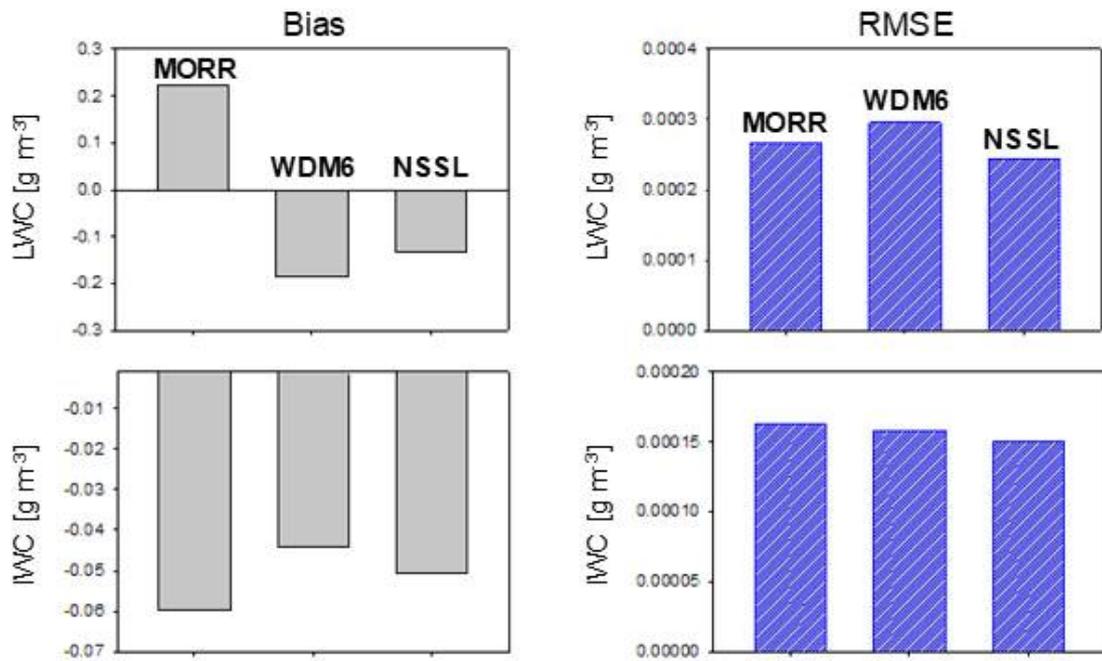


그림 27. 스킴(scheme)별 북극 지역의 강수 없는 혼합 구름의 액체수함량(liquid water content)과 빙정수함량(ice water content) 예측 기술 성능 점수(performance score).

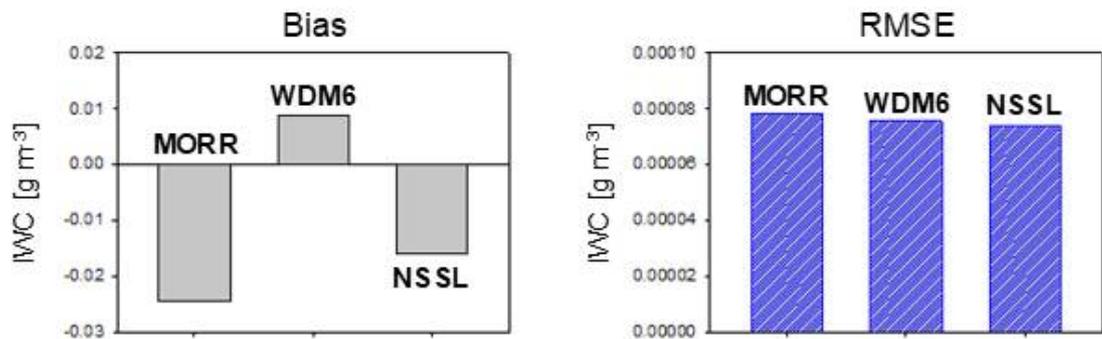


그림 28. 스킴(scheme)별 북극 지역의 강수 발생 혼합 구름의 빙정수함량(ice water content) 예측 기술 성능 점수(performance score).

## 2. 위성 원격관측자료와 구름 모델링 결과 비교

본 연구에서는 PWRF 모델링 결과에서 산출된 구름의 특성을 CALIPSO와 CloudSat에서 관측된 구름 자료와 비교를 수행하였다. 그림 29는 PWRF의 모델링 도메인을 나타낸 그림이다. 모델의 미세물리 스킴 결과를 관측과 비교하기 위해 1년 간(2008년 3월 - 2009년 2월)의 모델링을 통해 구름의 특성을 산출하였다. CALIPSO와 CloudSat의 통합 관측 결과와 비교를 통해 모델링 결과를 분석하였다. 단, 위성 관측 자료는 앞서 언급한 것과 같이  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 의 격자 내에 총 관측 횟수와 구름이 관측된 횟수의 비율로 운량을 정의하지만, PWRF에서는 Xu and Randall (1996)에서 정의한 모델 내의 얼음 및 액체의 양과 상대습도로 결정되는 운량을 사용하여 정의가 다를 수 있음을 유의하여야 한다.

그림 30은 PWRF, CALIPSO-CloudSat 통합 관측 결과에서 산출된 운량과 두 결과의 차이를 나타낸 그림이다. CALIPSO-CloudSat 통합 관측 결과에서는 그림 16과 같이 난류가 유입되는 북대서양 지역에 약 0.9의 높은 운량이 관측되고, 그린란드와 캐나다 북쪽의 일부 지역에 0.5 내외, 그 외의 지역에는 0.6 - 0.8의 값을 보여 지역별로 뚜렷한 차이를 보였다. 반면 PWRF에서는 북대서양 인근 이외에도 해상에는 약 0.9의 높은 운량을 보이고, 육지는 해상에 비해 낮은 값을 보였다. 또한 그린란드 가장자리에는 운량이 다소 낮지만 그린란드 중앙에는 약 0.8 내외의 높은 운량을 보였다. PWRF가 북극 전역에 걸쳐 많은 양의 구름을 모의하면서 CALIPSO-CloudSat 통합 관측 결과에서 운량이 높은 북대서양 지역을 제외하고는

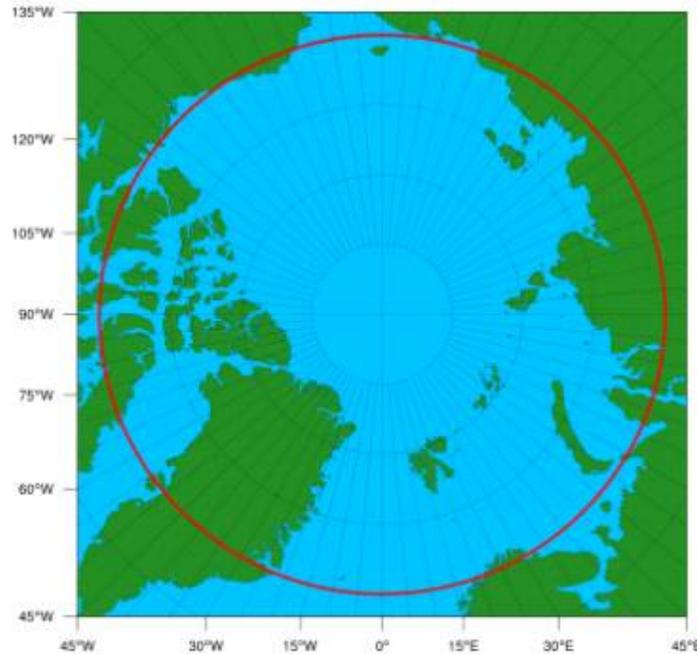


그림 29. 위성 관측 자료와 비교를 위한 PWRF 모델 도메인 설정. 붉은색 선이 북위 70°를 나타냄.

대체로 운량이 높았으며, 북대서양 지역에만 운량의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 분석 기간의 월별 운량의 변화(그림 31)를 살펴보면, 5월부터 10월까지는 평균 운량이 0.7 - 0.8로 유사하지만, 겨울철에 운량이 줄어드는 것으로 산출된 위성 관측 결과와는 달리 PWRF에서는 겨울철에도 운량이 가을과 유사하게 유지되다가 4월부터 감소하는 것으로 나타났다. 즉, PWRF의 운량이 위성 관측보다 높은 것은 겨울철에 높은 운량에 기인한 것으로 판단된다.

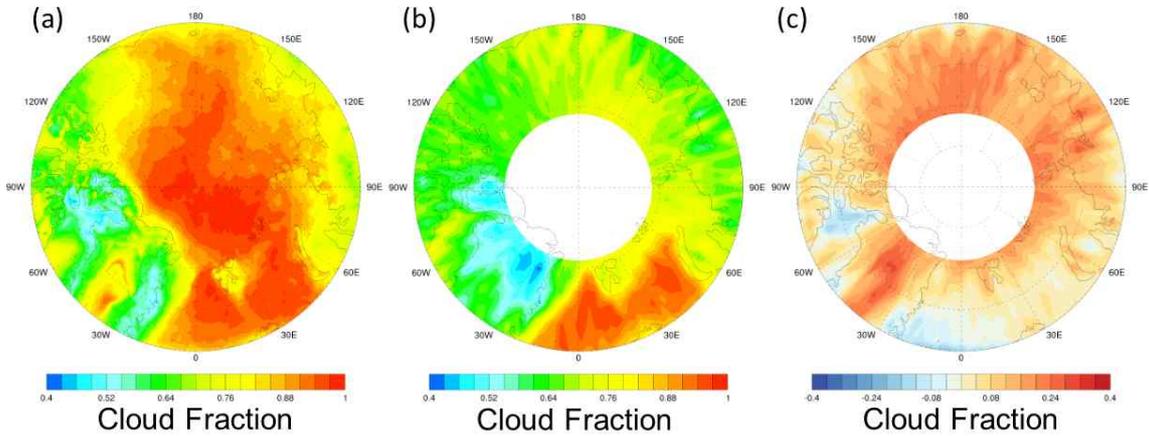


그림 30. 2008년 3월부터 2009년 2월까지 (a) PWRF, (b) CALIPSO-CloudSat 통합 관측에서 산출된 운량과 (c) PWRF와 위성 관측의 운량 차이 분포.

