

북극 지역 에어로졸-구름의 입체 분포 및
장기변동 특성 분석

Three-dimensional aerosol-cloud distribution and
their long-term trends over the Arctic



서울대학교

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 해양·해빙 변화에 기인한 북극과 한반도의 재해기상 현상 모델링 시스템(KPOPS-Earth)의 개발 및 활용에 관한 연구” 과제의 위탁연구 “북극 지역 에어로졸-구름의 입체 분포 및 장기변동 특성 분석에 관한 연구” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.



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

요 약 문

I. 제 목

북극 지역 에어로졸-구름의 입체 분포 및 장기변동 특성 분석

II. 연구개발의 목적 및 필요성

기후 변화로 인한 북극 온난화(Arctic amplification)와 해빙 감소로 전 지구 수증기 순환 특징이 변하고 있다. 에어로졸(미세먼지)의 화학성분 및 농도 변화와 해빙의 연관성을 밝혀내기 위한 연구가 진행 중이며, 대기 및 해양에 의해 전달되는 열 및 수증기량과 관련이 있는 것으로 보고된다. 모델 계산을 통해 극지방의 에어로졸의 기후 영향 그리고 에어로졸, 구름 발생(수증기량), 대기복사, 해빙, 중위도·저위도의 대기 수송패턴 상호작용 등에 관한 연구가 진행되고 있는 가운데, 아직 관측을 기반으로 한 상세한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 위성 및 지상 에어로졸(미세먼지)-구름 관측자료 분석을 통해 북극 지역 에어로졸의 분포 특성과 구름의 장기변동 특성을 조사 및 분석함으로써 북극 지역 에어로졸의 주요 발생원을 연구하고 중위도에서 북극 지역으로의 장거리 수송 영향을 상세 분석하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 위탁연구는 북극 지역의 에어로졸(미세먼지)과 구름의 시·공간 분포 특성 및 장기변동 특성 이해를 목표로 한다. 이를 위해 본 연구에서는 (1) 지상 및 위성 원격관측 자료를 활용하여 북극 지역 에어로졸(미세먼지)의 시·공간 분포 특성 및 구름 미세물리 특성을 분석하고, (2) 구름 유형별 연직 분포와 장파 복사 수지와의 연관성 분석을 수행한다. 또한, (3) 북극 지역 에어로졸과 구름의 장기변동 특성을 조사하며, 북극권 해상의 에어로졸 주요 발생원 및 중위도에서 북극 지역으로의 장거리 수송 영향을 분석하고자 한다. 마지막으로, (4) 북극 지역 에어로졸-구름 모델링의 입력 및 검증 자료로 활용 가능한 관측자료의 데이터베이스(DB)를 구축하고자 한다.

IV. 연구개발 결과

니알슨 기지에서 관측된 에어로졸 산란계수는 3월에 최대값($\sim 8 \text{ Mm}^{-1}$)을 보이며 8월까지 꾸준히 감소하여 9월에 약 0.05 Mm^{-1} 까지 감소하는 변화 양상을 보였다. 에어로졸 입경별 수농도가 2000년대 초반 약 200 cm^{-3} 이하였던 것과 비교하여 2010년대에 들어서며 $250\sim 300 \text{ cm}^{-3}$ 까지 증가했고, 그에 따라 핵화 모드 입자 개수는 약 $+3.975 \text{ cm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 의 증가 추세를 지니고 있다.

북극 지역 AERONET에서 관측된 에어로졸 광학두께는 4월에 높게 관측되었으며, 7~8월에도 높은 에어로졸 광학두께를 들어내는 지역이 많았다. 가장 높은 평균 에어로졸 광학두께 값은 Yakutsk 관측소에서 0.24 ± 0.43 이었으며 산불이 빈번하게 발생하는 시베리아에 속해있어 산불로 인해 발생한 에어로졸의 영향으로 에어로졸 광학두께가 증가한 것으로 사료된다. PEARL 관측소의 경우 가장 높은 고도에 있는 관측소로, 가장 낮은 에어로졸 광학두께 값(0.07 ± 0.05)이 나타났다.

알래스카 베로우에서 상위 70% 이상인 고농도 에어로졸 사례는 겨울 동안 약 50%로 가장 높았고, 다음으로 봄철(27%)과 여름철(12%) 순서대로 비율이 높았으며 가을철에 약 10%로 가장 낮았다. 역 궤적 모델을 이용하여 계절마다 잠재적 오염원의 분포를 살펴보았을 때 겨울철에는 북위 50도 이상의 러시아 및 동유럽 지역과 베로우 근처 북극해 지역이 가장 강한 잠재 오염원($0.6\text{--}0.9$)으로 추정된다. 여름철에는 베링해 부근에서 상대적으로 높은 기여도($0.6\text{--}0.7$)가 나타났으며, 가을철에는 뚜렷한 잠재 오염원이 보이지 않는다(0.4 이하).

북극에서 평균적으로 78% 구름이 관측되었으며, 이는 단층 구름 39%와 다층 구름 38%로 구성되었다. 총 구름 발생 빈도는 5월부터 10월까지 80% 이상으로 높았으며, 11월부터 4월까지 그 이하로 상대적으로 적은 구름 발생 빈도를 보였다. 평균적으로 얼음 구름은 2 km 정도의 두께였으며 여름철에는 3 km 이상 높은 고도에서 발생하는 반면, 겨울철에는 2 km 이하에서 빈번하게 발생하였다. 혼합상 구름은 하부 높이가 여름과 초가을에 높아져 전반적으로 가장 낮은 고도(1 km 내외)에서 발생하며, 값의 변동 폭이 작게 나타났다. 액체 구름의 LWC는 평균 0.6 gm^{-3} 로 관측되었고 상대적으로 따뜻한 온도($-3.8\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$) 범위 안에 있음을 확인할 수 있었다. IWC 값은 0.1 gm^{-3} 미만이었으며, 특히 얼음 구름에서의 IWC는 영하 $-12\sim 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 의 온도 범위에서 0.5 km 이하에서 관측되었다.

온난 이류 사례에서 총 구름 발생 빈도는 약 0.5 km에서 가장 높았으며($\sim 60\%$), 이는 대부분 혼합상 구름($\sim 30\%$)과 얼음 구름($\sim 25\%$)에 기인했다. 한랭 이류 사례에서도 대략 0.8 km에서 혼합상($\sim 20\%$) 및 얼음($\sim 20\%$) 구름에 기인한 구름 발생 빈도

가 가장 높았으며(~45%), 상층에선 얼음 구름이 대부분이었다.

모델을 통해 산출된 자료를 통해 북극 지역(북위 60° 이상)에서의 지상 구름의 장파 복사강제력 및 구름 유형별 장파 복사강제력은 평균적으로 41.65 Wm^{-2} 로 나타났다. 6월에 최소(18년 평균 34.82 Wm^{-2})를 보였다가, 점차 증가하여 10월에 최대(18년 평균 50.06 Wm^{-2})를 보인 후 다시 감소하는 경향을 보였다.

한랭 이류가 유입된 케이스에서 관측된 혼합상 구름이 불연속적으로 발생하였다. 표층 온도는 대략 -10°C 이하로 낮았고, 이에 따라 상향 장파 복사량이 약 250 Wm^{-2} 로 온난 이류 사례와 비교해 현저하게 적었다. 하향장파 복사량은 최대 240 Wm^{-2} 에서 최소 150 Wm^{-2} 로 낮았으며, 특히 구름이 존재할 때 최대값이 관측되었다.

V. 연구개발 결과의 활용계획

본 연구에서는 지상 및 위성 관측된 에어로졸과 구름 특성의 시·공간 변화 분석을 통해 에어로졸의 직·간접적인 복사 효과에 대한 이해도를 높이고, 북극 지역의 에어로졸-구름 모수화 과정을 개선하는데 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 또한, 본 연구에서 산출된 북극 구름 특성들을 구름 모의에 활용하여, 구름 모의 정확도를 향상할 것으로 예측된다. 향상된 구름 모의 정확도로 북극의 온난화에 따른 기후 변화 및 중위도에 미치는 영향을 더 정확하게 파악할 수 있을 것이다.

S U M M A R Y

I. Title

Three-dimensional aerosol-cloud distribution and their long-term trends over the Arctic

II. Purpose and Necessity

Arctic amplification and sea ice loss due to climate change are changing the characteristics of the global water vapor cycle. Research is underway to find out the relationship between changes in the chemical composition and concentration of aerosols (fine dust) and sea ice. It is reported that these relationships are due to the amount of heat and water vapor transmitted by the atmosphere and the ocean. Modeling studies are being conducted on the effects of aerosol on Arctic climate, cloud generation (water vapor), atmospheric radiation, sea ice, and atmospheric transport pattern interactions in mid- and low-latitudes. However, observations and detailed studies over Arctic region are still lacking. In this study, the aerosol distribution and characteristics in the Arctic region and the long-term variation of clouds are investigated through the analysis of satellite and ground aerosol(fine dust) and cloud data. Also, the impact of long-distance transport from mid-latitudes to the Arctic region was analyzed in detail.

III. Contents

This research aims to understand the temporal and spatial distribution and long-term variation of aerosols (fine dust) and clouds in the Arctic region. In this study, (1) analysis of spatial and temporal distribution of aerosol (fine dust) in the Arctic region and microphysical characteristics of clouds by using ground

and satellite remote observation data, and (2) investigate vertical distribution of cloud microphysics and its relationship with long wave radiation. In addition, (3) we investigate the main transport of aerosols in the Arctic Ocean and the impact of long-distance transport from mid-latitudes to the Arctic. Finally, (4) a database of observational data that can be used as verification data for aerosol-cloud modeling in the Arctic region is collected.

IV. Results

The aerosol scattering coefficient observed at the Ny-Ålesund Station showed a maximum value of ($\sim 8 \text{ Mm}^{-1}$) in March, decreased steadily until August and September (0.05 Mm^{-1}). The number concentration of each aerosol particle size in the early 2000s were less than about 200 cm^{-3} , while it increased to $250\text{--}300 \text{ cm}^{-3}$ in the 2010s. The number of particles in the nucleation mode increased by about $+3.975 \text{ cm}^{-2}\text{yr}^{-1}$.

The aerosol optical depth (AOD) observed by AERONET in the Arctic region peaked in April, July, and August. The highest AOD observed was 0.24 ± 0.43 at the Yakutsk Observatory, which might be due to the influence of aerosols caused by forest fires as it is Siberia where forest fires frequently occur. In the case of the PEARL observatory, which is located at the highest altitude, showed the lowest AOD (0.07 ± 0.05).

In Barrow, Alaska, top 70% high concentration aerosol cases occurred the highest at about 50% during winter, followed by spring (27%) and summer (12%). The distribution of potential pollutants for each season was examined using reverse trajectory model, where Russia and Eastern Europe regions above 50 degrees North latitude and the Arctic Ocean region near Barrow are estimated to be have strongest potential pollutants (0.6–0.9) in winter. A relatively high contribution (0.6–0.7) was found near Bering Sea in summer, and no clear potential pollution source was seen in autumn (less than 0.4).

On average over the Arctic, 78% clouds were observed, consisting of 39% single layer clouds and 38% multi-layer clouds. The total cloud occurrence

frequency was higher than 80% on May to October, and less than that from November to April. On average, ice clouds was about 2 km thick, and occurred at high altitudes of more than 3 km in summer, but 2 km in winter. Mixed-phase clouds generally occur at the lowest altitude (around 1 km) as the lower height increases in summer and early autumn, and the fluctuation range of values is small. The LWC of liquid cloud was observed to be 0.6 gm^{-3} on average, and it was confirmed that it was during relatively warm temperature range ($-3.8^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$). The IWC values were less than 0.1 gm^{-3} , especially in ice clouds, which was observed below 0.5 km in the temperature range of $-12 \sim 3^{\circ}\text{C}$.

In warm advection case, total cloud occurrence frequency was highest around 0.5 km ($\sim 60\%$), which was mostly due to mixed-phase clouds ($\sim 30\%$) and ice clouds ($\sim 25\%$). In case of cold advection, the frequency of clouds due to mixed-phase ($\sim 20\%$) and ice ($\sim 20\%$) clouds was highest ($\sim 45\%$) at approximately 0.8 km height, and ice clouds were the most common in the upper layer.

The average long wave radiative forcing of surface clouds calculated through the model was 41.56 Wm^{-2} . It showed a minimum (18 year average of 34.82 Wm^{-2}) in June, then gradually increased to a maximum ($\sim 50.06 \text{ Wm}^{-2}$) in October and then decreased afterwards.

During cold advection, the observed mixed-phase clouds occurred discontinuously with low (-10°C) temperature. Accordingly, the upward long wave radiation was about 250 Wm^{-2} , which was significantly less than in case of warm advection. Downward long wave radiation ranged from a maximum of 240 Wm^{-2} to a minimum of 150 Wm^{-2} was observed especially when clouds were present.

V. Application Plans of Results

In this study, the understanding of the direct and indirect radiation effects of aerosols can be improved through the analysis of the temporal and spatial changes of the aerosol and cloud characteristics using ground and satellite observation data sets. It is expected to improve the aerosol-cloud

parametrization process in the Arctic region. In addition, it is predicted that the accuracy of cloud simulation can be improved by using the Arctic cloud characteristics investigated in this study. Improved cloud simulation accuracy will be enable more accurate picture of climate change and mid-latitude impacts of Arctic warming.



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	15
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	16
제 1 절 에어로졸 입체 분포 및 장기변동 특성 분석	16
1. 지상·위성 관측자료를 이용한 북극 에어로졸의 계절·경년 변동 특성 분석	16
2. 아라온호에서 관측된 에어로졸의 특성 분석	34
3. 북극 지역 에어로졸 주요 발생원 및 중위도에서 장거리 수송 영향 분석	36
제 2 절 구름 입체 분포 및 장기변동 특성 분석	40
1. 지상·위성 관측자료를 이용한 북극 구름의 계절·경년 변동 특성 분석	40
2. 니알슨 지역의 구름 특성과 북극 종관 기상 패턴과의 연관성 분석	54
3. 북극 구름 유형 분포와 장파 복사 수지와와의 연관성 분석	60
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	63
제 1 절 연구개발목표의 달성도	63
1. 정성적 성과	63
가. 1차연도 정성적 성과	63
나. 2차연도 정성적 성과	64
다. 3차연도 정성적 성과	65
2. 정량적 성과	66
제 2 절 관련 분야 기여도	66
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	67
제 1 절 추가연구의 필요성	67
제 2 절 타 연구에의 응용	67
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학 기술정보	68
제 7 장 참고문헌	69

제 1 장 서론

제 1 절 연구개발 목적

본 위탁연구는 북극 지역에 있는 주요 기상 관측소 및 위성에서 얻은 다양한 종류의 지상 및 원격 관측자료를 이용하여 북극 지역의 에어로졸(미세먼지)과 구름의 시·공간 분포와 장기변동 추세에 대해 이해하는 것을 목표로 하였다.

이를 위해 본 위탁과제는 세부적으로 지상 및 위성 원격관측 자료를 활용하여 에어로졸과 구름의 시·공간 특성을 분석하였다. 에어로졸에 관한 연구를 위해 AERONET에서 제공하는 지상 원격 관측자료 및 CALIPSO, MODIS 등의 위성 관측자료를 이용하여 에어로졸 광학두께, 소산 계수 등 광학적·물리적 특성의 시공간적 변화를 자세히 분석하고, 아라온호에서 측정된 에어로졸(미세먼지)의 수농도를 이용하여 미세물리 과정과의 관련 가능성에 대하여 논의하였다. 구름에 관한 연구를 위해 CDP를 통한 직접 관측자료 및 Cloudnet에서 제공하는 지상 및 원격 관측자료, CALIPSO에서 제공하는 운정고도 자료, ACLOUD 항공 측정 캠페인을 통해 얻은 관측자료 등을 이용하여 북극 지역 구름의 특성 및 구름 내의 액체, 얼음 수 함량을 분석하고 종관 기상 패턴과의 관련성을 조사하여 구름의 생성, 이동 및 구름 내에서 발생하는 미세물리 과정에 대해 논의하는 것을 목표로 하였다. 지상 및 위성 원격자료들을 통합하여 데이터베이스를 만들고 이를 이용하여 북극 지역 에어로졸 및 구름의 장기 변동성을 살펴보는 것과 함께 HYSPLIT 역궤적 모델을 이용하여 다른 지역으로부터 북극 지역으로 수송되는 오염물질을 추적하고 이를 이용해 에어로졸 및 구름의 주요 발생원을 분석하였다. 그림 1.1에 최종 연구 목표 및 내용을 모식도로 정리하였다.

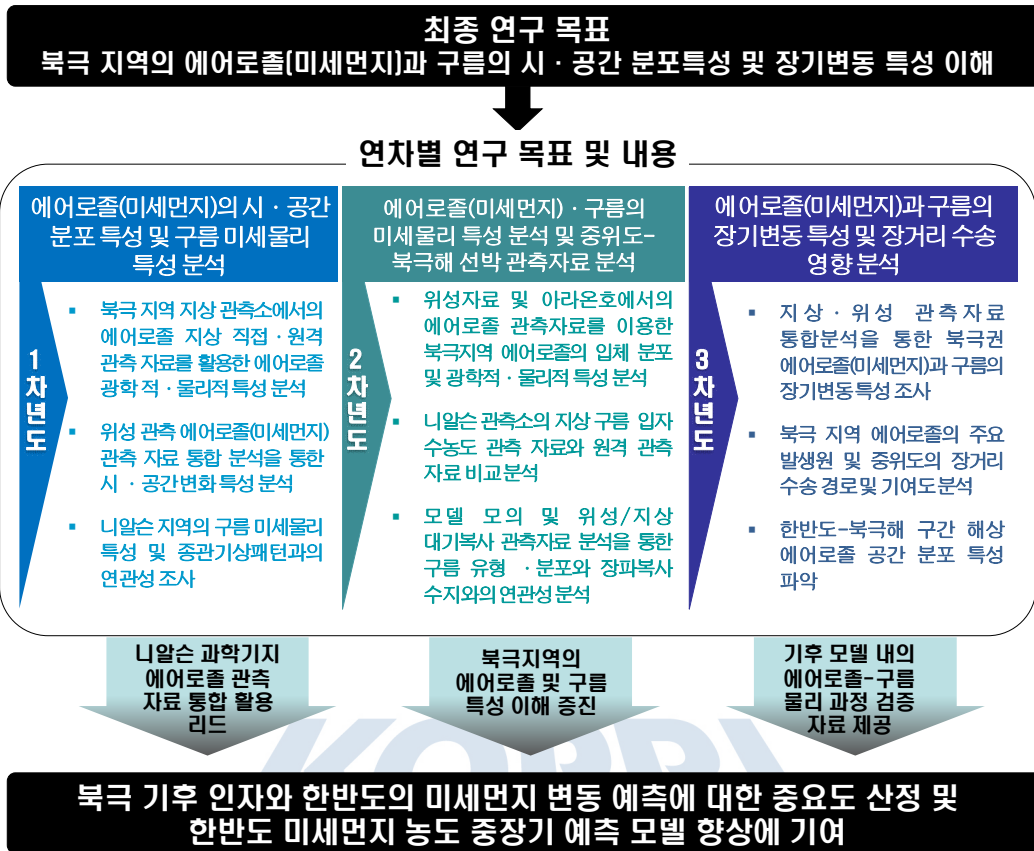


그림 1.1. 본 연구개발의 추진 체계 모식도.

제 2 절 연구의 필요성

○ 북극의 기후 변화

최근 기후 변화로 인해 전 지구의 온난화가 진행되고 있으며, 특히 북극은 저위도 지역보다 더욱더 빠르게 기온이 상승하고 있다(Serreze and Barry, 2011; Previdi et al., 2021). 북극 증폭(Arctic amplification)으로 불리는 이 현상으로 인해 해빙 감소, 전 지구 수증기 순환 변화 등이 발생하고 있으며 이는 주로 대기 및 해양을 통해 이루어지는 열 및 수증기 수송과 관련이 있는 것으로 보고된다(Francis and Hunter, 2006; Shindell and Faluvegi, 2009; Screen and Simmonds 2010; Yang et al., 2010; Serreze and Barry, 2011; Flanner, 2013). 북극 증폭의 영향력 향상에 따라 북극 지역의 기후를 면밀하게 이해하고 현재의 기후 변화를 모델을 통해 정확히 모의하는 것에 대한 필요성이 증대되었다. 북극의 기후에 영향을 미칠 수 있는 여러 가지 물리, 화학적 요소들은 해양, 해빙, 눈, 에어로졸, 구름 등이 있다(Sand et

al., 2013; Heogh-Guldberg et al., 2018; Wendisch et al., 2019). 이 중 에어로졸과 구름은 대기복사에 큰 영향을 미치는 요인으로 이들은 북극 지역의 지표 에너지 균형을 결정하는 데에 아주 중요한 역할을 한다(Twomey, 1977; Albrecht, 1989, Haywood et al., 2021). 하지만 북극 지역의 에어로졸 및 구름이 기후에 미치는 영향에 대한 이해는 부족한 실정이며, 따라서 에어로졸 및 구름의 복사 영향, 구름 발생 및 특성 변화에 대한 조사와 에어로졸 및 구름과 해빙, 해양, 및 대기 등이 가지는 상호작용에 대해 분석 및 연구가 필요하다(Sand et al., 2013; Law et al., 2014; Arnold et al., 2016; AMAP, 2017). 에어로졸과 구름의 상관관계에 관한 관심 증대에 부합하기 위하여 지상·항공·위성 등 다양한 관측자료 기반의 정확한 현황 파악 필요성이 증대되고 있으며, 미래 기후 예측과 분석에 사용되는 기후 모델의 개선 수요가 높아지고 있다. 특히, 북극 지역은 다른 지역에 비해 지상 관측 데이터가 제한적이므로 다각화되고 입체적인 원격관측을 통해 높은 신뢰도의 고해상도 자료 데이터베이스 구축 및 분석이 필요하다.

○ 북극 기후와 에어로졸

에어로졸은 빛의 산란과 흡수, 방출을 통해 대기의 복사에 큰 영향을 미치며(직접 복사 효과), 응결핵 혹은 빙정핵 역할을 하여 구름의 미세물리 과정에 영향을 주고 구름의 생성을 조절하여 대기에 대한 구름의 복사 효과를 변화시키기도 한다(간접 복사 효과)(Garret et al., 2002; Lubin and Vogelmann, 2006). 이처럼 에어로졸은 직·간접적으로 북극 지표의 에너지 균형에 지대한 영향을 미칠 수 있지만, 북극 지역의 에어로졸이 복사에 미치는 영향은 불확실성이 매우 크다. 북극의 기후에 대한 이해를 높이고 모델을 통한 북극 기후 예측 정확도를 높이기 위해 북극 지역 에어로졸(미세먼지)의 시·공간 분포 특성 및 구름 미세물리 과정과의 연관성에 대한 분석이 필요하다. 다양한 지상 및 위성 원격 관측자료를 활용하여 에어로졸 농도와 시·공간적 변화를 조사하고 정량화할 수 있다. 그뿐만 아니라 미래의 북극 기후를 이해하고 정확히 예측하기 위해 에어로졸의 장거리 수송 및 발생원을 조사하여 북극 지역의 에어로졸 농도에 대한 내부적, 외부적 기여도를 파악하고 장기변동을 조사하여야 한다.

○ 북극 기후와 구름

구름은 단파 복사의 반사와 장파 복사의 흡수 및 방출을 통해 지구의 복사 수지에 큰 영향을 미친다. 에어로졸과 마찬가지로 북극 지역의 구름에 대한 이해는 매우 부족한 실정이며, 구름 생성 및 구조와 구름 내부의 미세물리적 과정, 구름이 북극

대기에 미치는 영향에 대한 체계적인 정리가 필요하다. 다양한 지상, 위성, 항공 관측자료를 이용하여 구름 유형별 연직 분포, 운정고도, 그리고 종관 기상 패턴과의 관련성 등 중규모 및 종관규모에서의 구름의 특성을 밝힐 수 있다. 구름의 복사 효과는 구름의 미세물리적 특성 과도 밀접하게 관련되어 있다. 직접, 원격관측을 통해 액체, 얼음 수함량 등을 측정하여 구름 내 입자들의 미세물리적 특성 및 구름 내에서 발생하는 미세물리적 과정 등을 밝힐 수 있다. 일반적으로 구름 응결은 과포화도 뿐만 아니라 에어로졸의 크기 분포, 화학 조성 및 지표면 내의 에어로졸 농도에 의해 결정된다(Pierce and Adams, 2009; Liu and Li, 2014). 따라서 에어로졸에 대한 조사가 동반된 구름에 대한 조사는 구름의 미세물리 과정을 이해하는 데에 필수적이며 에어로졸(미세먼지)-구름 상관관계 이해를 크게 증진할 수 있다. 구름과 복사의 피드백 메커니즘을 그림 2.1에 나타내었다.

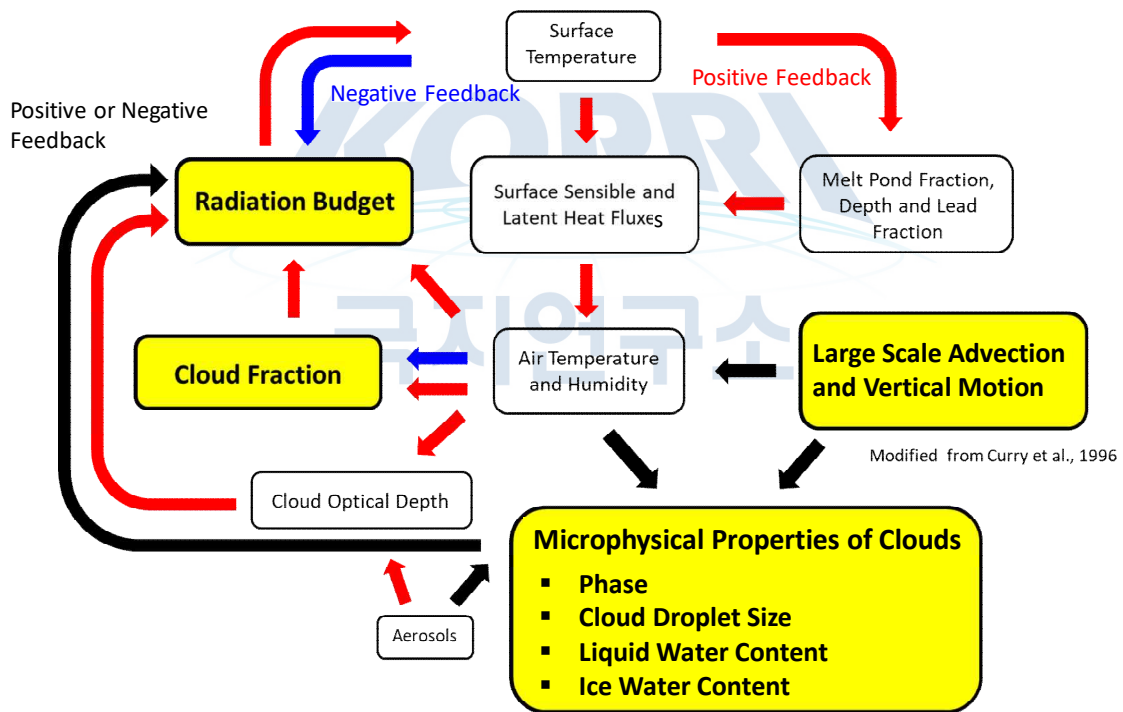


그림 2.1. 구름, 복사 피드백 메커니즘의 모식도. 출처:Curry et al. (1996).

제 2 장 국내외 기술개발 현황

○ 북극 지역 에어로졸 및 구름의 관측

- 2007년에서 2008년 사이 수행된 Arctic Summer Cloud Ocean Study(ASCOS) 캠페인은 북극 해상 및 해빙 위의 저층운의 형성과 일생, 미세물리적 과정을 조사하기 위해 에어로졸 흡습성 관측 장비, 구름 및 강수 레이더, 프로파일러 등이 장착된 쇄빙선을 이용하여 기상 변수들과 에어로졸 및 가스상 물질 등을 관측하였다(Tjernström et al., 2014).
- 2017년 5월 23일부터 6월 6일 사이 수행된 Arctic Cloud Observations Using airborne measurements during polar Day(ACLOUD) 캠페인은 북극 대기 경계층과 중층운, 그리고 북극 증폭의 관련성을 살펴보기 위해 2대의 항공기를 이용하여 22번의 관측을 수행하였다. 직접, 원격 관측 장비를 이용하여 기상 변수, 난류 및 복사에너지 속(flux) 등을 측정하였다(Ehrlich et al., 2019).
- 2019년 9월에서 2020년 8월까지 스발바르 지역에서 수행된 Ny-Ålesund Aerosol Cloud Experiment(NASCENT) 캠페인에서는 북극 지역 에어로졸의 순환을 살펴보고 구름 내 입자의 활성화, 빙정화 등의 기작을 논의하기 위해 지상에서 직접, 원격 측정을 수행하였다(Pasquier et al., 2022).

