

남극 기후 환경 변화 이해와
전지구 영향 평가

Understanding of Antarctic climate and environment
and assessments of global influence



2023. 02. 28

한국해양과학기술원
부설 극지연구소



제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “남극 기후 환경 변화 이해와 전지구 영향 평가”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2023. 02. 28

연구책임자 : 김성중

참여연구원 : 최용한, 박상중, 최태진, 전상윤,
김주홍, 정의석, 박기태, 윤영준,
박지연, 홍상범, 이방용, 김정현,
박기홍, 김연태, 최혜선, 이솔지,
이수봉, 이민희, 이지연, 김유진,
강효진, 서원석, 장은호, 안서희,
배효준, 오민기, 김정훈, 황혜원,
장지이, 오건호

위탁연구기관명 : 이화여자대학교, 연세대학교
북경사범대학교

위탁연구책임자 : 이지이, 구자호, 루이마오



보고서 초록

과제관리번호	BSPE22030-051-12	해당단계 연구기간	2020.01.01. ~ 2022.12.31.	단계 구분	1단계 / 3단계
연구사업명	중 사업명	기관연구사업			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	남극 기후 환경 변화 이해와 전지구 영향 평가			
연구책임자	김성중	해당단계 참여연구원수	총 : 46 명 내부 : 33 명 외부 : 13 명	해당단계 연구비	정부: 2,740,000 천원 기업: 천원 계: 2,740,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 / 대기연구본부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 말레이시아, 미국, 아일랜드 상대국연구기관명 : NARC, 오하이오 주립대, ENEA				
위탁연구	연구기관명 : 이화여자대학교, 연세대학교, 북경사범대학교 연구책임자 : 이지이, 구자호, 루이마오				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	391 pp
<p>○ 연구목표</p> <p>- 목표 : 남극의 극한기상/기후 변화 특성 파악 및 남극의 기후변화가 전지구에 미치는 영향 평가</p> <p>○ 연구내용</p> <ul style="list-style-type: none"> - 남극 극한기상 특성 진단 - 남극 성층권 오존 및 라돈 농도 변화 특성 파악 - 남극 및 남반구 고위 기후변화 변동성 탐지 - 남극 대기 에어로졸 물리화학 특성 현장 관측 - 남극 에어로졸 발생 프로세스 파악 <p>○ 주요 연구 성과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 남극의 극한 기상 특성 및 변동성 평가 결과 - 남극 성층권 대기 순환과 오존 간의 지역별 및 시간적 상호 작용 특징 제시 - 남극의 기후변화 경향 분포도 및 전지구에 미치는 영향 피드백 관계 개념도 - 세종과학기지 기반 에어로졸 현장관측 DB 구축 및 이를 통한 에어로졸 형성 특성 규명 <p>○ 연구개발결과의 활용 계획</p> <ul style="list-style-type: none"> - 남극의 기후 환경 변화가 남극의 극한 기상 뿐 아니라 전지구 기상/기후 변화에 미치는 영향 파악을 통해 전지구 기후에서 남극의 중요성 제고에 활용 - 성층권 오존 농도의 회복추세 정량화를 통한 미래 남극 기후 예측에 활용 - 남극 기후변화 진단을 통한 동남극 용빙의 가속화 시기 판단에 활용 - 저농도 기후물질 분석 기술을 활용한 국내 미세먼지 분석 기술 향상 - 남극 에어로졸 물리화학 특성 장기간 DB 축적을 통한 기후변화 연구 기초 자료 공유 					
색인어 (각 5개 이상)	한글	남극, 기후변화, 극한기상, 에어로졸, 대기환경, 전지구 영향			
	영어	Antarctica, Climate Change, Extreme Weather, Aerosol, Atmosphere environment, Global Influence			



요 약 문

I. 제 목

- 남극 기후 환경 변화 이해와 전지구 영향평가

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 목적

(1) 남극의 극한기상(강풍, 저온, 폭설) 특성 진단

- 남극 기지 기상관측자료 및 수치모델링 실험을 기반으로 강풍, 저온, 폭설 등 주요한 극한기상현상의 발생 특성 파악
- 미래 극한기상 발생 변화 예측을 위한 기반 구축

(2) 남극 성층권 오존 및 지상 라돈 농도 시공간 변동 특성 파악

- 성층권 오존과 남극/남반구 기후변화 간 상호 미치는 영향 규모 이해를 위한 기상 요소 및 대기순환에 대한 성층권 오존의 반응성 규명
- 기후변화에 대한 대기순환 변화의 영향 평가를 위한 대기 라돈 가스 관측 기반 남극과학기지 주변 대기 수송과정 파악

(3) 남극 및 남반구 고위도 지역 기후변동성 진단

- 남극 지역 기후 변동성 탐지 및 변동성 지수 개발
- 남극 및 남반구 고위도 지역 기후변동성간 상관 메커니즘 분석

(4) 남극 에어로졸 물리화학 특성 현장 관측 및 에어로졸 발생 프로세스 파악

- 에어로졸 물리특성 및 화학특성 시계열 변화 DB 구축
- 에어로졸 발생 모사실험을 통한 극지 에어로졸 형성 기작 파악
- 초고분해능질량분석기를 활용한 남극 해양, 육상, 해빙 유기물 특성 정밀 분석

- 필요성

- 극지역의 강한 온난화와 더불어 극한기상의 발생빈도가 증가할 것으로 예상되고 있고 극한기상은 인간에게 큰 피해를 초래할 뿐만 아니라 기후적 관점에서는 남극 빙권 변화에 영향을 줄 수 있음. 따라서 미래 남극 및 전지구 기후환경의 변화 예측을 위해 남극 극한기상의 특징을 연구할 필요가 있음.
- 동서 남극의 서로 다른 기후변화 과정의 원인이 성층권 오존 농도 감소에 의해 남극 주변을 순환하는 기류의 강화로 이해되고 있기 때문에 2000년 이후

회복 중인 성층권 오존이 남극/남반구 기후변화에 미치는 영향에 대한 선제적 연구가 필요함.

- 극지 기후변화에 대해 대기 순환장의 변화가 큰 역할을 하지만, 남극 지역을 대상으로 대기대순환모델 결과 간의 큰 차이를 보여 대기수송연구에 활용되는 대기 라돈을 이용하여 모델 개선이 필요함.
- 남극부터 적도까지 남반구 지역 대기, 해양, 지면의 여러 기후요소는 밀접한 상호 영향하에 급격한 기후변화를 겪고 있음.
- 이중 대기 순환과 관련된 기후 변화는 표층 기온과 관련된 기후변화 보다 덜 이해된 상태이며, 특히, 극지 대류권과 성층권 순환에서 관찰된 변화의 원인과 그 과정을 이해하는 것은 미래 남극 기후변화에 예측에 매우 중요함.
- 대기 중 에어로졸은 태양빛을 흡수·산란하고 구름 형성에 기여함으로써, 지구 지표로 유입되는 태양빛을 직간접적으로 차단하는 냉각효과에 기여함. 세종과학기지가 위치한 남극반도는 기후변화가 급격하게 일어나고 있으며, 이 지역의 급격한 환경변화(해빙감소, 육빙수 증가, 해양생물 변화 등)는 다양한 자연 기원 에어로졸의 발생 변화를 유발할 수 있음.
- 해양생물 및 육상생물에 의해 생산된 생물기원 가스 및 용존성 유기물은 남극 대기로 방출된 후 주요 에어로졸 구성물질로 작성할 수 있으며, 유기물의 화학적 특성에 따라 에어로졸 형성 기여도 및 광학특성에 상이한 영향을 미침. 환경변화에 따른 남극 에어로졸의 기후피드백 기능을 정확히 이해하고 평가하기 위해서는 에어로졸의 물리화학 특성에 관한 장기적인 현장 관측과 환경모사 실험을 통한 에어로졸 형성 기작에 대한 이해가 필요함.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

- 남극 극한기상 특성 진단
 - 세종기지 32년 장기 기상자료 기반으로 강풍, 저온, 폭설 현상의 상위 10% 극한기상 사례를 추출하고 각 극한기상 종류별 발생 시기, 강도, 평균적인 중관장의 특징 및 발생시기의 경년변동 분석
 - 추출한 강풍, 저온, 폭설 극한기상 사례에 대해, 중규모 수치모형을 이용한 수치모의를 수행하고 극한기상 현상별 특성과 원인 분석
- 남극 성층권 오존 및 지상 라돈 농도 시공간 변동 특성 파악
 - 남극과학기지에서 운영 중인 브루어 분광광도계와 오존존데를 이용한 오존전량 및 연직 오존 분포 자료 구축 및 분석
 - 브루어 분광광도계 관측과 다양한 위성 자료 간의 비교하여 위성 관측된 오존전량 및 연직 오존 농도 프로파일의 신뢰성 파악
 - 성층권 오존량의 변화를 이해하기 위해 대류권과 성층권 각 층을 정밀하게 구분하고 정량적인 오존량 변화의 특징 및 원인 이해

- 남극세종 및 장보고과학기지에서의 대기 라돈 관측 및 변동 특성 분석
- 세종기지의 고농도 라돈 가스 발생 사례에 대해 대기화학수송모델과 역궤적 모델을 이용한 대기 수송과정 이해
- 장보고기지의 고농도 라돈 가스 발생 사례에 대해 역궤적 모델을 이용한 대기 수송과정 이해
- 남극 및 남반구 고위도 기후변동성 진단
 - 남극 대륙 지역의 표층온도 변화, 남극 지역의 해빙, 해수면온도와 남반구 지역 대기 및 해양의 주요 변동성 등의 특성 및 상관기작 분석
 - 장기 관측자료 수집과 머신러닝 기반 격자 자료 생성 방안의 개발을 통한 남극대륙 지역 표층대기온도 복원 자료 생산
 - 장기 기후 자료와 수치모형 실험을 통한 남극, 남반구 고위도 지역 기후변동성간 상관 특성 및 메커니즘 진단
- 남극 대기 에어로졸 물리화학 특성 현장 관측
 - 세종과학기지 기반 에어로졸 물리특성(입자수농도, 구름응결핵, 블랙카본 등) 시계열 변화 DB 구축
 - 세종과학기지 기반 에어로졸 화학특성(주요이온, HULIS) 시계열 변화 및 생물 유래 기후가스 DB 구축
 - 아라온 기반 남극 대기 에어로졸 물리특성 현장 관측
 - 국제공동연구를 통한 남극 에어로졸 흡습성 변화 관측
- 남극 에어로졸 발생 프로세스 파악
 - 남극 에어로졸 발생 모사 실험 수행
 - 초고분해능질량분석기를 활용한 남극 환경시료 유기물 특성 분석
 - 생물기원 에어로졸 전구물질 분석 기술개발

IV. 연구개발결과

- 남극 극한기상 특성 진단
 - 세종기지 32년 관측자료DB 기반으로 추출한 상위 10% 극한기상현상의 강도는 강풍사례는 일평균풍속 12.3m/s, 일최고순간풍속 27.8m/s 이상일 때로 나타났다으며, 저온사례는 일평균기온 -8.1°C , 일최저기온 -11.4°C 이하일 때, 고온사례는 일평균기온 2.3°C , 일최고기온 4.7°C 이상일 때였음. 일신적설량을 기준으로 한 폭설사례는 10.4cm 이상일 때였음.
 - 극한기상 발생시기는 강풍사례는 6-10월 동계에 60% 이상 발생하고 12-2월 하계에는 10% 미만으로 적게 발생하였으며 경년변동성에서는 2010년도 초반 이후 강풍사례가 감소하고 있는 추세를 보임. 저온사례는 6-8월에 70% 이상 집중되어 있고 강풍사례와 유사하게 2010년대 초반 이후 감소 추세를 보이고 있음. 적설량은 변동성이 매우 큰데 눈에 띄는 경향은 2000년대 중반 이전에

비해 이후에는 매우 큰 경년변동성을 보이고 있음.