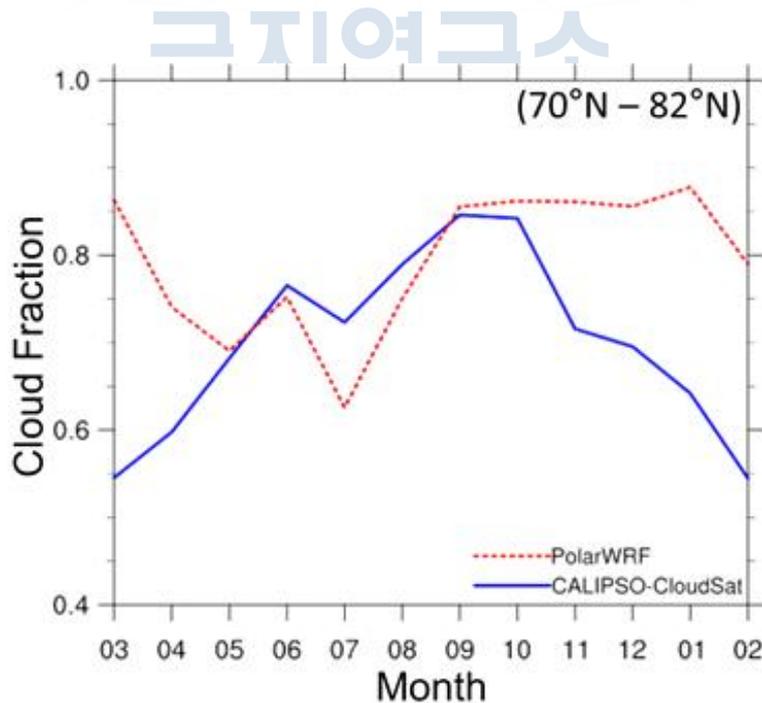


그림 31. 2008년 3월부터 2009년 2월까지 PWRF (빨간색 점선)와 CALIPSO-CloudSat 통합 관측(파란색 실선)에서 산출된 운량의 월 변화.

그림 32는 PWRF와 위성 관측에서 산출된 운량 연직 분포의 월 변화를 나타낸 그림으로, 지상 2 km 이상에서는 대체로 위성 관측에서 산출된 운량이 높았으며, 지상 2 km 이하에는 PWRF에서 산출된 운량이 더 높은 것으로 나타났다. 월 변화를 살펴보면 평균 운량에 큰 차이가 없었던 5월부터 10월까지는 대체로 지상 2 km, 이하의 운량이 두 결과 모두 유사하였으나, 11월부터 위성 관측에서는 하층운이 줄어드는 반면, PWRF에서는 하층운이 겨울 내내 유지되는 것으로 나타났다. 즉, PWRF에서 겨울철 하층운을 관측에 비해 더 많이 모의함에 따라 겨울철 전체 운량이 증가한 것으로 파악된다. Taylor et al. (2019)에 따르면, CMIP5의 기후 모델들에서 운량의 계절변화는 겨울철에 최고를 보이는 모델과 여름철에 최고를 보이는 모델로 나뉘며, 하층운의 변화에 따라 전체 운량의 변화가 나타나는 것으로 분석되었다. 이는 본 연구에서 PWRF가 겨울철 하층운을 더 많이 모의해 위성 관측과 겨울철 운량에 큰 차이를 보이는 것과 일치한다. 다만, 제 2 절의 위성 관측을 통한 구름 특성을 분석할 때 언급한 것처럼 CloudSat은 지표면의 신호로 인해서, 그리고 CALIPSO는 구름의 광학적 두께가 두꺼울 경우 레이저 소산 때문에 하층의 구름의 관측이 어려우므로, PWRF의 운량이 관측에 비해 높게 산출된 것은 관측이 실제보다 낮아서 발생했을 수도 있음을 명심해야 한다.

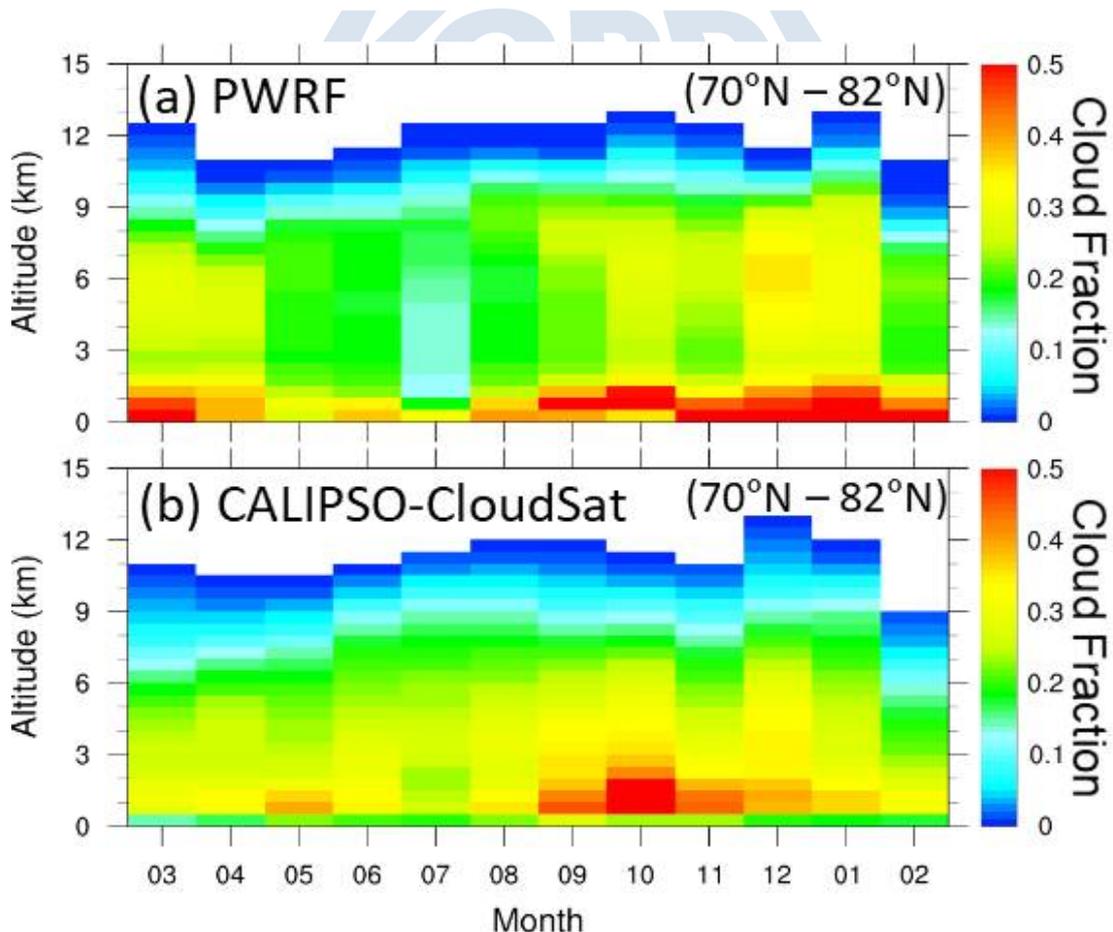


그림 32. 2008년 3월부터 2009년 2월까지 북위 70° 이상에서 (a) PWRF와 (b) CALIPSO-CloudSat 통합 관측에서 산출된 운량 연직 분포의 월 변화.

그림 33은 PWRF와 CloudSat에서 산출된 빙정수경로의 분포 및 빙정수함량 연직 분포의 월 변화를 나타낸 그림이다. CloudSat의 관측 결과 난류가 유입되어 상대적으로 수증기 공급이 많은 북대서양 지역에 빙정수경로가 높게 나타나는 것으로 산출되었으나, PWRF에서는 지역별로 큰 차이가 없이 전반적으로 매우 낮은 빙정수경로가 산출되었다. 빙정수함량도 대기의 불안정도 증가로 인해 위성 관측 결과 10월에 하층에서 연중 가장 높았으나, PWRF에서는 가장 온도가 낮은 1월에 가장 높은 것으로 나타났으며, 산출된 값이 매우 적었던 것으로 확인된다.

그림 34는 PWRF와 CloudSat에서 산출된 액체수경로의 분포 및 액체수함량 연직 분포의 월 변화를 나타낸 그림이다. 그림 33과 마찬가지로 CloudSat 관측 결과 북대서양 부근에는 액체수경로가 높으며, 고도가 높은 육지인 그린란드 상공에는 액체수경로가 낮은 것으로 나타났다. PWRF 모의 결과 빙정수경로와는 달리 다른 지역에 비해 북대서양 부근에 액체수경로가 높고, 그린란드 지역에 가장 낮은 공간분포를 보이지만, 관측에 비해 과소모의 하는 나타났다. 액체수함량의 연직 분포를 살펴보면, PWRF에서도 위성 관측과 마찬가지로 여름철 하층에 증가하고, 겨울철에 감소하는 경향은 일치하지만, 위성 관측에 비해 하층에만 집중되어 있고, 겨울철에 급격하게 줄어드는 것으로 모의하는 문제가 존재한다.