○ 북극 지역 에어로졸 및 구름의 모의

- Morrison et al. (2009)는 17 개의 single-column 모델과 9개의 cloud-resolving 모델을 이용하여 북극 지역에서 관측된 혼합층 구름을 모의하고 비교하였다. 모의된 빙정수경로는 대체로 관측값과 일치하였고 액체수경로는 관측값과 약간의 차이를 보였다. Morrison et al. (2009)은 혼합 상태의 구름에 대한 미세물리에 대한 이해 및 모의 능력 향상이 필요함을 강조하였다.
- Pithan and Mauritsen (2021)은 CMIP 5 기후 모델 모의 자료를 분석하여 지표 알베도 피드백보다 기온 피드백, 즉 지표의 기온 상승이 북극 증폭에 가장 큰 기여를 하는 과정임을 밝혔다.
- Breider et al. (2014)는 GEOS-Chem 전 지구 화학 수송 모델을 이용하여 북극 지역의 에어로졸 및 오존에 대한 3차원 입체 지도를 개발하였다. 모의 결과를 여러 관측자료와 비교하여 북극 지역의 광학적 두께와 잘 일치하는 결과를 얻어내었으며 모의 결과들을 통해 에어로졸 주요 생성 원을 밝혀내고 대기 중 화학 물질들의 계절 변동 등을 살펴보았다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 에어로졸 입체 분포 및 장기변동 특성 분석

1. 지상·위성 관측자료를 이용한 북극 에어로졸의 계절·경년 변동 특성 분석

북극 지역 Svalbard, Ny-Ålesund 기지(제플린 측정소)에서 2010년부터 2013년까지 3과장 네펠로미터(Nephelometer) 및 PSAP(Particle Soot Absorption Photometer)를 이용하여 관측된 에어로졸 산란계수(550 nm) 및 흡수계수(525 nm) 자료를 바탕으로 북극 지역에서 에어로졸 광학특성의 월변화를 살펴보았다. 그림 3.1의 파란색은 에어로졸 산란계수를, 붉은색은 흡수계수를 나타낸다. 전체적으로 에어로졸 산란계수의 값이 흡수계수보다 뚜렷하게 높은 값을 보였으나, 여름철(6~8월) 및 초가을을 제외하고는 월변화의 증감 양상이 서로 유사한 모습을 보였다. Ny-Ålesund 기지의 에어로졸 산란계수는 3월에 최대값($\sim 8 \text{ Mm}^{-1}$)을 보이고 8월까지 꾸준히 감소한 후 그 이후로 다시 증가하나, 흡수계수는 3월 이후로 감소하다 7월에 잠시 값을 회복한 후 9월에 약 0.05 Mm^{-1} 까지 감소하는 변화 양상을 보인다. Ny-Ålesund 기지의 에어로졸 산란계수 및 흡수계수는 지역적 국지 오염원이나 주위 배출원으로부터의 수송 영향이 거의 없는 위치적 특성상 다른 지역, 예를 들어 풍상 측 거대 오염원으로부터의 월경성 수송 영향을 빈번하게 받는 제주 고산 기후 관측소의 평균 에어로졸 산란계수($\sim 61.85 \text{ Mm}^{-1}$) 및 흡수계수($\sim 4.59 \text{ Mm}^{-1}$)보다 극히 낮은 값을 보였다(Schmeisser et al., 2017).

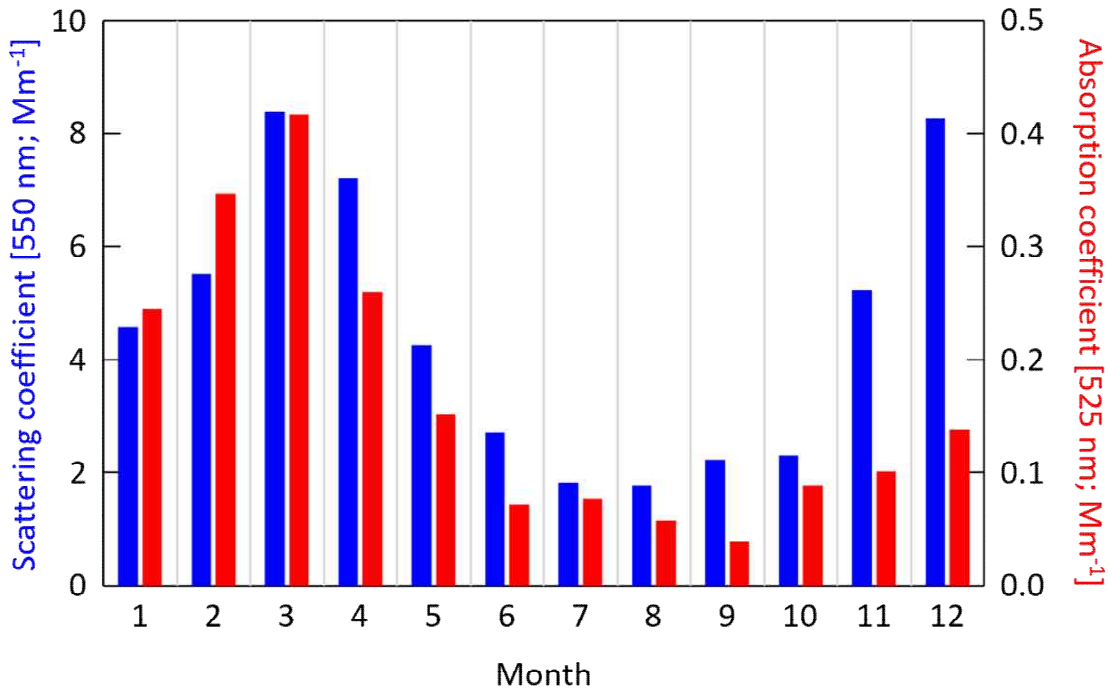


그림 3.1. Ny-Ålesund 기지(제플린 측정소)에서 2010년-2013년 기간에 3과장 네펠로미터 및 PSAP을 이용하여 각각 550 nm, 525 nm 파장대에서 측정된 에어로졸 산란계수 및 흡수계수의 월변화.

북극 에어로졸 물리 특성의 월변화 또한 Ny-Ålesund 기지에서 DMPS(Differential Mobility Particle Spectrometer)를 이용하여 측정된 에어로졸 입경별 수농도 자료를 통해 알아보았다(그림 3.2). 에어로졸 입경별 수농도는 2000년부터 장기 관측이 존재하지만, 위에서 파악된 광학 특성과의 연계 분석을 위해 본 연구의 분석에서는 자료 기간을 2010년~2013년으로 한정하였다. 핵화(Nucleation) 모드의 입경은 10-25 nm로, 축적(accumulation) 모드의 입경은 100-500 nm로 설정하였고, 10-500 nm를 총 수농도의 입경 범위로 설정하였다.

전체적으로 에어로졸 광학 특성값이 봄철 및 겨울철에 높았던 것과 비교하여 에어로졸 수농도는 입경과 관계없이 여름철에 높았다. 핵화 모드의 입자가 겨울 및 초봄까지 높은 수농도로 존재하지 않더라도 서브마이크론(submicron) 입경 범위의 축적 모드 및 총 입자 수농도가 확보되면 에어로졸의 산란 및 흡수 효율에 따라 얼마든지 높은 에어로졸 산란 및 흡수계수 값을 보일 수 있다는 것을 의미한다. 또한, 북극 지역의 겨울은 태양 복사가 극히 적거나 없어 저위도로부터 유입된 비/저 휘발성 유기 혹은 무기 전구물질이 자외선에 의한 광화학반응에 의해 이차 입자 생성이 일어나기 어려우므로 핵화 모드의 입자 수농도가 10월부터 3월까지 거의 0 cm^{-3} 에 가까운 값을 보인다. 반대로 여름철로 갈수록 태양 복사에 의한 광화학반응

이 활발해지면서 이차 입자 생성으로 핵화 모드 입자의 수농도가 증가하고, 그러한 입자가 저 휘발성 증기의 응결 반응으로 성장하게 되면 에이트킨(Aitken) 모드의 입자 개수까지 함께 증가할 수 있어 총 수농도 또한 7월에 약 450 cm^{-3} 까지 증가하는 모습을 보인다. 한편 구름 응결핵으로 작용할 수 있는 입경 범위인 축적 모드의 입자 수농도는 핵화 모드 혹은 총 수농도에 비해서는 그 월변화 폭이 작았다. 축적 모드 입경 범위의 입자가 화학적 특성에 따라 구름 응결핵으로 작용할 수 있다는 점을 생각해보면 구름 응결핵의 공급은 국지적인 이차 입자 생성 및 그 후속 성장에 의해서뿐만 아니라 외부로부터의 월경성 수송을 통해서도 일어날 수 있다는 점을 겨울철의 축적 모드 입자 수농도의 증가로부터 추정해볼 수 있다.

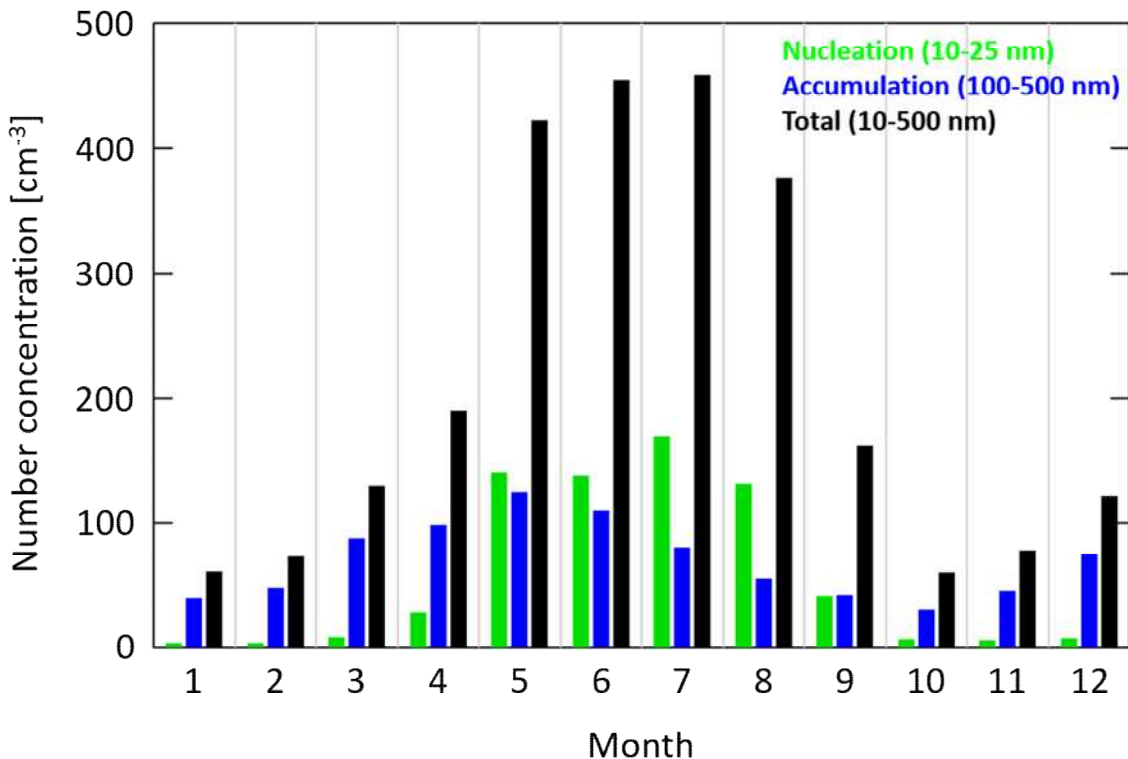


그림 3.2. Ny-Ålesund 기지(제플린 측정소)에서 2010년~2013년 기간에 DMPS를 이용하여 측정된 에어로졸 입경별 수농도 자료로부터 산정된 핵화(Nucleation) 모드(초록색), 축적(Accumulation) 모드(파란색) 및 총(Total) 수농도(검은색)의 월변화.

Ny-Ålesund 기지에서 장기간(2000년~2020년) 지속 관측된 에어로졸 입경별 수농도 자료를 바탕으로 에어로졸 물리 특성의 연변화 및 증감추세 또한 파악해보았다(그림 3.3). 총 수농도가 2000년대 초반 약 200 cm^{-3} 이하였던 것과 비교하여 2010년대에 들어서면 $250\sim 300 \text{ cm}^{-3}$ 까지 증가한 것을 볼 수 있다. 특히 핵화 모드 입자

수농도는 거의 2배 정도 증가하였다. 그에 따라 핵화 모드 입자 개수는 약 $+3.975 \text{ cm}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 의 증가 추세를 지니는 것으로 파악되었다. 그에 반해 축적 모드 입자는 장기 경향 관점에서 뚜렷한 증감이 없었으며, 총 수농도는 핵화 모드 입자 수농도보다 더 급격한 증가 추세($+5.017 \text{ cm}^{-3} \text{ yr}^{-1}$)을 보였다. 축적 모드 입자 개수의 증감이 미미한 상태에서 핵화 모드 입자보다 총 수농도 입자가 더 급격한 증가 경향을 보였다는 것은 에이트킨 모드 입자의 증가 경향 또한 총 수농도 증가 경향에 기여하였다는 것이고, 이는 핵화 모드 입자 수농도 증가로 대표되는 이차 입자 생성의 빈도 혹은 강도 증가뿐만 아니라 새로 생성된 입자의 후속 성장률 또한 증가하였다는 것을 의미한다. 향후 이러한 핵화/에이트킨 모드 입자 수농도의 증가 추세가 계속될 경우 북극 지역 에어로졸 산란계수 등의 광학 특성 또한 직접적인 영향을 받을 것으로 사료된다.

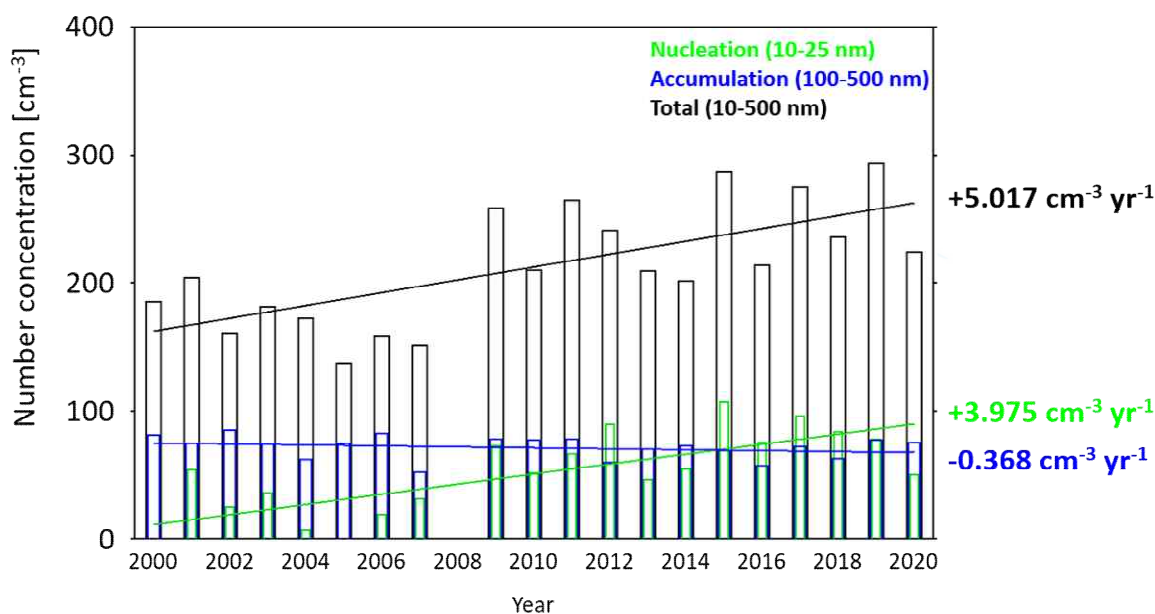


그림 3.3. Ny-Ålesund 기지(제플린 측정소)에서 2000년~2020년 기간에 DMPS를 이용하여 측정한 에어로졸 입경별 수농도 자료로부터 산정된 핵화(Nucleation) 모드(초록색), 축적(Accumulation) 모드(파란색) 및 총(Total) 수농도(검정색)의 연변화 및 증감추세.

본 연구는 Aerosol Robotic Network(AERONET)에서 수집한 지상 원격관측자료를 이용하여 에어로졸 계절 및 경년 변동 특성을 분석하였다. AERONET은 태양광도계(Cimel sun photometer)로 관측이 진행되며, 관측값은 340-1020 nm 범위의 7개 스펙트럼 채널에서 직접적인 태양 및 하늘 복사(sky radiance)로 측정하여 계

산된다. AERONET 사이트에서는 다음과 같은 관측자료들을 제공하고 있다: 에어로졸 광학두께(Aerosol Optical Depth, AOD) 스펙트럼 및 태양 광도계 측정(Sun photometer)된 크기 분포(size distribution), 단일 산란 알베도(single scattering albedo), 복사 굴절률(complex refractive index).

전 세계 에어로졸의 광학적 특성을 산출하는 네트워크인 AERONET 관측 지점 중 북위 70도 이상의 지점을 표 3.1에 정리하였다. 그림3.4는 북극 지역에 있는 AERONET 관측소 위치를 표시한 그림이다. 북위 70도 이상에 있는 관측소는 총 9 개 관측소이며, 알래스카 지역의 Barrow 관측소는 1997년부터 현재까지 관측을 수행하고 있다. 북극 지역 AERONET 관측소 중 가장 높은 고도에 있는 관측소는 캐나다 유레카에 있는 PEARL 관측소이며, 해발고도 615 m에 있다. 시베리아 지역에는 관측 지점이 적어 북위 61도에 해당하는 Yakutsk도 포함되어 있다.

표 3.1. 북극 지역 AERONET 관측 지점.

관측지점	관측기간	위도	경도
Ny-Ålesund_AWI	2017.06 - 현재	78.923° N	11.923° E
Hornsund	2004.05 - 현재	77.001° N	15.540° E
ARM_Oliktok_AK	2013.11 - 현재	70.499° N	149.880° W
Barrow	1997.07 - 현재	71.312° N	156.665° W
Yakutsk	1999.06 - 현재	61.662° N	129.367° E
Thule	2007.03 - 현재	76.516° N	68.769° W
Tiksi	2010.06 - 2019.08	71.587° N	128.921° E
Ittoqqortoormiit	2009.10 - 2019.10	70.485° N	21.951° W
Resolute_Bay	2004.07 - 2019.10	74.705° N	94.969° W
PEARL	2007.02 - 2019.10	80.054° N	86.417° W

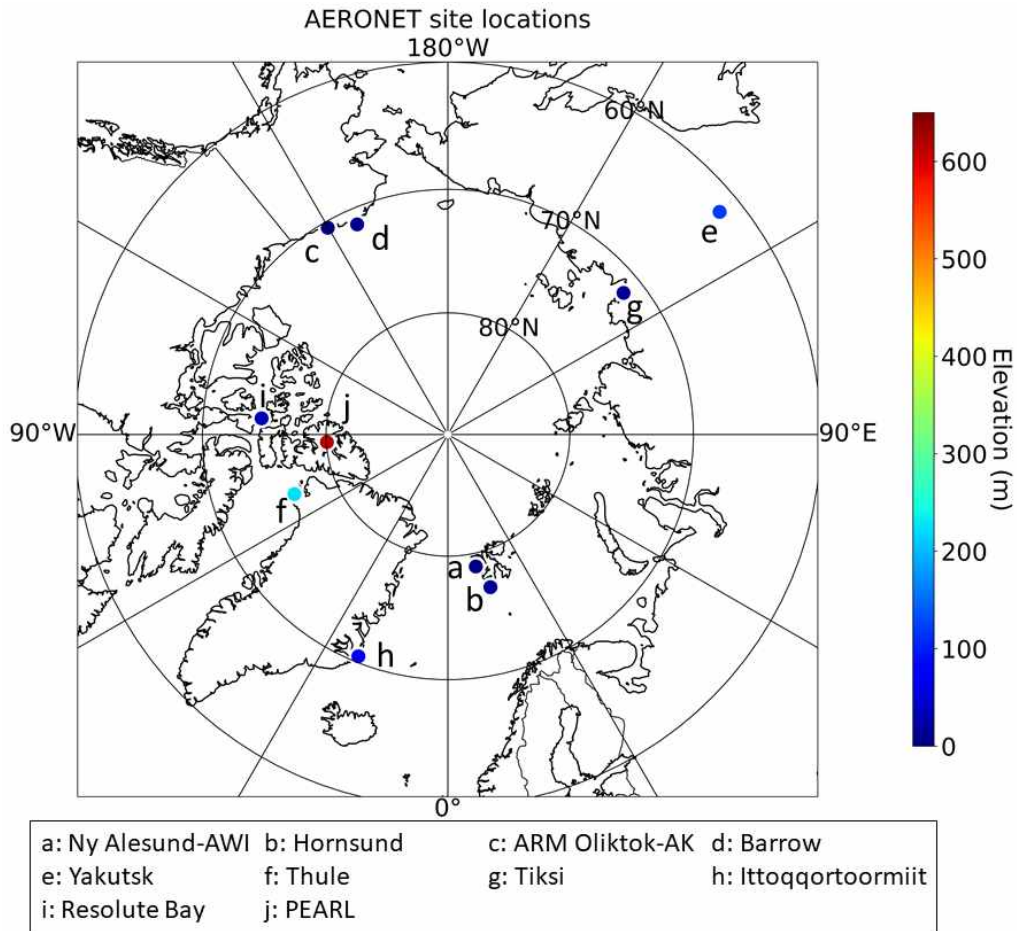


그림 3.4. 북극 지역의 AERONET 위치.

그림 3.5는 북극 지역 AERONET으로 관측된 에어로졸 광학두께의 월별 변화 양상을 나타낸 그림이다. 태양광을 이용하여 관측을 수행하는 Sun-photometer 측기의 특성으로 인해 극야기간인 겨울철에는 관측자료가 없다. 유일하게 북위 70도 이하에 있는 Yakutsk 관측소에서 1월과 11월 관측자료가 존재한다. 대부분의 북극 지역 AERONET 관측소에서 4월에 높은 에어로졸 광학두께가 관찰되었으며, 7~8월에도 높은 에어로졸 광학두께가 관찰되는 지역이 많았다. 가장 높은 평균 에어로졸 광학두께는 Yakutsk에서 0.24 ± 0.43 으로 관찰되었다. Yakutsk는 상대적으로 저위도에 있으며, 산불이 빈번하게 발생하는 시베리아에 속해있어 산불에서 발생하는 에어로졸의 영향으로 에어로졸 광학두께가 증가한 것으로 사료된다. 시베리아 산불이 주요 에어로졸 배출원이기 때문에 Yakutsk에서 에어로졸 광학두께가 큰 시간적 변동성을 보인다. PEARL 관측소는 북극 지역 AERONET 관측소 중 가장 높은 고도에 있는 관측소로, 가장 낮은 에어로졸 광학두께 평균(0.07 ± 0.05)이 관찰되었다.

그림 3.6은 북극 지역 AERONET으로 관측된 옹스트롬 지수(Angstrom

exponent)의 월별 변화 양상을 나타냈다. 옹스트롬 지수는 파장에 따른 에어로졸 광학두께의 민감도를 나타내는 값으로, 에어로졸의 크기에 대한 정보를 제공하는 변수이다. 에어로졸의 크기가 작을수록 옹스트롬 지수가 값이 크게 관찰된다. 북극 지역에서 옹스트롬 지수는 여름철에 큰 값이, 겨울철에 작게 관찰되었다. 옹스트롬 지수가 큰 월별 변동성을 보이는 Barrow, Thule, Yakutsk, Ittoqqortoormiit 관측소들은 에어로졸의 크기 조성이 월 및 계절에 따라 크게 변하는 것으로 보인다. 그림 3.7은 북극 지역 AERONET으로 관측한 에어로졸 광학두께의 일변동성을 나타낸 그림이다. 야간의 에어로졸 광학두께는 백야기간동안 관측된 자료로, 여름철 북극 지역의 에어로졸 광학두께를 대표하는 값으로 볼 수 있다. 북극 지역 관측소들 주변에는 인위적인 에어로졸 배출원이 없으므로 뚜렷한 에어로졸 광학두께 일변동성이 관찰되지 않았다. 그림 3.8은 북극 지역 AERONET으로 관측한 옹스트롬 지수의 일변동성을 나타낸 그림이다. 에어로졸 광학두께와 마찬가지로, 뚜렷한 일변동성이 관찰되지 않았다.

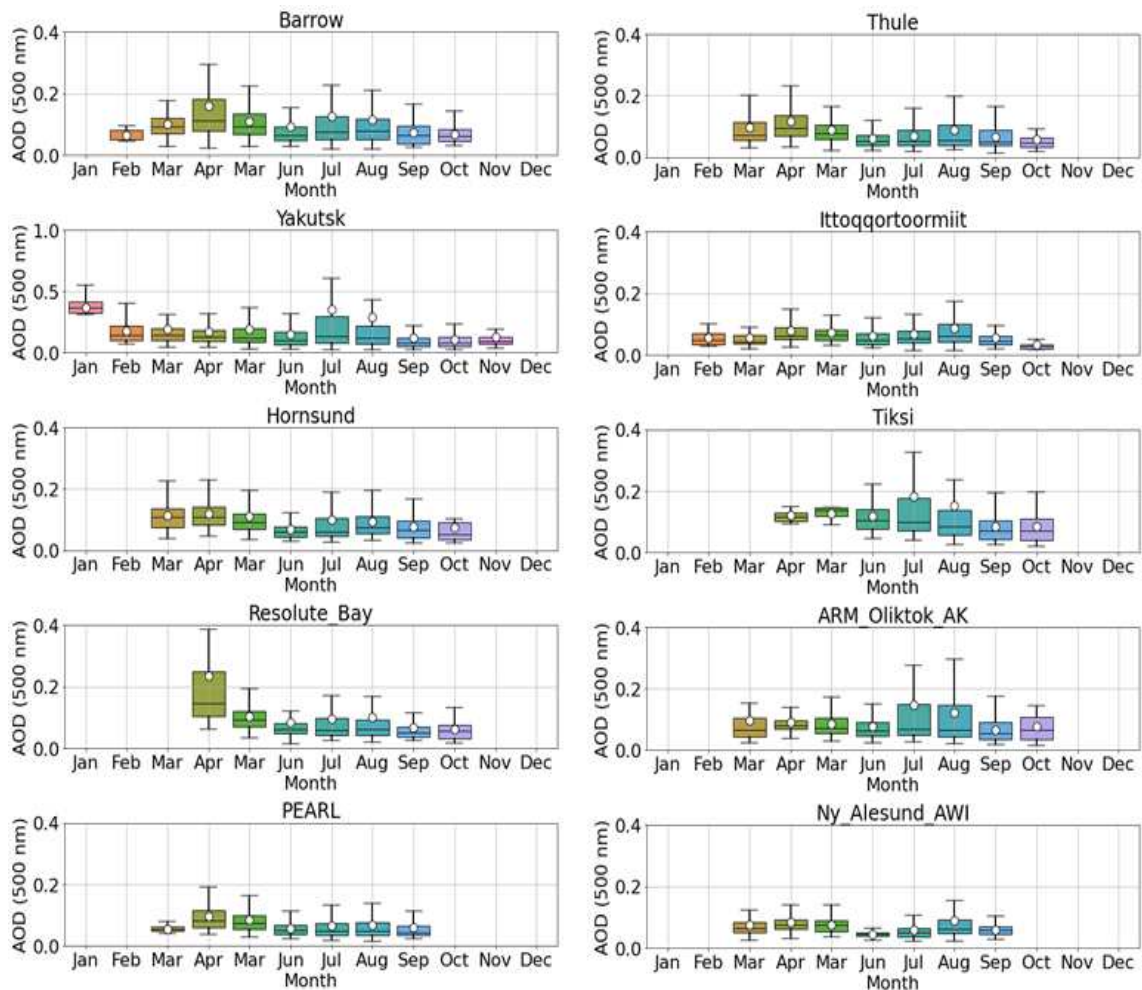


그림 3.5. 북극 지역 AERONET으로 관측된 에어로졸 광학두께(AOD)의 월변화.

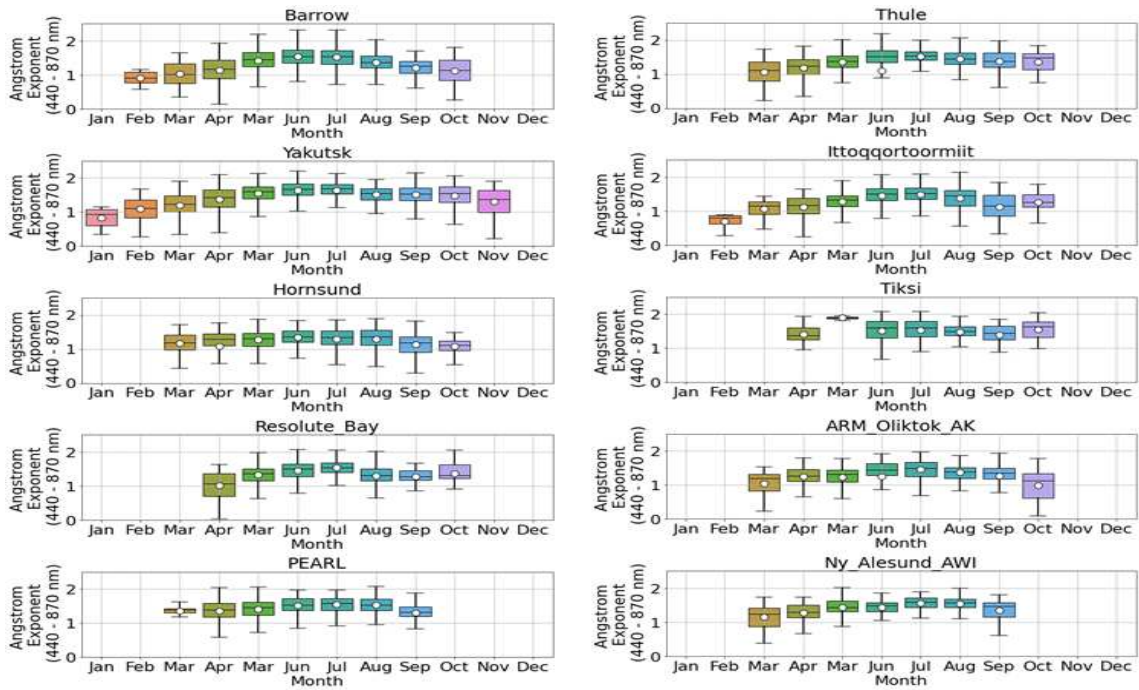


그림 3.6. 북극 지역 AERONET으로 관측된 옹스트롬 지수(Angstrom Exponent)의 월변화.