- 강풍 사례의 경우, 세종기지 부근에 저기압이 통과하면서 발생하며, 일평균 풍속을 기준으로 선정된 사례에서는 동풍, 그리고 일최대풍속을 기준으로 선정된 사례에서는 북풍 계열이 우세함. 일최대풍속을 기준으로 선정된 사례에서는 저기압 외에, 세종기지 부근의 지형이 강풍 발생에 기여함을 확인함.
 - 저온 사례의 경우, 남극 대륙으로부터의 차가운 공기의 이류가 발생 원인이며, 수치모의 결과에서, 세종기지 부근의 구름과 관련된 하향장파복사를 관측에 비해 과소모의하면서 음의 온도 편차가 나타남.
 - 폭설 사례의 경우, 세종기지 부근을 통과하는 저기압, 세종기지로의 수증기 유입, 그리고 사례에 따라서는 세종기지 부근의 지형이 중요한 역할을 함. 이상 고온 사례의 경우, 대기의 강 현상에 의해 상당량의 수증기가 유입되면서 상향장파복사에 의한 냉각을 억제하여 나타남.
- 남극 성층권 오존 및 지상 라돈 농도 시공간 변동 특성 파악
- 세종 및 장보고 기지의 브루어 분광광도계의 장기간 자료를 세밀하게 분석함으로써 남극 지역 봄철에 나타나는 뚜렷한 오존량 감소에 대한 근거 확보함.
 - 신뢰도가 높은 장기간 오존 관측 자료를 남극 전 지역에 대해 구축하고 분석을 통해 일반적인 연중 오존 변화 및 기후 경년 변동과의 관련성 파악함.
 - 남극세종과학기지와 장보고기지에서의 라돈 검출기 연중 90% 이상 운영 및 DB 구축함.
 - 남극세종과학기지의 동계기간 고농도 라돈 가스 사례는 장거리 수송에 의해, 남극장보고과학기지의 하계기간 고농도 라돈 가스 사례는 지역적인 특징으로 분석됨.
- 남극 및 남반구 고위도 기후변동성 진단
- 기계학습 기반 Kriging 내삽 방안을 개발하고 확보된 기지 관측자료와 ERA-Interim 자료를 활용하여 1961년부터 2020년까지의 60년간의 남극대륙 월평균 지상온도를 복원함.
 - 복원된 자료의 연평균, 계절평균 변동성 및 장기 추세를 조사하고 기존에 보고되었던 서남극 지역의 강한 온난화 추세를 확인함.
 - EOF와 CBF 방법을 활용하여 남극대륙 지면온도 변화 특성을 탐지하는 두 가지 변동 지수를 개발함.
 - 남극대륙 지면온도 변동 지수와 남반구 지역의 Southern Annual Mode (SAM), Pacific-South America 1 (PSA-1), Pacific-South America 2 (PSA-2) 등의 주요 대기 변동성과의 상관성 계수 특성을 조사하고 남반구 지역 바람, 온도, 지위 고도와의 회귀상관성 분석을 수행하여 남반구 지역의 기후요소간 상관성 관계를 진단함.

- 남반구 대류권 및 성층권 오존 자료를 수집하고 오존의 대기순환장, 남극지 면변동 모드, SAM, PSA-1, PSA-2의 남반구 기후요소와의 상관성 분석을 수행하여 남반구 오존 변동 특성을 파악하고 남반구 기후시스템에의 영향에 대한 모식도를 작성함.
- 남극 전지역 연평균, 계절평균 해빙 변화의 SAM, PSA-1, PSA-2 등의 기후변동 모드와의 상관성을 분석하고 주요 관계 분포 모식도를 작성함.
- 최근 남극지역 해빙 증가 경향을 분석하여 적도지역의 Interdecadal Pacific Oscillation (IPO)와 Atlantic Multidecadal Variability (AMV) 등의 장주기 변동성의 영향이 존재함을 확인함.
- 남극지역의 주요 변동성과 적도지역의 변동성을 고려한 남극 및 남반구 지역의 기후변화 특성에 대한 모식도를 작성함.
- 남극 대기 에어로졸 물리화학 특성 현장 관측
 - 남극 세종과학기지 기반 에어로졸 물리화학특성 (입자수농도, 구름응결핵, 블랙카본 등) 관측 자료에 관한 장기간 DB를 확보 하였으며, 이를 바탕으로 남극 에어로졸의 계절별 발생 특성을 파악함.
 - 생물기원기후가스 현장 분석자료를 위성자료 기반 해양, 해빙 환경변화 자료와 결합하여 기원지 특성 및 해양생산성, 일년빙 분포 변화가 생물유래 에어로졸 입자 형성에 미치는 영향을 파악함.
- 남극 에어로졸 발생 프로세스 파악
 - 남극 세종과학기지 현장에서 확보한 다양한 환경 시료를 활용하여 자연유래 에어로졸 발생 모사실험을 수행하였으며, 이를 통해 해양 및 육상 기원 에어로졸 형성 프로세스를 파악함.
 - 초고분해능질량분석기를 활용한 남극 해양, 육상, 해빙에 분포하는 다양한 유기물의 특성을 분석함.

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극 극한기상 현상 사례선정 및 특성분석 결과를 바탕으로 기후변화에 따라 남극에서 극한기상 현상의 발생빈도와 발생강도가 어떠한 변동성을 보이고 있는지 장기적 관점에서 분석하고 미래 극한기상 발생 변화 예측에 활용할 예정
- 남극 성층권 오존의 변화와 대기 대순환과의 상관성을 파악하고, 기후 지표보다 더 세밀한 남반구 전체 기후 변동 요소에 대해 오존량 변화와의 관계를 탐색에 활용
- 남극과학기지 주변 기후변화에 대한 대기순환 과정 변화의 역할 이해에 활용
- 남극 및 남반구 고위도 기후변동성 진단
 - 생산된 장기간의 월평균 남극 지면온도 자료와 관련 기계학습 기반 복원 기술은 남극 지역의 장기 기후변동성의 심화연구에 활용할 예정임

- 남극대륙 지면온도, 해빙 등 기후요소와 적도 및 남반구 지역의 기후요소의 상관특성은 남극 및 남반구 지역의 기후변화 예측과 영향 진단에 활용할 계획임.
- 남극 자연유래 에어로졸의 기후 피드백 역할 규명
 - 남극 에어로졸 물리화학 특성에 관한 장기간 DB 구축을 통해 기후변화 연구 기초자료로 활용
 - 에어로졸 관측 기술 고도화 및 선진화를 통해 국제공동 연구 활성화



S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

- Understanding of Antarctic climate and environment and assessments of global influence

II. Objectives and Necessities of R&D

○ Objectives

(1) Characteristics of Antarctic extreme weather events

- To identify the occurrence characteristics of major extreme weather phenomena such as strong winds, low temperatures, and heavy snow based on the Antarctic station meteorological observation data and numerical modeling experiments
- To establish the basis for predicting changes in future extreme weather events

(2) To investigate the characteristics of stratospheric ozone and Radon concentration over Antarctica

- To understand how changes in the recovering stratospheric ozone affect climate change in Antarctica
- To evaluate the response of stratospheric ozone to atmospheric circulation and meteorological factors to understand the scale of interaction between stratospheric ozone and Antarctic/Southern Hemisphere climate change
- To identify atmospheric transport processes based on radon gas measurements over Antarctic stations to understand the impact of changes in atmospheric circulation on climate change

(3) To diagnose climate variability in Antarctica and the Southern Hemisphere

- To detect climate variability in the Antarctic region and development of the representative indices

- (4) To observe long-term variation of aerosols in Antarctic atmosphere
 - To measure physical properties of aerosols including size distribution, number concentration of particles, black carbon, and cloud condensation nuclei
 - Field observation of biogenic trace gases (including dimethyl sulfide) and chemical properties of aerosol particles
- (5) Identifying processes controlling atmospheric aerosol formation
 - To characterize aerosol formation and growth processes by chamber experiments
 - To analyse the chemical property of organic matters dissolved in Antarctic seawater, sea-ice, snow using ultra-high resolution mass spectrometry

○ **Necessities**

- It is expected that the frequency of extreme weather will increase along with strong warming in the polar region, and extreme weather will not only cause great damage to humans, but can also affect changes in the Antarctic cryosphere. Therefore, it is necessary to study the characteristics of Antarctic extreme weather events to predict changes in the future Antarctic and global climate environment.
- Since the Montreal Protocol, stratospheric ozone concentration over Antarctica has been recovered. Thus, we need to understand how changes in the recovering stratospheric ozone affect climate change in Antarctica, and need to evaluate the response of stratospheric ozone to atmospheric circulation and meteorological factors to understand the scale of interaction between stratospheric ozone and Antarctic/Southern Hemisphere climate change
- Since the Antarctic stations are supposed to be clean and not polluted , we need to identify atmospheric transport processes based on radon gas measurements over Antarctic stations. This is to understand the impact of changes in atmospheric circulation on climate change
- Various climatic factors of the atmosphere, ocean, and land surface in the Southern Hemisphere have experienced rapid climate change under mutual influences.

- Climate change related to atmospheric circulation is less well understood than climate change related to surface temperature. In particular, understanding the causes and processes of observed changes in atmospheric circulation is very important for predicting future Antarctic climate change.
- We need to evaluation of natural aerosol-climate feedbacks in Antarctic through field observation of physiochemical properties of aerosol at King Sejong Station to understand seasonal and interannual variation of climate-relevant aerosol particles in pristine Antarctic atmosphere
- Molecular characteristics of organic matters using ultra-high resolution mass spectrometry to evaluate the link between airborne particles and those potential source origin

III. Contents and Extent of R&D

- Characteristics of Antarctic extreme weather events
 - Based on 32-year meteorological data of the King Sejong Station, top 10% cases of extreme weather events such as strong wind, low temperature, and heavy snow were extracted, and the time of occurrence, intensity, characteristics of average synchronicity, and interannual variation of occurrence time for each type of extreme weather were analyzed.
 - For selected extreme weather cases (i.e., strong wind, low temperature, and heavy snowfall), numerical simulations were conducted to investigate characteristics and causes of three-category extreme weather phenomena, using a mesoscale model.
- Investigation for the characteristics of stratospheric ozone and Radon concentration over Antarctica Stratosphere
 - Correlation Analysis between meteorology-atmospheric processes and total ozone and ozone profiles by using measurements at Antarctic stations, satellite data, and reanalysis data
 - Measurements of radon gas at Antarctic King Sejong and Jang Bogo stations and its analysis on the atmospheric transport processes to the station with aid of back trajectory and CAM-Chem models
- Diagnosis of high-latitude climate variability in Antarctica and the

Southern Hemisphere

- Analysis of characteristics and correlation mechanisms, such as changes in surface temperature in Antarctica, sea ice and sea surface temperature in the Antarctic surrounding region, and major variability of the atmosphere and ocean in the Southern Hemisphere
- Production of surface air temperature reconstruction data in Antarctica based on long-term observation data by developing a machine learning-based kriging method
- Diagnosis of relationship characteristics and mechanisms between climate variability in Antarctica and southern hemisphere high latitudes through long-term climate data and climate model experiments
- Long-term field observation of aerosols in Antarctic atmosphere
 - Continuous measurements of physical properties of aerosols including size distribution, number concentration of particles, black carbon, and cloud condensation nuclei
 - Field observation of biogenic trace gases (including dimethyl sulfide) and chemical properties of aerosol particles
- Identifying processes controlling atmospheric aerosol formation
 - Characterization of aerosol formation and growth processes by chamber experiments
 - Analysis of the chemical property of organic matters dissolved in Antarctic seawater, sea-ice, snow using ultra-high resolution mass spectrometry

IV. R&D Results

- Characteristics of Antarctic extreme weather events
 - The intensity of the top 10% extreme weather events selected from the 32-year observation data of the King Sejong Station was found to be the daily average wind speed was 12.3 m/s and daily maximum instantaneous wind speed were 27.8 m/s or more for strong wind cases; the daily average temperature. When the daily minimum temperature was below -11.4°C at -8.1°C, the high temperature case was when the daily average temperature was 2.3°C and the daily maximum temperature was above 4.