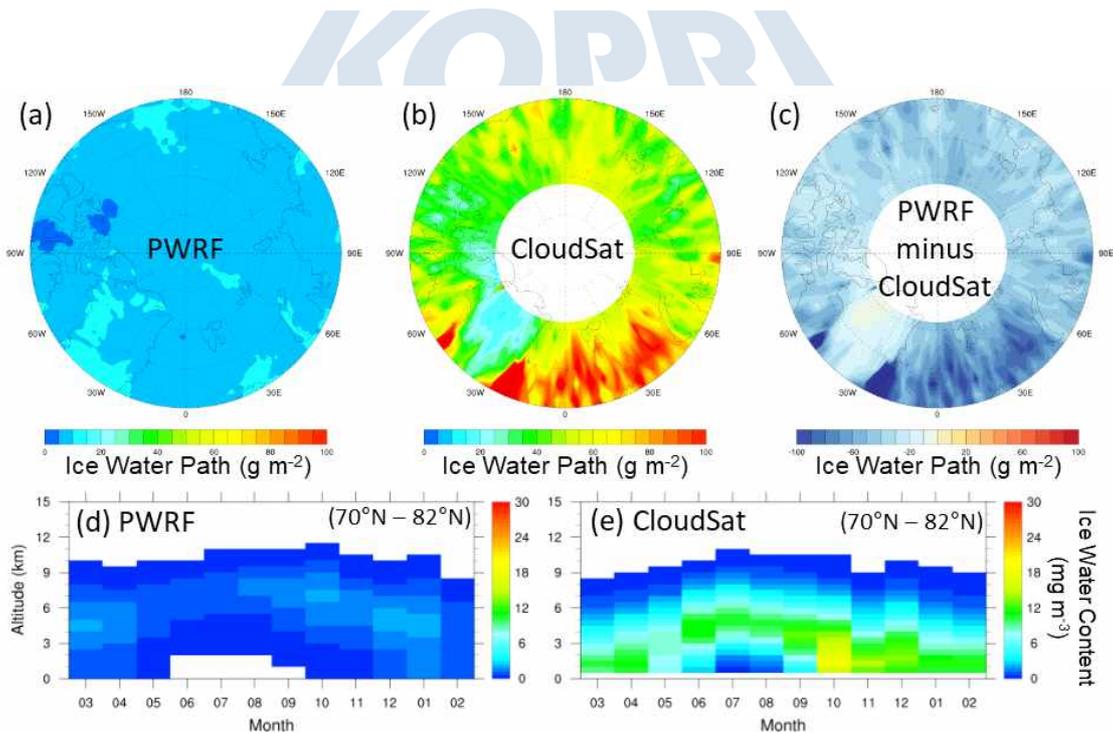


그림 33. 2008년 3월부터 2009년 2월까지 (a) PWRF, (b) CloudSat에서 산출된 빙정수경로(ice water path)와 (c) PWRF와 CloudSat의 차이의 분포. (d) PWRF와 (e) CloudSat에서 산출된 빙정수함량(ice water content) 연직 분포의 월 변화.

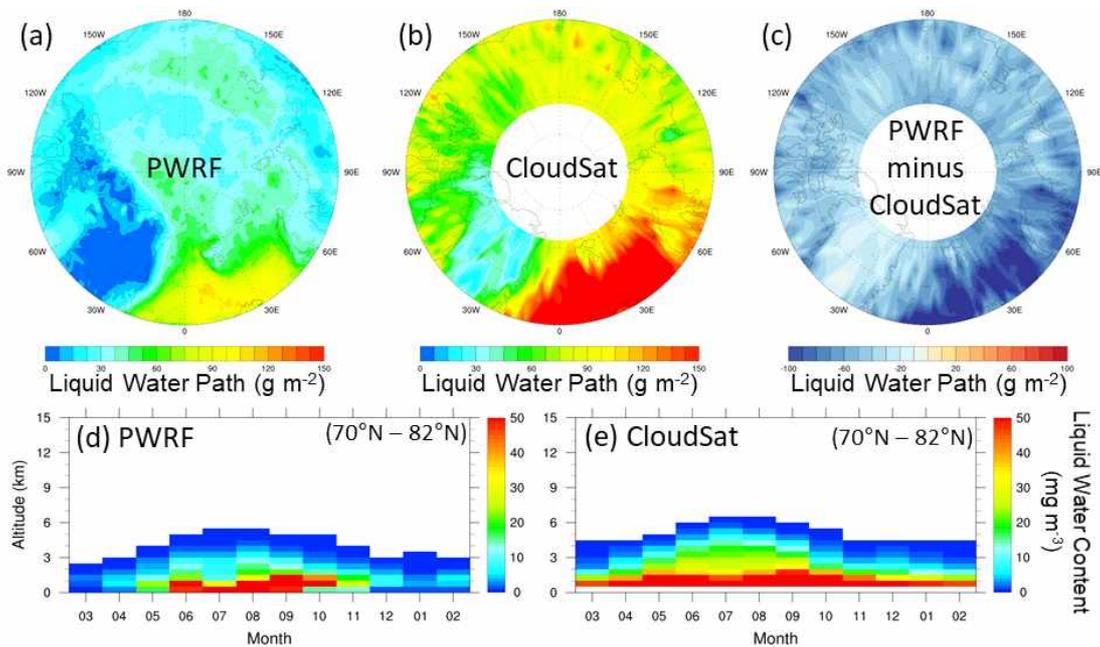


그림 34. 그림 33과 동일. 단, 액체수경로(liquid water path)와 액체수함량(liquid water content)의 분포.

그림 35는 PWRP에서 산출된 지표면의 구름 복사강제효과(Cloud radiative effect; CRE)를 CALIPSO-CloudSat 관측 자료와 비교한 그림이다. CALIPSO와 CloudSat은 관측으로부터 산출된 구름의 고도 분포 및 미세물리 특성을 복사전달모델에 제공하여 구름 복사강제효과를 계산한 결과를 공개하고 있다 (2B-FLXHR-LIDAR). 구름은 지표면에 도달하는 태양 복사에너지를 줄이기 때문에 단파 복사에서는 음의 복사강제효과를 가지고, 지표면에서 방출된 장파 복사에너지를 흡수하여 재방출하여 장파 복사에서는 양의 복사강제효과를 가진다. PWRP는 북대서양 지역을 제외하고는 단파 복사의 차단 효과가 위성 관측 결과에 비해 낮은 것으로 나타났으며, 북대서양 지역에서만 더 높은 단파 복사 차단 효과가 나타났다. PWRP가 구름 내부의 빙정 및 액체의 양이 적어 구름의 광학적 두께가 낮게 모의하였고, 그 결과 구름에 의한 태양 복사 에너지 차단이 적었을 것으로 예상된다. 반면 장파복사에서는 PWRP가 위성 관측 결과에 비해 더 높은 구름 복사강제효과를 산출하여 구름에 의해 지표면으로 유입되는 장파복사가 더 많은 것으로 나타났다. 이는 PWRP가 구름을 많이 모의하였으며, 특히 하층운을 많이 모의하였기 때문에 지표면에 재방출되는 장파 복사 에너지가 증가하였을 것으로 추정된다. 실제 위성 관측 결과에 비해 운량이 높았던 대부분의 지역은 더 높은 구름 복사강제효과를 보이지만, 운량이 낮은 그린란드 주변과 캐나다 북쪽 지역은 더 낮은 구름 복사강제효과를 나타냈다.

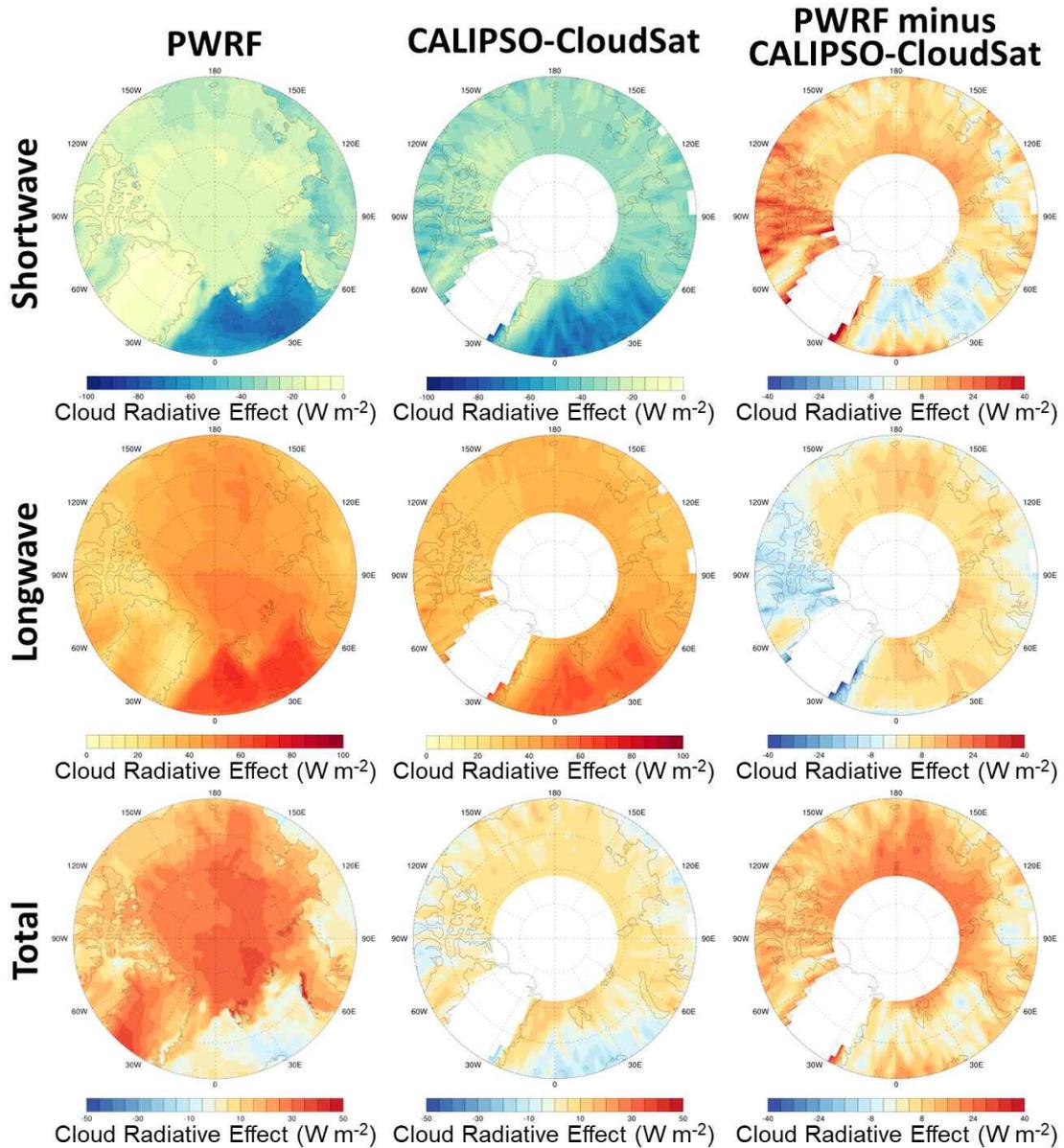


그림 35. 2008년 3월부터 2009년 2월까지 산출된 (첫 번째 행) 단파, (두 번째 행) 장파, (세 번째 행) 총 구름 복사강제효과의 분포. 첫 번째 열과 두 번째 열은 각각 PWRF와 위성 관측으로부터 산출된 복사강제효과이며, 세 번째 열은 모델과 위성 관측 결과의 차이.