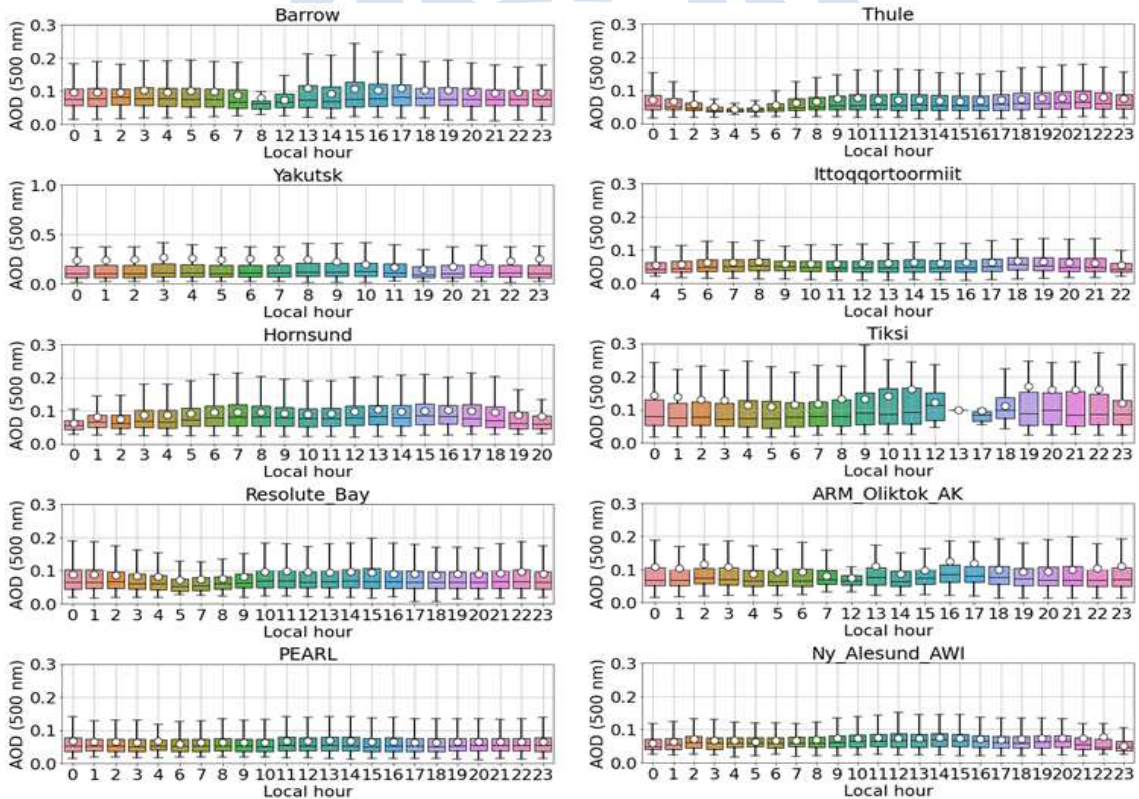


그림 3.7. 북극 지역 AERONET으로 관측한 에어로졸 광학두께(AOD)의 일 변동성.

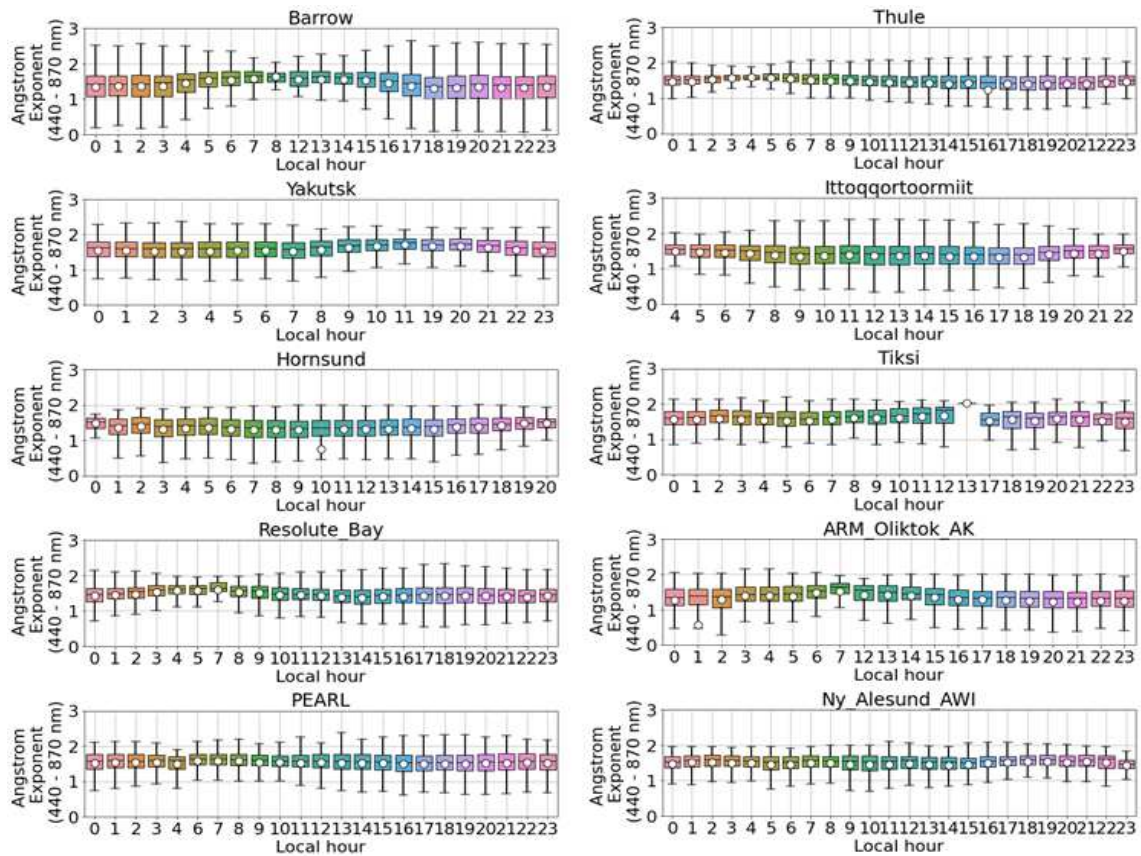


그림 3.8. 북극 지역 AERONET으로 관측한 옹스트롬 지수의 일 변동성.

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) 위성에서 관측된 에어로졸 광학두께 자료를 활용하여 북극 지역의 에어로졸 분포 특성을 분석하였다. MODIS의 에어로졸 광학두께는 최신 collection 6.1을 사용하였으며, Terra와 Aqua 위성에서 Dark Target과 Deep Blue 산출에 기반을 둔 관측값이다(Levy et al., 2013). 550 nm 파장에서 관측되는 에어로졸 광학두께는 1°x1° 위·경도 격자를 가지며 6시간마다 생산된다.

그림 3.9는 2002년부터 2022년까지의 MODIS에서 산출된 북극 지역 에어로졸 광학두께 공간분포를 나타낸 것이다. 북극 중심지역과 그린란드 지역은 상시 해빙과 눈으로 덮여 있어서 에어로졸 광학두께 산출이 되지 않았다. 북위 60° 이상의 북극 지역 에어로졸 광학두께는 평균적으로 0.1에서 0.2 사이의 값을 보이는 것을 알 수 있었으며 중위도 지역보다 상대적으로 낮은 값을 보였다. 동경 약 90°에서 180°, 북위 약 80°의 북극 중심지역에서는 에어로졸 광학두께가 0.3 이상의 매우 높은 값을 보이는데, 이는 해빙의 분포에 따른 해수면 알베도의 오차에 의한 것으로 생각된다.

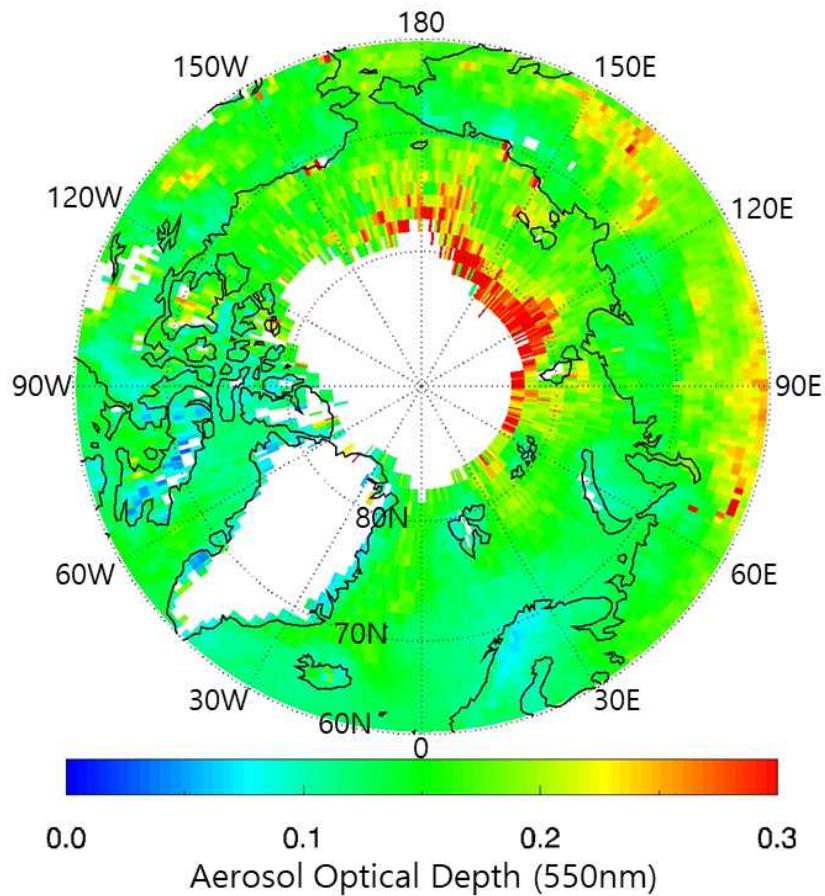


그림 3.9. 2002년부터 2022년까지 MODIS로 관측된 북극 지역의 평균 에어로졸 광학두께.

북극 지역 에어로졸 광학두께의 계절 변화를 살펴보기 위해 MODIS로 산출된 에어로졸 광학두께의 계절 평균 공간분포를 그림 3.10에 나타내었다. MODIS는 태양 빛이 지표면이나 구름에 반사되어 위성에 도달하는 복사에너지를 관측하기 때문에 야간에는 자료를 생산할 수 없으며, 따라서 태양 에너지가 유입되지 않는 북극의 겨울철에도 관측할 수 없다. 또한, 해빙이나 눈에 의해 지표면 반사도가 높은 경우에도 산출되지 않는 지역이 다수 존재한다. 이러한 영향으로 겨울철에는 북극 지역의 에어로졸 광학두께가 거의 산출되지 않는 것을 확인할 수 있다. 겨울철과 가을철의 자료가 부족하여 계절 변화를 온전히 파악하기 어렵다는 한계가 있으나 산출된 자료를 통해 북극 지역 에어로졸 광학두께는 봄철과 여름철이 상대적으로 높고 가을과 겨울에 낮은 경향을 보였다. 특히, 여름 평균 에어로졸 광학두께(그림 3.10b)와 전 기간 평균(그림 3.9)이 매우 유사하게 나타나는데, 이는 여름철에 관측 빈도

가 다른 계절에 비해 매우 높기 때문으로 판단된다. 따라서 MODIS로 관측된 에어로졸 광학두께를 이용하여 북극 지역 에어로졸의 연평균 특성을 분석할 때에는 계절에 따른 관측 빈도 차이를 고려해야 할 것이다.

해당 기간 한반도 평균 에어로졸 광학두께(0.4)와 비교해보았을 때 북극의 대기는 일반적으로 중위도보다 더 맑게 나타나고 있으며, 봄철에는 이른바 북극 연무(Arctic haze) 현상으로 인해 상대적으로 높은 에어로졸 광학적 두께가 관측되었다. 이 에어로졸은 주로 황산염(sulfate)과 그을음(soot)으로 구성되며, 이는 시간이 지나며 노화됨에 따라 외부에서 내부 혼합물(internal mixture)로 변환된다(Hara et al., 2003). 그 밖에도 Warneke et al. (2009)의 경우 바이오매스 연소(biomass)가 추가로 에어로졸의 중요한 공급원이 될 수 있으며 잠재적으로 북극에 상당한 오염을 가져온다고 밝혀졌다. 여름철 비교적 낮은 에어로졸 광학두께는 북극해의 식물성 플랑크톤 번성에서 방출되는 에어로졸이 주를 이루고 있으며, 산란 효율이 매우 낮아 광학두께 값이 적게 관측된다(Tunved et al., 2013).



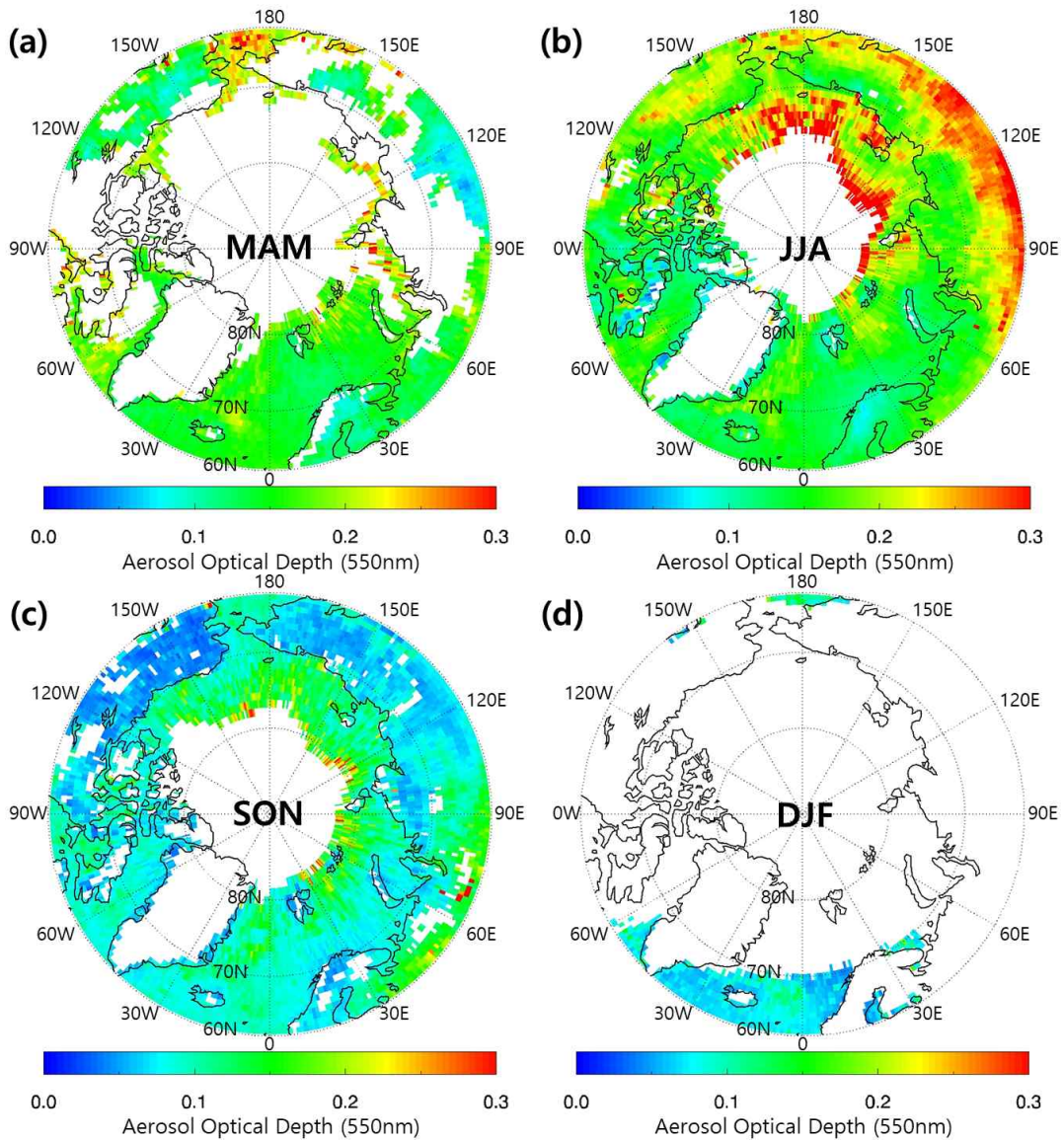


그림 3.10. 2002년부터 2022년까지 MODIS로 관측된 북극 지역의 계절 평균 에어로졸 광학두께.

북극 전 지역의 에어로졸 장기변동 분석을 위해 MODIS에서 산출된 에어로졸 광학두께를 2002년 2월부터 2022년 6월까지 북위 60° 이상의 지역에 대해 분석하였다. 에어로졸 광학두께는 연평균 0.13이며, T-test를 통해 에어로졸 광학두께의 경년변화를 분석한 결과 약 20년간 크게 변화가 없는 것으로 관측되었다(그림 3.11). 경년 변동성이 뚜렷하게 나타나지 않았으나 일부 에어로졸이 유입되는 봄철에 고농도 사례가 기록되며, 북극의 에어로졸 농도는 국지적으로는 바다에서 자연적으로 배출되는 해염(sea salt), 생물 기원, 그리고 바람에 날리는 표층에 쌓인 눈에 기인하는 것으로 밝혀진 바 있다. 그러나 주로 아시아, 북아메리카 등과 같은 중위도에

서의 산불에서 나오는 바이오매스 에어로졸이나 도심 및 산업 지역에서 발생한 에어로졸 또는 먼지(dust)의 유입으로 인한 연무(haze) 현상이 관측되었다. 특히 북극 지역에서 봄철에 관측되는 고농도 에어로졸 사례의 경우 중국 북서부에서 태평양으로 먼지(dust)가 장거리 운송되는 경우와 북미에서 유입되는 두 가지 경우로 잘 알려져 있다(Stohl, 2006; Wang et al., 2010; Schmale et al., 2021).

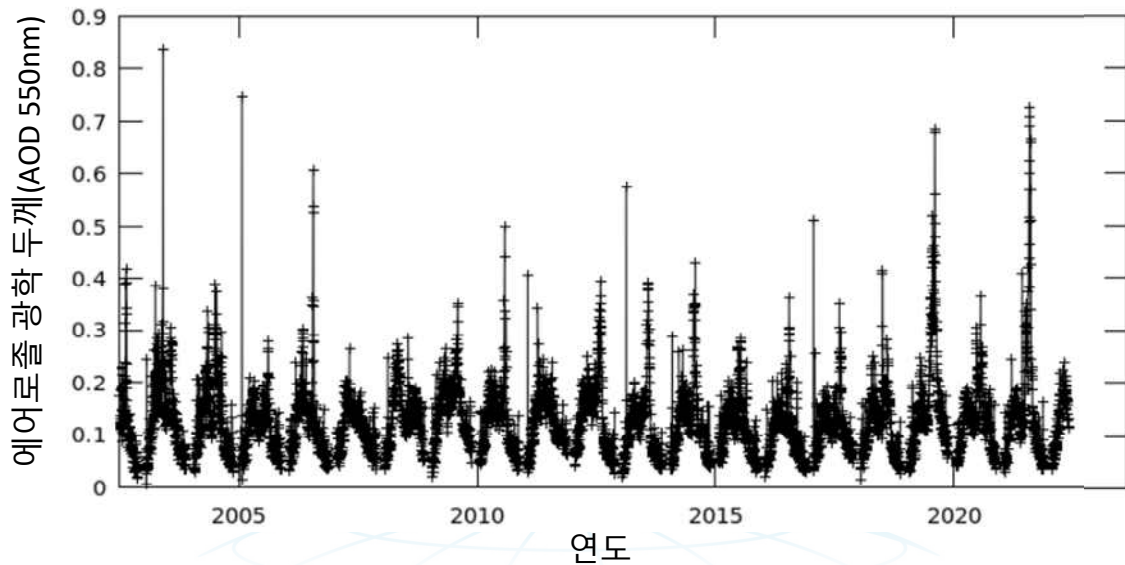


그림 3.11. 북극 전 지역 평균한 MODIS 위성 에어로졸 광학적 두께 월변화.

해빙이나 눈으로 덮인 해상이나 지표면에서의 관측할 수 없는 MODIS의 한계를 보완하고자 본 연구에서는 Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation(CALIPSO) 위성 관측자료를 추가로 활용하였다. CALIPSO 위성은 2006년 4월부터 관측이 시작되었으며 98.2°의 궤도 경사각을 가지고 있어 위도 82°까지 두 반구의 극지방에 대한 광범위한 일일 측정 범위를 제공한다. Aqua 위성에 탑재된 MODIS 와 같은 궤도를 돌며 관측하지만, 진행 방향의 수직인 수평 방향으로 약 2330 km(swath width)를 훑고 지나가는 MODIS 와 달리 위성의 연직 아래 방향으로만 관측하기 때문에 수평 관측 범위는 매우 좁다. 이러한 이유로 MODIS는 하루나 이틀이면 전 지구의 모든 지역을 관측하지만, CALIPSO는 관측하지 못하는 지역이 발생한다. 그러나 극궤도 위성의 특성상, 북극 지역은 저위도 지역보다 촘촘히 관측 가능하여 공간분포 분석에 문제가 없을 것으로 판단되었다. CALIPSO는 1064 nm 및 532 nm의 파장에서 후방 산란을 측정하는 라이다로, 레이저 빔의 편광 면에 평행하고 수직인 직교 편광으로 분리된 523 nm 신호를 사용하

고 있다. CALIPSO의 기본 궤도 성능 및 보정에 대한 세부 사항은 Hunt et al.(2009)와 Powell et al.(2009)에 자세히 설명되어 있다.

본 연구에 사용된 자료 기간은 2007년 1월부터 2020년 12월까지이며 계절 평균을 이용하여 에어로졸 광학두께 및 소산계수 연직분포 분석을 수행하였다. 에어로졸의 광학 특성을 관측하는 일반적인 수동(passive) 센서와 달리 CALIPSO는 능동(active) 센서이기 때문에 야간 및 북극 지역 겨울철에도 에어로졸 관측이 가능한 장점이 있다. 또한, 수동 센서는 구름이 있을 때 에어로졸 원격관측이 거의 불가능하지만 능동 센서는 매우 두꺼운 구름이 아니라면 관측할 수 있다. 그러나 구름이 분포하면 그 정확도가 떨어지고, 특히 구름 하부에 있는 에어로졸 관측에 어려움이 있어 본 연구에서는 구름이 관측된 자료는 분석에서 제외하였다.

CALIPSO 관측으로 산출된 북극 지역 에어로졸 광학두께의 공간분포를 그림 3.12에 나타내었다. 북극 지역의 에어로졸 광학두께는 북대서양 지역에서 0.1 이상의 값을 보였으나 그 외의 대부분 지역에서는 0.05 이하의 낮은 값을 보였다. 앞의 MODIS 결과(그림 3.9)와 비교하면 매우 낮은 값을 보였는데, MODIS는 에어로졸 광학두께가 높은 계절인 여름철에 관측이 집중되어 있기 때문으로 추측해 볼 수 있다.

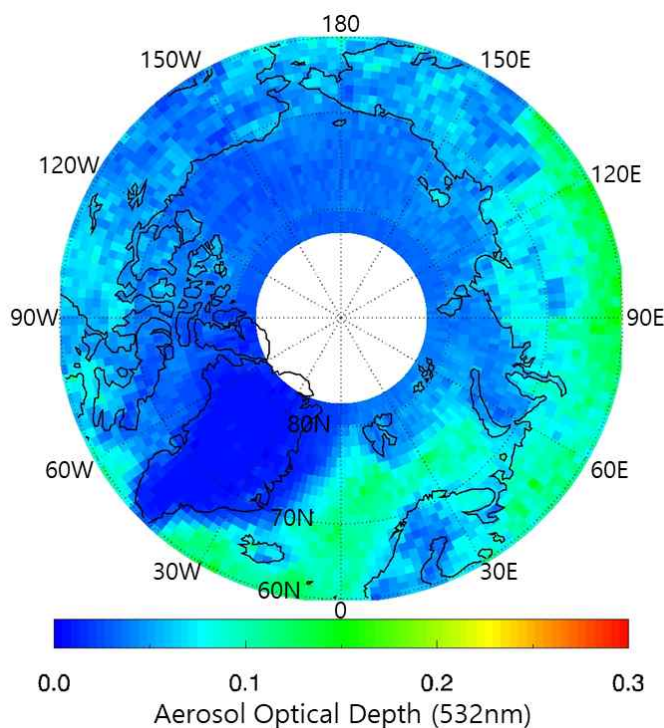


그림 3.12. 2007년부터 2020년까지 CALIPSO로 관측된 북극 지역의 평균 에어로졸 광학두께.

계절 평균 CALIPSO 에어로졸 광학두께는 그림 3.13에 나타내었다. 연평균 결과와 마찬가지로 모든 계절의 극지역 평균 에어로졸 광학두께는 MODIS의 결과보다 상대적으로 낮은 값을 보였다. 특히, 여름철의 차이가 매우 두드러졌는데, MODIS의 관측 결과는 일부 계절의 관측 부족을 고려해도 여름철에 가장 높은 값을 보이지만, CALIOP 관측 결과는 특히 북극 중심에 가까운 부근에서 여름철에 가장 낮은 값을 보여 매우 상반되는 경향이 나타났다.

MODIS와 CALIOP의 북극 지역 에어로졸 광학두께 차이는 두 센서의 특성, 관측 조건, 환경 등의 원인으로 추측해 볼 수 있다. 먼저, MODIS는 지표면 알베도가 에어로졸 광학두께 산출에 매우 중요한 입력자료로 사용되기 때문에 알베도가 과소모의되면 에어로졸 광학두께는 과대모의 될 가능성이 있다. 특히, 북극 지역은 해빙이 많이 존재하기 때문에 이러한 문제가 저위도 지역에 비해 큰 영향을 미칠 수 있다. 해빙이 없는 어두운 해수면을 상정하고 에어로졸 광학두께를 산출하였으나 작은 해빙이 부분적으로 존재하여 알베도를 증가시킬 수 있다. 또한, 하층운과 같은 일부 구름의 영향으로 에어로졸 광학두께가 실제보다 크게 산출될 가능성이 있다. 북극은 저위도 지역보다 태양의 천정각이 크기 때문에 이러한 효과가 극대화되어 산출되는 에어로졸 광학두께에 오차가 크게 나타날 우려가 있다.

CALIPSO는 에어로졸 광학두께 산출에 지표면 알베도나 태양의 천정각 등에 의한 영향이 거의 없거나 상대적으로 적다는 장점이 있다. 그러나 CALIPSO는 라이더 관측을 통해 에어로졸의 존재 여부를 먼저 결정하고 에어로졸이 있는 층만 에어로졸 광학두께를 산출하기 때문에 과소모의 될 수 있다. 대기 전 구간의 에어로졸에 의한 빛의 감쇄를 측정하는 MODIS와는 달리, CALIPSO는 에어로졸이 존재한다고 판단되는 층에서의 에어로졸 광학두께만 산출하고 그 외의 모든 대기층에서는 에어로졸이 전혀 없다고 가정하는 것이다. 따라서 약한 에어로졸층이 존재하더라도 라이더의 신호가 약하면 에어로졸이 없는 것으로 판단할 수 있다. 북극 지역은 주변에 인위적인 배출원이 없어 에어로졸 광학두께가 저위도 지역보다 평균적으로 낮아서 이러한 원인에 의한 오차는 극대화될 수 있다. 특히, 태양 빛에 의한 잡음(noise)이 영향을 미치는 낮에는 약한 에어로졸층의 신호보다 잡음이 크게 나타나 관측되지 않을 수 있다. 그림 3.14는 그림 3.13의 결과를 밤과 낮으로 구분하여 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 낮에 비해 밤의 에어로졸 광학두께가 뚜렷하게 높은 값을 보이는 것을 알 수 있다. 이는 태양 빛에 의한 잡음이 없는 밤에 더 많은 약한 에어로졸층을 구분해 낼 수 있기 때문이다.