7°C. The case of heavy snow based on the daily snowfall was when it was 10.4 cm or more.

- Cyclones passing the King Sejong Station can induce pressure gradient force, which finally leads to strong wind events at the King Sejong Station. When strong-wind cases are selected based on daily-average-wind observations, easterly is dominant; when the cases are selected based on daily-maximum-wind observations, northerly is dominant. Topography near the King Sejong Station can contribute to strong wind occurrence when the cases selected based on daily-maximum-wind observations are considered.

- Strong cold advection from Antarctic Continent results in low temperature at the King Sejong Station. Results of numerical simulations have cold biases near the King Sejong Station due to underestimation of cloud and associated downward longwave radiation.

- Three main causes for heavy snowfall over the King Sejong Station are cyclones, moisture transport to the King Sejong Station, and topography near the King Sejong Station. Unprecedented high-temperature event over East Antarctica in March 2022 is attributed by transport of warm and moist air, which is usually called “atmospheric river”.

- Investigation for the characteristics of stratospheric ozone and Radon concentration over Antarctica Stratosphere

- Understanding of the mechanisms for the marked reduction in ozone in the springtime of Antarctica based on detailed analysis of the long-term data of the Brewer spectrophotometer at Sejong and Jang Bogo stations

- Construction of reliable long-term ozone zone observations across Antarctica and their analysis and identification of the characteristics of typical year-round ozone changes and climate fluctuations

- Operation of radon detectors at the Antarctic King Sejong Station and Jang Bogo Station more than 90% of the year and establishment of DB.

- Identification of the causes for high concentration radon gas during the winter period of the Antarctic King Sejong Station as long-distance transport, and high concentration radon gas during the summer period of

the Antarctic Jang Bogo Station as regional characteristics.

- Diagnosis of high-latitude climate variability in Antarctica and the Southern Hemisphere
 - Development of a machine learning-based Kriging interpolation method and reconstruct monthly surface temperature in Antarctica for 60 years from 1961 to 2020 using the station observation data and ERA-Interim reanalyses.
 - Investigation of the annual and seasonal mean variability and long-term trend of the Antarctic surface temperature reconstruction and examine the strong warming trend in the West Antarctic region.
 - Development of the characteristics of surface temperature change in Antarctica using EOF and CBF methods
 - Examination of correlation coefficients between the Antarctic surface temperature indices and major atmospheric variabilities such as Southern Annual Mode (SAM), Pacific-South America 1 (PSA-1), and Pacific-South America 2 (PSA-2) in the southern hemisphere
 - Investigation and diagnosis for the relationship between climate factors in the southern hemisphere by using a regression analysis with temperature, wind, and geopotential in the southern hemisphere
 - Investigation of the relationship between ozone and Antarctic surface temperature indices, SAM, PSA-1, and PSA-2, to identify the characteristics of ozone fluctuations in the southern hemisphere and climate in the southern hemisphere
 - Analyzation of correlations between climate modes such as SAM, PSA-1, and PSA-2 of the annual and seasonal mean sea ice change in the entire Antarctic region, and develops a schematic diagram of the distribution of significant relationships.
 - analyze the recent trend of increasing sea ice in the Antarctic region and confirm the effects of long-term variabilities such as Interdecadal Pacific Oscillation (IPO) and Atlantic Multidecadal Variability (AMV) in the equatorial region on the recent change in Antarctic sea ice
 - Development of a schematic diagram of the characteristics of climate change in Antarctica and the southern hemisphere, considering the major

variability in the Antarctic and equatorial regions

- Long-term field observation of aerosols in Antarctic atmosphere
 - Molecular-level chemical characterization of dissolved organic matter in the ice shelf system of King George Island, Antarctica to identify the characteristics of dissolved organic matter (DOM) in the ice shelf systems, surface water was collected from the open sea (OS) and Marian cove (fjord, FJ).
 - Although there were no differences in DOM characteristics between sampling sites in the quantitative analyses, the DOM in the surface water of each region seemed to be more affected by terrestrial than marine biological sources in optical and molecular properties.
 - This finding indicates that the terrestrial DOM related to mosses based on the results of molecular properties.
 - When comparing the FJ transect samples, those nearest to a glacier (FJ1; 0.93 km from the glacier) showed relatively low salinity, high dissolved organic carbon, and high chromophoric DOM, indicating that terrestrial DOM (possibly produced by moss) inflow occurred with the runoff from the freshly melting land ice and glacier.
- Identifying processes controlling atmospheric aerosol formation
 - Linking biogenic sulfur aerosols and first-year ice in the Antarctic Peninsula, dimethyl sulfide (DMS, biogenic gas produced by marine phytoplankton), its oxidation products, and aerosols were measured in the Antarctic atmosphere.
 - Emission and oxidation of DMS were highly source region dependent. DMS emission was associated with the abundance of DMS producers in source regions. However, DMS oxidation was primarily affected by atmospheric BrO levels in source regions.
 - Heterogeneous chemical processes that actively occur over first-year sea ice tend to accelerate the release of bromine monoxide (BrO), which is the most efficient DMS oxidant in Antarctica. Model estimates for surface BrO confirmed that high BrO mixing ratios were closely associated with first-year sea ice,
 - Thus, we could conclude that first-year sea ice accelerates particle

formation by acting as DMS and BrO source.

V. Application Plans of R&D Results

- Characteristics of Antarctic extreme weather events
 - Based on the results of case selection and characterization of Antarctic extreme weather events, we plan to apply for prediction of future changes in extreme weather event including the variability of the frequency and intensity of extreme weather events in Antarctica according to climate change from a long-term perspective
- Investigation for the characteristics of stratospheric ozone and Radon concentration over Antarctica Stratosphere
 - Utilization of the results of the stratospheric ozone characteristics, we will apply to better understand the influences of the change in atmospheric circulation on the climate change in Antarctica and the Southern Hemisphere
- Diagnosis of high-latitude climate variability in Antarctica and the Southern Hemisphere
 - The long-term monthly mean Antarctic surface temperature data and related machine learning-based reconstruction methods will be used for in-depth research on long-term climate variability in the Antarctic region. Secondly, characteristics of the relationships among climatic factors such as surface temperature and sea ice in Antarctica and atmospheric and oceanic variabilities in the adjacent regions are planned to be used for predicting climate change and diagnosing impacts in the Antarctic, and even the globe.
- Understanding climate roles of aerosol particles in Antarctica
 - Usage in predicting the importance of biogenic organics in formation and growth of climate relevant aerosol particles and cloud formation in a changing Antarctic environment.
 - Establishment of international collaboration program for aerosol-climate studies.

C O N T E N T S

Chapter 1 Introduction	1
Section 1. Objective of the study	3
Section 2. Necessity of the study	13
Chapter 2 Current R&D Status in Korea and Other Nations	19
Section 1. Domestic	21
Section 2. Abroad	22
Chapter 3 R&D Implementation Contents and Results	25
Section 3.1. Characteristics of Antarctic extreme weather events	27
Section 3.2. Investigation for the characteristics of stratospheric ozone and Radon concentration over Antarctica Stratosphere	86
Section 3.3 Diagnosis of high-latitude climate variability in Antarctica and the Southern Hemisphere	213
Section 3.4. Long-term field observation of aerosols in Antarctic atmosphere	300
Section 3.5 Identifying processes controlling atmospheric aerosol formation	341
Chapter 4 Degree of R&D Goal Achievement and Degree of Contribution to Outside Research Institute	361
Chapter 5 Application Plans of R&D Results	375
Chapter 6 References	381



목 차

제 1 장 서론	1
1.1 연구개발의 목적	3
1.2 연구개발의 필요성	13
제 2 장 국내외 기술개발 현황	19
2.1 국내 기술개발 현황	21
2.2 국외 기술개발 현황	22
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	25
3.1 남극의 극한기상(강풍, 저온, 폭설) 특성 진단	27
3.2 남극 성층권 오존 및 지상 라돈 농도 시공간 변동 특성 파악	86
3.3 남극 및 남반구 고위도 기후변동성 진단	213
3.4 남극 대기 에어로졸 물리화학 특성 현장 관측	300
3.5 남극 에어로졸 발생 프로세스 파악	341
제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외기여도	361
4.1 연차별 연구개발 목표 및 달성도	363
4.2 대외 기여도	373
제 5 장 연구개발 결과 활용계획	375
제 6 장 참고문헌	381



The image features a large, light blue watermark logo for KOPRI (Korea Ocean Policy Research Institute). The logo consists of the acronym 'KOPRI' in a bold, sans-serif font, with a stylized globe or wave pattern behind it. Below the acronym, the Korean text '극지연구소' (Korea Polar Research Institute) is written in a smaller, similar font. The watermark is centered on the page and serves as a background for the main title.

제 1 장 서론

극지연구소



제 1 장 서론

1.1 배경 및 필요성

- 2015년 파리기후협약에 의해 전지구 온도상승을 산업혁명 이전의 2도 이하로 낮추기로 하였지만 지구 온난화에 의해 최근 빈번하게 발생하는 전지구적 이상 기후로 인해 전지구 평균기온을 1.5도 이하로 낮추기로 합의하였다.
- 극지역은 눈과 얼음으로 덮여 있어 지구온난화에 다른 지역에 비해 더 크게 반응하여 극지역 온난화 증폭이라 하는데, 북극은 기존의 예상대로 온난화가 전지구 평균보다 2-3배 빠르게 일어나며 해빙도 줄고 빙하도 급격히 줄어들어 추세에 있다.

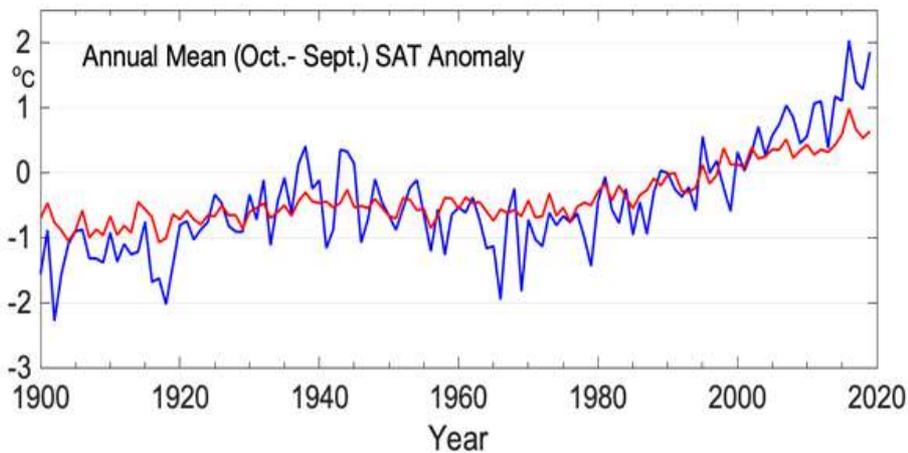


Fig. 1.1. 전지구 평균 (붉은색)과 북극 (파란색) 지면기온 편차
(Overland et al., Arctic Report Card, 2019)

- 하지만 남극은 예상과 달리 온실가스 증가에 대해 남극은 동서남극의 온난화정도가 매우 다른데, 서남극은 온난화가 빠르게 일어나며 해빙도 줄고 빙하도 많이 녹아내리고 있는 추세인데 반해, 동남극은 온도 변화가 거의 없고 해빙과 빙하도 약간 증가 추세에 있다.