그림 36은 그림 35의 구름 복사강제효과의 월 변화를 나타낸 그래프이다. 장파 복사는 PWRF와 위성 산출 결과 모두 연중 30 - 60  $W m^{-2}$  범위 내에서 여름철에 다소 증가하는 것으로 나타났다. PWRF가 9월과 10월에 약 10  $W m^{-2}$  내외의 더 높은 장파 구름 복사강제효과를 산출한 것을 제외하고는 위성 관측 결과와 큰 차이를 보이지 않는다. 반면 단파 구름 복사강제효과는 태양 에너지 유입이 없는 11월부터 2월까지의 0  $W m^{-2}$ 에서 점차 태양 고도 및 일조 시간이 증가하는 여름철에는

최대  $-90 \text{ W m}^{-2}$ 까지 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 장파와 단파 구름 복사강제 효과를 종합해보면 구름은 대체로 하향 장파복사에너지를 늘려 지표면에 복사에너지 수지가 양의 값을 나타내지만 여름철에는 태양 복사에너지를 차단하여 지표면에 도달하는 복사에너지를 줄이는 효과를 나타내는 것으로 산출되었다. 다만, CALIPSO와 CloudSat으로부터 산출된 단파 복사강제효과는 PWRF에 비해 더 낮아서 5월부터 구름에 의한 일사 차단 효과가 더 크게 나타난다. 이는 위성 관측 결과에서 나타난 높은 빙정수경로와 액체수경로의 영향으로 일사 차단 효과가 PWRF보다 더 큰 것으로 판단되지만, 단파 복사강제효과는 구름 이외에도 지표면의 반사도 등 다양한 변수들에 영향을 받기 때문에 추가 분석을 통해 원인을 파악할 필요가 있다.

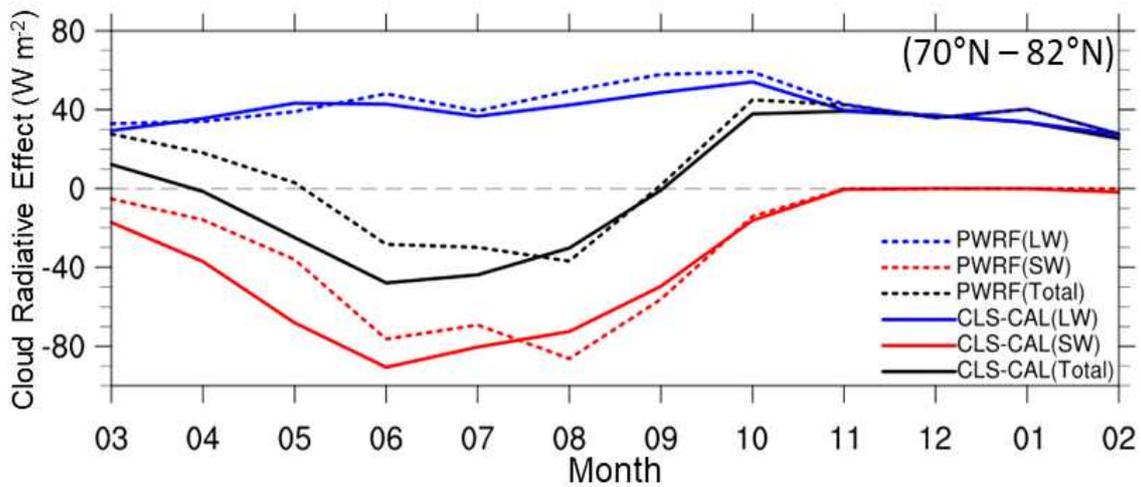


그림 36. 2008년 3월부터 2009년 2월까지 PWRF(점선)와 CALIPSO-CloudSat(실선)에서 산출된 장파(LW, 파란색), 단파(SW, 빨간색), 총(Total, 검은색) 구름의 복사강제효과(cloud radiative effect)의 월 변화.

### 3. 위성 원격관측자료와 재분석자료의 구름 산출 결과 비교

그림 37은 2006년 6월부터 2018년 10월까지 위성(CALIPSO, CloudSat, MODIS)과 재분석자료(ERA5, JRA-55, MERRA2)에서 산출된 운량의 분포를 나타낸 그림이다. 그림 16에서 언급한 내용과 같이 위성 관측 자료들은 모두 운량이 해빙이 적은 북대서양 지역에 가장 높고, 그린란드와 캐나다 북쪽에 구름이 가장 적은 것으로 일관되게 나타났다. 반면, 재분석자료들은 각자 다른 운량 분포 특성을 보였다. ERA5는 북극해 중심으로 갈수록 운량이 증가하였고, JRA-55는 위성과 유사하게 북대서양에서 가장 높고, 그린란드에서 가장 낮은 운량을 모의하였으나 산출된 값이 매우 낮았다. 마지막으로 MERRA2는 시베리아 북쪽에 운량을 가장 높게 모의한 것으로 나타났다. 재분석자료에서 모의된 평균 운량(북위 60° - 북위 82°)은 ERA5, JRA-55, MERRA2에서 각각 0.79, 0.51, 0.73으로 나타났다.

그림 38은 북위 70° 이상의 지역에서 재분석 자료가 모의한 운량 연직 분포의 월변화를 나타낸 것으로, 위성 관측 결과(그림 18b, 18d)에 비해 전 고도에서 운량이 낮게 모의되었다. 위성에서는 여름철에 지상 1 km 내외에 구름이 적고 10월에 가장 많은 등 계절변화를 보였으나, 재분석자료에서는 계절 변화가 뚜렷하지 않았다. 특히 JRA-55는 오히려 하층운이 여름철에 늘어나 9월에 최고를 보인 후 감소하는 것으로 나타났고, MERRA2는 1월부터 3월까지 지표면 부근의 운량이 가장 높은 것으로 나타나 재분석자료 간에도 차이가 존재하고, 위성 관측 결과와도 차이를 보인다.

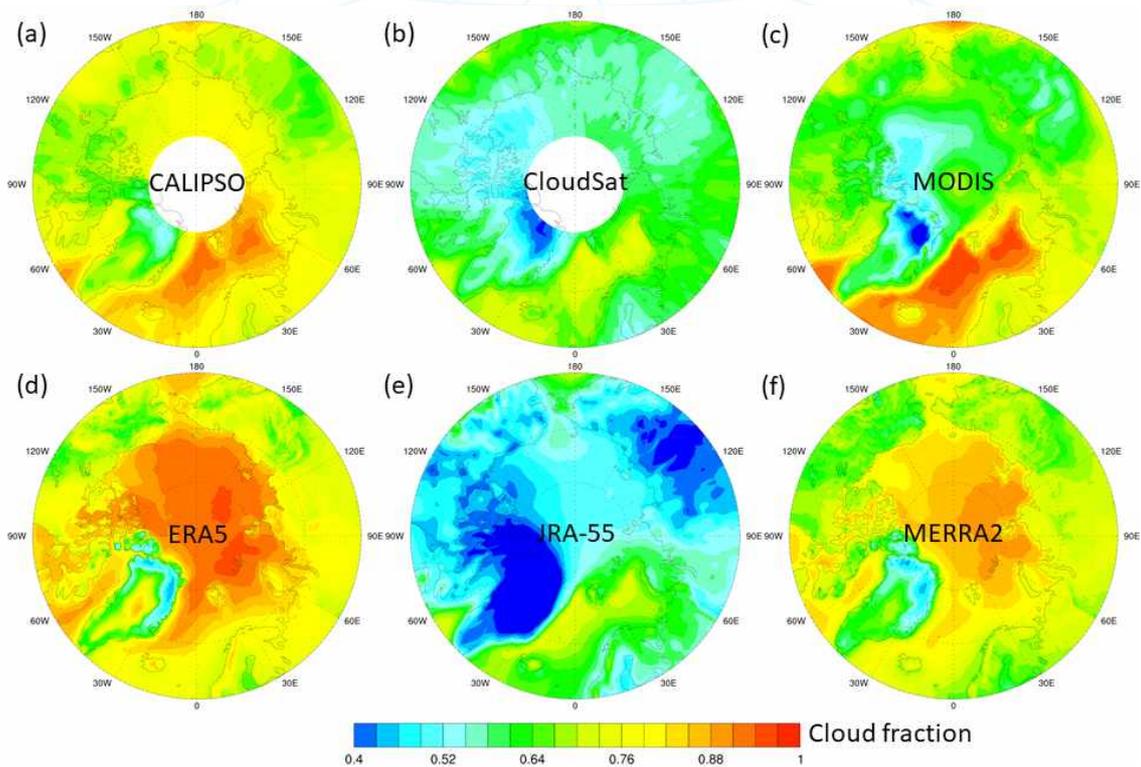


그림 37. 2006년 6월부터 2018년 10월까지 (a) CALIPSO, (b) CloudSat, (c) MODIS, (d) ERA5, (e) JRA-55, (f) MERRA2에서 산출된 운량의 분포.