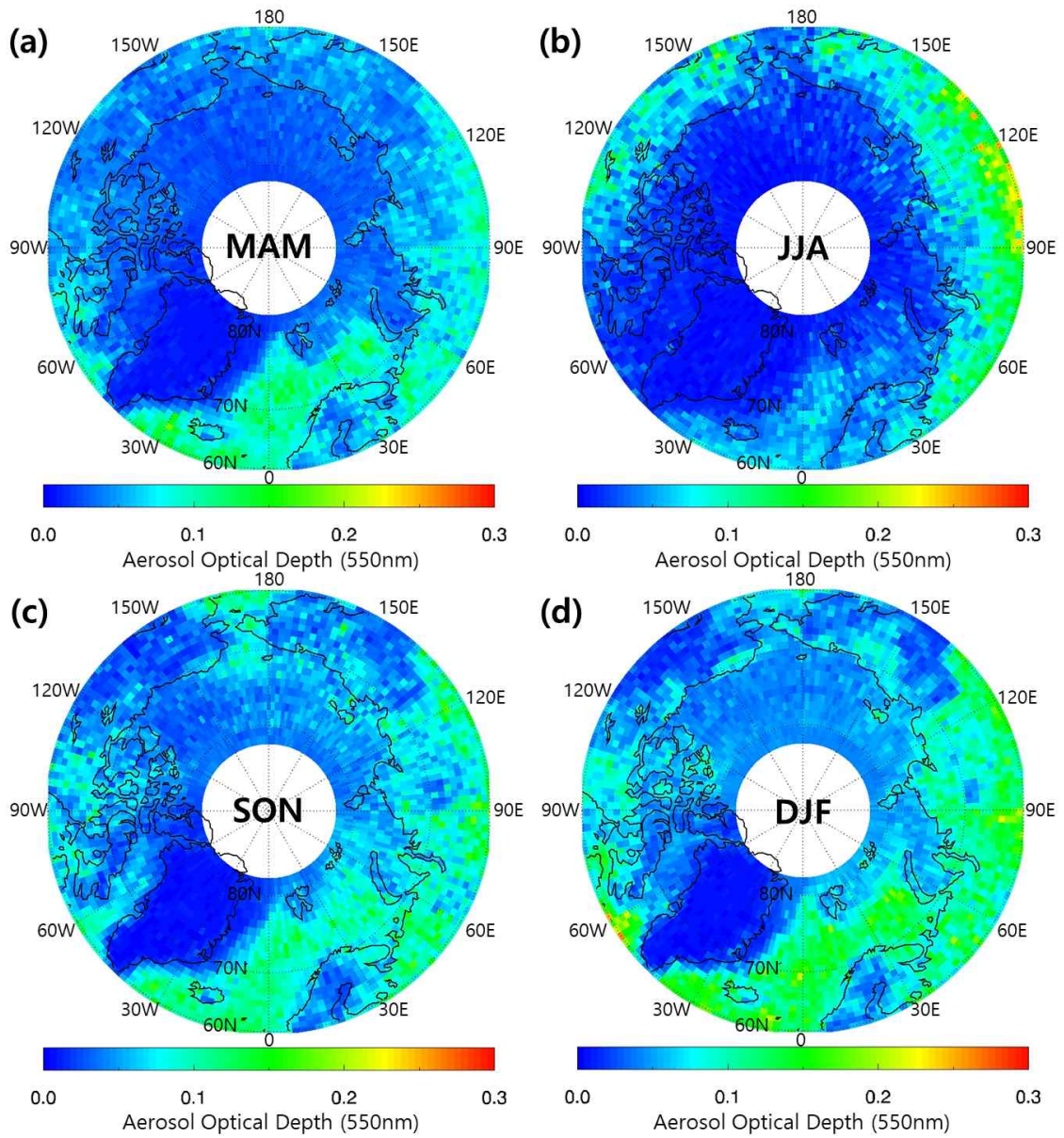


그림 3.13. 2007년부터 2020년까지 CALIPSO로 관측된 북극 지역의 계절 평균 에어로졸 광학두께.

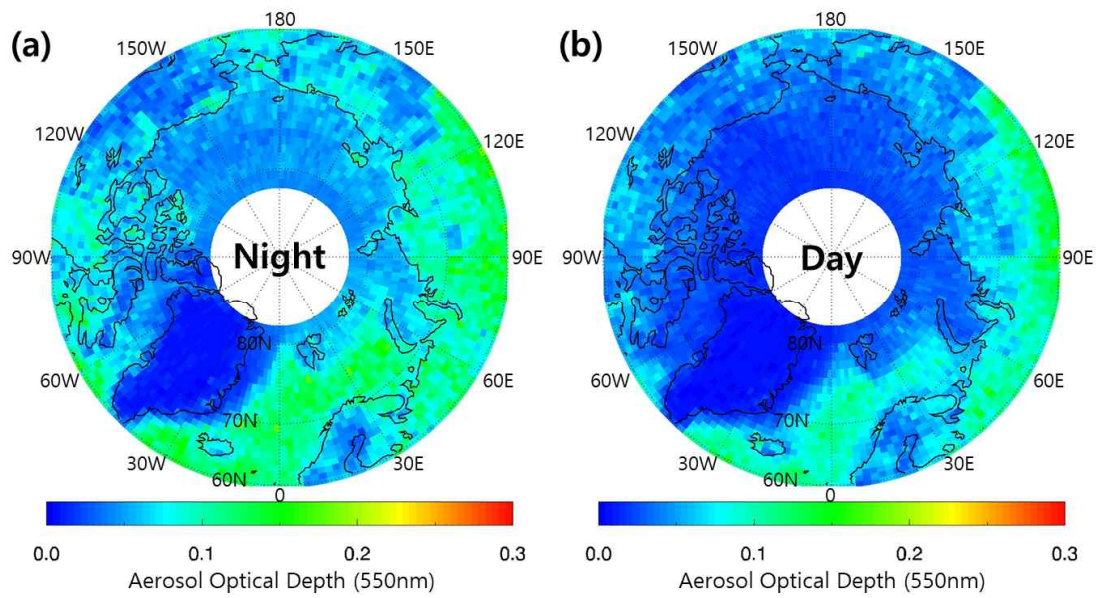


그림 3.14. 2007년부터 2020년까지 CALIPSO로 관측된 북극 지역의 평균 에어로졸 광학두께. (a)밤과 (b)낮 시간의 평균.

여름철에는 태양광의 잡음(noise)으로 인해 에어로졸 광학두께의 관측에 어려움이 있어 실제 값보다 낮게 관측될 가능성이 있으므로, 이를 지상 관측자료와 비교하기 위해 Ny-Ålesund 관측소에 설치되어있는 AERONET 지상 관측 에어로졸 광학두께 값과 비교하였다(그림 3.15). 평균적으로 여름철에 가장 낮은 에어로졸 광학두께(평균 0.04; 7월 최저 0.02)를 보여 위성관측(평균 0.03; 6월 최저 0.01)과 비슷한 경향이 관찰되었다. 다만 겨울철에는 태양 복사 에너지가 유입되지 않아 지상에서는 에어로졸 광학두께를 산출할 수 없어 비교할 수 없었다.

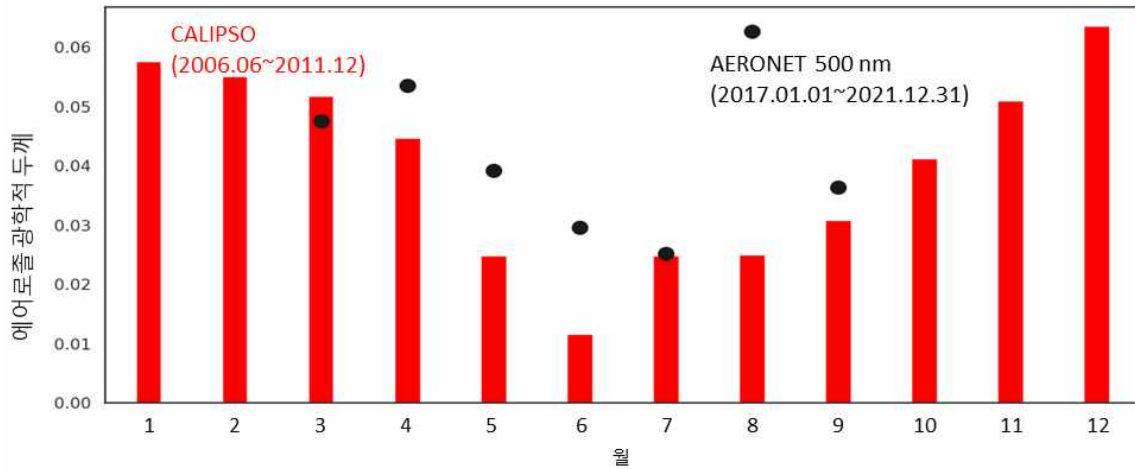


그림 3.15. 북극 전 지역 평균적인 CALIPSO 위성(빨강)과 Ny-Ålesund 지역의 AERONET 지상 관측(검정 점) 에어로졸 광학두께 월변화.

북극 에어로졸 연직 분포 특성을 파악하기 위해 CALIPSO로부터 에어로졸 소산계수의 연직 분포 산출하였다. CALIPSO 관측자료로부터 2007 - 2020년의 북극 지역의 에어로졸 소산계수 연직 분포를 분석을 진행하였다(그림 3.16). 북극 전 지역(북위 60° 이상)에서 관측된 532 nm에서의 에어로졸 소산계수는 겨울철에는 약 100 m 고도에서 최대 0.055 km^{-1} , 여름철에는 약 500 m 고도에서 최대 0.018 km^{-1} 를 보여 계절에 따른 차이가 뚜렷하게 나타났다. 이러한 효과는 계절에 따른 대기 경계층 및 대기의 연직 운동 차이에 기인한 것으로 보인다. 겨울철에는 태양 에너지가 거의 도달하지 않고 지표면 기온이 낮아 대기가 상대적으로 안정되어 지표면 부근에 에어로졸이 집중되어 나타나지만, 여름철에는 대기 경계층이 높고 태양 복사에 의해 연직 운동이 상대적으로 활발하여 에어로졸이 더 높은 고도까지 분포할 수 있는 것으로 보인다. CALIPSO에서 산출된 야간의 에어로졸 소산계수는 주간 에어로졸 소산계수에 비해 최소 60%에서 최대 100% 이상 더 높은 값을 보였다. 이는 지상에서 관측된 에어로졸 광학적 특성의 계절 변동성(겨울철과 봄철에 높고, 여름철에 낮음)과도 일관된 결과를 보여준다. 또한, 앞에서 언급한 것처럼 CALIPSO에서 사용하는 레이저는 532 nm로 주간에는 태양광 잡음에 의해 에어로졸 소산계수가 작은 에어로졸층은 관측에 어려움이 있어서 이러한 요인도 주야간의 에어로졸 소산계수 차이를 유발할 수 있다.

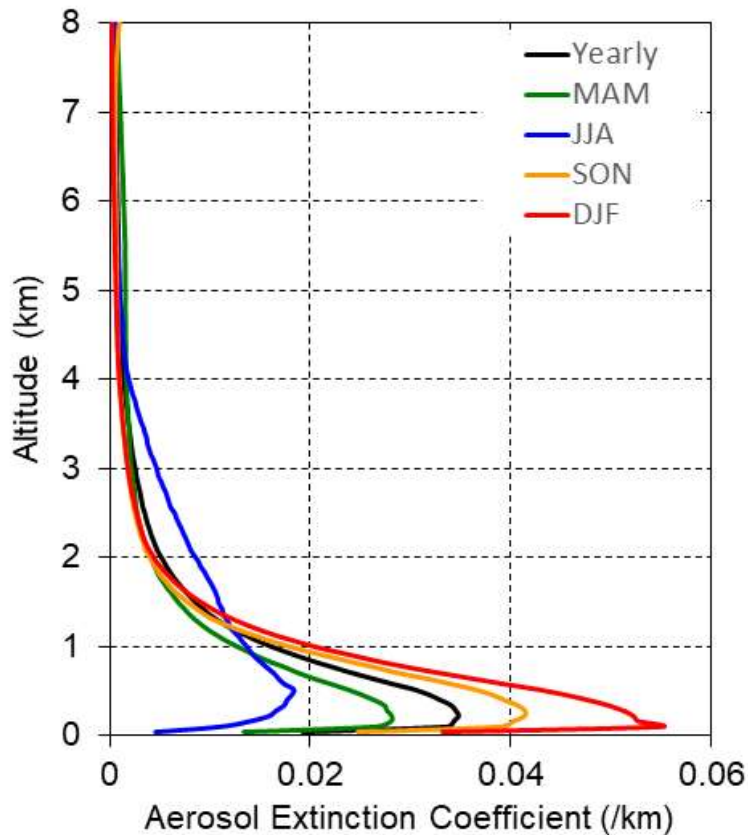


그림 3.16. 북극 전 지역 평균적인 CALIPSO 에어로졸 소산계수의 연평균 및 계절 평균 연직 분포.

2. 아라온호에서 관측된 에어로졸의 특성 분석

북극 지역의 에어로졸 물리적 특성을 조사하기 위해 2021년 7월부터 9월까지 아라온호에서 관측된 Condensation Particle Counters(CPC) 수농도 자료를 분석하였다. 7월 1일 부산에서 출발하여 태평양을 지나는 데 총 13일이 걸렸으며(그림 3.17), 관측된 직경 2.5 nm 이상 10 nm 이하, 10 nm 이상의 에어로졸 총수농도는 각각 약 1569 cm^{-3} 와 1333 cm^{-3} 로 두 입경 구간의 총수농도 차이가 235 cm^{-3} 로 나타났다. 7월 13일부터 24일 알래스카를 지나 북극으로 올라가며 두 입경 구간(2.5 nm 이상 10 nm 이하, 10 nm 이상)에서의 에어로졸 총수농도 차이는 1715 cm^{-3} 이었으며 북극 향해 기간(7월 24일 ~ 9월 10일)에는 약 9438 cm^{-3} 으로 그 차이가 제일 크게 나타난다(그림 3.18). 10 nm 이상의 에어로졸 수농도의 경우 평균적으로 약 1845 cm^{-3} 으로 관측되었으나 2.5 nm 이상 10 nm 이하의 에어로졸 수농도의 경우에는 관측지역 및 광화학반응에 따라 $1569 - 14638 \text{ cm}^{-3}$ 까지 차이가 났다. 이는 북극에서 여름철 광화학반응 따라서 핵화 입자(freshly nucleated particle)가 많이

생성된 것으로 보이며, 응결(condensation)과 응고(coagulation) 작용이 적게 발생하면 작은 크기의 에어로졸이 오랫동안 유지돼 10 nm 크기의 에어로졸에 비해 2.5 nm 에서 10 nm 이하 크기의 작은 입자의 에어로졸이 더 많이 관측된 것으로 추정된다.

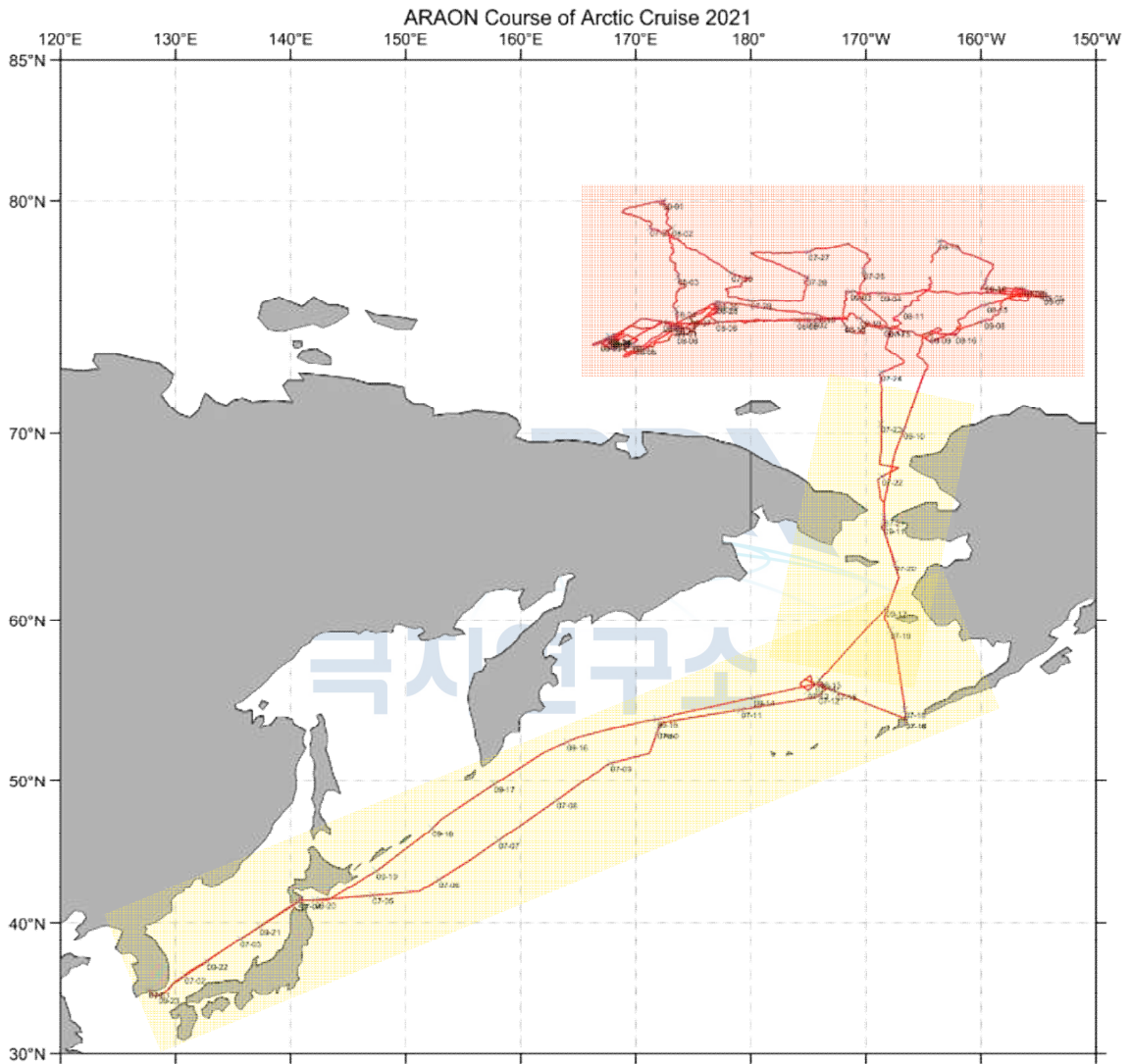


그림 3.17. 아라온호 이동 경로.

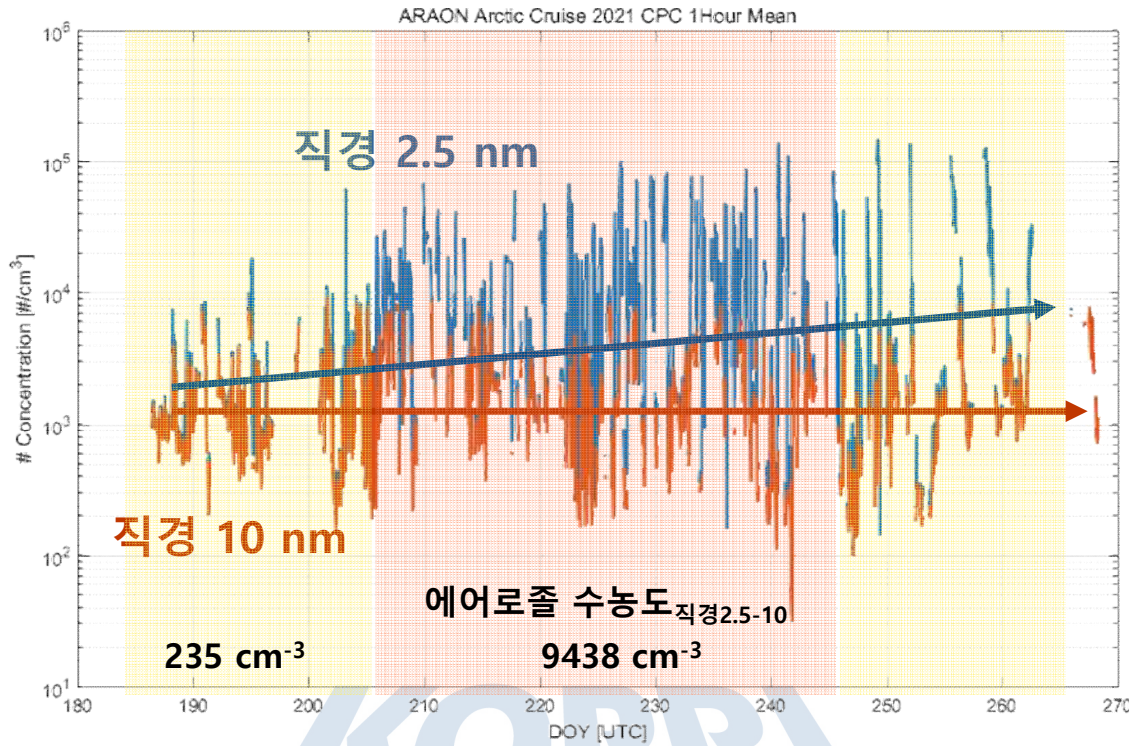


그림 3.18. 아라온호에서 관측된 에어로졸 수농도(cm^{-3}).

3. 북극 지역 에어로졸 주요 발생원 및 중위도에서 장거리 수송 영향 분석

북극 에어로졸의 직접 복사강제력은 에어로졸, 수송, 퇴적의 기원과 밀접한 관련이 있으며, 에어로졸이 북극으로 장기간 이동하는 동안 태양 복사는 에어로졸의 일부 요소에 흡수되거나 산란하여 표면에 도달하는 태양 복사의 양이 감소할 수 있다 (Sand et al., 2013; Breider et al., 2017; Gagné et al., 2017). 본 연구는 아시아, 북미, 러시아 등 중위도 지역에서 북극 지역으로 장기간 수송되어 유입되는 경로를 파악하고 각 경로에서 이송되어온 에어로졸의 양에 따른 기여도를 산정하고자 한다. 그림 3.19a는 2010년 3월 19일에 동아시아에서 발생한 대규모 먼지 폭풍의 이동 경로를 NOAA HYSPLIT MODEL Forward trajectory로 계산한 결과이며, 41 - 43°N 와 106 - 108°E 지역을 중심으로 500 m 높이의 공기괴를 240시간 추적하였다. 공기괴 이동의 경로는 (A) 발생지로부터 시작되어 한국, 일본, 러시아를 지나 북극으로 유입 또는 (B) 한반도와 북극해 구간 해상을 지나 북극으로 유입되는 경로를 보인다. 그림 3.19b는 2017년 3월 22일의 대규모 먼지 폭풍의 공기괴 이동 경로로 (A) 경로를 통해 북극 지역으로 유입되는 것으로 보인다. (A) 경로의 경우 지

리적으로 이동하는 범위가 넓고 운송 기간이 비교적 길며(7 - 10일) 주로 해양을 지나가는 특징이 있다. 이는 먼지 발생원 지역에서 높은 상승 고도(1500 m 이상)으로 입자가 더 먼 지역으로 이동한 것으로 추정된다. (B) 경로의 경우 육지를 지나쳐 이동하며 약 4~8일의 기간으로 상대적으로 짧게 이동하며, 이것은 봄에 일본 북부에 있는 저기압 시스템으로 기단이 북쪽으로 편향되도록 유도되었기 때문이다 (Zhao et al., 2022).

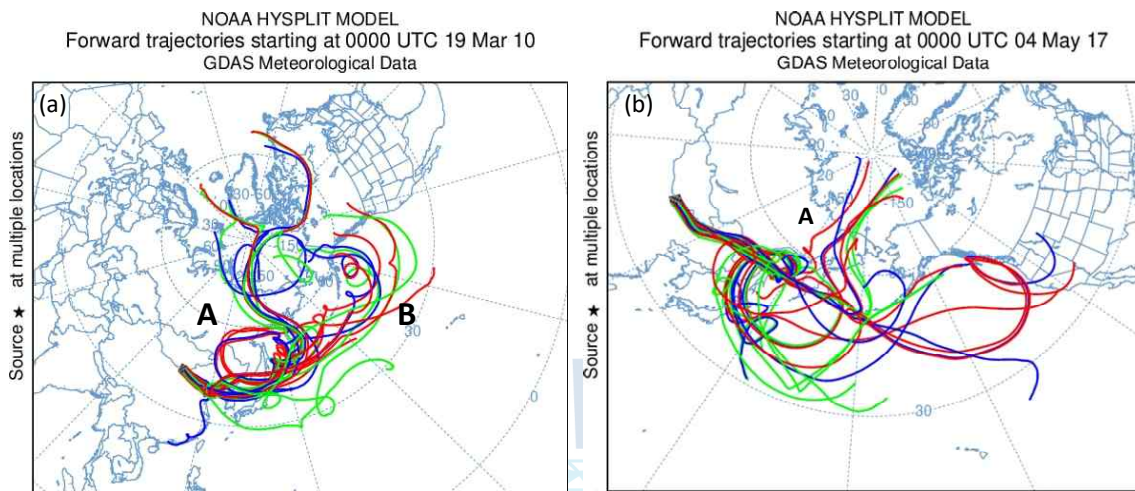


그림 3.19. (a) 2010년 3월 19일 (b) 2017년 3월 22일에 동아시아 고비사막에서 발생한 대규모 먼지 폭풍의 공기과 이동 경로.

그림 3.20은 2010년 10월부터 2022년 10월까지 알래스카 베로우에서 네펠로미터(Nephelometer)로 관측한 550 nm 에어로졸 산란계수를 나타냈다. 그림에서 나타난 빨간 점이 일변화에서 보이는 상위 70% 이상인 고농도 사례이며, 겨울 동안 약 50%로 가장 높았고, 다음으로 봄철(27%)과 여름철(12%) 순서대로 비율이 높았으며 가을철에 약 10%로 가장 낮았다(그림 3.21).

역제적 모델(HYSPLIT)을 이용하여 베로우 관측 지점(71.19 °N, 156.36 °W)에서 계산된 유입경로와 농도 자료를 이용한 중장거리 이동에 의한 잠재적 오염원 추정(PSCF; Potential Source Contribution Function) 분석 결과, 계절마다 다른 잠재적 오염원 분포가 나타났다(그림 3.22). PSCF 모델은 수용점에서의 분석자료와 역제적 자료를 결합하여 수용 점에 영향을 주는 배출원에 대한 위치 정보를 알려주는 혼합 모형으로 대기 오염물질의 발생원 추정 등에 많이 사용되는 모델이다. 겨울철에는 북위 50도 이상의 러시아 및 동유럽 지역과 베로우 근처 북극해 지역이 가장 강한 잠재 오염원(0.6 - 0.9)으로 계산되었으며, 봄철에는 북위 60도 이상의 시베리아가 가장 높은 확률(0.6 - 0.9)로 잠재적 오염원 지역으로 추정된다. 여름철에는 베링해

부근에서 상대적으로 높은 기여도(0.6 - 0.7)가 나타났으며, 가을철에는 뚜렷한 잠재 오염원이 보이지 않았다(0.4 이하).

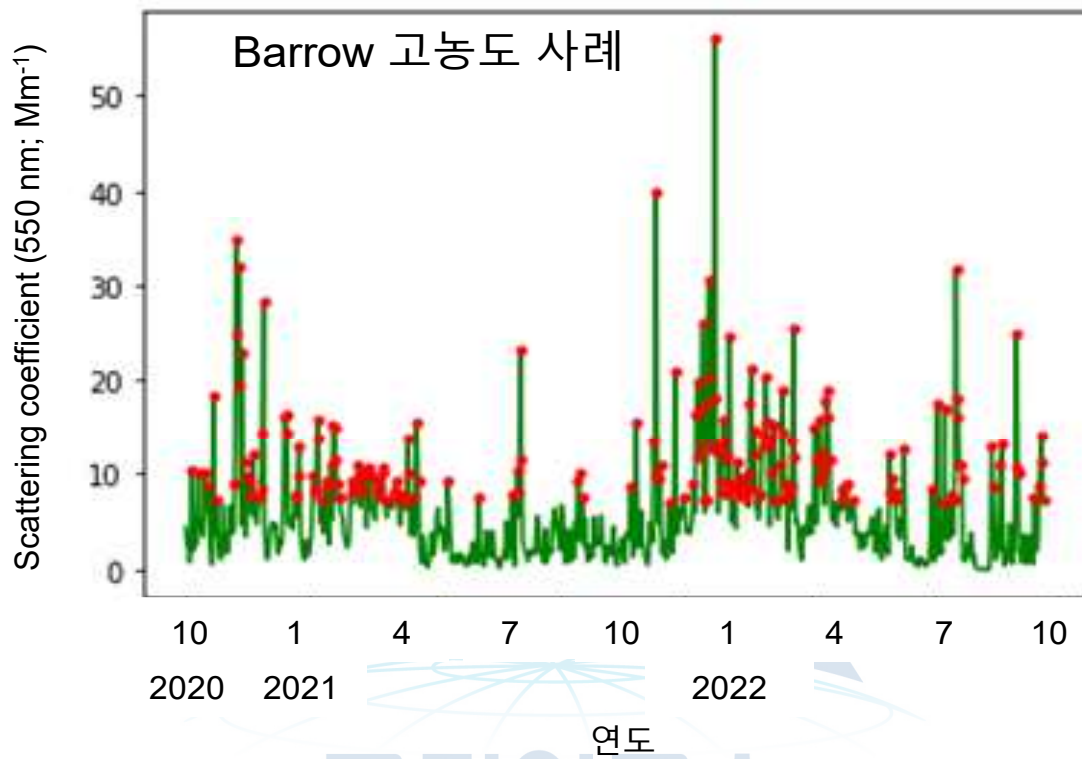
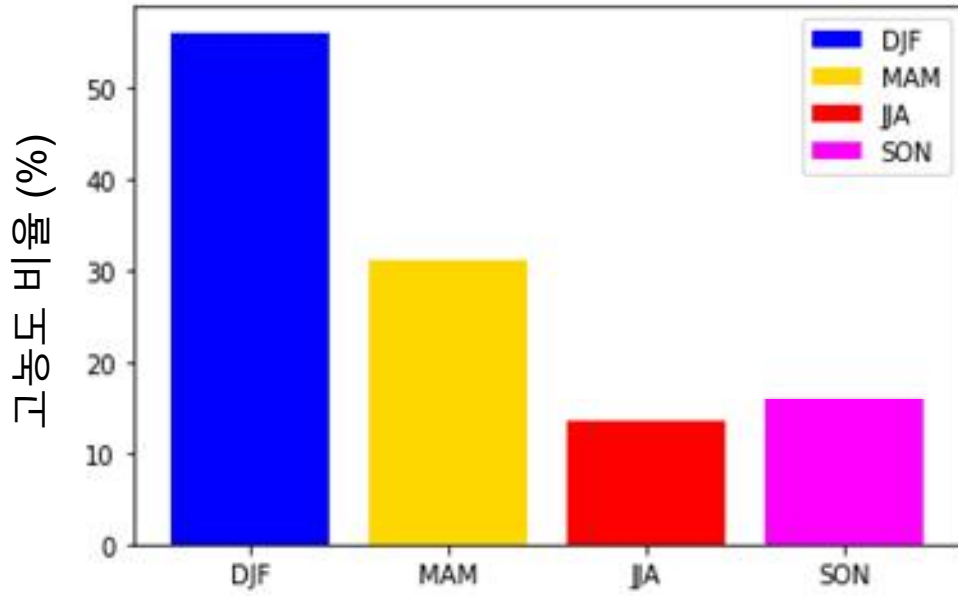


그림 3.20. 알래스카 베로우에서 네펠로미터(Nephelometer)로 관측한 550 nm 에어로졸 산란계수.