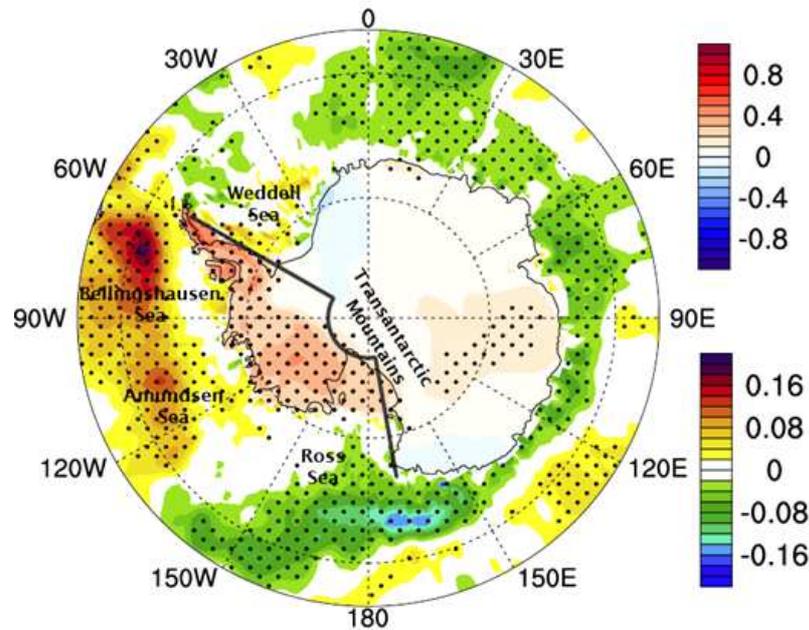


Fig. 1.2. 1958년부터 2012년까지 복원된 남극 지면기온과 해면 수온 편차

- 대기 순환과 관련된 기후 변화는 기온과 관련된 기후변화 보다 덜 이해된 상태이며, 특히, 극지 대류권과 성층권 순환에서 관찰된 변화의 원인과 그 과정을 이해하는 것은 미래 남극 기후변화에 예측에 매우 중요하다.
- 동서 남극이 이와 같이 다르게 반응하는 원인은 성층권 오존농도 감소에 의해 남극 주변을 순환하는 기류가 강해졌기 때문으로 이해되고 있는데, 1990년대 초반 몬트리올 의정서에 의해 성층권 오존과괴물질 사용 제한으로 2000년 이후 성층권 오존은 서서히 회복 중에 있다.
- 1970년대와 1990년대 사이 빠른 오존 파괴 기간 형성된 오존홀은 봄철에 약 6 K 냉각 및 관련된 극 소용돌이 속도를 5-6 m/s 증가시켜 오존 농도 변화가 성층권 대기 순환에 영향을 미친다.
- 온실기체로 인한 전지구 온난화와 관련된 성층권 하부의 냉각화는 겨울철의 보다 낮은 기온으로 인해 극 성층권 구름 발생을 증가시켜 성층권 오존의 완전한 회복은 되지 못할 수도 있다.
- 성층권 오존 농도의 거의 회복은 봄철 극 소용돌이의 최근 변화와 반대되는 현상을 일으킬 것으로 예상되나, 정확한 오존 회복 속도와 최종 면적 그리고 극 소용돌이 변화의 역전이 21세기 지상 기후 변화에 미치는 결과를 전망하는 여러 기후 모델에서 다르게 나타나며, 특히, 성층권 오존 회복이 미래 예상되는 온실가스 농도 증가로

인한 제트의 극향 이동을 어느 정도까지 상쇄할 지는 모델에 상당한 불확도가 있다.

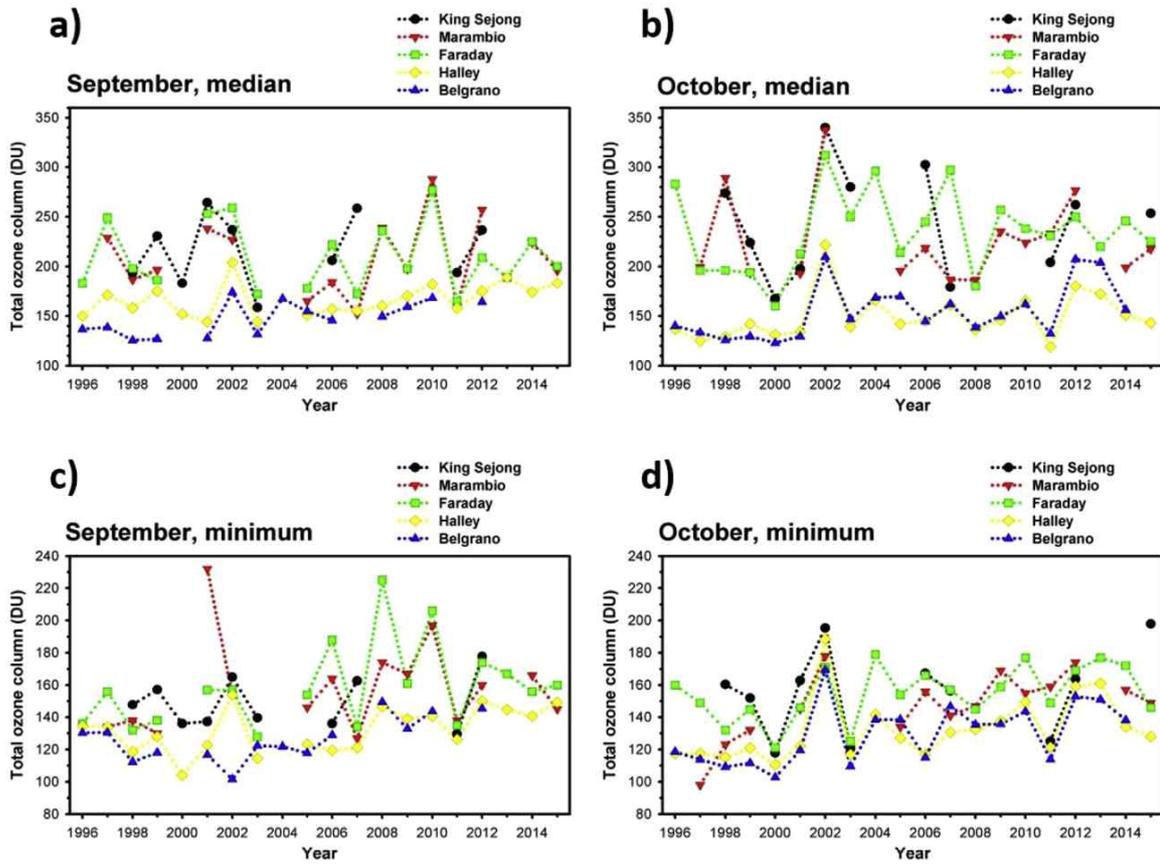


Fig. 1.3. 세종기지과 남극반도의 기지와 인공위성으로 관측된 성층권 오존 농도 시간 변화 (Koo et al., Atmosphere Environment, 195, 78-88, 2018)

- 라돈 가스는 지각으로부터 발생하는 대표적인 자연 핵종으로 남빙양과 남극에서 관측되는 라돈 가스는 중위도 대륙지역에서 고위도 지역으로의 대기수송 과정을 이해하기 위한 대기추적자로 활용이 가능하며, 현재 대기화학수송모델을 활용한 남극권의 대기라돈가스의 계절농도 변동 특성에 대한 모의 연구가 활발히 진행 중이다.

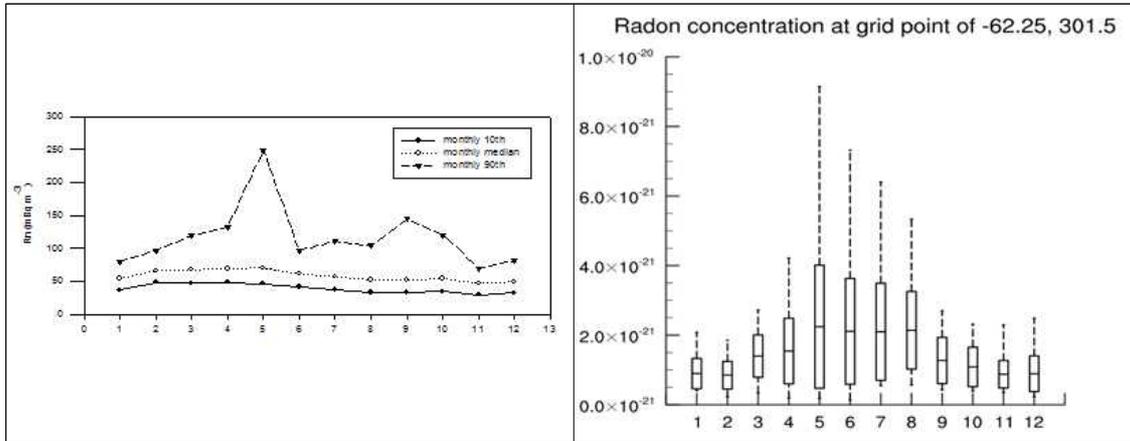


Fig. 1.4. 월별 라돈농도 변동 특성

- 그리고 지구온난화와 더불어 기지주변에선 최근 극한 기상이 빈번히 발생하고 있고 강설량의 패턴도 변화하고 있어 기지 안전 뿐 아니라 남극이 전지구에 미치는 영향과악의 원인을 밝힐 필요가 있다.
- IPCC 1.5도 특별보고서(IPCC, 2018)에서는 지구평균온도가 0.5℃ 상승한 동안 일부 극한 기상현상의 강도와 빈도가 변화했다는 연구들이 제시됨. 예측모델을 이용해 1.5℃ 상승 및 2.0℃ 상승한 경우에 고온 현상이나 폭우, 가뭄 등 극한현상의 위험성 증가 가능성이 중간 또는 높은 동의수준으로 예측되고 있다. 온도 2도 상승시 물부족, 식량부족, 홍수 위험 노출, 폭염 위험 등 경고. 이는 대부분 극한기상에 의한 재해이다. 우려요인-2(RFC2: 극한기상현상)에 의한 추가영향 및 리스크 수준이 증가할 수 있다고 경고한다.
- IPCC 해양빙권특별보고서(IPCC, 2019)에서는 21세기에 온난화에 따라 강한 엘니뇨, 라니냐 현상의 발생빈도가 증가할 것으로 예상되고 있다(B2.6 in SPM of IPCC SROCC, 2019). 이러한 현상은 원격상관을 통해 남극 기후에도 영향을 주기 때문에 남극에서도 극한 기상/기후를 유발할 가능성이 존재한다.
- Wei et al. (Environmental Research Letters, 084040, 2019)은 남극 기상관측소 관측 자료를 분석하여, 지역에 따른 차이가 크지만, 킹 조지 섬 등 남극의 일부 지역에서는 최근 15년 (1999-2013년) 동안 저온과 고온 현상 발생일 수가 증가하는 경향을 보임을 제시한다.