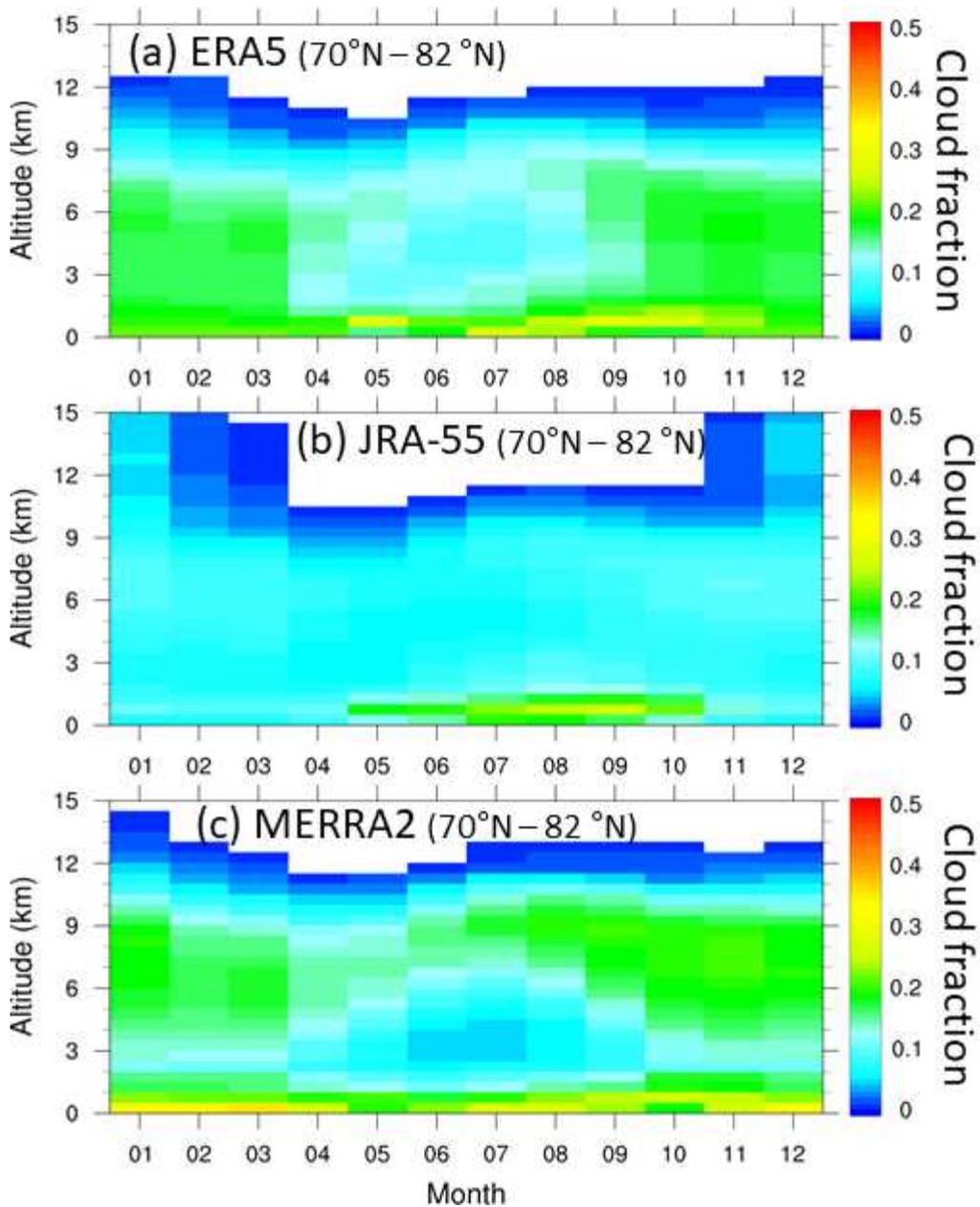


그림 38. 2006년 6월부터 2018년 10월까지 북위 70° - 북위 82°에서 (a) ERA5, (b) JRA-55, (c) MERRA2의 운량 연직 분포의 월 변화.

그림 39와 그림 40은 CloudSat과 ERA5, JRA-55, MERRA2에서 산출된 빙정수경로 및 액체수경로의 공간분포를 나타낸 그림이다. 북위 60°부터 북위 82°까지 지역의 CloudSat, ERA5, JRA-55, MERRA2에서 산출된 빙정수경로(IWP)와 액체수경로(LWP; 괄호 값)는 각각 56.0(88.8), 25.5(43.4), 25.8(30.1), 14.6(63.2)  $g\ m^{-2}$ 로 나타났다. 재분석자료에서 산출된 빙정수경로, 액체수경로 모두 CloudSat에 비해 낮은 값을 보였지만, 북대서양 지역에서 가장 높은 것으로 나타나 공간 분포에는 유사하였다. 한편, MERRA2는 다른 재분석 자료에 비해 빙정수경로(IWP)와 액체수경로의 합은 가장 높지만, 빙정수경로가 매우 적고 액체수경로의 비율이 매우 높은 것으로

나타났다. Huang et al. (2017)에서도 CERES와 MODIS의 연계로 산출된 빙정수경로와 액체수경로와 재분석자료들의 산출 결과를 비교한 결과, 위성 산출 결과가 재분석자료에 비해 높았으며, 특히 MERRA2는 빙정수경로를 낮게 산출하는 것으로 분석하였다.

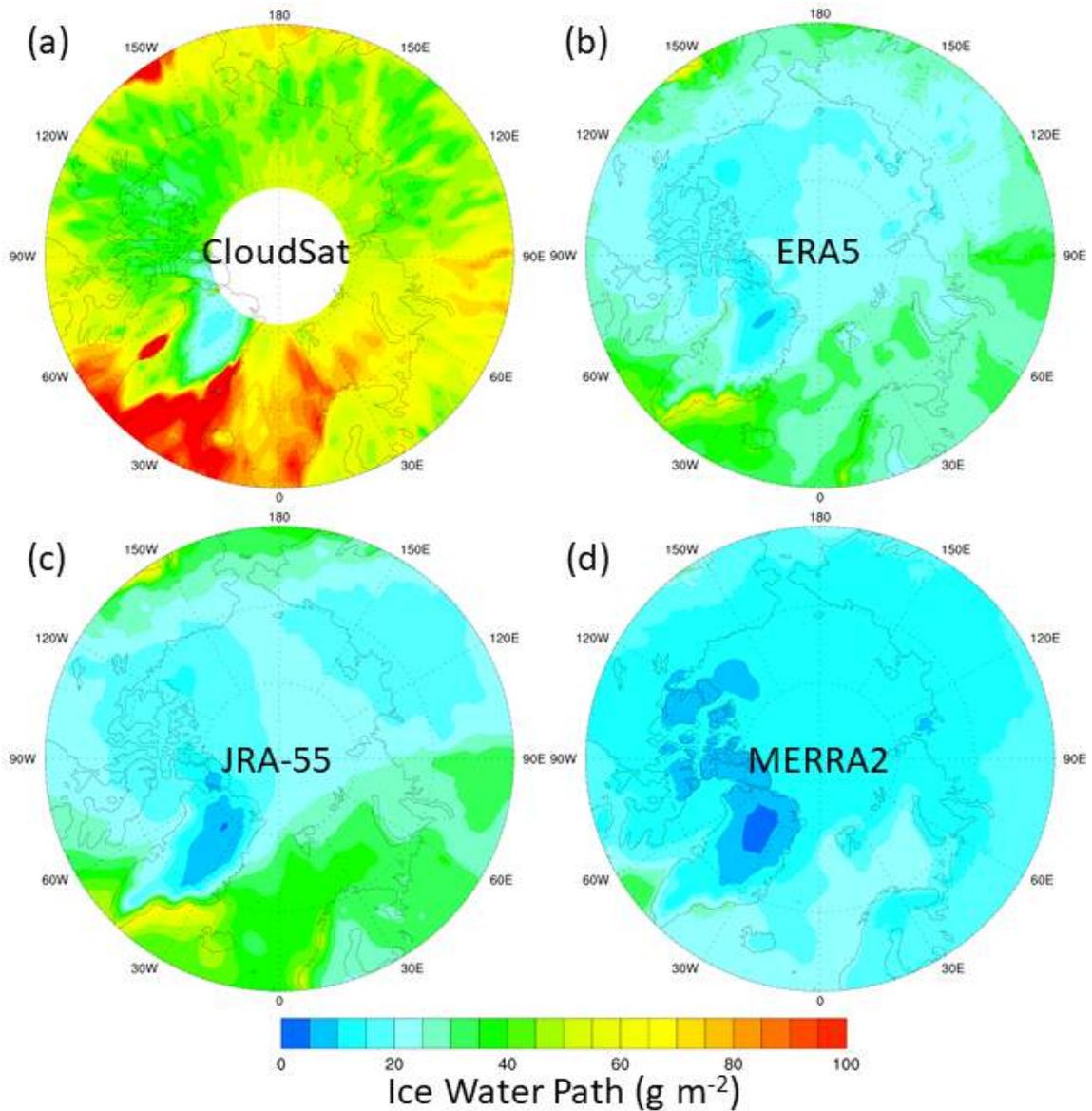


그림 39. 2006년 6월부터 2018년 10월까지 (a) CloudSat, (b) ERA5, (c) JRA-55, (d) MERRA2의 빙정수경로(ice water path) 분포.