(a) 각 계절별 상위 70% 고농도 비율



(b) 상위 70% 고농도의 계절별 비율

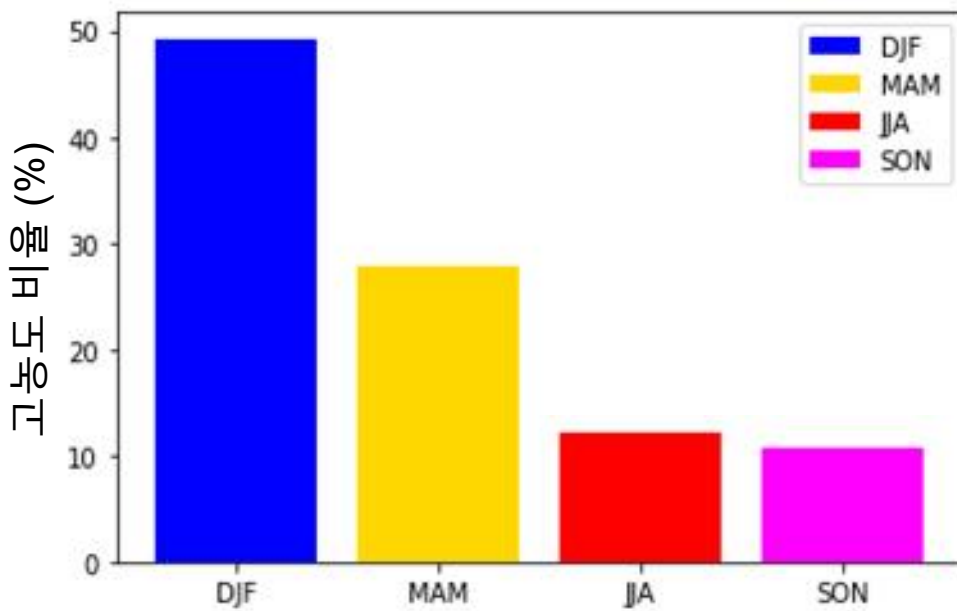


그림 3.21. Barrow 지역에 관측된 (a) 각 계절별 상위 70% 고농도 비율, (b) 상위 70% 고농도의 계절별 비율.

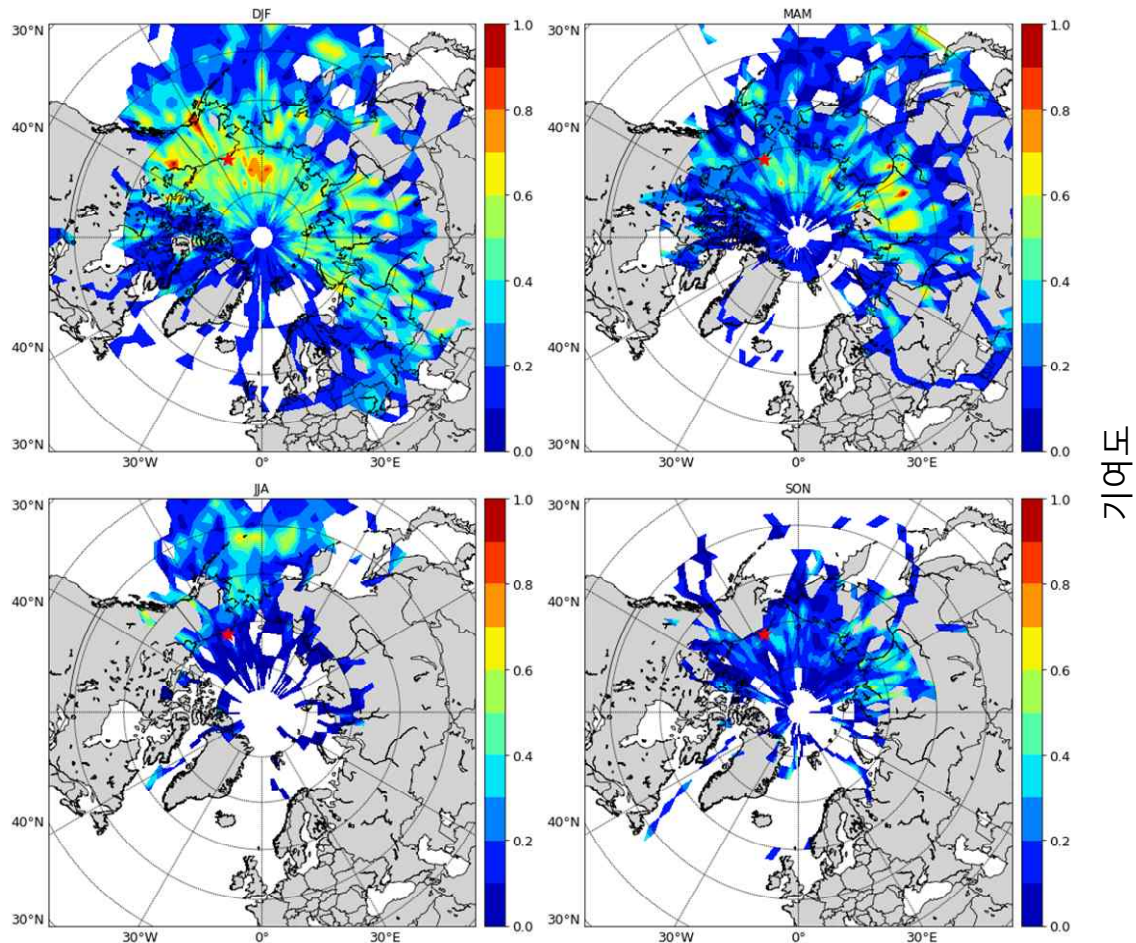


그림 3.22. PSCF 모델로 계산된 알래스카 베로우(Barrow) 기준 공기피 유입 기여도.

제 2 절 구름 입체 분포 및 장기변동 특성 분석

1. 지상·위성 관측자료를 이용한 북극 구름의 계절·경년 변동 특성 분석

본 연구는 “Arctic Amplification: Climate Relevant Atmospheric and Surface Processes, and Feedback Mechanisms(AC)³” 국제 프로젝트의 일환으로 Svalbard, Ny-Ålesund(78.92 °N, 11.92 °E)의 AWIPEV 관측소에서 2016년 6월부터 수행되고 있는 연속적인 구름 관측자료를 이용하여 북극 구름의 특성에 대해 분석을 진행하였다. 94 GHz 구름 레이더(Cloud radar), 905 nm 운고계(Ceilometer), 그리고 K-band와 V-band를 이용하는 마이크로 라디오미터(Microwave radiometer), 세 가지의 지상 원격관측을 혼합하여 서로 다른 파장 특성을 통해 구름의 수직 분포, 상

분류, 미세물리 특성 등을 관측 및 산출할 수 있다. 그리고 이는 국제 네트워크인 Cloudnet에서 제공하는 알고리즘을 통해 계산되어 제공되고 있다.

관측 및 산출된 시간에 따른 대기층(30 s, 20 m) 내에서의 상 분류를 이용하여 구름을 정의하고 구름 유형을 세 가지(액체, 얼음, 혼합상 구름)로 분류하였다. 대기층 내에서 구름 상이 수직으로 연속되어 관측되었을 때 구름층이라 정의하였고, 정의된 구름층의 개수에 따라 단층(single-layer clouds), 다층(multi-layer clouds)으로 분류하였다. 또한, 구름층에 액체 또는 얼음의 하나의 상만 존재하는 경우엔 각각 액체 구름 또는 얼음 구름으로, 두 가지 상이 모두 존재하면 혼합상 구름으로 분류하였다.

본 연구에서 이용된 구름 미세물리 특성은 다음과 같은 방법으로 산출되었다. 액체 수함량(Liquid water content; LWC)은 마이크로 라디오미터(MWR)에서 측정된 액체 수경로(Liquid water path; LWP)와 모델 온도 및 압력을 이용하여 산출하였으며(Illingworth et al., 2007), 얼음 수함량(Ice water content; IWC)은 구름 레이더 관측값을 경험식에 적용하여 산출하였다(Hogan et al., 2006). 구름의 입자 유효 반경(Effective radius; R_{eff})의 경우는 액체 입자와 얼음 입자 각각 Frisch et al. (2002)와 Delanoë et al. (2007)에서 제공하는 경험식을 통해 계산되었다. 구체적인 구름 미세물리 특성의 산출 방법은 표 3.2에 나타나 있다.

표 3.2. 구름 미세물리 특성 산출 방법.

Parameter	Equation	Reference
액체 수함량 (Liquid water content ; LWC)	마이크로 라디오미터로 측정된 액체 수경로를 단 열적으로 규모화하여 산출	Illingworth et al. (2007)
얼음 수함량 (Ice water content ; IWC)	$\log_{10}(IWC) = (0.00058)ZT + (0.0923)Z - (0.00706)T - 0.992$ $Z = 0.7194 \times Z_{measured}$	Hogan et al. (2006)
액체 입자 유효 반경 (Effective radius)	$r_e(h) = \frac{Z^{\frac{1}{6}}(h)}{2LWP^{\frac{1}{3}}} \left(\frac{\pi\rho}{6} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\sum_{i=1}^{i=m} Z^{\frac{1}{2}}(h_i) \Delta h \right)^{\frac{1}{3}} \exp(-2\sigma_x^2)$	Frisch et al. (2002)
얼음 입자 유효 반경 (Effective radius)	$r_e = \frac{3(IWC)}{2\rho_i\alpha} 10^6$ $\log_{10}(\alpha) = (0.000876)ZT + (0.0928)Z - (0.00513)T - 2.49$	Delanoë et al. (2007)

Z = Radar reflectivity factor, T = Temperature, h_i = Height in the cloud (i: radar range gate at cloud base and top), Δh = Radar range gate thickness, ρ = Water density, ρ_i = Solid ice density ($0.917 \times 10^6 \text{ g cm}^{-3}$), σ_x = Logarithmic spread of the distribution (assume 0.38; Miles et al., 2000), α = Visible extinction coefficient

그림 3.23은 Ny-Ålesund 지역에서 2년 동안(2016년 6월부터 2018년 5월까지) 관측된 구름 발생빈도의 계절 변동성을 보여준다. 월별로 이용 가능한 구름 관측된 프로파일의 수가 다르므로, 이를 반영한 구름이 없는 맑은 날과 구름이 관측된 날의 비율을 그림 3.23a에서 확인할 수 있다. 관측이 시작된 6월에 이용 가능한 프로파일의 수가 가장 적었으며, 구름이 관측된 날의 비율은 대략 겨울철보다 여름철에 높은 것으로 보였다. 모든 월에서 80% 이상 데이터가 존재하였으므로 데이터 수에 따른 계절 특성 분석의 한계는 존재하지 않을 것으로 판단하였고, 이용 가능한 프로파일 대비 구름 발생빈도를 계산하여 그림 3.23b에 나타내었다. 앞서 설명한 방법에 따라 구름은 다층 구름과 단층 구름으로 분류하였으며, 단층 구름만 액체, 얼음, 혼합상 구름으로 분류하였다. 이들을 모두 합한 총 구름 발생빈도는 5월부터 10월까지 80% 이상으로 높았으며, 11월부터 4월까지의 그 이하로 상대적으로 적은 구름 발생빈도를 보였다. 모든 계절에서 관측된 구름의 약 50%는 다층 구름이었는데, 이는 구름 층간의 상호작용으로 인해 단층 구름보다 좀 더 복잡한 미세물리 과정 및 복사 효과 특성을 가진다. 단층 구름 중에선 혼합상 구름의 비율이 절반 이상을 차지하며 가장 높았으며, 액체 구름은 여름에 증가하고 얼음 구름은 겨울에 증가하는 경향성을 확인하였다. 분석을 진행한 2년 동안 평균적으로 약 78% 구름이 관측되었으며, 이는 단층 구름 39%와 다층 구름 38%으로 구성되었다. 단층 구름의 경우에는 액체, 얼음, 혼합상 구름의 비율이 각각 7%, 11%, 21% 이었다.

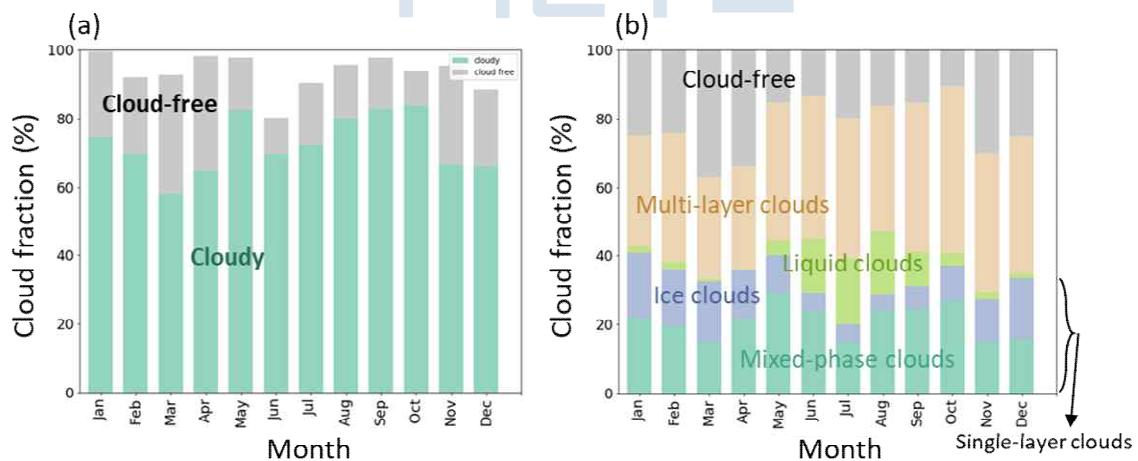


그림 3.23. 2016년 6월부터 2018년 5월까지 Ny-Ålesund에서 지상 원격 관측된 (a) 전체 기간 중 존재하는 자료의 비율 및 구름 있는 날과 없는 날의 비율의 월 변동, (b) 존재하는 자료 내에서 구름이 없는 날, 다층 구름, 단층 구름(액체, 얼음, 혼합상 구름) 비율의 월 변동.

그림 3.24는 전체 구름과 세 가지 유형의 구름에 대한 가장 높은 구름층의 상부 높이와 가장 낮은 구름층의 하부 높이의 월평균 분포이다. 이때 단층 구름만 분류했던 그림 3.23과는 다르게, 다층 구름도 모두 포함하여 액체, 얼음, 혼합상 구름으로 분류하였다. 전체 구름의 구름 높이는 눈에 띄는 계절 변동성은 없었으며, 평균적으로 하부 높이가 1 km, 상부 높이가 4 km 였다(그림 3.24a). 액체 구름은 여름 동안 1 km 내외에서 보통 1 km보다 얇은 두께로 발생하였으며, 겨울철 구름 높이의 증가는 적은 관측 데이터로 인한 오류로 예측된다(그림 3.24b). 얼음 구름은 보통 2 km 정도의 두께였으며 여름철에는 3 km 이상 높은 고도에서 발생하는 반면, 겨울철에는 2 km 이하에서 빈번하게 발생하였다(그림 3.24c). 마지막으로 혼합상 구름은 하부 높이가 여름과 초가을에 약간 높아지긴 하지만 전반적으로 가장 낮은 고도(1 km 내외)에서 발생하였으며, 그 값이 변동 폭도 가장 작았다(그림 3.24d).

그림 3.25는 Ny-Ålesund에서 관측된 액체, 얼음, 혼합상 구름의 액체 수함량(LWC)/수경로(LWP) 및 얼음 수함량(IWC)/수경로(IWP)에 대한 월변화를 나타낸다. 액체 구름의 액체 수경로는 여름과 가을에 다른 계절에 비해 최소 2배 이상 큰 계절 변동성을 보인다. 특히, 2 km 이하의 하층 구름에서 액체 수함량이 높게 관측되었다(그림 3.25a). 반면에, 얼음 구름의 얼음 수경로는 겨울에 가장 큰 값을 보였고, 얼음 수함량 역시 고도가 높아질수록 감소하였다(그림 3.25b). 액체와 얼음 수함량을 모두 포함하는 혼합상 구름은 액체 및 얼음 구름의 수함량과 동일한 계절 변동성을 보였으나, 액체 구름보다는 많은 액체 수함량을 얼음 구름보다는 적은 얼음 수함량을 가지고 있었다(그림 3.25c, d). 이러한 혼합상 구름에 포함된 얼음과 액체 수함량의 비율은 액체의 복사와의 강한 상호작용 때문에 구름 복사 효과의 변화에 중요한 영향을 미친다. 따라서 혼합상 구름의 복사 효과를 정확히 식별하기 위해선 액체 수함량과 얼음 수함량의 비율을 고려하는 것이 중요하다. Ny-Ålesund 지역의 혼합상 구름의 얼음 수함량 대비 액체 수함량의 비율은 여름철 낮은 고도에서 증가하였다. 특히, 9월에 상대적으로 높은 액체 수함량은 북극 지역 대규모 대류와 관련이 있었으며, 같은 기간 동안 ERA5 재분석자료의 850 hPa 지위 고도(geopotential height) 분석에 따르면 북대서양으로부터의 따뜻한 이류의 수송이 주요 요인이라고 볼 수 있다.

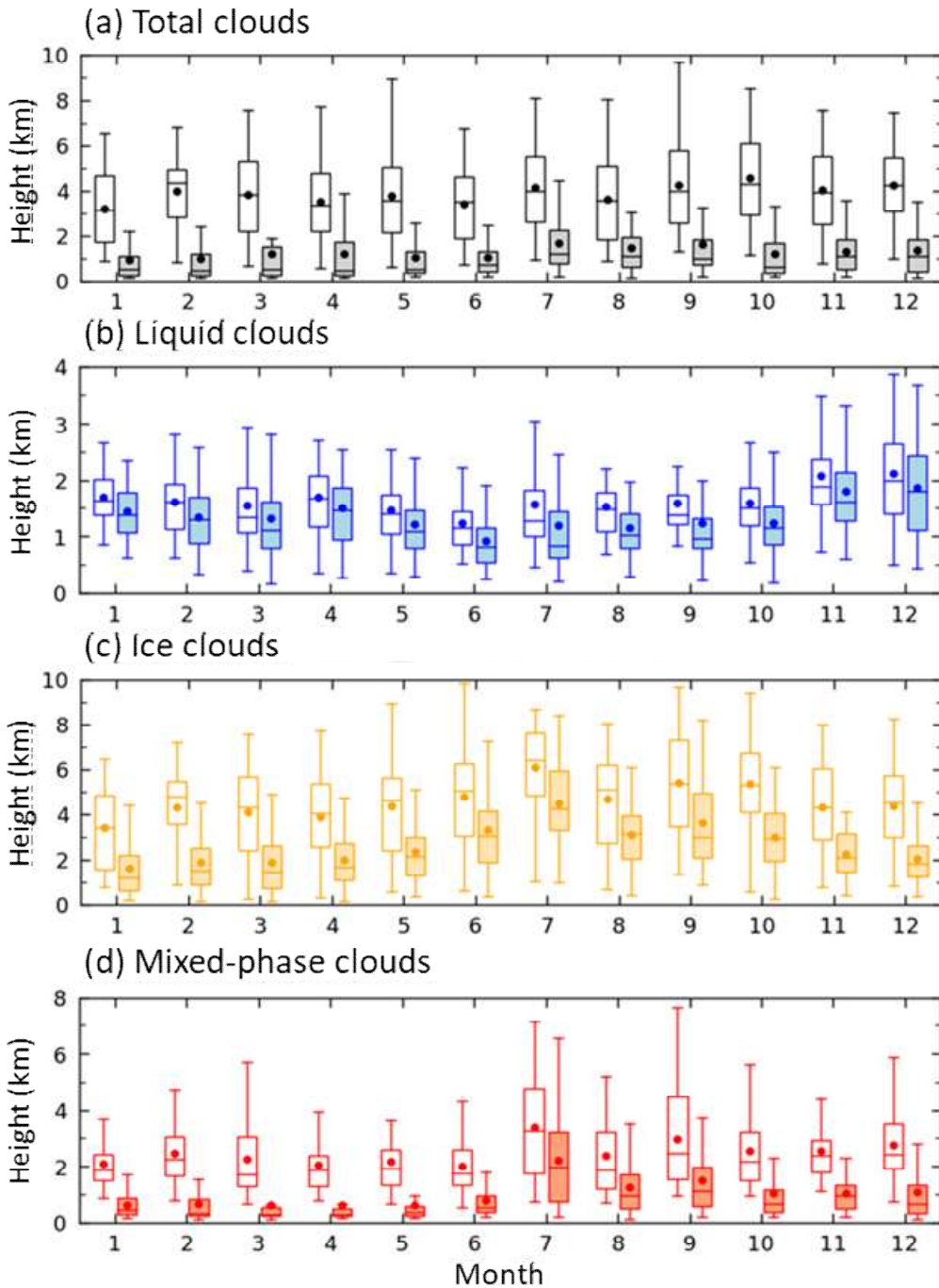


그림 3.24. Ny-Ålesund에서 관측된 (a) 전체 구름, (b) 액체 구름, (c) 얼음 구름, 그리고 (d) 혼합상 구름의 가장 높은 구름층의 상부 높이(흰색 박스)와 가장 낮은 구름층의 하부 높이(색 있는 박스)의 월별 상자 수염 그림(Box-whisker diagram). 상자의 상부 하부는 각각 75th, 25th 백분위 값이며, 막대의 상부 하부는 각각 95th, 5th 백분위 값을 가리킨다. 그리고 중간값과 평균값이 각각 상자 내의 가로선과 점으로 나타나 있다.

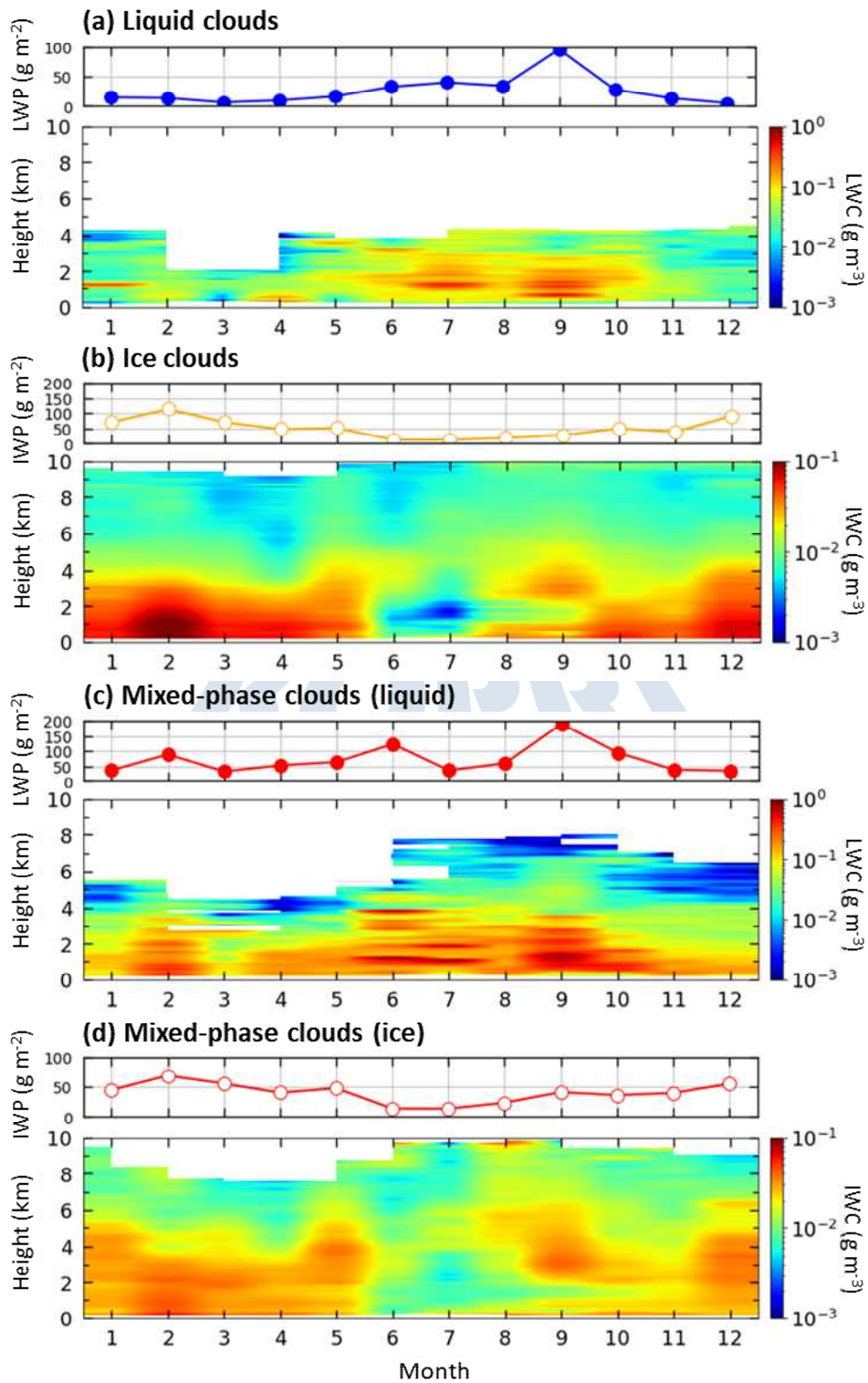


그림 3.25. Ny-Ålesund에서 관측된 월별 (a) 액체 구름과 (c) 혼합상 구름의 액체 수경로와 액체 수함량의 수직 분포 그리고 (b) 얼음 구름과 (d) 혼합상 구름의 얼음 수경로와 얼음 수함량의 수직 분포.

그림 3.26은 세 가지 구름의 입자 유효 반경의 월 변화를 보여주고 있다. 액체 구름의 액체 입자 유효 반경은 여름에 약 $5\ \mu\text{m}$ 로 고도에 따라 일정하게 나타났다. 하지만 겨울철에는 고도에 따라 증가하는 모습을 보이는데, 상층에서 큰 값은 데이터 부족으로 인해 신뢰도가 낮아 해석하기 어려운 결과이다(그림 3.26a). 반면에, 얼음 구름과 혼합상 구름의 얼음 입자의 경우에는 고도에 따라 입자의 크기가 작아지는데, 이는 얼음 입자가 하강하면서 성장할 수 있음을 의미한다(그림 3.26b, c). 또한, 여름과 가을에 4 km 이하에서 가장 큰 얼음 입자가 관측되었다. 얼음 입자는 혼합상 구름(약 $47\ \mu\text{m}$)에서 얼음 구름(약 $45\ \mu\text{m}$)에서보다 더 컸으며, 이는 얼음 입자가 물과 얼음이 공존하는 상태에서 더 빠르게 성장할 수 있다는 Wegener-Bergeron-Findeisen (WBF) 메커니즘에 의해 설명될 수 있다. 특히 겨울 중 2월에 3 km 이하에서 관측된 $50\ \mu\text{m}$ 이상의 큰 얼음 입자는 북대서양으로부터 수송되는 따듯하고 습한 공기와 관련이 있을 수 있다. 풍부한 수증기는 액체 및 얼음 입자의 생성과 성장을 촉진할 수 있고, 심지어 강수 및 강우의 발생 가능성도 증가시킬 수 있다.