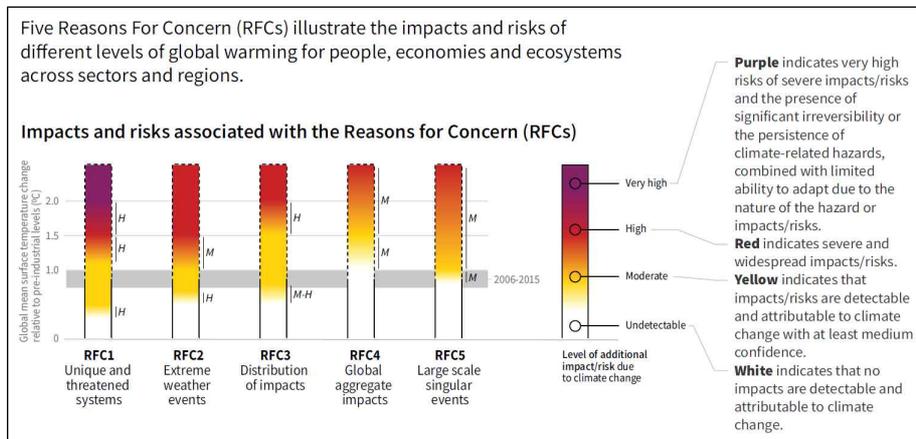


Fig. 1.5. 지구온난화에 따른 우려요인 및 위험도 평가 (IPCC SR1.5, 2019)

○ 에어로졸에 의한 기후피드백 연구의 중요성

- 대기 중 에어로졸은 다양한 화학 물질로 이루어져 있으며, 전지구적인 냉각화(음의 복사강제력)에 기여한다. 하지만, 기후변화 예측 연구에 있어 대기 에어로졸에 의한 전지구적 복사강제력 변화에 대한 불확실성이 상당히 높다(IPCC 6차 보고서).
- 특히, 에어로졸에 의한 복사강제력은 에어로졸의 발생 형태 및 구성에 따라 큰 차이를 보이기 때문에, 에어로졸에 의한 기후피드백 효과를 정확히 이해하기 위해서는 에어로졸의 물리·화학적 특성에 대한 장기적인 관측이 필요하다.
- 에어로졸의 생성 및 구름 입자 크기로의 성장과정은 [(i) 해양, 해빙 및 육상 기원의 다양한 전구물질의 발생, (ii) 복잡한 1차, 2차 에어로졸 생성기작, (iii) 에어로졸에 의한 구름 형성] 다양한 환경요소의 영향을 받으므로, 지역적·계절적 특성 변화가 크게 나타난다. 이에 에어로졸의 기후적 기능을 평가하기 위해서는 장기 관측 자료의 축적과 함께 에어로졸 생성에 관한 프로세스 연구(모사실험)가 필요하다.
- 에어로졸의 복사강제력에 대한 불확실성에 있어서 자연적인 방출, 인위적인 방출, 그리고 에어로졸 프로세스들 간의 기여도를 분석한 결과 자연적인 방출에 의한 에어로졸의 복사강제력의 불확실성이 가장 높게 나타난다(Carshaw et al., 2013).
- 지구 지표면의 71% 가량을 차지하는 해양은 자연적인 에어로졸 형성에 있어서 매우 중요한 기원지로 작용함. 해양 에어로졸은 해염(sea-salt), 유기물(organiacs) 등으로 구성된 입자의 직접적인 방출과 dimethyl sulfide (DMS), isoprene, 그리고 nitrate와 같은 휘발성 유기 화합물들의 가스-입자 상변환에 의해 이차적으로 형성될 수 있다. 대기 중 에어로졸 입자들의 화학 조성과 크기는 구름응결핵과 빙정핵으로써 작용하기

위한 구름 내 얼음 결정과 물방울들의 형성을 얼마나 효율적으로 촉진할 수 있는지를 결정한다(Fitzgerald 1973). 따라서, 해양 에어로졸들의 형성과 구름 형성 과정들을 촉진하는데 있어서 이들의 경향에 대한 이해는 기후 모델 내에서 에어로졸과 관련된 주요한 불확실성을 해소하기 위하여 반드시 요구되는 부분이다.

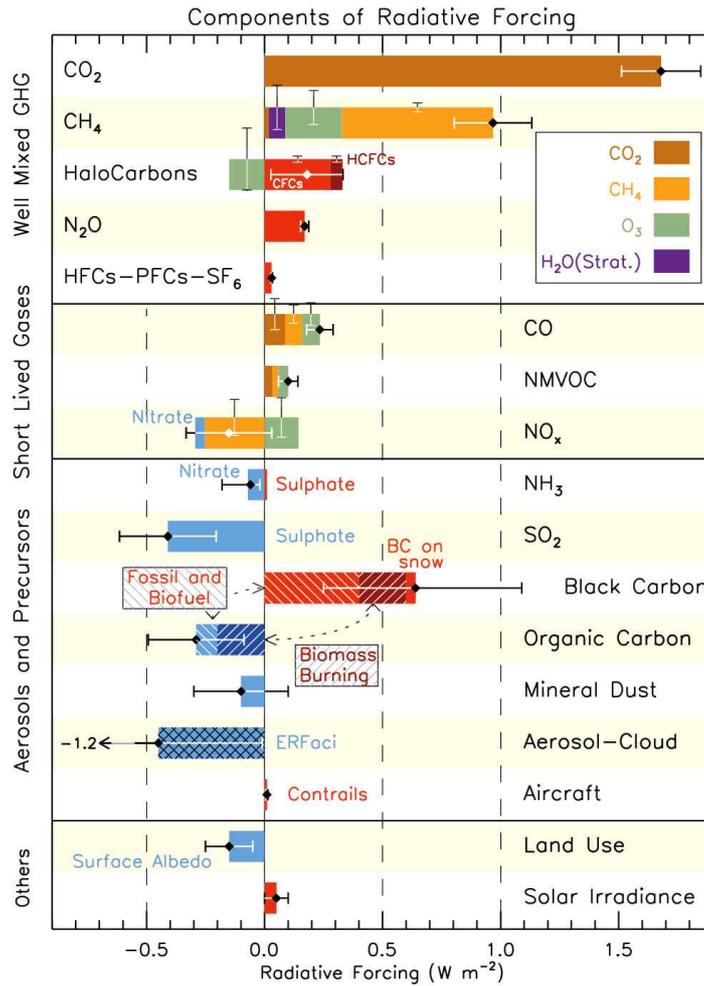


Fig. 16. 주요 대기구성물질에 의한 지구 복사 강제력 변화 (IPCC 6차 보고서)

○ 해양생물기원 물질에 의한 에어로졸 생성 및 성장

- 남극해는 영양염 농도가 높은 해양 저층수의 용승으로 인해 높은 일차생산량을 보일 뿐만 아니라 생물기원 기후냉각물질(DMS)의 발생량이 월등히 높은 식물플랑크톤(Prymnesiophytes)의 우점도가 높은 지역이기 때문에, 해양 일차생산자의 성장이 활발히 일어나는 봄, 여름철 표층해수의 DMS 농도가 세계적으로 가장 높게 나타난다.
- 해양 표층의 복잡한 생물 반응 과정을 통해 생성된 DMS는 대기로 방출되어 산화

과정을 통해 황화염 에어로졸의 형성에 기여하며, 이는 구름응결핵 (cloud condensation nuclei)의 주요 성분으로 작용함. 해양 생물에 의해 발생하는 DMS는 에어로졸 및 구름의 형성에 기여하며 이를 통해 지구에 도달하는 태양 복사 에너지를 줄이는 역할을 할 수 있기 때문에 인위적인 이산화탄소 방출로 인한 지구 온난화와는 반대로 자연적인 지구 냉각화가 가능 할 것으로 예측된다(Charlson et al., 1987).

- 하지만 기후 변화에 따른 DMS의 발생량 변화 및 기후변화 피드백 기작에 대한 과학적 증거는 부족한 실정이다(Quinn and Bates, Nature, 2011). 특히, 기후변화에 따른 해양환경 변화가 해양생물기원 DMS 발생량을 증가 또는 감소시킬 것인지 그리고, DMS의 증가 또는 감소가 대기 중 에어로졸 및 구름응결핵의 형성에 어떠한 기능을 할 것인지에 대한 현장 관측 자료 기반 증거 자료가 극히 부족하다.
- 북대서양에서 계절별 에어로졸 입자의 물리화학 특성을 분석한 결과, 인근 해양의 생물활성도가 낮은 겨울철에는 전체 에어로졸 입자의 유기물 함량 비율이 15%에 불과 했지만, 인근 해양의 생물량이 급격히 증가한 봄철에는 전체 에어로졸 입자 중 유기물이 차지하는 비율이 63%로 크게 증가하였다. 이는 해양 식물플랑크톤의 생산력 변화가 해양 에어로졸 입자 내의 유기물 함량을 결정하는 주요한 요인으로 작용함을 의미한다. 또한 해양 생물의 생산력이 극히 낮은 겨울철에도 해양 에어로졸의 유기물 함량이 일정 수준 이상으로 나타나는 점을 고려할 때 난분해성(refractory) 용존 유기물이 해양 에어로졸 내 총 유기물의 일정 부분에 기여한다는 것을 의미한다(O'Dowd et al., 2004).
- 위성 관측(MODIS, SeaWiFS, AIRS, SSM/I 그리고 CERES)을 기반으로 한 분석 결과에 따르면 식물성플랑크톤으로부터 기인한 isoprene과 DMS와 같은 미량 가스의 대기 방출은 남반구 여름철 기간 동안 남반구의 광범위한 위도 범위 내의 구름 특성에 주요한 영향을 미치는 것으로 밝혀진다. 특히 남위 45-65도 범위 내 위치한 남극해에서 클로로필 농도가 약 0.2 mg/m³ 증가함에 따라 단위 면적당 구름응결핵 수가 약 3.0×10^8 CCN/cm² 가량 증가한 것으로 분석되었으며, 이는 cloud droplet effective radius의 감소, cloud optical thickness의 증가와 더불어 대기권 상부에서의 상향 단파 복사의 교환을 증가시켰다(Krüger¹ and Graß, 2011).

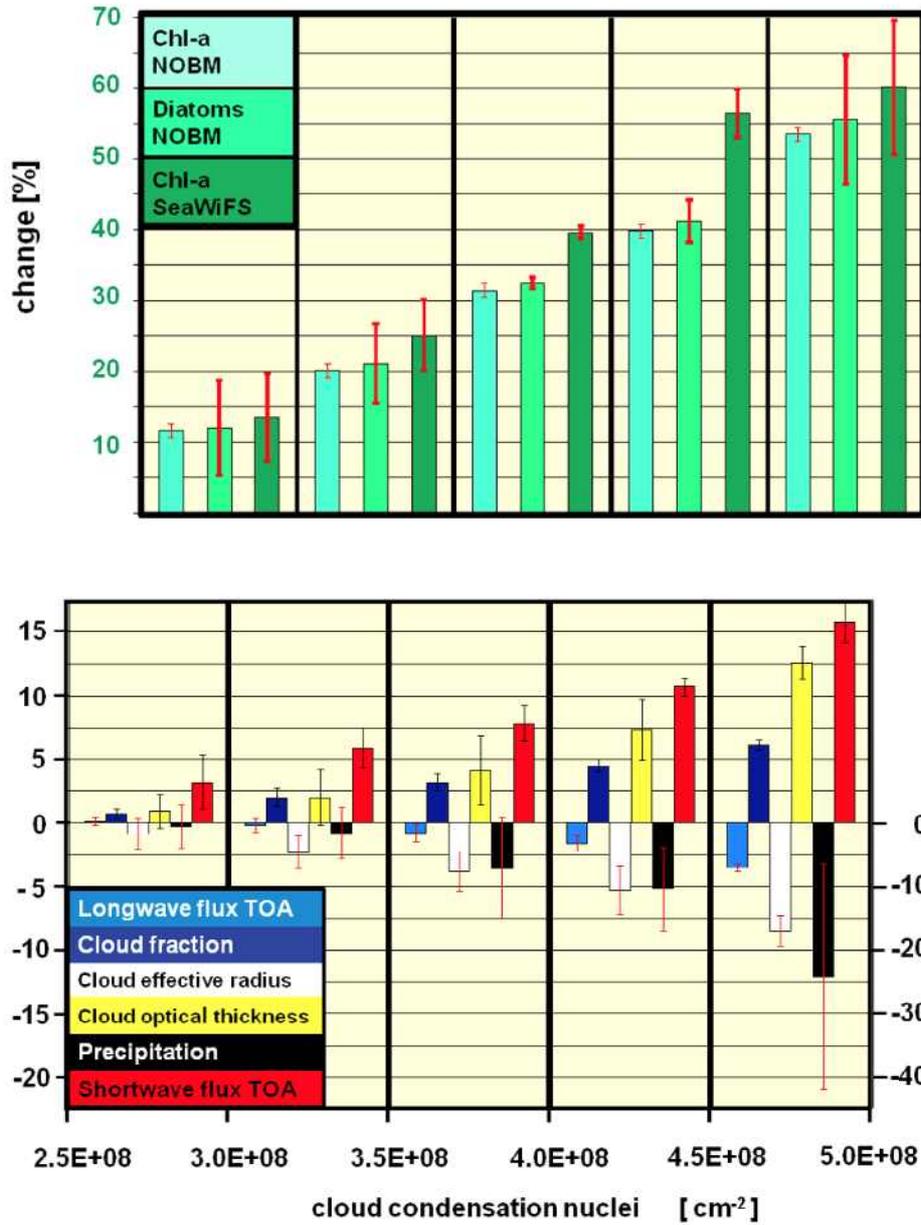


Fig 17. 위성 관측자료를 통한 남반구 해양 식물플랑크톤 특성 변화 (상) 및 대기 구름 주요 특성 변화 (하)

- 최근 스페인 연구팀은 위성 자료 기반의 알고리즘을 통해 북극해의 장기간(1998~2016년) 표층 DMS 농도 변화를 추정하였다. 북극해의 전체 DMS 배출량이 지난 20년간 빠르게 증가하고 있으며 동시에 위도별 큰 차이를 보인다. 북위 70-85도 지역의 여름철 DMS 배출량은 13.3 Gg S decade⁻¹로 증가한 반면, 북위 60-70도 지역의 여름철 DMS 배출량은 -5.4 Gg S decade⁻¹의 속도로 감소하였다. 또한 북극 여름철 얼음의 분포 면적과 DMS 배출량 사이의 선형관계를

여름철 북극 얼음의 분포 면적이 0인 경우로 외삽한 결과 DMS 배출량은 현재 수준에 비해 2.4배 정도 증가할 것으로 추정된다(Gali et al., 2019). 하지만, 남극해의 DMS 배출량 변화 또는 DMS 변화에 따른 대기 에어로졸 형성 변화에 대한 정량적인 연구는 전무하다.