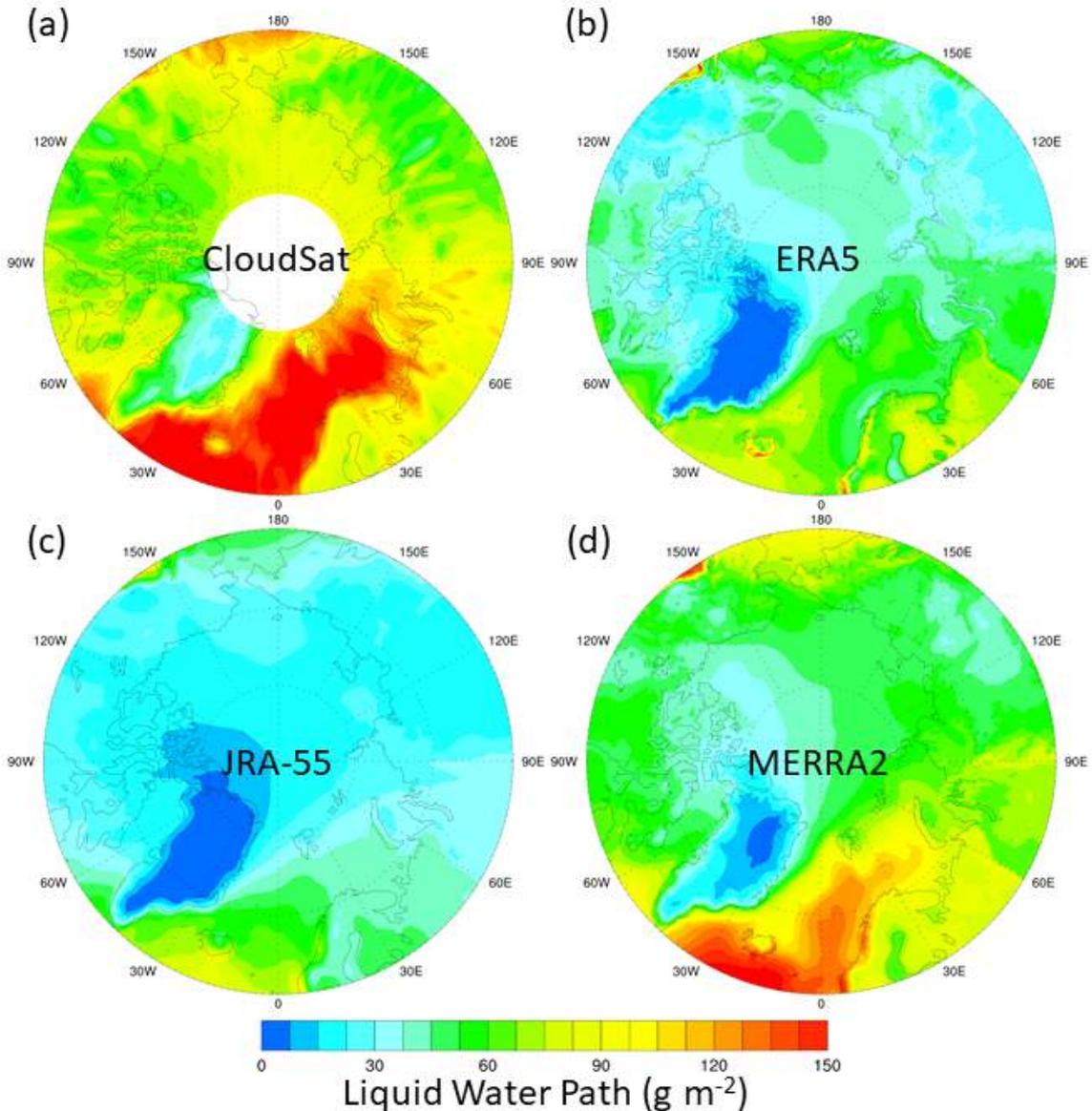


그림 40. 그림 39와 동일. 단, 액체수경로(liquid water path) 분포.

그림 41과 그림 42는 CloudSat과 ERA5, JRA-55, MERRA2에서 산출된 빙정수함량 및 액체수함량 연직 분포의 월 변화를 나타낸 그림이다. 앞서 언급한 빙정수경로와 액체수경로 모두 위성 관측에 비해 재분석자료에서 낮은 값을 보였기 때문에 빙정수함량과 액체수함량 연직 분포도 모두 CloudSat보다 낮은 값을 보인다. 빙정수함량은 여름철 하층에 낮게 모의되는 것은 관측과 유사하지만, 계절 변화가 상대적으로 덜 뚜렷하고, 특히 빙정수경로가 낮았던 MERRA2는 여름철에는 지상 3 km 까지 빙정이 거의 없는 것으로 모의하였다. 액체수함량은 온도가 높은 여름철 하층에 증가하고, 겨울철 줄어드는 변화는 유사하지만, 겨울철에 액체수함량이 관측에 비해 낮게 나타났다. 해당 결과는 앞서 PWRP의 비교 결과와도 유사하다.

이처럼 각 재분석자료에서 산출된 구름의 분포 및 미세물리 특성들은 재분석자료

들에서 사용하는 모델의 격자 등의 차이뿐만 아니라 모델 내의 구름 모의 과정에 차이가 있기 때문이다. 전구를 대상으로 위성(CALIPSO, CloudSat 통합) 관측과 재분석자료(ERA-Interim, JRA-55, MERRA2)의 운량을 비교한 Miao et al. (2019)에서는 재분석자료의 운량 모의 오차는 상대습도의 오차에 기인한 것이라고 분석하였다.

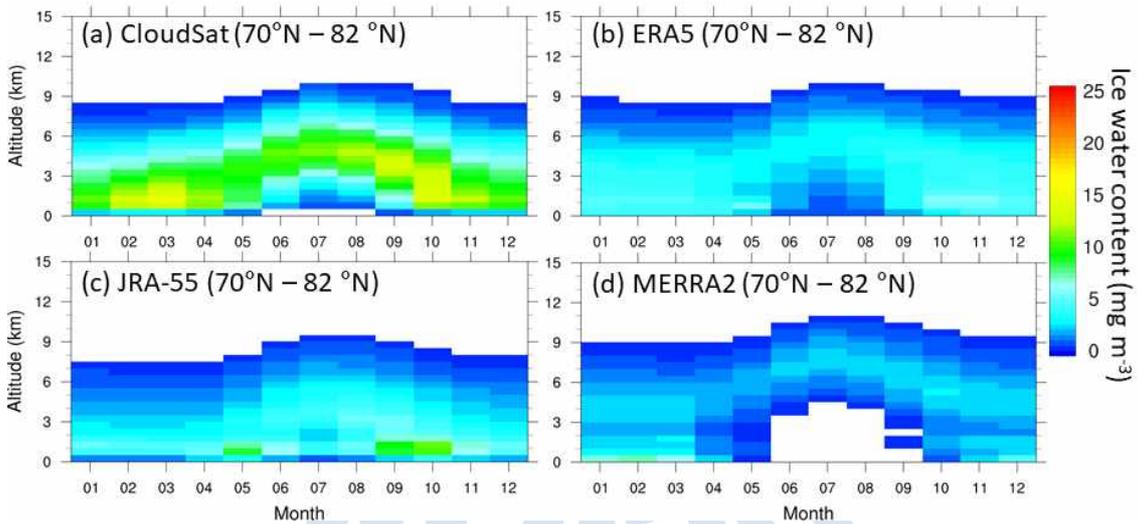


그림 41. 2006년 6월부터 2018년 10월까지 북위 70° - 북위 82° 지역에서 (a) CloudSat, (b) ERA5, (c) JRA-55, (d) MERRA2의 빙정수함량(ice water content) 연직 분포의 월 변화.

극지연구소

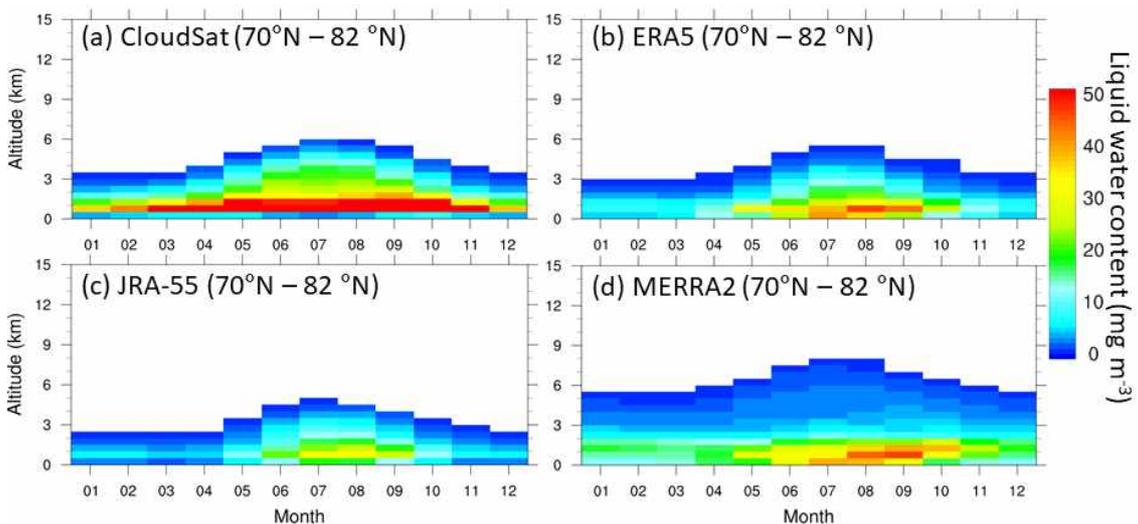


그림 42. 그림 41과 동일. 단, 액체수함량(liquid water content)의 연직 분포.