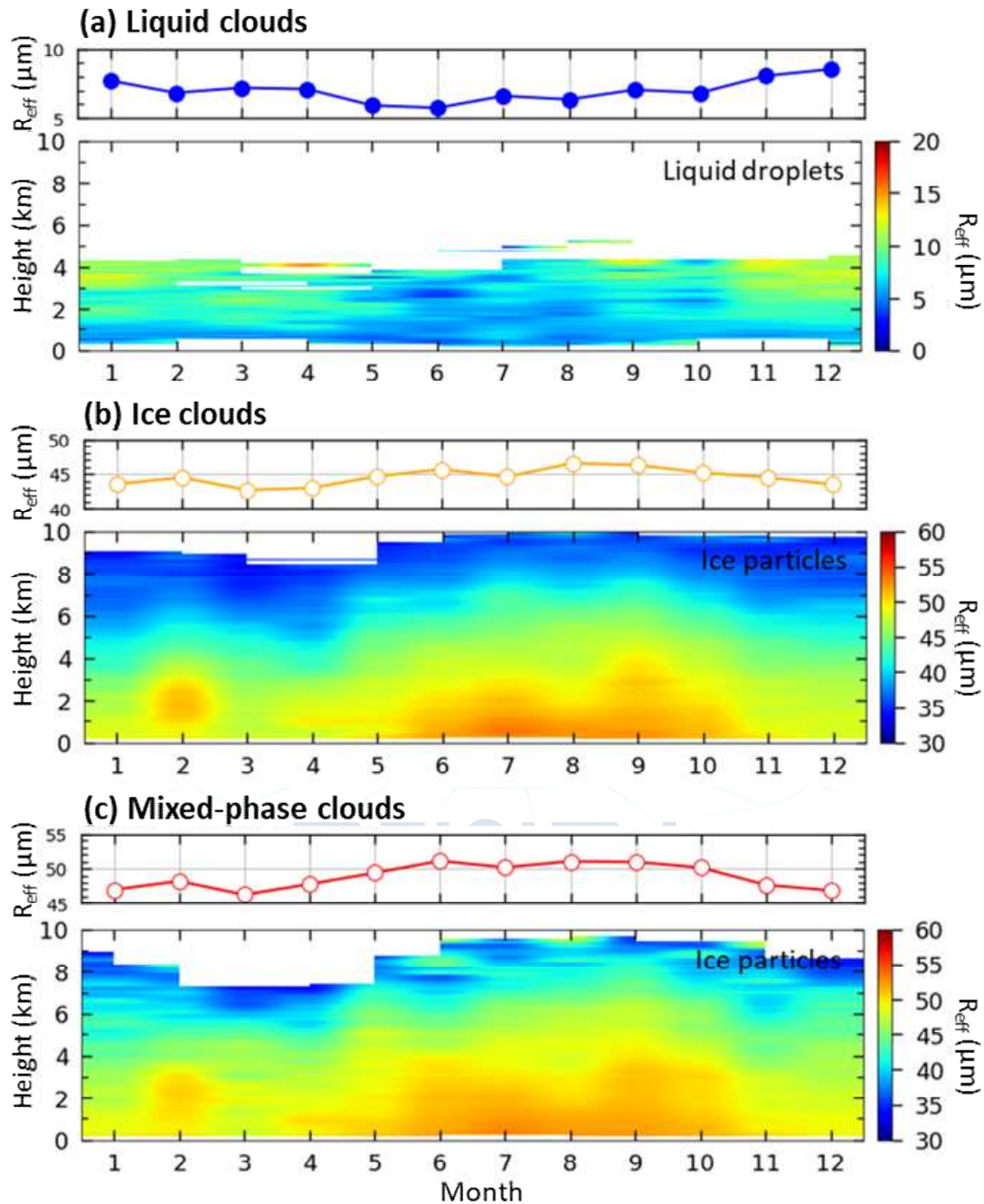


그림 3.26. Ny-Ålesund에서 관측된 월별 (a) 액체 구름의 액체 입자 유효 반경과 (b) 얼음 구름과 (c) 혼합상 구름의 얼음 입자 유효 반경의 수직 분포. 각 그림의 위쪽에 있는 그래프는 전체 고도 내 평균적인 입자 유효 반경.

Ny-Ålesund의 제플린 관측소에 설치된 Cloud Droplet Probe(CDP) 관측자료를 수집하여 구름 특성 분석을 진행하였다. 제플린 관측소는 2017년 9월 15일부터 2018년 3월까지 관측을 수행하였으며, 일정 기간 장비 정비 후 2018년 8월부터 다

시 관측을 진행하였다. 2017년 9월 15일부터 2018년 2월 28일 기간 관측된 자료를 데이터베이스화하였으며, 이를 활용하여 분석을 진행하였다. CDP는 주변 공기를 흡입하여, 공기 내 존재하는 구름 입자의 미세물리 특성을 측정하는 in-situ 기기이며, 기기가 설치된 고도의 공기를 흡입하여 관측을 수행하기 때문에 제플린 관측소의 고도(해발 474 m)에서의 구름 특성에 대한 정보를 얻을 수 있다. 흡입된 공기로 반출된 658 nm 레이저를 이용하여 구름 입자의 크기 분포(size distribution), 수농도(number concentration; N_c), 유효 직경(effective diameter; ED), 체적 중간 직경(median volume diameter; MVD), 액체수함량(liquid water content; LWC)을 측정한다. 이때 직경 2 - 50 μm 범위의 구름 입자만 감지할 수 있으며, 30개 구간(bin)으로 나누어 각각의 구간에 해당하는 입자의 수를 측정한다.

본 연구에서 Ny-Ålesund(해발 474 m)에서 CDP 관측자료를 활용하여 구름의 2 - 50 μm 사이 입자에 대한 수농도, 액체수함량, 체적 중간 직경, 유효 직경의 월평균 분석을 진행하였다(그림 3.27). 구름의 수농도(그림 3.27a)와 액체수함량(그림 3.27b)은 모두 다른 달에 비해 2017년 9월에 3배 이상 크게 나타났으며, 이는 해당 시기에 발생한 강한 강수 이벤트와 관련 있을 것으로 추측된다. 체적 중간 직경과 유효 직경의 월평균 값은 6 - 14 μm 의 범위로 관측되었으며, 2017년 11월에 최소, 2018년 2월에 최대를 보여 변동성이 일치함을 확인할 수 있다.

극지연구소

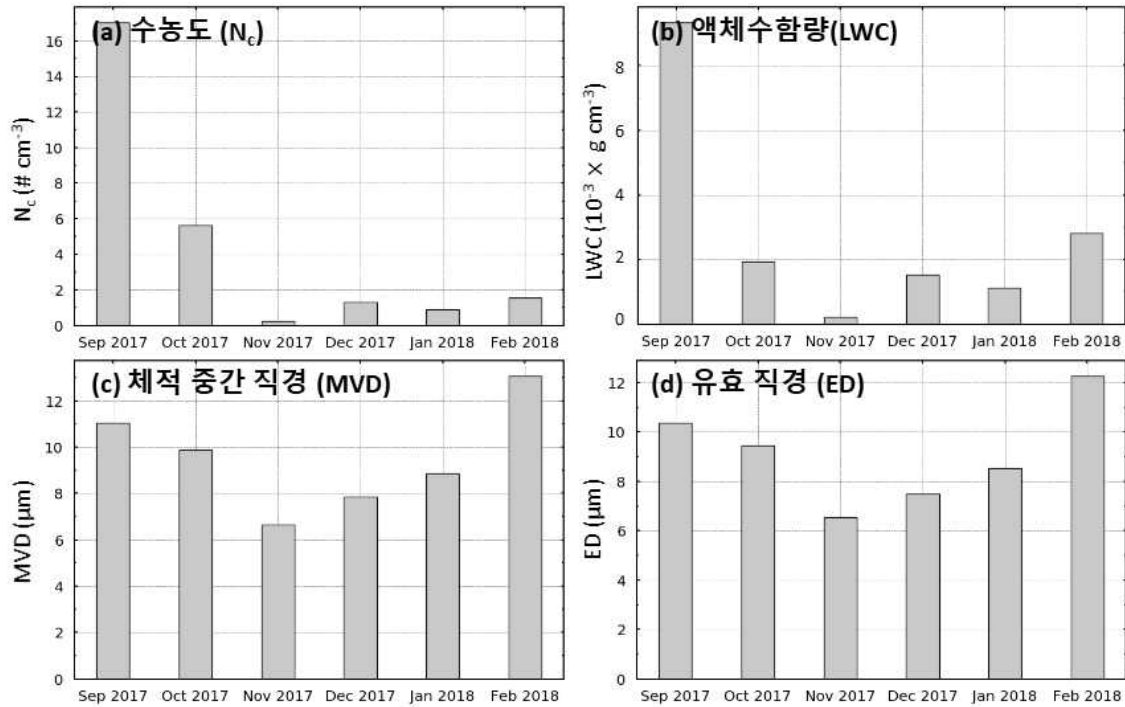


그림 3.27. Ny-Ålesund (해발 474 m)에서 발생하는 구름의 2 - 50 μm 사이 입자에 대한 (a) 수농도(N_c), (b) 액체수함량(LWC), (c) 체적 중간 직경(MVD), (d) 유효 직경(ED)의 월평균.

모델의 복사력 계산과 강수 등의 구름의 복합적인 액체 및 얼음물 함량 등의 모수화 과정(parametrization)이 올바르게 나타나려면 많은 관측자료를 통해 구름 내부 수직 분포 및 변화에 대한 분석이 이뤄져야 하는 것에 반해, 구름 특성의 수직 프로파일에 대한 관찰은 북극에서 거의 찾아볼 수 없다. 이를 보완하기 위해 “Arctic Amplification: Climate Relevant Atmospheric and Surface Processes, and Feedback Mechanisms(AC)³ 프로젝트(Wendisch et al., 2017)의 일환으로 Cloudnet은 구름 수직 프로파일에 대한 지상 기반의 지속적인 관측으로 예보 및 기후 모델에서 체계적인 구름 평가를 제공하는 것을 목표로 한다. 본 연구에서는 Cloudnet에서 제공하는 북극 Ny-Ålesund 지역의 지상 관측자료, numerical weather prediction 모델의 열역학 특성, GDAS1과 NWPICON, 그리고 원격 관측자료를 사용하여 액체 수함량(Liquid water content, LWC), 얼음 수함량(Ice water content, IWC), 구름 유효 반지름(effective radius)을 계산한 자료를 활용하였다. 구름 미세 물리적 특성(LWC와 IWC)은 MWR에서 도출된 LWP와 GDAS1에서 가져온 모델값인 온도 및 기압과 Cloudnet의 알고리즘에 사용된 수치기상예측(NWP) ICON 모델을 결합하여 scaled adiabatic method에 따라 LWC를 계산하였다. IWC 및 IWP는 Hogan et al. (2006)의 레이더 측정 높이 및 온도 값을 활용하여 계산되었으며,

Hogan et al. (2006)과 Nomokonova et al. (2019)에 의하면, Cloudnet에서 계산된 IWC의 불확실성은 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 미만 및 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상의 온도에서 각각 $-50\% \pm 100\%$ 및 $-33\% \pm 50\%$ 인 것으로 알려져 있다.

(AC)³ 프로젝트의 일환으로 항공 Arctic Cloud Observations Using Airborne Measurements during the Polar Day (ACLOUD) 캠페인 동안 Svalbard 상공에서 구름 미세물리적 특성에 대한 종합적인 항공 현장 측정이 이루어졌다. 액체 수함량 (LWC) 및 얼음 수함량(IWC)은 각각 구름 입자 프로브(Cloud droplet probe, CDP)와 구름 이미지 프로브(Cloud imaging probe, CIP)의 결합으로 측정되었으며, 항공기의 노즈붐(nose boom)에 설치된 센서에서 측정한 기온, 기압, 상대습도, 바람의 수직 프로파일 또한 구름 미세물리적 특성 분석에 활용되었다(Hartmann et al., 2018).

그림 3.28은 2017년 5월부터 6월까지의 19편의 ACLOUD 캠페인 항공 관측 기간 동안 종관 날씨 패턴, 구름량 및 일일 기단 궤적의 수평 분포를 나타냈다. 해수면 기압 패턴에서 볼 수 있는 뚜렷한 고기압 및 저기압 시스템으로 기단은 북극에서 스발바르(Svalbard, 관측 지점) 지역으로 이류 됨을 확인 할 수 있다. 각 비행 고도에서 NCEP 기상 데이터와 함께 Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPPLIT)를 사용하여 계산된 5일 후진 궤적은 해빙 지역을 넘어 상대적으로 따뜻한 바다로 수송됨을 보여주고 있다. 즉 기단은 해빙 지역(GIN Sea)에서 스발바르(Svalbard, Ny-Ålesund)로 이동하는 동안 단열 운동과 현열/잠열 플럭스에 의해 가열되어 많은 양의 구름을 생성한 것으로 보인다. 구름의 특성은 기상 조건에 따라 달라지는 것으로 보이며, 액체 구름의 경우 약 30~50%가 Greenland 근처에서 발생하였으며, 얼음 구름은 주로 카라해에서 스발바르(Kara, Barents, GIN seas)까지 대양을 가로질러 이동하는 따뜻하고 습한 기단에 의해 생성되었다(Graversen et al., 2011; Ding et al., 2017). 혼합 구름의 경우 기단이 해빙과 바다 사이(transition zone)를 지나갈 때 다량 형성되었다(그림 3.28c). Mioche et al. (2017)에서는 riming과 diffusional growth의 빈번한 발생으로 인해 transition zone에서 많은 양의 수증기와 얼음 크리스털(ice crystal)이 생성된다고 밝힌 바 있다.

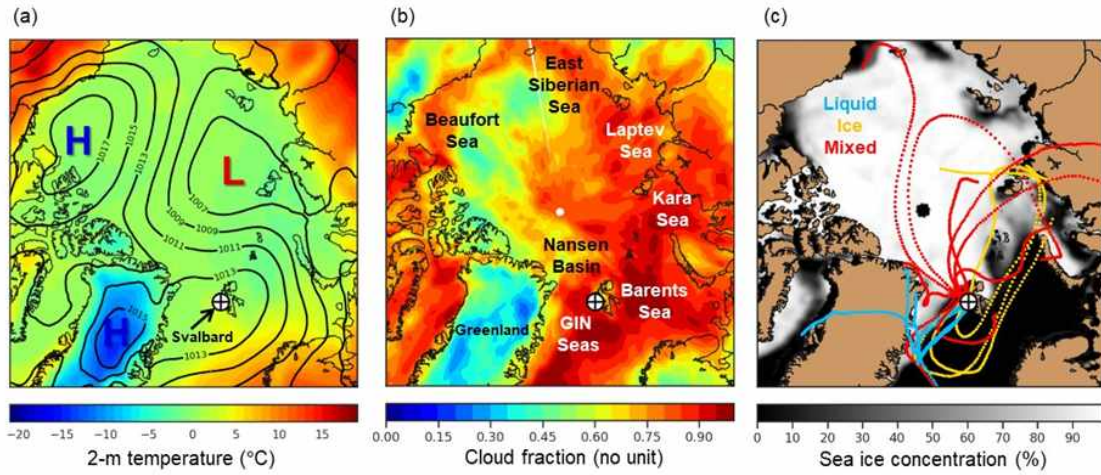


그림 3.28. (a) ERA5 재분석자료로 계산된 해수면 기압(hPa; 선, 2hPa 간격)과 2 m 온도(°C;음영), (b) MODIS-Aqua 구름 마스크를 사용한 구름량(Cloud fraction), 및 (c) NOAA ARL Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT)에서 각 구름의 특성(액체, 파란색; 얼음, 노란색; 혼합, 빨간색)에 대한 일일 기단 역방향 궤적. (c)의 음영은 2017년 5월 29일부터 2017년 6월 23일까지 NIMBUS-7 관측자료를 사용한 평균 해빙 농도.

그림 3.29는 ACLOUD 관측 기간에 관측한 온도, LWC와 IWC의 수직 분포와 확률 밀도 함수를 나타냈다. 온도 범위는 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 온도가 비교적 높은 기간이었다. 항공 고도는 0 km (지상) 에서 최대 4 km까지 관측하였으며 주로 하층 (0 - 2 km)에 많은 양의 구름이 존재하며 높은 LWC와 IWC 값을 보인다. 2 - 3 km 사이에 존재하는 구름층의 경우 IWC의 값이 LWC의 값 보다 높게 나타나며, 주로 얼음으로 이루어져 있는 혼합 구름임을 알 수 있다. Ny-Ålesund 관측소의 Cloudnet 자료와 비교해보았을 때 여름철에 보이는 LWC와 IWC의 수직 분포도와 비슷한 분포로 확인하였다. 각 구름 특성별 분석을 위하여 관측된 구름 LWC와 IWC의 양을 기준으로 하여 3가지 유형으로 구분하였다. LWC또는 IWC가 전체 수 함량에서 각각 95% 이상 함량되어 있을 경우 액체 또는 얼음 구름으로 분류된다. 혼합상 구름은 LWC와 IWC가 각각 5% 이상 함량되었을 경우로 정의하였다. 그림 3.30에서 각 구름 특성별 LWC, IWC, 그리고 온도 수직 분포와 커널 확률 밀도 함수(KDE)를 나타낸 것이다. 액체 구름의 LWC는 평균 0.6 gm^{-3} 로 관측되었고 상대적으로 따뜻한 온도($-3.8\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$) 범위 안에 있음을 확인할 수 있었다. 혼합상 구름에서 관측된 LWC의 KDE는 모든 비행 고도에서 0.8 gm^{-3} 정도의 값에 밀집되어 있으며 0에 수렴할수록 기하급수적으로 감소함을 볼 수 있다. ACLOUD 캠페인 동안 항공 CIP 측정에서 얻은 대부분의 IWC 값은 0.1 gm^{-3} 미만이었으며, 특히 얼음

구름에서의 IWC는 영하 $-12\sim 3$ °C의 온도 범위에서 0.5 km 이하에서 관측되었으며, 고도 3 km에서 약간의 정점을 보였다. 혼합 구름의 경우 하층이 3 km 부근의 피크보다 2배 정도 많이 관측되었다.

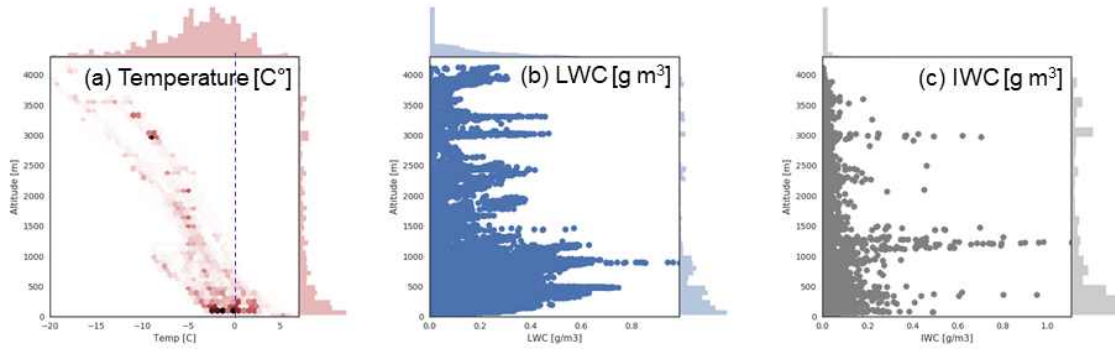


그림 3.29. ACloud 캠페인 전 기간 동안 관측된 (a) 온도 (b) 액체 수함량(Liquid water content; LWC) (c) 얼음 수함량(Ice water content; IWC) 변수의 산점도와 분포도.

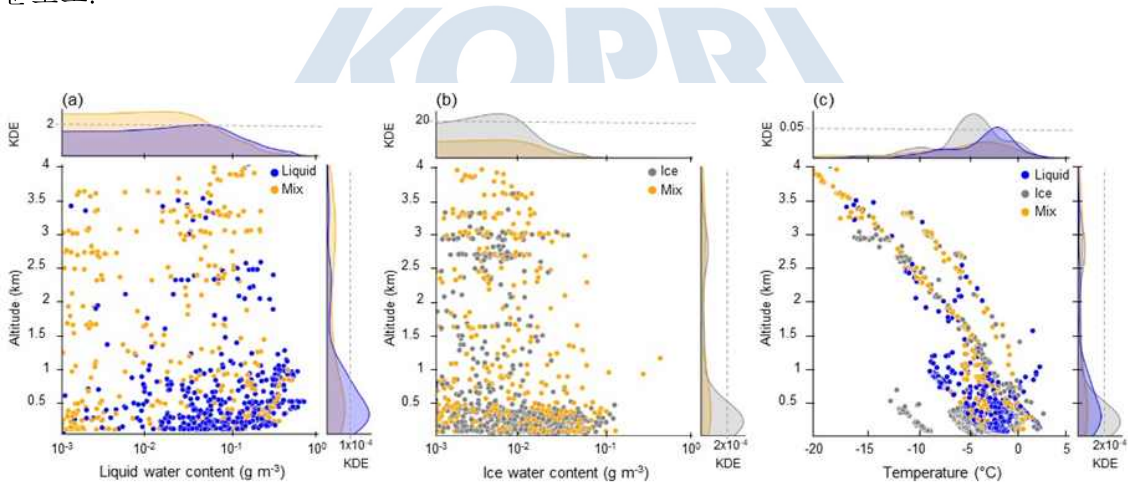


그림 3.30. ACloud 캠페인에서 관측된 각 액체(파란색), 얼음(회색), 혼합(노란색) 구름의 (a) 액체 수함량(LWC), (b) 얼음 수함량(IWC), 그리고 (c) 온도의 수직 분포. 상단과 오른쪽의 패널은 각 변수에 대한 확률 분포 함수(PDF)의 커널 밀도 추정(KDE).

그림 3.31는 2006년부터 2016년까지의 CALIPSO (Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation) 관측자료로부터 산출한 북극 지역의 운정 고도(cloud top height)의 계절 변화를 나타낸다. 라이다를 이용한 CALIPSO 위성 관측 자료는 광학적 두께가 작은 구름도 관측할 수 있는 장점이 있기 때문에 북극 전역의 구름 고도 정보를 분석하였다. 레이저 신호가 구름을 통과할 시 모두 소

산되므로 본 연구에서는 운정 고도의 변화를 분석하였으며, 특히 구름이 여러 층으로 존재하는 경우에는 최상단 구름의 운정 고도만 산출하였다. 모든 계절에서 대체로 운정 고도는 육지에 비해 해양에서 낮은 값을 보였으며 여름철을 제외하고는 대체로 캐나다 북쪽 지역에서 운정 고도가 4 km 내외로 산출된다. 반면 여름철에는 북대서양 지역에서 운정 고도가 4 km 이하로 매우 낮은 것으로 확인된다. 한편 육지에서는 여름철에 운정 고도가 가장 높았으며, 시베리아 지역에는 최대 9 km 내외의 높은 운정 고도가 산출되기도 하였다. 본 연구는 다층 구름(multi-layer cloud)이 존재하는 경우에는 최상단 구름의 운정 고도만 산출하였으며, 북극에서는 다층 구름의 관측 빈도가 단층 구름(single-layer cloud)과 유사하거나 더 높기 때문에 (Nomokonova et al., 2019), 운정 고도의 변화만으로 구름 고도 특성의 계절 변화를 파악하기에는 어려움이 있다.

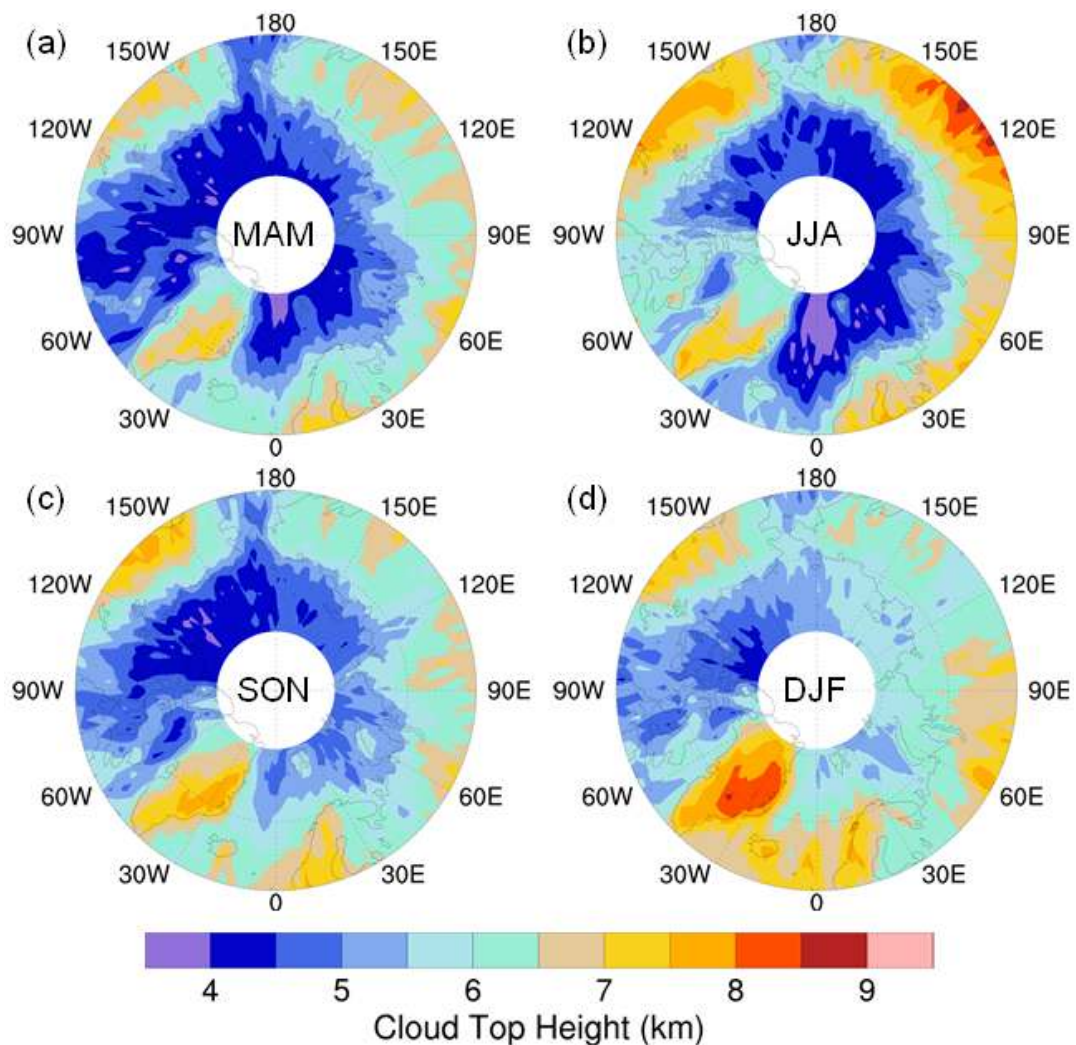


그림 3.31. 북극 지역에서 운정 고도(cloud top height)의 수평 분포

2. 니알순(Ny-Ålesund) 과학기지의 구름 특성과 북극 종관 기상 패턴과의 연관성 분석

Ny-Ålesund은 서로 다른 기상 특성을 가지는 두 가지의 종관 패턴의 영향을 크게 받는 지역으로 알려져 있다. 특히, 북대서양 지역의 종관 규모 대기 순환과 관련한 온도 및 습도의 변화는 북극 지역 구름 형성 및 미세 물리 특성에 영향을 줄 수 있다(Yeo et al., 2018; Yamanouchi, 2019). CloudSat과 CALIPSO 위성으로 관측한 구름 발생빈도의 평균 분포를 통해, Ny-Ålesund주변의 북대서양과 바렌츠·카라해에서 구름이 가장 빈번하게 발생하고 있음을 확인할 수 있다(그림 3.32a). 그림 3.32b는 Nimbus-7 위성으로 관측된 북극의 해빙 농도 분포를 보여준다. 구름 발생빈도가 높았던 북대서양과 바렌츠·카라해를 경계로 해빙 농도가 0에 수렴하였다. 다시 말해, 북쪽엔 한랭하고 건조한 공기가 남쪽엔 온난하고 습윤한 공기가 존재하는 경계에 Ny-Ålesund이 위치해있음을 구름과 해빙 분포를 통해 확인하였다.

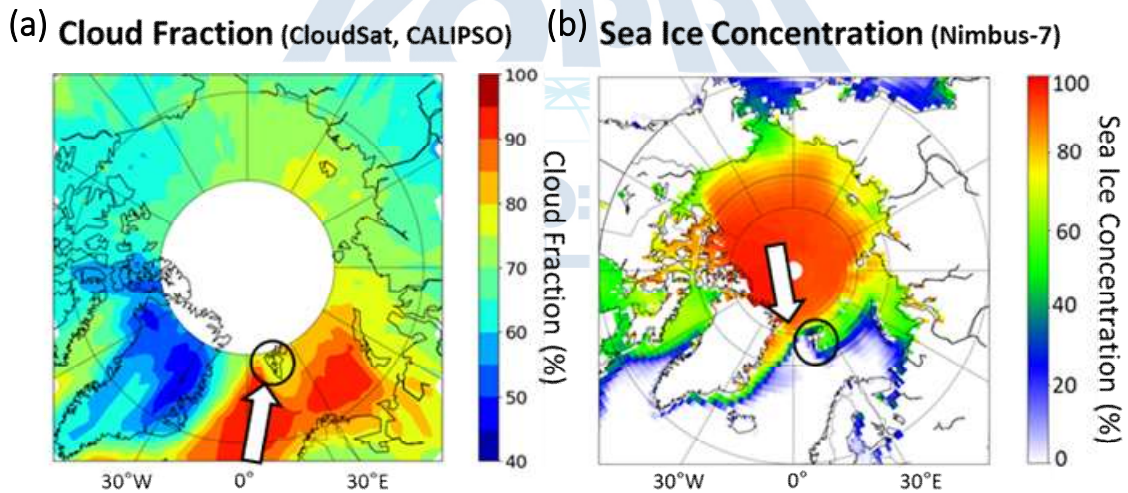


그림 3.32. (a) 위성(CloudSat, CALIPSO) 관측된 북극 지역에서 평균적인 구름 발생빈도의 공간분포(2006-2010), (b) 위성(Nimbus-7) 관측된 평균적인 해빙 농도의 공간분포(1978-2015). 니Ny-Ålesund에 영향을 주는 주요한 이류의 방향을 하얀색 화살표로 임의로 나타냄.