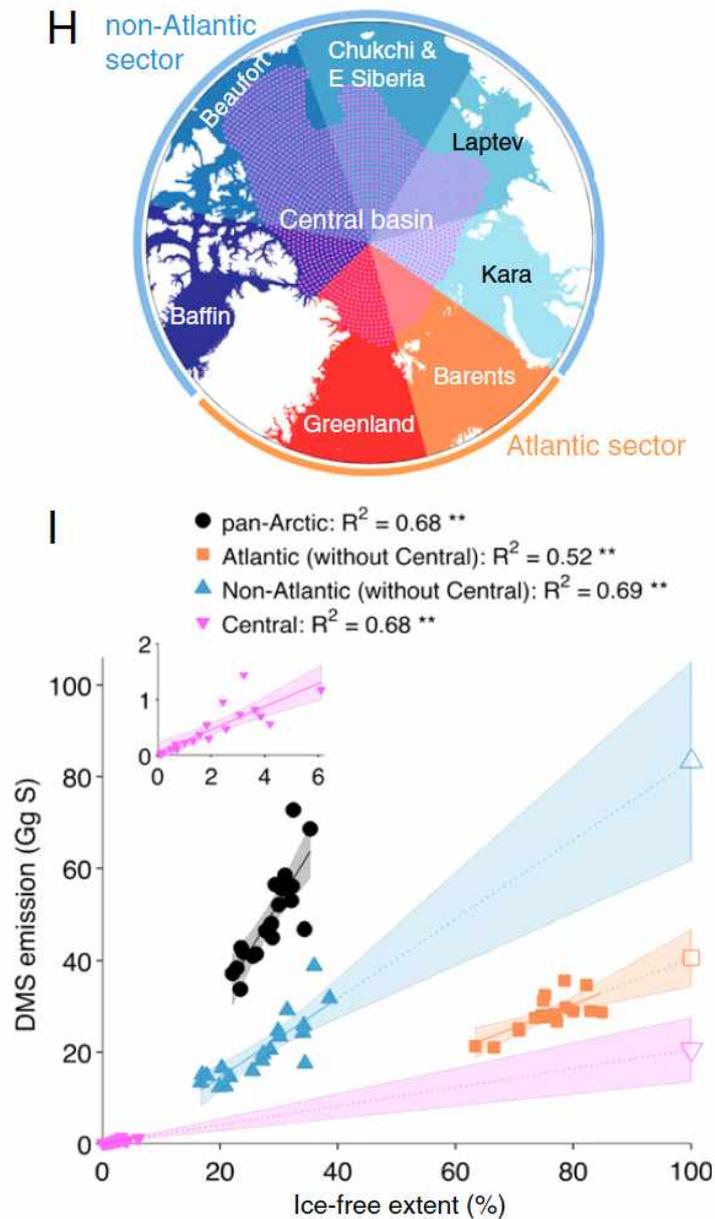


Fig. 1.8. 북극 해역별 해빙 면적 변화가 DMS 발생량 변화에 미치는 영향

○ 남극 에어로졸 연구의 필요성

- 극지역은 전 지구적 기후변화에 대하여 가장 민감한 반응을 나타내는 곳으로 알려져 있으며, 온난화로 인한 극지역의 해빙 면적, 용빙수 유입 변화 등은 극지 해양/육상 생태계에 눈에 띄는 변화를 야기함과 동시에 대기와 접하는 해양의 표면적을 증가시키고 해빙 및 육빙의 전체 면적을 감소시킴으로써 다양한 생지화학적 물질순환을 변화시킬 것으로 추정되고 있다.
- 기후변화에 따른 극지역의 생지화학적 물질순환 변화는 극지 자연기원 에어로졸 입자들의 물리화학적 특성 및 생성-성장 기작 변화를 야기시킬 수 있다.
- 남극 에어로졸의 생성-성장 변화가 기후변화에 미치는 영향에 대한 개선된 평가를 위해서는 장기적 현장 관측 자료의 확보와 더불어 해양생물, 해빙/육빙, 육상생물 특성 등과 같은 주요 환경 요인 변화에 의한 에어로졸 형성 모사 연구가 필요하다.
- 동·서 남극은 뚜렷이 다른 기후변화 양상을 보이고 있으며, 기후변화에 의한 환경변화가 남극의 자연 기원 에어로졸 생성-성장에 미치는 영향을 파악하기 위해서 세종기지(서남극), 장보고기지(동남극) 기반 에어로졸 물리·화학적 특성 동시 관측 연구가 필요하다.
- 기존의 세종과학기지 에어로졸 물리 관측 시스템을 근간으로 새롭게 개발한 기후조절물질 분석 기술을 접목하고, 남극 기반 기후조절물질 관측지를 확장(장보고, 아라온) 함으로써, 극지 에어로졸 연구에 대한 창의적 선도연구 수행이 가능하다.

1.2 목적 및 연구 범위

1.2.1 연구 개발 목표

- 남극기지의 극한기상 (강풍, 저온, 폭설) 특성 진단
 - 남극기지의 극한기상 (강풍, 저온, 폭설) 사례분석
 - 수치모델 활용 남극 극한기상 재현 및 원인 파악
- 남극 성층권 오존 및 지상 라돈 농도 시공간 변동 특성 파악
 - 남극기지기반 성층권 오존농도의 기후학적 변동 특성 파악과 대기순환 관계 분석
 - 인프라 기반 남극 대기 라돈 농도 시공간 변동성 비교 분석
- 남극의 극한 기상/기후 변화 특성 파악 및 남극의 기후변화가 전지구에 미치는 영향 평가
 - 지구온난화에 대한 남극의 극한 기상과 기후변화 특성 파악
 - 남극의 극한 기상과 기후변화가 전지구에 미치는 영향 기작 파악
- 남극 에어로졸 현장 관측 및 모사실험을 통한 기후피드백 기작 평가
 - 남극 에어로졸의 물리·화학특성 관측 및 모사실험을 통한 입자의 생성-성장-구름형성 과정 규명
 - 남극 환경 변화가 에어로졸 및 구름형성에 미치는 영향 및 극지 기후시스템간의 피드백 평가
- 남극의 극한 기상 특성 및 변동성 평가 결과
- 남극의 기후변화 경향 분포도 및 전지구에 미치는 영향 피드백 관계
- 세계 최장기 남극 대기 에어로졸 현장 관측 DB 구축

1.2.2 연구 개발 내용 및 범위

- 남극기지의 극한기상 (강풍, 저온, 폭설) 특성 진단
 - 남극기지 관측자료 기반 극한기상 기준 결정 및 사례 선정
 - 남극세종기지 1988년 이후 장기 기상관측자료를 중심으로 하여 강풍, 저온, 폭설 등 위험성 높은 극한기상 종류별로 사례 탐색
 - 과거 연구과제를 통해 품질관리된 장기 기상자료DB에서 풍속, 기온, 강수량 등 분석
 - 장기관측자료에서 극한기상 종류별로 사례들을 선정 후 전형적인 대표사례

- 선정하고 현상 발생 전후 총 3일간의 기상자료 시계열을 해당 극한기상 사례별 DB 구축
- 극한기상현상 종류별 특성 분석
 - 남극세종기지 장기 기상관측자료를 중심으로 하여 강풍, 저온, 폭설 등 위험성 높은 극한기상 종류별로 사례 탐색
 - 선정된 극한기상현상 종류별 사례들을 바탕으로 각 극한기상현상별 특성을 분석
 - 강풍사례 발생시기, 배경 종관기압배치, 강풍강도, 강풍지속기간 등 특성 분석
 - 저온 및 폭설 사례의 경우에도 발생시기, 배경 종관장, 강도, 지속기간 등 특성 분석
 - 남극 대상 수치모의실험 결과를 이용하여 극한기상 종류별 특성 분석
 - 극한기상 사례 수치모의를 위한 Polar WRF (Polar Weather Research and Forecasting) 모델 최신버전 (2019년 12월 기준 버전 4.1.2) 설치
 - 관련 분야 선행연구 조사를 통해, 수치모의를 위한 모의영역 및 수평해상도, 초기 및 경계자료, 물리과정 결정
 - 극한기상 특성 분석을 위한 기초 자료 (예, 세종, 장보고 기지 외 타기지의 관측자료, 재분석자료 등) 확보
 - 극한기상현상 분포의 시공간적인 구조 분석과 역학적 특성 파악을 위해 고해상도 수치모델링을 수행하고 모델링결과를 분석
 - 지형자료, 초기조건, 물리과정 조합에 대한 민감도 실험을 수행하여 극한기상 사례의 발생 기작 분석
 - 극한기상현상 종류별 대표사례들에 대해 합성장 분석 등을 통해 전형적인 극한기상발생 매커니즘 파악
 - 대표 사례별 수치모델링 결과를 이용해 극한기상 사례의 3차원적인 기상장 DB화
 - 기상관측자료 및 수치모델링자료 기반 극한기상현상 종류별 개념모델 제시
 - 2차년도 연구를 통해 분석된 극한기상현상 종류별 특성을 바탕으로 각 극한기상현상별 전형적 사례를 이용해 배경장, 원인, 입체적 구조, 소멸과정 등을 설명하는 개념모델 구성
 - 강풍, 저온, 폭설 등에 대해 우선적으로 개념모델 제시
 - 남극기지 기상관측시스템 연중 운영 및 데이터 획득
 - 1단계 3년간 남극과학기지 기상관측시스템 센서 점검 및 교체 등을 통해 고품질의

- 기상관측을 연중 수행하도록 지원하고 기상월보 등 통계자료 작성
- 국제공동 극지기상연구 프로그램 YOPP-SH 참여
 - 극지역 기상현상 이해 제고 및 예보정확도 향상을 위한 국제협력활동 (YOPP-SH)의 하계 특별관측(2018-2019년 하계 3개월)에 이은 동계 특별관측에 참여하기 위해 YOPP-SH 커뮤니티에 참여하여 2020년부터 2022년까지 남극반도권역(세종기지) 및 로스해권역(장보고기지) 특별관측 그룹에서 논의 참여하며 라디오존데 관측 준비
 - YOPP-SH 동계 특별관측이 수행된 2022년 4월부터 8월 중 남극반도 및 로스해 지역에 TOP 발효시 각 기지에서 월동대원의 협조를 통해 라디오존데 관측을 수행하고 자료를 세계기상기구 통신망 GTS에 전송 실시
 - 기존의 YOPP-SH 하계 집중관측 기간 자료를 이용해 라디오존데 자료를 추가적으로 자료동화에 사용하는 경우 남극권 기상예보에 미치는 개선효과를 정량적으로 분석하는 수치모델실험 수행하였음