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

### 제 1 절 연구개발목표의 달성도

#### 1. 정성적 성과

##### 가. 1차년도 정성적 성과

연구개발목표	달성내용	달성도
지상 원격 구름 관측 자료를 이용한 구름의 기하학적·미세물리적 특성 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 니알슨 과학기지에서 지상 라이더, 구름 레이더, 마이크로 라디오미터를 이용한 구름의 기하학적·미세물리적 특성 파악               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 레이더를 이용한 구름 관측 결과 단층(single-layer) 구름과 다층(multi-layer) 구름은 모두 40%의 빈도로 나타나 비슷한 발생 빈도를 보였음.</li> <li>- 상(phase)에 따른 구름을 발생 빈도를 구분한 결과 얼음 구름(49.0%), 혼합상 구름(41.6%), 액체 구름(15.0%)의 순으로 나타남.</li> </ul> </li> </ul>	100 %
위성 원격 구름 관측 자료를 이용한 북극권 구름의 기하학적·미세물리적 특성 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ CALIPSO, CloudSat, MODIS 관측 결과를 이용하여 북극 지역 내 구름의 특성 분석               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 세 위성 모두 난류가 높은 위도까지 유입되어 상대적으로 해빙의 양이 적고 해양에서부터 수증기 공급이 활발한 북대서양 지역에 높은 구름의 분포를 보임.</li> <li>- 능동 센서인 CALIPSO와 CloudSat은 관측 파장에 따른 차이로 운량에 차이가 나타났으나, 수동 센서인 MODIS는 해빙의 농도에 따라서도 운량에 차이가 나타남.</li> </ul> </li> </ul>	100 %

나. 2차년도 정성적 성과

연구개발목표	달성내용	달성도
<p>북극권 하층운의 미세물리 특성 상세 분석 및 생성·유지 메커니즘 조사 (I)</p>	<p>○ 니알슨 과학기지에서 하층운과 중관 기상장의 관련성 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 니알슨 과학기지에서 운저고도가 지상 2 km 이 내인 하층운의 약 80%는 2.5일 가량 유지되어 매우 짧게 지속되는 것으로 나타남.</li> <li>- 니알슨 과학기지에서 운저고도가 지상 2 km 이 내인 하층운이 발생할 때는 주로 아이슬란드 저기압이 강화되어 북대서양에서부터 강한 바람이 유입되며, 반대로 맑은 경우에는 그린란드의 고기압 강화 및 노르웨이에 저기압으로 인해 북극 중심에서 차고 건조한 공기가 유입되는 것으로 나타남. 즉, 니알슨 과학기지의 하층운은 중관 기상장의 영향을 받아 이동되는 것으로 나타남.</li> </ul>	<p>100 %</p>
<p>지상 원격탐사 자료를 이용한 니알슨 과학기지의 대기경계층 연구</p>	<p>○ 에어로졸 라이다와 윈드 도플러 라이다를 이용한 대기 하층의 바람 분포 특성 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 윈드 도플러 라이다의 Doppler Beam Swinging mode를 이용하여 지표면에서부터 지상 1.5 km 내외까지 바람장 산출.</li> <li>- 에어로졸 라이다로부터 대기 중의 에어로졸 연직 농도의 변화를 통해 대기경계층 고도를 산정할 수 있으며, 윈드 도플러 라이다도 대기 중의 에어로졸의 움직임으로 바람장을 산출할 수 있음. 하지만 북극 지역은 상당히 깨끗한 지역으로 대기 중의 에어로졸의 양이 매우 적어 장기적으로 두 자료를 이용하여 대기경계층의 변화를 파악하기에는 어려우며, 대기경계층 주변의 낮은 구름이 존재할 때에 활용 가능한 것을 파악하였음.</li> </ul>	<p>100 %</p>

다. 3차년도 정성적 성과

연구개발목표	달성내용	달성도
<p>북극권 하층운의 미세물리 특성 상세 분석 및 생성·유지 메커니즘 조사 (Ⅱ)</p>	<p>○ 지상 직접(in-situ) 관측을 통한 구름의 미세물리적 특성 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 니알슨 과학기지 인근 제플린(Zeppelin) 정상(해발 고도 약 474 m)에 설치된 Cloud Droplet Probe를 이용하여 하층운의 미세물리 특성 분석.</li> <li>- 2017년 9월부터 2018년 2월까지 관측 결과 2017년 9월과 10월은 다른 달에 비해 액체상과 혼합상 구름의 수농도가 매우 높았고, 유효 직경(effective diameter)은 얼음상과 혼합상은 2017년 11월까지 감소 이후 12월부터 증가하는 것으로 나타남.</li> </ul>	<p>100 %</p>
<p>아라온 호와 다른 국제 관측 프로그램의 구름 관측 결과 비교 분석</p>	<p>○ 아라온 호 해상 관측 시 라이다 관측 자료를 이용한 구름 특성 이해</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 아라온 호 해상 관측 시 관측된 라이다 자료를 기반으로 웨이블릿 법을 이용하여 구름의 운저고도 산출. 8월 말과 9월 초 알래스카 인근 운항 시 지상 수 백 m의 고도에 구름들이 매우 빈번하게 관측됨.</li> <li>- 아라온 호 운항 주변의 Atmospheric Radiation Measurement의 North Slope of Alaska 지점의 라이다를 이용하여 동일한 방법론으로 운저고도 산출. 두 라이다 관측 결과 운저 고도가 1 km 미만인 구름이 빈번히 관측되었으며, 일부 종관 기상장에 의한 구름의 이동도 발견함.</li> </ul>	<p>100 %</p>

<p>니알슨에서 관측된 하층운과 대기경계층 특성(바람)과의 연관성 분석</p>	<p>○ 에어로졸 라이다와 윈드 도플러 라이다를 이용한 대기 하층의 구름과 구름 주변의 바람장 관측</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 전선이 유입되는 시기에 마이크로펄스 라이다와 윈드 도플러 라이다를 이용하여 구름의 유입과 바람장 변화를 관측. 전선이 유입됨에 따라 지상 3 km 이상에 존재하던 구름의 운저고도가 점차 낮아지고, 이후 강수 발생. 한편 윈드 도플러 라이다 관측에서는 전선이 접근하기 이전에 동풍이 유입되다가 전선 유입 시 남풍, 전선이 지난 후 서풍으로 풍향이 바뀌는 것을 관측하였음.</li> </ul>	<p>100 %</p>
---	--	--------------

라. 4차년도 정성적 성과

연구개발목표	달성내용	달성도
<p>니알슨 과학기지와 북극 전지역 구름에 대한 관측 결과와 재분석 자료 및 모델링 결과와의 비교 분석</p>	<p>○ 지상 및 위성 원격구름관측자료와 모델 (Polar-optimized Weather Research and Forecasting Model version 4.1.1; PWRF) 및 재분석 자료의 구름 모의 결과 비교</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 니알슨 과학기지의 구름 레이더 자료와 PWRF 모의 결과를 비교한 결과, 모든 미세물리 스킴 (scheme)이 빙정수함량(ice water content)은 낮게 모의하였으나, 액체수함량(liquid water content)은 스킴에 따라 과대(Morrison), 과소(WDM6, NSSL) 모의 하였음.</li> <li>- PWRF는 CALIPSO-CloudSat 통합 관측 결과에 비해 겨울철 하층운을 더 많이 모의하여 운량이 더 높은 것으로 나타났지만, 구름 내의 빙정과 액체의 양은 매우 적었음.</li> <li>- 재분석 자료는 위성(CALIPSO, CloudSat) 관측 결과 뿐만 아니라 각자 다른 운량의 분포를 보였으며, 빙정수함량 및 액체수함량 모의에도 어려움을 나타냄.</li> </ul>	<p>100 %</p>

<p>관측자료 기반 에어로졸 기초 연구</p>	<p>○ CALIPSO 위성을 이용한 북극 지역 내 에어로졸 광학적 두께 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 13년(2006년 7월 - 2019년 6월) 관측 결과 북위 60° 이상의 북극 지역 내 평균 에어로졸 광학적 두께(aerosol Optical Depth)는 약 0.04로 매우 낮게 나타났으며, 아이슬란드 주변과 시베리아 내륙 지역에서 높음.</li> <li>- 북극 지역 평균 에어로졸 광학적 두께의 월 변화를 살펴본 결과, 12월과 1월에 약 0.06으로 최고를 보인 후 점차 감소하여 6월에 0.015로 최저를 보였으며, 겨울철과 봄철에 높은 에어로졸 광학적 두께를 보이는 선행연구 결과들과 동일한 변화를 보임.</li> </ul>	<p>100 %</p>
---------------------------	--	--------------

## 2. 정량적 성과

본 연구에서 니알슨 과학기지에서의 마이크로펄스 라이다를 이용한 구름 관측 자료와 지상 복사관측자료의 비교를 통해 구름의 복사효과에 관한 논문을 2018년 3월 Tellus B에 출판하였으며, 위성 관측 자료와 재분석자료에서 산출된 구름의 기하학적·미세물리적 특성의 차이에 관한 연구, 니알슨 과학기지의 지상 원격관측자료 및 Cloud Droplet Probe(CDP)를 이용한 구름의 미세물리 특성에 관한 연구 등을 현재 준비 중에 있다.

## 제 2 절 관련분야 기여도

본 연구에서는 니알슨 과학기지에서 관측 수행 중인 에어로졸 라이다, 구름 레이더, 마이크로파 라디오미터, 윈드 도플러 라이다, CDP 등 다양한 원격 및 직접(in-situ) 관측 자료를 이용하여 데이터 베이스를 구축하였고, 이를 통해 구름의 기하학적·미세물리적 특성을 분석하였다. 또한, 이렇게 산출된 구름의 특성을 극지에 최적화된 PWRF 모의 결과의 비교에 활용하여 모델의 모의 능력을 파악하였다. 또한 지상 관측자료뿐만 아니라 위성 원격관측자료를 이용하여서도 북극 전역의 구름 특성을 파악하고, 해당 결과도 PWRF와 재분석자료의 구름 특성과 비교하여 구름 모의 능력을 확인하였다.

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 제 1 절 추가연구의 필요성

본 연구에서는 지상 원격관측자료(구름 레이더, 운고계, 마이크로 라디오미터 등)을 이용하여 대기 중 구름의 고도 분포와 미세물리적 특성을 분석하였다. 현재까지 지상 원격관측자료를 통해 구름의 특성을 파악하여 주로 구름의 연직 분포와 상에 대해서만 분석을 수행하였다. 정확한 구름의 특성을 파악하기 위해서는 지상 원격관측과 제플린(Zeppelin) 정상에 위치한 CDP와의 연계 분석을 통해 하층운의 다른 미세물리 특성(입자 수, 입자 크기 등)들도 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 지상 및 위성 원격관측자료와 PWRF 모델링 결과의 비교를 통해 모델의 구름 모의 능력을 파악하였다. PWRF에서 발생한 구름의 오차 원인을 분석하고 이를 향상시킬 방안을 모색할 필요가 있으며, 최종적으로는 지표면의 복사 수지 모의에도 정확도를 향상시킬 필요가 있다.