본 연구는 그림 3.32에서 설명한 Ny-Ålesund 지역의 지리적 특성에 기반하여 영향을 미치는 주요한 종관 패턴을 규명하고, 그에 따른 구름의 미세물리 특성의 변화를 비교하고자 한다. 이를 위해, Ny-Ålesund 지역의 2016년부터 2020년까지(2018/2019년 겨울 제외) 겨울철(11-2월) 지표부터 1.5 km까지 평균 온도의 아노말리를 이용하여 상위 5% 온도 아노말리를 가지면 온난 이류(Warm_{adv}) 사례, 하위

5% 온도 아노말리를 가지면 한랭 이류(Cold_{adv}) 사례로 분류하였다. 구름의 특성 및 복사 효과를 정확하게 확인하기 위해 단파 복사가 존재하지 않는 겨울철에 대해서만 분석을 진행하였다. 그림 3.33는 온난 및 한랭 이류 사례 사이 종관 규모 대기 순환 패턴을 비교한다. 이때 ERA5 재분석자료의 850 hPa 지위 고도와 바람 방향 및 속도를 이용하여 각 이류 사례에 대한 합성장을 계산하였다. 온난 이류 사례는 그린란드 남쪽 위 저기압과 북유럽 위 고기압 사이에서 강하게 불어오는 남풍 및 남서풍과 관련이 있었다(그림 3.33a). 이는 북대서양으로부터 Ny-Ålesund까지 따뜻하고 습한 공기를 가져올 수 있다. 그림 3.32에서 Ny-Ålesund 남쪽에서 관측된 빈번한 구름의 발생이 이와 관련이 있음을 추측할 수 있다. 반대로 바렌츠-카라해에 위치한 저기압에 의한 북풍이 북극 중심으로부터 차갑고 건조한 공기를 Ny-Ålesund으로 가져와 Ny-Ålesund의 한랭 이류 사례를 유발하였다(그림 3.33b). Ny-Ålesund 지역의 수증기 유입 경로를 추적한 선행연구(Nomokonova et al., 2020)에서도 그림 3.33와 일치하는 결과를 확인하였다. Ny-Ålesund에서 관측된 대기 중 총 수증기량(Integrated water vapor; IWV)의 아노말리를 기반으로, 양과 음의 아노말리 사례에 대해 FLEXPART 모델을 이용한 역궤적 분석을 진행하였다. 그 결과, 습한 대기 조건(양의 아노말리)은 Ny-Ålesund의 남쪽 및 남서쪽의 북대서양으로부터 기원하였고, 건조한 대기 조건(음의 아노말리)은 Ny-Ålesund의 북쪽인 북극 중심 공기에서 기원하였다(그림 3.34a). 이러한 선행연구는 Ny-Ålesund에 영향을 주는 종관규모 대기 순환 패턴에 따른 온도(그림 3.33)뿐만 아니라 수분 조건의 변화를 설명할 수 있다.

종관규모 대기 순환의 변화는 Ny-Ålesund의 온도 및 습도를 바꿈으로써 Ny-Ålesund구름 발생 및 특성의 변화에 영향을 줄 수 있다. 그림 3.34b는 Ny-Ålesund에서 MPL(Micro pulse lidar)로 관측한 겨울철 하층 구름 사례와 구름이 없는 맑은 날 사례에 대해서 HYSPLIT 역궤적 경로를 추적한 결과를 보여준다. 역궤적은 하층 구름이 발생한 날의 경우엔 남쪽으로, 맑은 날엔 북쪽으로 치우쳐 있었다. 이는 북대서양으로부터 따뜻하고 습한 공기가 유입된 날엔 하층 구름의 발생이 증가하였으며, 북극 중심으로부터 차갑고 건조한 공기가 유입된 날엔 맑은 하늘을 볼 수 있었음을 의미한다. 대기 순환이 구름 발생에 미치는 영향에 대해 구체적으로 살펴보기 위해, 본 연구에서 분류한 온난 및 한랭 이류 사례에 대해서 Ny-Ålesund에서 지상 원격 관측된 세 가지 유형 구름의 발생빈도 수직 분포를 그림 3.35b, c에서 분석해 보았다. 온난 이류가 유입될 때 대기 전체의 온도가 약 20 °C 정도 상승하였으며(그림 3.35a), 이는 구름 발생 및 구름의 수함량 증가에 영향을 미쳤다. 온난 이류 사례에서 총 구름 발생 빈도는 약 0.5 km에서 가장 높았으며

(~60%), 이는 대부분 혼합상 구름(~30%)과 얼음 구름(~25%)에 기인했다. 그리고 3 km 이상의 상층에서는 얼음 구름의 기여도가 급격히 증가하였다(그림 3.35b). 마찬가지로, 한랭 이류 사례에서도 대략 0.8 km에서 혼합상(~20%) 및 얼음(~20%) 구름에 기인한 구름 발생빈도가 가장 높았으며(~45%), 상층에선 얼음 구름이 대부분이었다(그림 3.35c). 하지만 전반적으로 온난 이류 사례보다 구름 발생빈도가 작았으며, 고도에 따라 구름 발생빈도가 급격히 감소하며 3 km 이상에서는 10% 이하였다. 또한, 액체 구름도 한랭 이류 사례에선 거의 관측되지 않았다.



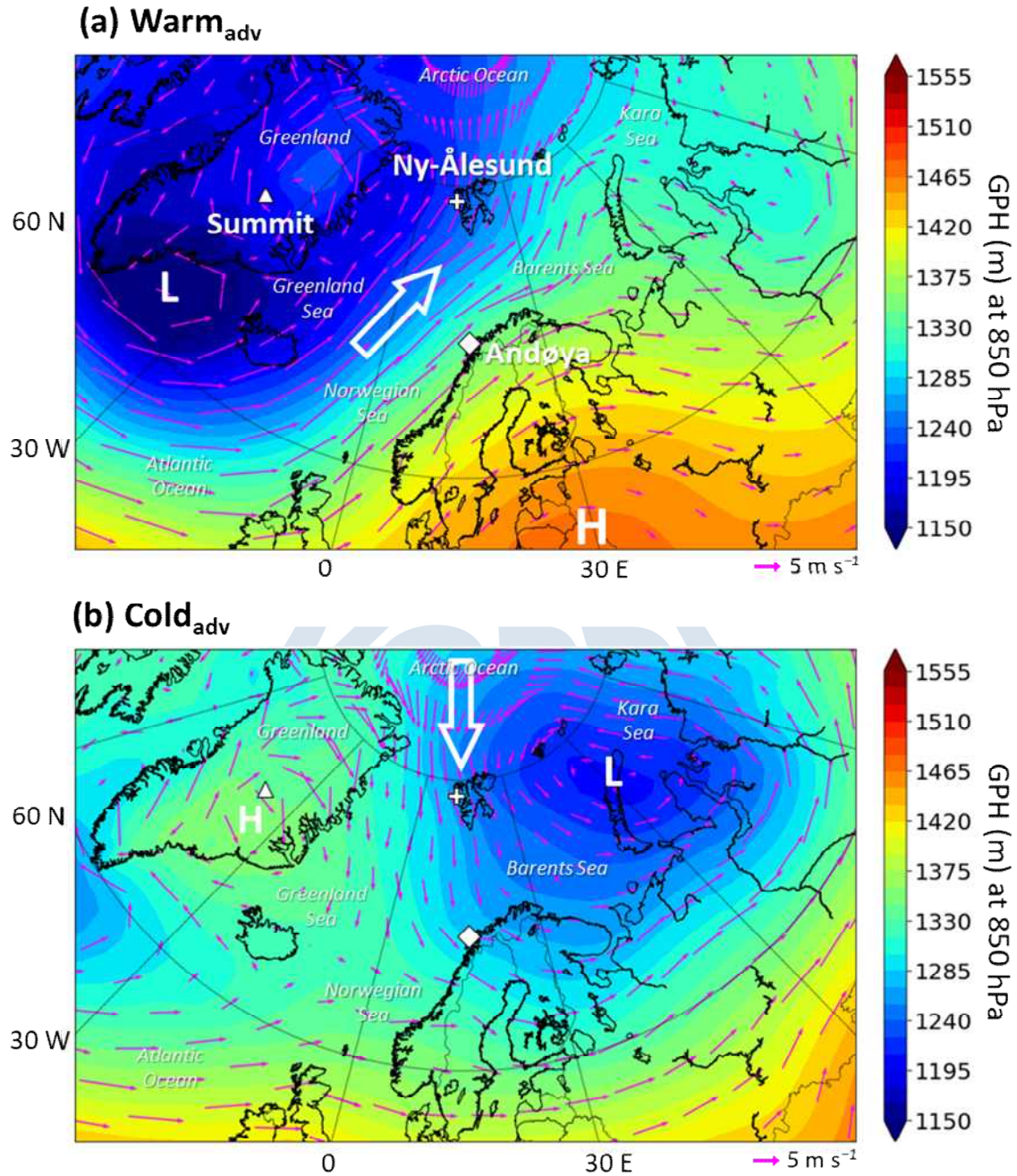


그림 3.33. Ny-Ålesund의 지표부터 1.5 km 까지의 평균 온도를 기반으로 분류된 (a) 온난 이류와 (b) 한랭 이류 사례에서의 평균 850 hPa 지위 고도 분포와 바람 방향 및 세기(분홍색 화살표). Ny-Ålesund에 영향을 주는 주된 바람의 방향을 하얀색 화살표로 표시.

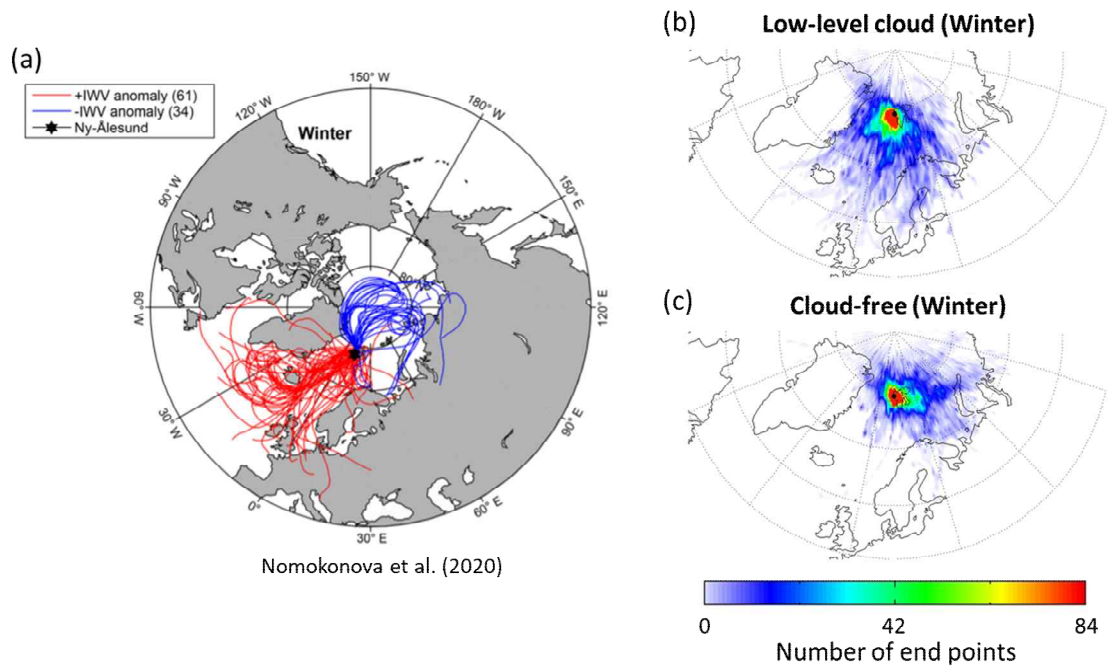


그림 3.34. (a) Nomokonova et al. (2020) 선행연구에서 제시된 Ny-Ålesund에서 대기 중 총 수증기량이 양(빨강) 또는 음(파랑)의 아노말리를 가질 때의 역궤적 분석 결과. (b) Ny-Ålesund 지역에서 겨울철 하층 구름 관측일과 구름이 없는 일에 대한 역궤적 분석 결과.

온난 이류는 구름의 액체 및 얼음 수함량 그리고 유효 반경 증가에도 기여하였다. 그림 3.36은 온난 및 한랭 이류 사례에서 구름 미세물리 특성들의 수직 분포를 비교하고 있다. 온난 이류의 영향을 받은 구름은 한랭 이류의 영향을 받았을 때보다 액체 및 얼음 수함량이 약 10배 정도 높게 나타났다(그림 3.36a, b). 이는 얼음 및 혼합상 구름의 더 많은 발생과 관련이 있다(그림 3.35b, c). 또한, 대기 중 총 수증기량 아노말리에 기반한 선행연구(Nomokonova et al., 2020)도 역시 북대서양에서 많은 수증기량이 수송되어 올 때, Ny-Ålesund 구름의 액체 및 얼음 수함량이 1.5-2배 및 3배 정도 증가함을 보고하고 있다. 또한, 얼음 입자의 유효 반경도 온난 이류 사례에서 모든 고도에서 약 5-10 μm 정도 더 크게 나타났는데(그림 3.36c), 이는 습하고 따뜻한 공기 하에서 촉진되는 얼음 입자의 성장 과정을 통해 설명될 수 있다.

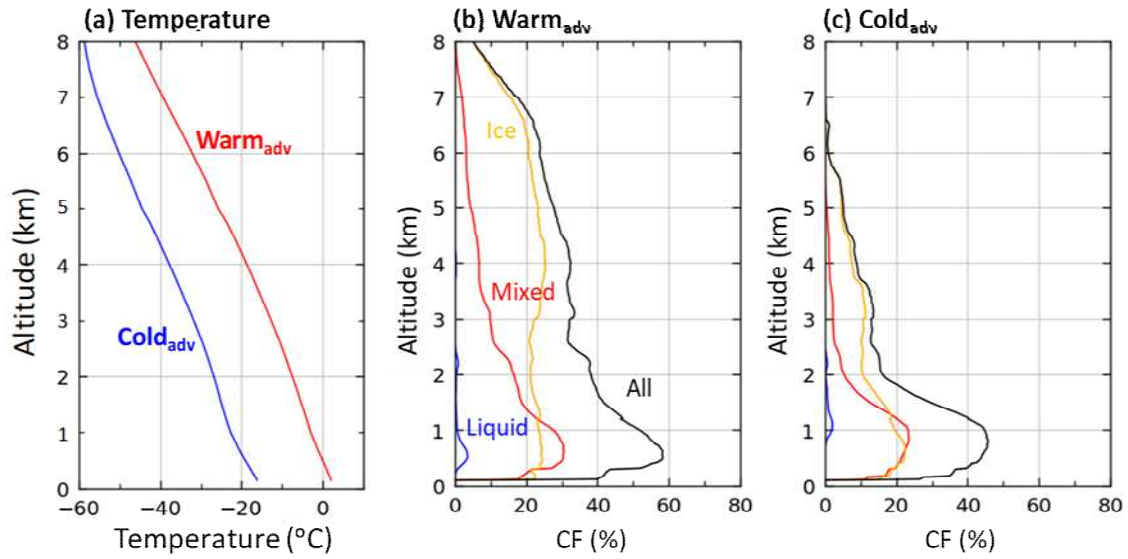


그림 3.35. 온난 이류와 한랭 이류 사례들에 대한 (a) 온도의 수직 분포, (b) 온난 이류 및 (c) 한랭 이류 발생 시 세 가지 유형(전체, 액체, 얼음, 혼합상 구름)의 구름 발생빈도의 수직 분포.

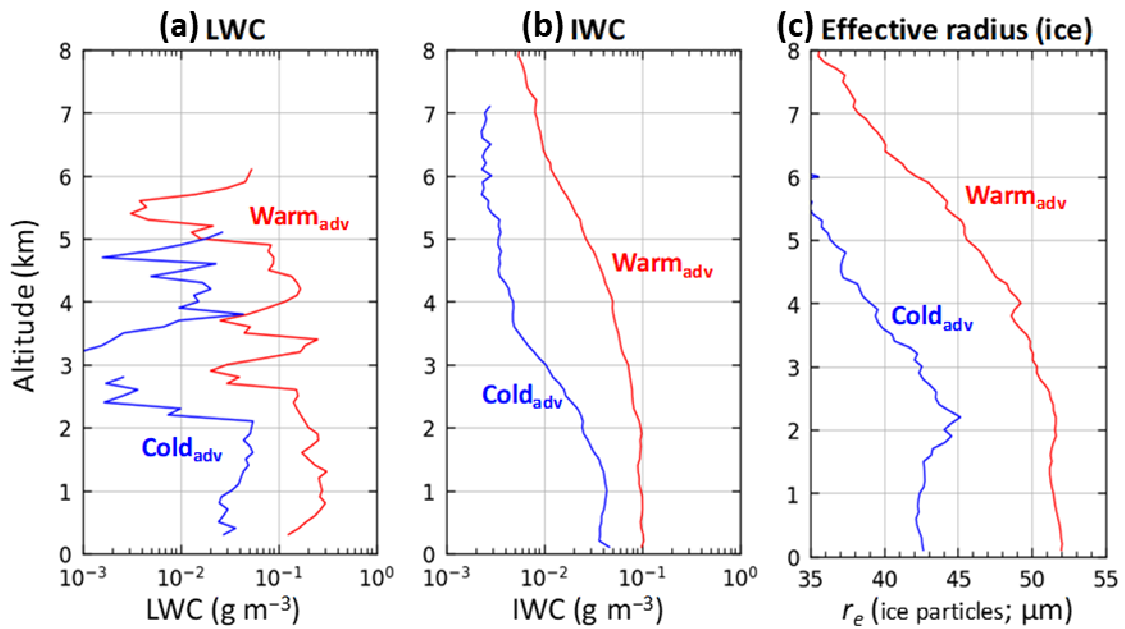


그림 3.36. 온난 이류와 한랭 이류 사례들에 대한 평균적인 (a) 액체 수함량, (b) 얼음 수함량, 그리고 (c) 얼음 입자의 유효 반경의 수직 분포.

3. 북극 구름 유형 분포와 장파 복사 수지와의 연관성 분석

모델을 통해 산출된 자료를 통해 북극 지역(북위 60° 이상)에서의 지상 구름의 장파 복사강제력 및 구름 유형별 장파 복사 수지를 조사하였다. 그림 3.37은 2003년 1월부터 2020년 12월까지 18년간의 CERES-EBAF4.1로부터 산출된 지상 장파 복사 수지의 분포를 나타낸 것으로, 북극(북위 60° 이상)에서 구름의 장파 복사강제력은 평균적으로 41.65 Wm⁻²로 나타났다. 구름이 많은 북대서양 부근(바렌츠-카라해)에서 다른 지역들에 비해 다소 높으나 지역별로 뚜렷한 차이가 나타나지는 않았다. 그림 3.38은 그림 3.37에서 산출된 지표면에서의 구름 장파 복사 효과의 시계열 그래프로, 계절 변동성이 뚜렷하게 나타난다. 구름의 장파 복사 효과는 6월에 최소(18년 평균 34.82 Wm⁻²)를 보였다가, 점차 증가하여 10월에 최대(18년 평균 50.06 Wm⁻²)를 보인 후 다시 감소하는 경향을 보였다.

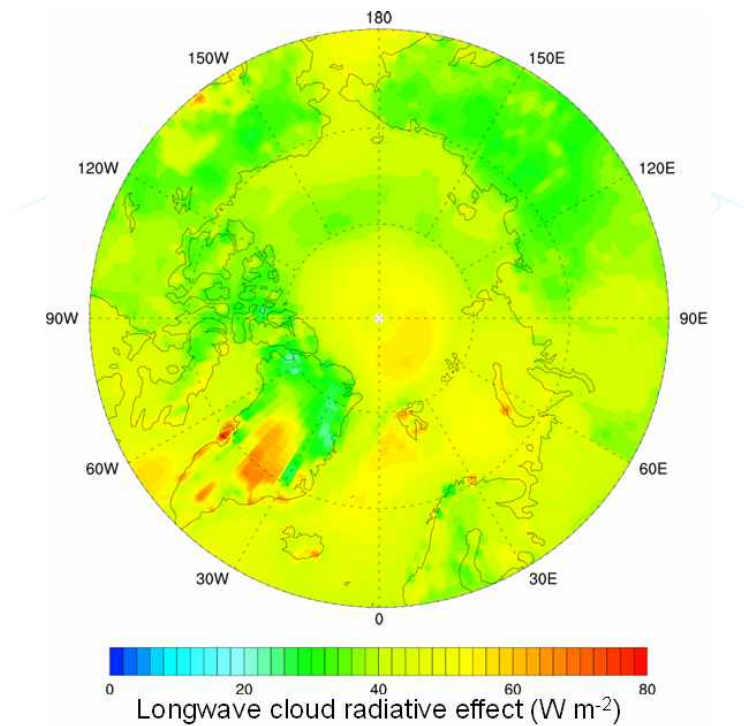


그림 3.37. 2003년 1월부터 2020년 12월까지 CERES-EBAF4.1로 산출된 지표면에서의 구름 장파 복사 효과.

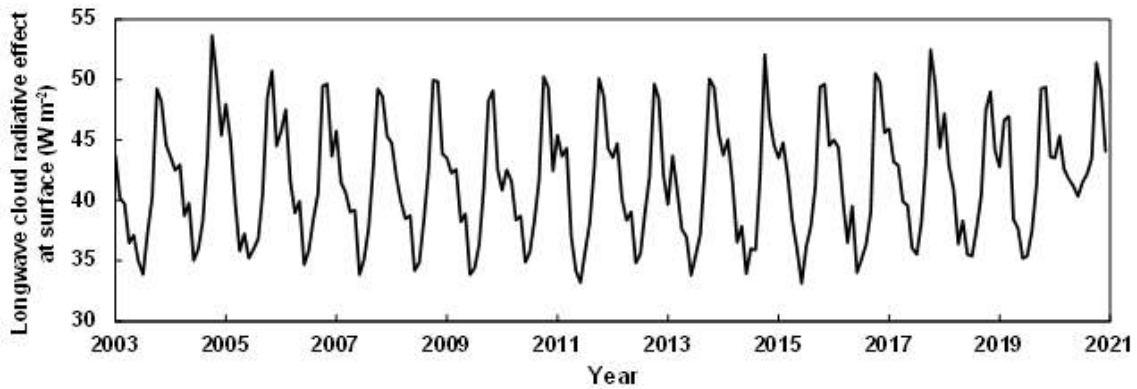


그림 3.38. 2003년 1월부터 2020년 12월까지 북위 60도 이상 지역에서 CERES-EBAF4.1로 산출된 지표면에서의 구름 장파 복사 효과의 시계열 그래프.

겨울철 중관규모 대기 순환 패턴과 관련한 Ny-Ålesund 지역 기상 조건 변화, 그에 따른 구름 발생 및 특성의 변화는 직접적으로 구름 복사 효과에 영향을 미칠 수 있다. 태양 복사에너지가 존재하지 않는 겨울철에는 구름이 장파 복사에너지를 방출함으로써 지표 온도를 변화시킬 수 있으므로, 구름의 발생 및 미세물리 특성과 복사 효과를 이해하는 것은 중요하다. 상향 장파 복사량은 일반적으로 표층 온도에 비례하며, 하향 장파 복사량은 대기 온도 및 수증기뿐만 아니라 구름에 의해 달라진다.

본 연구에서는 온난 및 한랭 이류의 사례를 선정하여 하루 동안 구름 발생 및 유형의 변화와 함께 Ny-Ålesund에서 관측된 표층 장파 복사 에너지(Baseline surface radiation network; BSRN)를 비교하였다(그림 3.39). 온난 이류가 유입된 2016년 12월 17일에는 24시간 내내 지표부터 6 km 이상까지 두꺼운 혼합상 구름이 발생하였다(그림 3.39a). 이때 표층 온도는 대략 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이상으로 높았으며, 이에 따라 상향 장파 복사량도 역시 300 Wm^{-2} 만큼 많은 양이 방출되었다. 하향 장파 복사량도 상향 장파 복사량만큼 크게 관측되었는데, 온난 이류에 의한 높은 온도 및 수증기와 지속되어 존재하는 두꺼운 혼합상 구름에 기인한 것으로 생각된다. 하지만, 본 사례분석만으로는 온도 및 수증기의 영향을 제외한 구름만의 하향 장파 복사량에 대한 기여도를 산정할 수는 없었다. 이에 반해, 한랭 이류가 유입된 2017년 12월 29일에는 2 km 이하의 하층의 얇은 혼합상 구름이 불연속적으로 발생하였다(그림 3.39b). 표층 온도는 대략 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하로 낮았고, 이에 따라 상향 장파 복사량이 약 250 Wm^{-2} 로 온난 이류 사례와 비교해 현저하게 적었다. 하향 장파 복사량은 최대 240 Wm^{-2} 에서 최소 150 Wm^{-2} 로 낮았으며, 특히 구름이 존재할 때 최대값에 도달하였다.

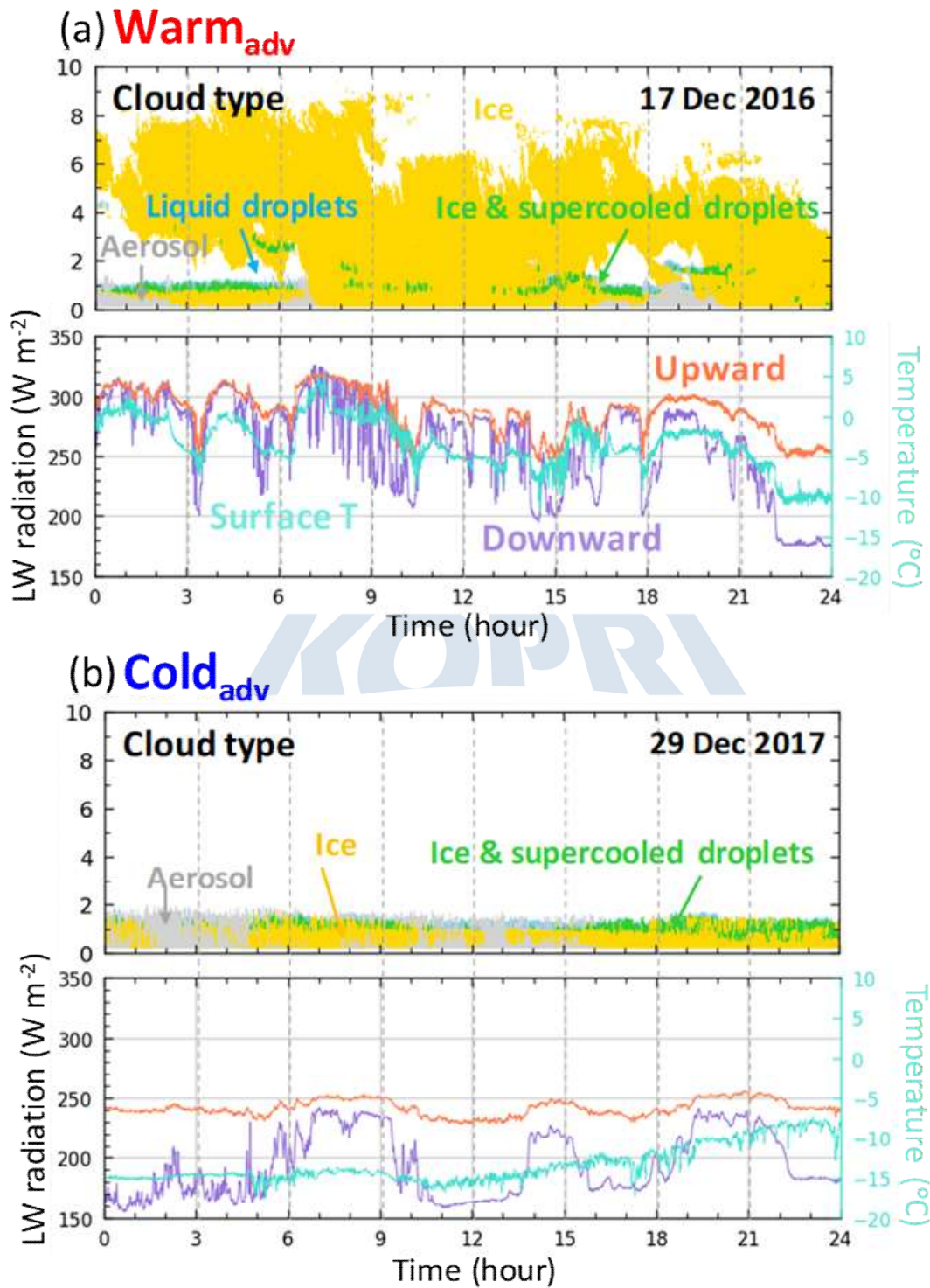


그림 39. (a) 온난 이류와 (b) 한랭 이류가 발생한 각각의 사례 일에서의 시간에 따른 구름 발생 및 유형 분포(노란색: 얼음, 초록색: 얼음과 과냉각 물방울, 하늘색: 액체, 회색: 에어로졸)와 그에 따른 표층 온도, 하향 및 상향 장파 복사량의 변화.