○ 남극 성층권 오존 및 지상 라돈 농도 시공간 변동 특성 파악

- 남극기지기반 성층권 오존농도의 기후학적 변동 특성 파악 및 대기순환 관계 분석
 - 남극 기지기반 성층권 오존 농도의 기후학적 변동 특성
 - ✓ 남극과학기지 기반 오존 전량 및 연직 프로파일 분석
 - ✓ 남극 지역별 평균 오존 전량 비교
 - ✓ 오존층 파괴 빈도와 평균 오존량 사이 관련성 비교
 - 남극기지기반 성층권 오존농도 변동의 수평, 수직 방향 차이에 대한 원인 규명
 - ✓ 성층권 고도별 오존량의 변동특징의 일관성 및 차이점 분석
 - ✓ 연직분포자료 사례연구
 - 남극 기지기반 성층권 오존 농도 변동과 대기 순환 관계 파악
 - ✓ 오존량과 기상변수와의 상관성 분석
 - ✓ 하부 성층권과 상부 대류권 사이 오존 교환 현상 진단
 - ✓ 극 소용돌이 및 남극 환상 진동(SAM) 패턴 변화에 따른 남극 성층권 오존 변동 특성 파악
- 인프라 기반 남극 대기 라돈 농도 시공간 변동성 비교 분석
 - 남극 기지 기반 대기 라돈 농도 계절 변동 특징

- 하계 및 동계 시즌 남극과학기지 대기 라돈가스 농도 특성 비교
- 세종기지 관측 대기 라돈가스 유입경로 조사 및 분석
 - ✓ 역궤적 분석
 - ✓ 대기 라돈 가스 농도 계절변동성 재현 모델 민감도 파악
- 장보고기지 대기 라돈 가스 농도의 변동성 상세 분석

○ 남극 및 남반구 고위도 지역 기후변동성 진단

- 남극 지역 장기 기후자료 수집
- 남극 지역 기후변동성 등 기후 변화 요소 분석
- 관측 자료, 수치모델 실험, 머신러닝 활용 남극지역 지상온도 기후 복원
- 장기 기후 자료와 수치모델 실험을 통한 남극 및 남반구 고위도 지역 기후변동성간 상관성 규명 및 메커니즘 진단
- 기후변화 요인별 남극 및 남반구 고위도 지역 대기, 해양순환, 지면대기온도, 해빙 등의 기후 요소의 변동 특성 진단

○ 남극 대기 에어로졸 물리화학 특성 현장 관측

- 에어로졸 물리특성 시계열 변화 관측
 - 세종과학기지 기반 에어로졸 물리 특성 연속관측
 - 아라온 기반 에어로졸 물리 특성 관측
- 에어로졸 화학특성 및 전구물질 관측
 - 세종과학기지 기반 에어로졸 화학특성 및 전구물질 관측
 - 세종과학기지 신규 대기구성물질 관측동 구축
- 국제공동연구를 통한 남극 에어로졸 흡습성 변화 관측
 - 한-스페인-아일랜드 협력 연구를 통한 남극 에어로졸 입자의 흡습성 변화 분석
 - 세종과학기지 기반 에어로졸 현장 관측에 관한 국제협력 강화

○ 남극 에어로졸 발생 프로세스 파악

- 남극 에어로졸 발생 모사 실험
 - 챔버장치를 통한 자연유래 에어로졸 발생 모사 실험 수행
- 초고분해능질량분석기를 활용한 남극 환경시료 유기물 특성 분석

- 남극환경시료 (해양, 해빙, 용빙수 등)의 유기물 화학 특성 정밀 분석
- 생물기원 에어로졸 전구물질 분석기술개발
- 미세조류 자동 분석 배양 및 미세조류 유래 휘발성 유기화합물 연속 분석을 위한 장치 개발





제 2 장 국내외 기술개발 현황



제 2 장 국내외 기술개발 현황

2.1 국내 기술개발 현황

○ 남극의 극한기상 연구 사례

- 국내에서는 극지연구소 연구팀이 2013년 1월에 남극세종과학기지에서 발생한 이례적인 강풍 발생사례에 대하여 고해상도 중규모 수치모델을 이용하여 재현하고 특성 분석결과를 보고한 바 있다(아래 그림참조).

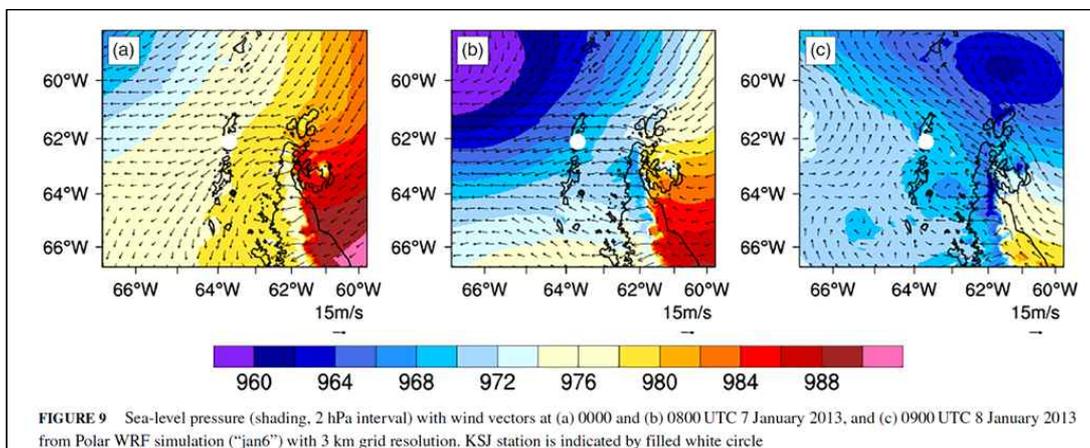


Fig. 2.1 2013년 1월 남극세종과학기지 강풍 사례에 대한 수치모델링 재현 결과
(Kwon et al, QJRMS, 145, 1267-1280, 2019)

- 2021년에는 서울대학교 및 극지연구소 공동연구팀이 남극반도 강풍 발생 사례에서 남극반도 지형이 미치는 영향을 분석하여 발표한 바 있다(Kwon et al., 2021).
 - 이 외에 2022년에는 서울대, 부경대, 극지연구소 공동 연구팀이 2020년 2월에 남극반도 동쪽 세이모어 섬에서 관측된 고온현상의 원인을 분석한 연구를 발표하였다(Bae et al., 2022).
- 국내에서는 연세대학교가 1984년부터 돕슨 분광광도계로 오존 전량(TOC, Total Ozone Column)을 측정하여 지상 기반의 원격 탐사 자료로써 전세계 오존 감시망에 성층권 오존량 정보를 제공하는 등의 기여를 하고 있다. 남극세종과학기지에서는 1996년부터, 장보고 기지는 2015년부터 브루어 분광광도계를 운영을 시작하였다. 남극에서의 오존 관측은 극지연구소 및 연세대 협업으로 이루어지고 있다. 한편, 오존 존데는 기상청 포항관측소에서 1995년부터 수행되어 오고 있으며, 남극장보고과학기지 월동대원은 포항관측소에서 교육을 받은 후 오존 존데 비양

업무를 수행한다.

- 극지역을 대상으로 하는 에어로졸 연구는 극지연구소를 중심으로 국내·외 우수 연구팀(포항공대, 광주과학기술원, 이화여대, 경인여대, 스톡홀름 대학, 피렌체 대학 등)이 연구협력네트워크를 구성하여 다년간 북극 다산과학기지, 남극 세종과학기지, 쇄빙연구선 아라온호를 활용하여 현장 관측 연구를 수행하고 있다. 특히, 국가연구개발사업 (‘북극권 육상-대기 환경변화 예측 및 대응 기술개발’, NRF-2021M1A5A1065425) 지원을 통해 다년간의 북극 니알슨 제플린 관측소 현장 에어로졸 및 전구물질 관측자료를 확보하였으며, 이를 통해 북극 대기 에어로졸 형성 기작 및 에어로졸/구름응결핵의 계절별 분포 특성 규명에 관한 연구 논문을 다수 발표한다.

2.2 국외 기술개발 현황

- 국외 남극 극한기상 연구 사례
 - 남극 대륙은 중저위도 지역에 비해 기본적으로 저온, 활강풍, 블리자드 등 극한의 기상 특성을 나타내는 지역이다.
 - 최근 동남극 Dronning Maud Land 지역에서 발생한 이례적인 폭설의 원인을 저위도로부터의 강한 수분 이류, 즉 Atmospheric river 현상으로 지목하고 분석한 연구가 있다(Gorodetskaya et al., GRL, 2014).
 - 미국립해양대기청(NOAA) 연구팀은 2015년 발표한 논문(Herring et al., 2015)에서 전년도인 2014년에 발생한 다양한 극한 기상현상 사례를 분석 제시하였으며 이 논문에서 인간활동에 의해 열파의 발생 가능성과 강도가 크게 증가하였다고 주장한 바 있다. 그 외 가뭄, 폭우, 겨울철 스톰에서도 일부 인간활동의 영향을 주장하였다.
 - 미국립설빙데이터센터(NSIDC) 및 협동연구팀은 위성자료에 기반하여 동남극 지역 표면에서 영하 90℃ 이하의 극저온 지역을 발견하여 기존의 영하 89.2℃ 저온 기록을 경신하였다고 보고하였다(Scambos et al., GRL, 2018).
 - 네덜란드, 영국, 미국 연구팀은 남극 라르센C 빙상이 겨울철에 종종 해빙되며 간혹 여름철 보다 급격히 해빙되는 사례가 있음을 밝히고 이 메커니즘을 연구하고 해당 사례에서 남극반도를 넘어온 따뜻하고 건조한 편 바람이 겨울철에 빙상을 녹이는 원인이라고 제시하였다(Munneke et al., GRL, 2018).
 - 상기 연구들에서 강풍, 저온, 폭설 등에 대해 사례 제시 연구들이 있으나 대상 기간이

질지 않으며 다수 사례에 기반한 일반적인 메커니즘 제시 연구는 미비하다.

○ 남극에서의 중규모 모델링 연구활동 사례

- 남극 중심의 중규모 모델링은 이전까지 전구모델예보 결과에 의존해 오던 남극기상예보의 단점을 보완하여 USAP(U.S. Antarctic Program)을 지원하기 위해 2000년 초반 미국(NCAR, Ohio State University)을 중심으로 본격적으로 시작되었다. 기존 전구모델을 활용한 남극 예보의 경우 남극의 지형 및 지면상태, 극지역의 특이한 물리적 특성이 반영되지 않아 남극항공 운항 및 단기예보(6-24시간)에 영향을 미치는 중규모 현상 예보 정확도가 매우 미흡하였다.
- 이를 위해 미국 맥머도 기지주변 실시간 기상예보장 생산 및 남극 모의에 적합한 물리모수화 기법 장착을 목적으로 AMPS(Antarctic Mesoscale Prediction System)를 개발하고, 이를 중심으로 현재까지 독보적인 남극 중규모 모델링 연구를 선도해 오고 있다.
- AMOPS를 활용하여 미국 베이스 및 현장 캠프 주변의 연구 및 다양한 목적을 위한 인간활동 지원을 위해 실시간 기상예보시스템을 운영하고 있으며, 남극 내 긴급상황의 구조 및 항공, 항해 운항을 위한 실시간 기상정보 지원해 오고 있으며, 현재는 미국 기지뿐만이 아닌 이태리, 호주, 영국, 독일, 남아프리카, 중국, 칠레, 노르웨이, 러시아, 일본도 AMPS를 이용한 기지 주변 기상정보를 활용하고 있다.
- 장기간 축적된 AMPS 중규모 기상모델 자료를 이용하여 여러 국가의 연구기관에서 남극 대륙 주변의 다양한 기상, 기후 관련 연구가 활발하게 진행되어 오고 있다.