### 제 2 절 타 연구에의 응용

본 연구에서는 지상 원격관측자료 및 위성 원격관측자료를 통해 북극 지역 구름의 장기 및 계절 변동 특성을 이해하고, 이를 바탕으로 PWRF 모델링 결과와 비교를 수행하였고, 모델의 모의 능력을 검증하였다. 현재 모델은 구름을 모의하는 과정에서 모수화 과정을 거치는데 이 모수화 과정을 북극 구름에 맞게 개선하기 위해서 본 연구의 결과를 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 이를 통해서 구름의 모의 과정이 개선되면, 향후 북극 지역 온난화에 따른 구름의 변동 특성을 정확하게 예측할 수 있을 것이다.

또한 현재는 기후모형에서 구름의 모수화 과정만을 통해 구름을 모의하지만, 본 연구에서 산출된 북극 지역 구름의 특성을 자료동화 기법을 활용하여 구름을 모의한다면, 현재 나타나는 구름 모의 정확도를 향상시킬 수 있을 것이다. 이를 통해 북극 지역 구름이 북극 기후에 미치는 영향과 중위도 겨울철에 미치는 영향까지 파악할 수 있을 것이다.

## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구에서 활용된 지상 원격관측장비(구름 레이더, 운고계, 마이크로 라디오미터)는 AWIPEV의 니알슨 독일 기지에서 운영 중인 장비들이며, 구름의 거시특성(고도 등) 및 미세물리특성(상, 액체수함량, 빙정수함량 등)은 독일 기지의 관측자료를 Cloudnet 알고리즘으로 융합하여 산출된 것이다. 해당 정보들을 통해 구름의 상에 따른 운량, 고도 및 두께 정보를 파악할 수 있었다. 본 연구에서는 Atmospheric Radiation Measurement의 North Slope of Alaska 지점의 라이다 관측 자료를 통해 아라온 호 해상 관측 결과와 비교를 수행하였다. 또한, 본 연구에서는 극지에 최적화된 기상 모델(Polar-optimized Weather Research and Forecasting Model version 4.1.1; PWRF)을 통해 구름 모델링을 수행하고 지상 및 위성 관측결과와 비교를 수행하였다. PWRF는 지표면 모델과, 해빙, 눈 등의 정보를 극지역에 맞게 조정된 모델로, Ohio State University's Byrd Polar and Climate Research Center에서 개발하였고, 기존의 WRF 모델에 접합할 수 있게 되어있다. 이 밖에도 위성 관측자료인 CALIPSO, CloudSat, MODIS는 NASA에서 제공하는 자료이며, ERA5, JRA-55, MERRA2는 각각 ECMWF, JMA, NASA에서 제공하는 재분석자료이다.

극지연구소

## 제 7 장 참고문헌

- Barlage, M., Chen, F., Tewari, M., Ikeda, K., Gochis, D., Dudhia, J., Rasmussen, R., Livneh, B., Ek, M., and Mitchell, K., 2010, Noah land model modifications to improve snowpack prediction in the Colorado Rocky Mountains. *Journal of Geophysical Research*, **115**, D22101, <https://doi.org/10.1029/2009JD013470>.
- Bennartz, R., Shupe, M. D., Turner, D. D., Walden, V. P., Steffen, K., Cox, C. J., Kulie, M. S., Miller, N. B., and Pettersen, C., 2013, July 2012 Greenland melt extent enhanced by low-level liquid clouds. *Nature*, **496**(7443), 83.
- Dong, X., Xi, B., Crosby, K., Long, C. N., Stone, R. S., and Shupe, M. D., 2010, A 10 year climatology of Arctic cloud fraction and radiative forcing at Barrow, Alaska. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **115**(D17).
- Hines, K. M. and Bromwich, D. H., 2008, Development and testing of Polar Weather Research and Forecasting (WRF) model. Part I: Greenland Ice Sheet meteorology. *Monthly Weather Review*, **136**, 1971 - 1989, <https://doi.org/10.1175/2007MWR2112.1>.
- Hines, K. M., Bromwich, D. H., Bai, L., Bitz, C. M., Powers, J. G., and Manning, K. W., 2015, Sea ice enhancements to Polar WRF. *Monthly Weather Review*, **143**, 2363 - 2385, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00344.1>.
- Hogan, R. J., and O'Connor, E. J., 2004, Facilitating cloud radar and lidar algorithms: the Cloudnet Instrument Synergy/Target Categorization product. *Cloudnet documentation*.
- Huang, Y., Dong, X., Xi, B., Dolinar, E. K., Stanfield, R. E., and 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., and Coauthors, 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.
- Kay, J. E., L'Ecuyer, T., Chepfer, H., Loeb, N., Morrison, A., and Cesana, G., 2016, Recent advances in Arctic cloud and climate research. *Current Climate Change Reports*, **2**(4), 159-169.
- Küchler, N., Kneifel, S., Löhnert, U., Kollias, P., Czekala, H., and Rose, T., 2017, A W-Band radar - radiometer system for accurate and continuous monitoring of clouds and precipitation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*,

- 34(11), 2375–2392.
- Lim, K. - S. S., and Hong, S. - Y., 2010, Development of an effective double - moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. *Monthly Weather Review*, **138**, 1587 - 1612. doi:10.1175/2009MWR2968.1
- Liu, Y., Key, J. R., Ackerman, S. A., Mace, G. G., and Zhang, Q., 2012, Arctic cloud macrophysical characteristics from CloudSat and CALIPSO. *Remote Sensing of Environment*, **124**, 159–173.
- Liu, Y., and Key, J. R., 2014, Less winter cloud aids summer 2013 Arctic sea ice return from 2012 minimum. *Environmental Research Letters*, **9**(4), 044002.
- Mansell, E. R., Ziegler, C. L., and Bruning, E. C., 2010, Simulated electrification of a small thunderstorm with two - moment bulk microphysics. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **67**, 171 - 194. doi:10.1175/2009JAS2965.1
- Maturilli, M., and Ebell, K., 2018, Twenty-five years of cloud base height measurements by ceilometer in Ny-Ålesund, Svalbard. *Earth System Science Data*, **10**, 1451–1456.
- Miao, H., Wang, X., Liu, Y., and Wu, G., 2019, An evaluation of cloud vertical structure in three reanalyses against CloudSat/cloud aerosol lidar and infrared pathfinder satellite observations. *Atmospheric Science Letters*, e906.
- Morrison, H., Thompson, G., and Tatarskii, V., 2009, Impact of Cloud Microphysics on the Development of Trailing Stratiform Precipitation in a Simulated Squall Line: Comparison of One - and Two - Moment Schemes. *Monthly Weather Review*, **137**, 991 - 1007. doi:10.1175/2008MWR2556.1
- Nomokonova, T., Ebell, K., Löhnert, U., Maturilli, M., Ritter, C., and O'Connor, E., 2019, Statistics on clouds and their relation to thermodynamic conditions at Ny-Ålesund using ground-based sensor synergy. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**(6), 4105–4126.
- Rose, T., Crewell, S., Löhnert, U., and Simmer, C., 2005, A network suitable microwave radiometer for operational monitoring of the cloudy atmosphere. *Atmospheric Research*, **75**(3), 183–200.
- Shupe, M. D., and Intrieri, J. M., 2004, Cloud radiative forcing of the Arctic surface: The influence of cloud properties, surface albedo, and solar zenith angle. *Journal of Climate*, **17**(3), 616–628.
- Taylor, P. C., Boeke, R. C., Li, Y., and Thompson, D. W., 2019, Arctic cloud annual cycle biases in climate models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**(13), 8759–8782.

- Tjernström, M., Leck, C., Birch, C. E., Bottenheim, J. W., Brooks, B. J., Brooks, I. M., and Coauthors, 2014, The Arctic Summer Cloud Ocean Study (ASCOS): overview and experimental design. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **14**(6), 2823–2869.
- Tjernström, M., Shupe, M. D., Brooks, I. M., Persson, P. O. G., Prytherch, J., Salisbury, D. J., and Coauthors, 2015, Warm air advection, air mass transformation and fog causes rapid ice melt. *Geophysical Research Letters*, **42**(13), 5594–5602.
- Uttal, T., Curry, J. A., McPhee, M. G., Perovich, D. K., Moritz, R. E., Maslanik, J. A., and Coauthors, 2002, Surface heat budget of the Arctic Ocean. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**(2), 255–276.
- Verlinde, J., Harrington, J. Y., McFarquhar, G. M., Yannuzzi, V. T., Avramov, A., Greenberg, S., and Coauthors, 2007, The mixed-phase Arctic cloud experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **88**(2), 205–222.
- Wang, Q., Jacob, D. J., Fisher, J. A., Mao, J., Leibensperger, E. M., Carouge, C. C., Le Sager, P., Kondo, Y., Jimenez, J. L., Cubison, M. J., and Doherty, S. J., 2011, Sources of carbonaceous aerosols and deposited black carbon in the Arctic in winter–spring: implications for radiative forcing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **11**(23), 12453–12473.
- Weitkamp, C. (Ed.), 2006, Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere (Vol. 102). *Springer Science & Business*.
- Wendisch, M., Macke, A., Ehrlich, A., Lüpkes, C., Mech, M., Chechin, D., and Coauthors, 2019, The Arctic Cloud Puzzle: Using ACLOUD/PASCAL Multiplatform Observations to Unravel the Role of Clouds and Aerosol Particles in Arctic Amplification. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **100**(5), 841–871.
- Xie, Y., Li, Z., Li, L., Wagener, R., Abboud, I., Li, K., Li, D., Zhang, Y., Chen, X., and Xu, H., 2018, Aerosol optical, microphysical, chemical and radiative properties of high aerosol load cases over the Arctic based on AERONET measurements. *Scientific Reports*, **8**(1), 9376.
- Xu, K. M., and Randall, D. A., 1996, A semiempirical cloudiness parameterization for use in climate models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **53**(21), 3084–3102.
- Yeo, H., Park, S. J., Kim, B. M., Shiobara, M., Kim, S. W., Kwon, H., Kim, J. H., Jeong, J. H., Park, S. S., and Choi, T., 2018, The observed relationship of cloud to surface longwave radiation and air temperature at Ny-Ålesund,

Svalbard. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 70(1), 1-10.



## 뒷 면

### 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.