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 연도별 연구 목표 달성도

1. 정성적 성과

가. 1차연도 정성적 성과

연구개발목표	달성내용	달성도
에어로졸(미세 먼지)의 시·공간 분포 특성 및 구름 미세물리 특성 분석	<ul style="list-style-type: none"> ○ 니알슨(Ny-Ålesund), 베로우(Barrow) 등 북극 지역 지상 관측소에서의 에어로졸 지상 직접·원격 관측자료 수집 및 데이터베이스(DB) 구축 ○ 지상 직접·원격 관측 장비(Tethered balloon, Lidar 등)로 관측된 에어로졸 자료를 활용하여 에어로졸의 광학적·물리적 특성 분석 - 북극 Ny-Ålesund은 가을철, 베로우는 봄철에 높은 에어로졸 광학적 두께를 보이나 두 지역 모두 여름철에 낮은 에어로졸량이 관측됨. - 최근 2년간 관측된 에어로졸의 흡수계수(absorbtion coefficient)를 분석하였을 때 평균 약 0.8 Mm^{-1}에서 0.5 Mm^{-1}으로 꾸준히 감소하는 추세를 보임. 	100 %
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ny-Ålesund 지역에서의 구름 레이더 및 구름 입자 수농도 관측자료를 활용한 구름 미세물리 특성 분석 - 액체 구름의 LWC는 계절적 변동성이 강하며, 여름과 가을에 LWC가 낮은 고도에서 관측되는 반면 얼음 구름의 IWC는 극지의 밤 기간인 겨울에 가장 높은 값을 보임. - 혼합 구름의 LWC는 높이 4 km까지 모든 계절에서 높이 나타나며 IWC는 얼음 구름에서 나타난 월변동성에 비해 월 변동성이 거의 없으나 9월에 500 m 부근에 높은 값을 보임. 	100 %

나. 2차연도 정성적 성과

연구개발목표	달성내용	달성도
북극 지역 에어로졸 분포 및 광학적 물리적 특성 분석	<ul style="list-style-type: none"> ○ 위성(CALIPSO, MODIS) 및 선박(아라온호)에서의 에어로졸 관측자료 수집 및 데이터베이스(DB) 구축 ○ 위성(CALIPSO)으로 관측된 에어로졸 자료를 활용하여 북극 지역의 에어로졸의 입체 분포 및 광학적·물리적 특성 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 북극 지역 겨울철 에어로졸 광학두께(532 nm)는 겨울철에 0.05로 가장 높고, 여름철에는 0.01 - 0.03으로 낮으며, 연평균은 0.04로 산출됨. - CALIPSO에서 산출된 야간의 에어로졸 소산계수는 주간 에어로졸 소산계수에 비해 최소 60%에서 최대 100% 이상 더 높은 값을 보임. 	100 %
북극 관측소의 지상 구름 입자 수농도 관측자료와 원격 관측자료 비교분석	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ny-Ålesund의 제플린 관측소에 설치된 구름 원격자료인 Cloud Droplet Probe (CDP)을 활용하여 구름 미세물리 특성 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 구름의 수농도와 액체수함량은 모두 다른 달에 비해 2017년 9월에 3배 이상 크게 나타났으며, 이는 해당 시기에 발생한 강한 강수 이벤트와 관련 있을 것으로 추측됨. - 체적 중간 직경과 유효 직경의 월평균 값은 6 - 14 μm의 범위로 관측되었으며, 2017년 11월에 최소, 2018년 2월에 최대를 보여 변동성이 일치함. 	100 %
모델 및 위성/지상 관측된 구름 유형 분포 및 장파 복사 수치 분석	<ul style="list-style-type: none"> ○ 모델 CERES-EBAF4.1로부터 산출된 북극(북위 60°이상)에서 지상 구름의 장파 복사강제력 및 구름 유형별 장파 복사 수치 조사 <ul style="list-style-type: none"> - 북극권(북위 60°이상)에서의 구름의 장파 복사강제력은 평균적으로 41.65 W m^{-2}로 나타남. - 구름이 많은 북대서양 부근(바렌츠-카라해)에서 약 50 W m^{-2}로 다른 지역들에 비해 다소 높음. - 구름의 장파 복사 효과는 6월에 최소(18년 평균 	100 %

	34.82 W m ⁻²)를 보였다가, 점차 증가하여 10월에 최대(18년 평균 50.06 W m ⁻²)를 보인 후 다시 감소하는 경향을 나타냄.	
--	--	--

다. 3차연도 정성적 성과

연구개발목표	달성내용	달성도
북극권 에어로졸과 구름의 장기변동 특성 조사 및 계절·경년 변동 특성 분석	<p>○ 아라온호에서 에어로졸 측정기(Aerosol sizing instrument) 관측자료에 기반한 북극 지역의 에어로졸 입자 수농도 등 광학적/물리적 특성 조사</p> <ul style="list-style-type: none"> - 북극에서 여름철 광학 반응으로 핵화 입자(freshly nucleated particle)가 많이 생성됨. - 응결(condensation)과 응고(coagulation) 작용이 적게 발생하면 작은 크기의 에어로졸이 오랫동안 유지돼 10 nm 크기의 에어로졸 수농도에 비해 2.5 nm 에서 10 nm 이하 크기의 작은 입자의 에어로졸이 더 많이 관측됨. <p>○ 위성(CALIPSO, CloudSat) 및 북극 지상 관측소 자료를 활용하여 북극에 유입된 에어로졸이 구름의 기하학적/미세물리적 특성 변화에 미치는 영향 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - 모든 계절에서 대체로 운정고도는 육지와 비교해 해양에서 낮은 값을 보였으며 여름철을 제외하고는 대체로 캐나다 북쪽 지역에서 운정고도가 4 km 내외로 선정됨. - 여름철에는 북대서양 지역에서 운정고도가 4 km 이하로 매우 낮은 반면 육지에서는 여름철에 운정고도가 가장 높았으며, 시베리아 지역에는 최대 9 km 내외의 높은 운정고도가 산출되기도 하였음. 	100 %
북극 지역 에어로졸(미세먼지)의 주요 발생원 및 중위도에서	<p>○ 한반도와 북극해 해상 구간 에어로졸 공간분포 특성 파악</p> <ul style="list-style-type: none"> - 공기과 이동의 경로는 발생지로부터 시작되어 한국, 일본, 러시아를 지나 북극으로 유입 또는 	100 %

북극 지역으로의 장거리 수송 영향 분석	<p>한반도와 북극해 구간 해상을 지나 북극으로 유입되는 경로를 보임.</p> <p>○ 북미, 러시아, 아시아 등 고위도 및 중위도 지역에서 북극 지역으로의 에어로졸 주요 유입경로 분석 및 기여도 산정</p>	
-----------------------	--	--

2. 정량적 성과

본 연구에서 구름 라이다, 운고계, 마이크로 라디오미터 관측자료를 활용하여 Ny-Ålesund(Svalbard) 지역에서의 겨울철 구름 미세물리적 특성 및 기단 이류와의 관계를 분석한 논문을 2021년 5월에 Remote sensing에 출판하였으며, 분석자료를 활용한 북극 구름 특성 및 복사 효과 논문을 2021년 9월에 Atmospheric Research에 출판하였다. 관측자료와 Polar WRF 모델 산출된 북극 구름의 미세물리적 특성 분석에 관한 연구를 투고하였다. 또한, 북극 구름의 미세물리적 특성에 따른 기후 모델의 복사량 변화 연구 등을 현재 준비하고 있다.

제 2 절 관련분야의 기술발전예의 기여도

본 연구에서는 태양 광도계, CDP, ACLOUD 항공 캠페인, 등 다양한 지상 및 위성 관측자료를 이용하여 데이터베이스를 구축하였고, 이를 통해 북극의 에어로졸과 구름의 계절 및 경년 변동 특성을 분석하였다. 또한, 이렇게 산출된 에어로졸과 구름의 특성과 대기 및 해양에 의해 전달되는 열 및 수증기량과의 상관관계를 살펴보았다. 또한, 극지방의 에어로졸 기후 영향 그리고 에어로졸, 대기복사, 해빙, 중위도 저위도의 대기 수송패턴 상호작용 등에 대한 분석을 진행하였다. 북극 지역 에어로졸 분포 특성과 구름의 장기변동 특성을 분석하며 북극 지역의 에어로졸의 주요 발생원을 확인하고 중위도에서 북극 지역으로의 장거리 수송 영향에 대한 기여도를 계산하였다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 추가연구의 필요성

본 연구에서는 북극 다산 과학기지(Ny-Ålesund)에서 지상 관측된 에어로졸과 구름의 특성의 시·공간 변화 특성 이해를 위해 다양한 지상 및 위성 원격 관측자료를 활용하였다. 현재까지 북극 지역의 에어로졸 및 구름 광학 및 변동 특성을 연구할 때 주로 연직 분포와 미세물리적 관계에 대해서만 분석을 수행하였다. 정확한 에어로졸과 구름의 상관관계를 파악하기 위해서는 지상과 위성 관측자료뿐만 아니라 기후 모델링 및 재분석 자료를 활용하여 부족한 자료 개수를 충당하여 북극 전 지역에서 나타나는 에어로졸-구름 상관관계 분석을 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 북극 지역의 에어로졸 및 구름 특성 이해 증진을 통해 대기모형 자료 동화 시스템 구축 및 북극 기후 인자와 한반도의 미세먼지 변동 예측에 대한 중요도 산정에 기여하였으며, 최종적으로는 북극 지역과 중위도 에어로졸과 상호관계 분석을 통해 모델의 복사 수치 모의 정확도를 향상시킬 필요가 있다.

제 2 절 타 연구에의 응용

본 연구에서는 지상 및 위성 원격 관측자료를 활용하여 북극 지역의 에어로졸과 구름의 장기 및 계절 변동 특성을 이해하고, 이를 바탕으로 중위도의 에어로졸 및 북극지방에서의 에어로졸-구름 상관관계 이해도를 높이는 연구를 진행하였다. 현재 모델은 구름을 모의하는 모수화 과정에서 북극 구름 및 에어로졸과의 상관관계 이해도 향상을 위해 본 연구의 결과를 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 이를 통해서 구름의 모의 과정이 개선되며, 향후 북극 지역 복사모델의 성능이 향상되고 지역 온난화에 따른 구름 변동 특성을 정확히 예측할 수 있을 것이다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

본 연구에서 활용된 북극 Ny-Ålesund 지역의 지상 관측 장비(태양 광도계)는 AERONET에서 운영 중인 장비들이며, 340-1020 nm 범위의 7개 스펙트럼 채널에서 직접적인 태양 및 하늘 복사를 측정하여 에어로졸 광학두께, 크기 분포, 단일 산란 알베도, 복사 굴절률 등의 관측자료를 산출하고 있다. 해당 정보를 통해 에어로졸의 특성을 파악할 수 있었다. Ny-Ålesund 제플린 관측소에 CDP 관측기기를 통해 구름 입자의 미세물리 특성을 분석하였으며, 흡입된 공기로 반출된 658 nm 레이저를 이용하여 구름 입자의 크기 분포, 수농도, 유효 직경, 액체수함량 등을 측정하고 있다. 뿐만 아니라 (AC)³ 프로젝트의 일환인 Cloudnet 지상 관측은 구름 수직 프로파일에 대한 지속적인 관측을 통해 예보 및 기후 모델에서 체계적인 구름 평가를 할 수 있는 기초 자료를 제공하고 있다. ACLOUD 항공관측자료도 해당 프로젝트의 일환으로서 북극 구름의 미세물리적 특성 이해를 높이기 위하여 진행되었다. 이 밖에도 위성 관측자료인 CALIPSO, MODIS는 NASA에서 제공하는 에어로졸 및 구름 관측자료이며 두 반구의 극지방에 대한 광범위한 일일 측정 범위의 자료를 제공하고 있다.



KOPRI
극지연구소

제 7 장 참고문헌

- Albrecht, B. A. (1989) Aerosols, cloud microphysics, and fractional cloudiness. *Science* 245(4923), 1227 - 1230. <https://doi.org/10.1126/science.245.4923.1227>
- AMAP (2017) Snow, water, ice and permafrost in the Arctic: Summary for policy makers. Oslo, Norway: Arctic Monitoring and Assessment Program (AMAP). <https://www.amap.no/documents/doc/snow-water-ice-and-permafrost-summary-for-policy-makers/1532>
- Arnold, S. R., Law, K. S., Brock, C. A., Thomas, J. L., Starkweather, S. M., von Salzen, K., Stohl, A., Sharma, S., Lund, M. T., Flanner, M. G., Petäjä, T., Tanimoto, H., Gamble, J., Dibb, J. E., Melamed, M., Johnson, N., Fidel, M., Tynkkynen, V.-P., Baklanov, A., Eckhardt, S., Monks, S. A., Browse, J., Bozem, H. (2016) Arctic air pollution: Challenges and opportunities for the next decade. *Elementa: Science of the Anthropocene* 4: 000104. <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000104>
- Breider, T. J., Mickley, L. J., Jacob, D. J., Ge, C., Wang, J., Sulprizio, P. M., Croft, B., Ridley, D. A., McConnell, J. R., Sharma, S., Husain, L., Dutkiewicz, V. A., Eleftheriadis, K., Skov, H., Hopke, P. K. (2017) Multidecadal trends in aerosol radiative forcing over the Arctic: Contribution of changes in anthropogenic aerosol to Arctic warming since 1980. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122(6), 3573-3594. <https://doi.org/10.1002/2016JD025321>
- Breider, T. J., Mickley, L. J., Jacob, D. J., Wang, Q., Fisher, J. A., Chang, R. Y.-W., Alexander, B. (2014) Annual distributions and sources of Arctic aerosol components, aerosol optical depth, and aerosol absorption. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 119(7), 4107-4124. <https://doi.org/10.1002/2013JD020996>
- 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. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1996\)009<1731:OOACAR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1996)009<1731:OOACAR>2.0.CO;2)
- Delanoë, J., Protat, A., Bouniol, D., Heymsfield, A., Bansemmer, A., Brown, P. (2007) The characterization of ice cloud properties from Doppler radar measurements. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(10), 1682-1698. <https://doi.org/10.1175/JAM2543.1>
- Ding, Q., Schweiger, A., L'Heureux, M., Battisti, D. S., Po-Chedley, S., Johnson, N. C., Blanchard-Wrigglesworth, E., Harnos, K., Zhang, Q., Eastman, R., Steig, E. J. (2017) Influence of high-latitude atmospheric

- circulation changes on summertime Arctic sea ice. *Nature Climate Change* 7, 289 - 295. <https://doi.org/10.1038/nclimate3241>
- Ehrlich, A., Wendisch, M., Lüpkes, C., Buschmann, M., Bozem, H., Chechin, D., Clemen, H.-C., Dupuy, R., Eppers, O., Hartmann, J., Herber, A., Jäkel, E., Järvinen, E., Jourdan, O., Kästner, U., Kliesch, L.-L., Köllner, F., Mech, M., Mertes, S., Neuber, R., Ruiz-Donoso, E., Schnaiter, M., Schneider, J., Stapf, J., Zanatta, M. (2019) A comprehensive in situ and remote sensing data set from the Arctic CLOUD Observations Using airborne measurements during polar Day (ACLOUD) campaign. *Earth System Science Data*, 11, 1853 - 1881. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1853-2019>
- Francis, J. A., Hunter, E. (2006) New insight into the disappearing Arctic sea ice. *EOS, Transactions American Geophysical Union* 87(46), 509 - 511. <https://doi.org/10.1029/2006EO460001>
- Frisch, S., Shupe, M., Djalalova, I., Feingold, G., Poellot, M. (2002) The retrieval of stratus cloud droplet effective radius with cloud radars. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 19(6), 835-842. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0835:TROSCD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0835:TROSCD>2.0.CO;2)
- Gagné, M.-È., Fyfe, J. C., Gillett, N. P., Polyakov, I. V., Flato, G. M. (2017) Aerosol-driven increase in Arctic sea ice over the middle of the twentieth century. *Geophysical Research Letters* 44(14), 7338-7346. <https://doi.org/10.1002/2016GL071941>
- Garrett, T. J., Radke, L. F., Hobbs, P. V. (2002) Aerosol effects on cloud emissivity and surface longwave heating in the Arctic. *Journal of the Atmospheric Sciences* 59(3), 769 - 778. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059<0769:AEOCEA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059<0769:AEOCEA>2.0.CO;2)
- Graversen, R. G., Mauritsen, T., Drijfhout, S., Tjernström, M., Mårtensson, S. (2011) Warm winds from the Pacific caused extensive Arctic sea-ice melt in summer 2007. *Climate Dynamics* 36, 2103 - 2112. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0809-z>
- Hara, K., Yamagata, S., Yamanouchi, T., Sato, K., Herber, A., Iwasaka, Y., Nagatani, M., Nakata, H. (2003) Mixing states of individual aerosol particles in spring Arctic troposphere during ASTAR 2000 campaign. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108(D7). <https://doi.org/10.1029/2002JD002513>
- Hartmann, J., Gehrman, M., Kohnert, K., Metzger, S., Sachs, T. (2018) New calibration procedures for airborne turbulence measurements and accuracy of the methane fluxes during the AirMeth campaigns. *Atmospheric Measurement Techniques* 11(7), 4567 - 4581. <https://doi.org/10.5194/amt-11-4567-2018>
- Heogh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I.,

- Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K. L., Engelbrecht, F., Guiot, J., Hijioka, Y., Mehrotra, S., Payne, A., Seneviratne, S. I., Thomas, A., Warren, R., Zhou, G. (2018) Impacts of 1.5°C of global warming on natural and human systems. In: Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. pp. 175 - 311. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- Hogan, R. J., Mittermaier, M. P., Illingworth, A. J. (2006) The retrieval of ice water content from radar reflectivity factor and temperature and its use in evaluating a mesoscale model (2006) *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 45(2), 301-317. <https://doi.org/10.1175/JAM2340.1>
- Hunt, W. H., Winker, D. M., Vaughan, M. A., Powell, K. A., Lucker, P. L., Weimer, C. (2009) CALIPSO Lidar description and performance assessment. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 26(7), 1214 - 1228. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1223.1>
- Illingworth, A. J., Hogan, R. J., O'connor, E. J., Bouniol, D., Brooks, M. E., Delanoë, J., Donovan, D. P., Eastment, J. D., Gaussiat, N., Goddard, J. W. F., Haeffelin, M., Klein Baltink, H., Krasnov, O. A., Pelon, J., Piriou, J.-M., Protat, A., Russchenberg, H. W. J., Seifert, A., Tompkins, A. M., van Zadelhoff, G. - J., Vinit, F., Willén, U., Wilson, D. R., 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. <https://doi.org/10.1175/BAMS-88-6-883>
- Law, K. S., Stohl, A., Quinn, P. K., Brock, C. A., Burkhardt, J. F., Paris, J.-D., Ancellet, G., Singh, H. B., Roiger, A., Schlager, H., Dibb, J., Jacob, D. J., Arnold, S. R., Pelon, J., Thomas, J. L. (2014) Arctic air pollution: New insights from POLARCAT-IPY. *Bulletin of the American Meteorological Society* 95(12), 1873 - 1895. <https://doi.org/10.1175/bams-d-13-00017.1>
- Levy, R. C., Mattoo, S., Munchak, L. A., Remer, L. A., Sayer, A. M., Patadia, F., Hsu, N. C. (2013) The Collection 6 MODIS aerosol products over land and ocean. *Atmospheric Measurement Techniques* 6(11), 2989 - 3034. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2989-2013>
- Lubin, D., Vogelmann, A. M. (2006) A climatologically significant aerosol longwave indirect effect in the Arctic. *Nature* 439, 453 - 456. <https://doi.org/10.1038/nature04449>
- Miles, N. L., Verlinde, J., Clothiaux, E. E. (2000) Cloud droplet size distributions in low-level stratiform clouds. *Journal of the Atmospheric*

Sciences 57(2), 295–311.
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057<0295:CDSDIL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057<0295:CDSDIL>2.0.CO;2)

- Mioche, G., Jourdan, O., Delanoë, J., Gourbeyre, C., Febvre, G., Dupuy, R., Monier, M., Szczap, F., Schwarzenboeck, A., Gayet, J.-F. (2017) Vertical distribution of microphysical properties of Arctic springtime low-level mixed-phase clouds over the Greenland and Norwegian seas. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17(20), 12845 - 12869.
<https://doi.org/10.5194/acp-17-12845-2017>
- Morrison, H., McCoy, R. B., Klein, S. A., Xie, S., Luo, Y., Avramov, A., Chen, M., Cole, J. N. S., Falk, M., Foster, M. J., del Genio, A. D., Harrington, J. Y., Hoose, C., Khairoutdinov, M. F., Larson, V. E., Liu, X., McFarquhar, G. M., Poellot, M. R., von Salzen, K., Shipway, B. J., Shupe, M. D., Sud, Y. C., Turner, D. D., Veron, D. E., Walker, G. K., Wang, Z., Wolf, A. B., Xu, K.-M., Yang, F., Zhang, G. (2009) Intercomparison of model simulations of mixed-phase clouds observed during the ARM Mixed-Phase Arctic Cloud Experiment. II: Multilayer cloud. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 135(641), 1003–1019.
<https://doi.org/10.1002/qj.415>
- Nomokonova, T., Ebell, K., Löhnert, U., Maturilli, M., Ritter, C. (2020) The influence of water vapor anomalies on clouds and their radiative effect at Ny-Ålesund. *Atmospheric Chemistry and Physics* 20(8), 5157–5173.
<https://doi.org/10.5194/acp-20-5157-2020>
- Nomokonova, T., Ebell, K., Löhnert, U., Maturilli, M., Ritter, C., 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.
<https://doi.org/10.5194/acp-19-4105-2019>
- Pasquier, J. T., David, R. O., Freitas, G., Gierens, R., Gramlich, Y., Haslett, S., Li, G., Schäfer, B., Siegel, K., Wieder, J., Adachi, K., Belosi, F., Carlsen, T., Decesari, S., Ebell, K., Gilardoni, S., Gysel-Beer, M., Henneberger, J., Inoue, J., Kanji, Z. A., Koike, M., Kondo, Y., Krejci, R., Lohmann, U., Maturilli, M., Mazzolla, M., Modini, R., Mohr, C., Motos, G., Nenes, A., Nicosia, A., Ohata, S., Paglione, M., Park, S., Pileci, R. E., Ramelli, F., Rinaldi, M., Ritter, C., Sato, K., Storelvmo, T., Tobo, Y., Traversi, R., Viola, A., Zieger, P. (2022) The Ny-Ålesund Aerosol Cloud Experiment (NASCENT): Overview and first results. *Bulletin of the American Meteorological Society* 103(11), E2533–E2558.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0034.1>
- Pierce, J. R., Adams, P. J. (2009) Can cosmic rays affect cloud condensation nuclei by altering new particle formation rates? *Geophysical Research Letters* 36(9), L09820. <https://doi.org/10.1029/2009GL037946>

- Pithan, F., Mauritsen, T. (2014) Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature Geoscience* 7, 181 - 184. <https://doi.org/10.1038/ngeo2071>
- Powell, K. A., Hostetler, C. A., Vaughan, M. A., Lee, K.-P., Trepte, C. R., Rogers, R. R., Winker, D. M., Liu, Z., Kuehn, R. E., Hunt, W. H., Young, S. A. (2009) CALIPSO Lidar calibration algorithms. Part I: Nighttime 532-nm parallel channel and 532-nm perpendicular channel. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 26(10), 2015-2033. <https://doi.org/10.1175/2009JTECHA1242.1>
- Previdi, M., Smith, K. L., Polvani, L. M. (2021) Arctic amplification of climate change: A review of underlying mechanisms. *Environmental Research Letters* 16, 093003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1c29>
- Sand, M., Berntsen, T. K., Seland, Ø., Kristjánsson, J. E. (2013) Arctic surface temperature change to emissions of black carbon within Arctic or mid-latitudes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118(14), 7788 - 7798. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50613>
- Schmale, J., Zieger, P., Ekman, A. M. L. (2021) Aerosols in current and future Arctic climate. *Nature Climate Change* 11, 95-105. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00969-5>
- Schmeisser, L., Andrews, E., Ogren, J. A., Sheridan, P., Jefferson, A., Sharma, S., Kim, J. E., Sherman, J. P., Sorribas, M., Kalapov, I., Arsov, T., Angelov, C., Mayol-Bracero, O. L., Labuschagne, C., Kim, S.-W., Hoffer, A., Lin, N.-H., Chia, H.-P., Bergin, M., Sun, J., Liu, P., Wu, H. (2017) Classifying aerosol type using in situ surface spectral aerosol optical properties. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(19), 12097-12120. <https://doi.org/10.5194/acp-17-12097-2017>
- Screen, J. A., Simmonds, I. (2010) Increasing fall-winter energy loss from the Arctic Ocean and its role in Arctic temperature amplification. *Geophysical Research Letters* 37(16), L16707. <https://doi.org/10.1029/2010GL044136>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.03.004>
- Shindell, D., Faluvegi, G. (2009) Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. *Nature Geoscience* 2, 294 - 300. <https://doi.org/10.1038/ngeo473>
- Stohl, A. (2006) Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 111(D11). <https://doi.org/10.1029/2005JD006888>
- Tjernström, M., Leck, C., Birch, C. E., Bottenheim, J. W., Brooks, B. J., Brooks, I. M., Bäcklin, L., Chang, R. Y.-W., de Leeuw, G., Di Liberto, L., de la Rosa, S.,

- Granath, E., Graus, M., Hansel, A., Heintzenberg, J., Held, A., Hind, A., Johnston, P., Knulst, J., Martin, M., Matrai, P. A., Mauritsen, T., Müller, M., Norris, S. J., Orellana, M. V., Orsini, D. A., Paatero, J., Persson, P. O. G., Gao, Q., Rauschenberg, C., Ristovski, Z., Sedlar, J., Shupe, M. D., Sierau, B., Sirevaag, A., Sjogren, S., Stetzer, O., Swietlicki, E., Szczodrak, M., Vaattovaara, P., Wahlberg, N., Westberg, M., Wheeler, C. R. (2014) The Arctic Summer Cloud Ocean Study (ASCOS): Overview and experimental design. *Atmospheric Chemistry and Physics* 14(6), 2823 - 2869. <https://doi.org/10.5194/acp-14-2823-2014>
- Tunved, P., Ström, J., and Krejci, R. (2013) Arctic aerosol life cycle: Linking aerosol size distributions observed between 2000 and 2010 with air mass transport and precipitation at Zeppelin station, Ny-Ålesund, Svalbard. *Atmospheric Chemistry and Physics* 13(7), 3643 - 3660. <https://doi.org/10.5194/acp-13-3643-2013>
- Twomey, S. (1977) The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds. *Journal of Atmospheric Sciences* 34(7), 1149 - 1152. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1977\)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1977)034<1149:TIOPOT>2.0.CO;2)
- Wang, W., Huang, J., Minnis, P., Hu, Y., Li, J., Huang, Z., Ayers, J., K., Wang, T. (2010) Dusty cloud properties and radiative forcing over dust source and downwind regions derived from A-Train data during the Pacific Dust Experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 115(D4). <https://doi.org/10.1029/2010JD014109>
- Warneke, C., Bahreini, R., Brioude, J., Brock, C. A., de Gouw, J. A., Fahey, D. W., Froyd, K. D., Holloway, J. S., Middlebrook, A., Miller, L., Montzka, S., Murphy, D. M., Peischl, J., Ryerson, T. B., Schwarz, J. P., Spackman, J. R., Veres, P. (2009) Biomass burning in Siberia and Kazakhstan as an important source for haze over the Alaskan Arctic in April 2008. *Geophysical Research Letters* 36(2), L02813. <https://doi.org/10.1029/2008GL036194>
- Wendisch, M., Brückner, M., Burrows, J. P., Crewell, S., Dethloff, K., Ebell, K., Lüpkes, C., Macke, A., Notholt, J., Quaas, J., Rinke, J., Tegen, I. (2017) Understanding causes and effects of rapid warming in the Arctic. *Eos* 98. <https://doi.org/10.1029/2017EO064803>
- Wendisch, M., Macke, A., Ehrlich, A., Lüpkes, C., Mech, M., Chechin, D., Dethloff, K., Velasco, C. B., Bozem, H., Brückner, M., Clemen, H., Crewell, S., Donth, T., Dupuy, R., Ebell, K., Egerer, U., Engelmann, R., Engler, C., Eppers, O., Gehrman, M., Gong, X., Gottschalk, M., Gourbeyre, C., Griesche, H., Hartmann, J., Hartmann, M., Heinold, B., Herber, A., Herrmann, H., Heygster, G., Hoor, P., Jafariserajehlou, S., Jäkel, E., Järvinen, E., Jourdan, O., Kästner, U., Kecorius, S., Knudsen, E. M.,

- Köllner, F., Kretzschmar, J., Lelli, L., Leroy, D., Maturilli, M., Mei, L., Mertes, S., Mioche, G., Neuber, R., Nicolaus, M., Nomokonova, T., Notholt, J., Palm, M., van Pinxteren, M., Quaas, J., Richter, P., Ruiz-Donoso, E., Schäfer, M., Schmieder, K., Schnaiter, M., Schneider, J., Schwarzenböck, A., Seifert, P., Shupe, M. D., Siebert, H., Spreen, G., Stapf, J., Stratmann, F., Vogl, T., Welti, A., Wex, H., Wiedensohler, A., Zanatta, M., Zeppenfeld, S. (2019) The Arctic cloud puzzle: using ACLOUD/PASCAL multiplatform observations to unravel the role of clouds and aerosol particles in Arctic amplification. *Bulletin of American Meteorological Society*. 100(5), 841 - 871. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0072.1>
- Yamanouchi, T. (2019) Arctic warming by cloud radiation enhanced by moist air intrusion observed at Ny-Ålesund, Svalbard. *Polar Science* 21, 110-116. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.10.009>
- Yang, X.-Y., Fyfe, J. C., Flato, G. M. (2010) The role of poleward energy transport in Arctic temperature evolution. *Geophysical Research Letters* 37(14), L14803. <https://doi.org/10.1029/2010GL043934>
- Yeo, H., Park, S.-J., Kim, B.-M., Shiobara, M., Kim, S.-W., Kwon, H., Kim, J.-H., Jeong, J.-H., Park, S. S., 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). <https://doi.org/10.1080/16000889.2018.1450589>
- Zhao, X., Huang, K., Fu, J. S., Abdullaev, S. F. (2022) Long-range transport of Asian dust to the Arctic: Identification of transport pathways, evolution of aerosol optical properties, and impact assessment on surface albedo changes. *Atmospheric Chemistry and Physics* 22(15), 10389-10407. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10389-2022>

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.