○ 오존 관측은 세계 기상 기구 (WMO, World Meteorology Organization) 산하의 기관인 대기 감시 관측소 GAW(Global Atmosphere Watch)에 등록된 관측 기지들로부터 표준기기인 돕슨(Dobson)과 브루어(Brewer) 분광광도계를 이용해 진행되고 있다. 남극에 기지를 운영하는 12개국의 18개 기지에서 Ozone 관측을 수행되고 있는데 그중 브루어 분광광도계는 9개 기지, 돕슨 분광광도계는 6개 기지 그리고 오존 존대를 활용한 기지는 9개 기지가 있다(<https://gawsis.meteoswiss.ch/GAWSIS>).

○ 남위 50도 부근에서 관측된 라돈가스 농도는 동계시즌에 하계시즌보다 높게 나타나고 있다. 현재까지 GCM 모델 재현 결과는 남위 50도 부근에서 관측되는 라돈가스 농도에 대해 과대평가하고 있지만 계절 농도 변동 특성은 비교적 일치하고 있다.

그렇지만 남극 해안지역과 내륙에서 관측된 라돈가스의 계절 변동 특성에 대한 GCM 모델 결과는 여전히 동계시즌에 높은 농도를 나타내고 있으나 관측 결과는 하계시즌에 높은 경향이 있다. 라돈가스 외에도 남극에서 관측되는 미세입자의 BC (black carbon) 농도는 하계시즌에 동계시즌보다 농도가 높게 나타나고 있으나 GCM 모델은 동계시즌의 농도가 하계시즌에 비해 높게 재현되고 있다.

- 최근 북극권 국가들의 주도하에 ‘에어로졸-구름-기후’에 관한 대규모 북극 현장 관측 연구가 활발히 수행되고 있다. 대표적으로 ACCACIA(Aerosol-Cloud Coupling and Climate Interactions in the Arctic; <https://arcticaccacia.wordpress.com/>) 프로젝트를 통해 영국 British Antarctic Survey(BAS)를 중심으로 여러 유럽 국가들이 연합하여 지상거점 및 항공기를 활용한 대기 관측 연구를 활발히 진행한다. 또한, 캐나다에서는 NETCARE (Network on Climate and Aerosols: Addressing Key Uncertainties in Remote Canadian Environments; <https://www.netcare-project.ca/>) 프로그램을 통해 연구선 및 항공기를 활용한 북극해 대기 에어로졸 특성 집중 관측 연구를 수행한다.
- 남극 대륙에서 3개의 지구급 지구대기 관측프로그램이 (Global Atmosphere Watch, GAW) 운영되고 있으며, 해당 관측 기지에서 에어로졸의 물리·화학 특성 연속관측 연구를 수행하고 있다. 영국 British Antarctic Survey에서 운영하는 지구급 Global Atmospheric Watch Station인 Halley 기지에서는 청정대기 관측소 (clean air sector laboratory)를 상시 운영함으로써, 기지 오염원의 영향을 최소화한 남극 배경 대기의 에어로졸 물리화학 특성 연구를 수행하고 있다. 독일 Alfred Wegener Institute에서 운영하는 지구급 Global Atmospheric Watch Station인 Neumayer기지에서는 기지 오염원이 영향이 적은 Air chemistry laboratory를 운영하고 있으며, 에어로졸 특성 관측 연구를 1980년대부터 지속적으로 수행하고 있다.



제 3 장 연구개발 수행
내용 및 결과



제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

3.1 남극의 극한기상(강풍, 저온, 폭설) 특성 진단

3.1.1 남극기지의 극한기상(강풍, 저온, 폭설) 사례 분석

가. 세종기지 32년 자료 기반 극한기상 사례 분석

- 1988년-2019년까지 남극세종기지 기상관측자료 품질관리 수행 및 기준자료 생성하였다.
- 남극세종기지 1988년부터 2019년까지의 기상자료를 대상으로 품질관리(Quality Control, 이하 QC)를 수행하였으며 이 과정에서 AMOS1, AMOS3, AMOS3b 등 총 3개의 기상관측시스템 10분 간격 자료를 활용해 상호 비교검증 및 결측 보완을 실시하여 최종적인 기상관측자료 시계열을 생산하였다.

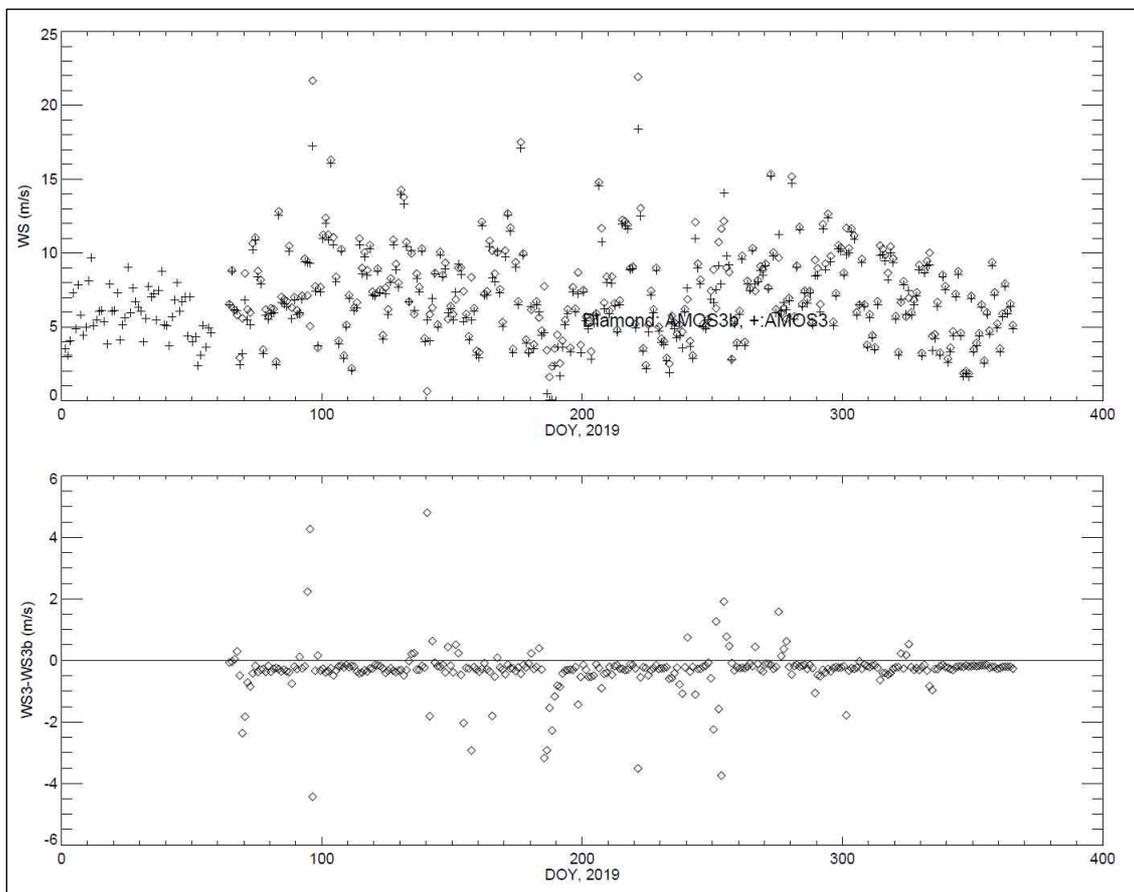


Fig. 3.1.1. 품질검사를 위한 AMOS3와 AMOS3b 풍속 비교

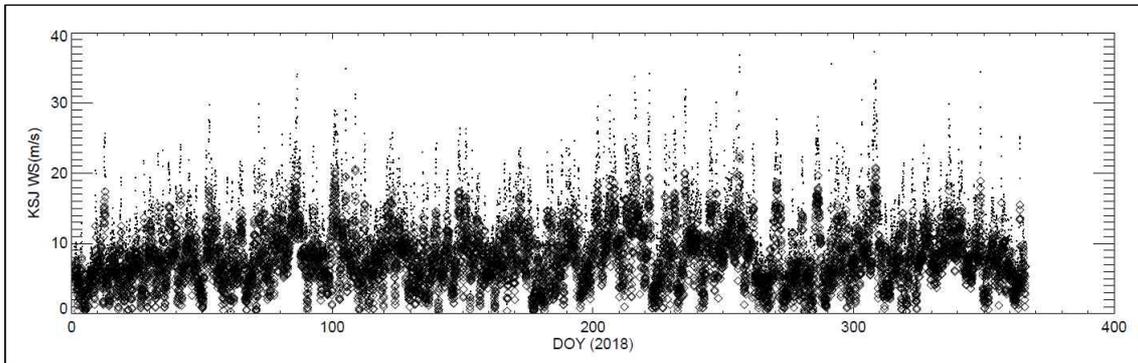


Fig. 3.1.2. 품질검사 후 2018년 세종기지에서의 풍속 시간 자료

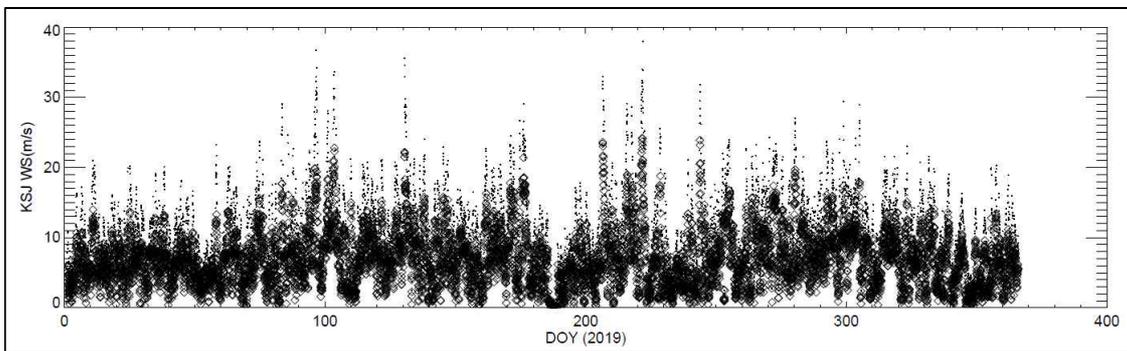


Fig. 3.1.3. 품질검사 후 2019년 세종기지에서의 풍속 시간 자료

- IPCC 극한기상 특별보고서(IPCC, 2012)에서 제시한 극한현상 정의(상위 10, 5, 1%)를 적용하기 위해 남극세종기지 일통계 기상자료 기반 풍속분포 분석하였다.
 - 일평균풍속 기준으로 볼 때 상위 10% 강풍은 12.3m/s, 상위 5% 강풍은 13.8m/s, 상위 1% 강풍은 16.5m/s으로 분석되었다.
 - 일최고순간풍속 기준으로는 상위 10% 강풍은 27.8m/s, 상위 5% 강풍은 30.9m/s, 상위 1% 강풍은 40.9m/s의 값을 나타냈음. 통상 세종기지에서 위험기상인 블리자드의 기준으로 삼는 14m/s 풍속은 순간풍속 기준으로 볼 때는 대략 하위 30% 수준에 속해 상당히 빈번한 현상임을 알 수 있다.
 - 일평균기온 기준으로 하위 10%는 -8.1°C , 상위 10%는 2.3°C 이고 일최고기온 기준 상위 10%는 4.7°C , 일최저기온 기준 하위 10%는 -11.4°C 로 분석되었다.
 - 강수가 기록된 날들을 대상으로 했을 때 일누적강수량 기준 상위 10%는 6.6mm였고, 상위 5%는 10.6mm, 상위 1%는 25.1mm를 기록하였다.
 - 적설의 경우 신적설이 기록된 날들을 대상으로 했을 때 상위 10%는 10.4cm, 5%는 18.7cm, 1%는 45.6cm를 기록하였다. 중위값인 0.1cm는 최소 기록값과 차이가 없어

세종기지 적설의 경우 겨우 기록할 만큼 소량인 경우가 절반을 차지함을 알 수 있다.

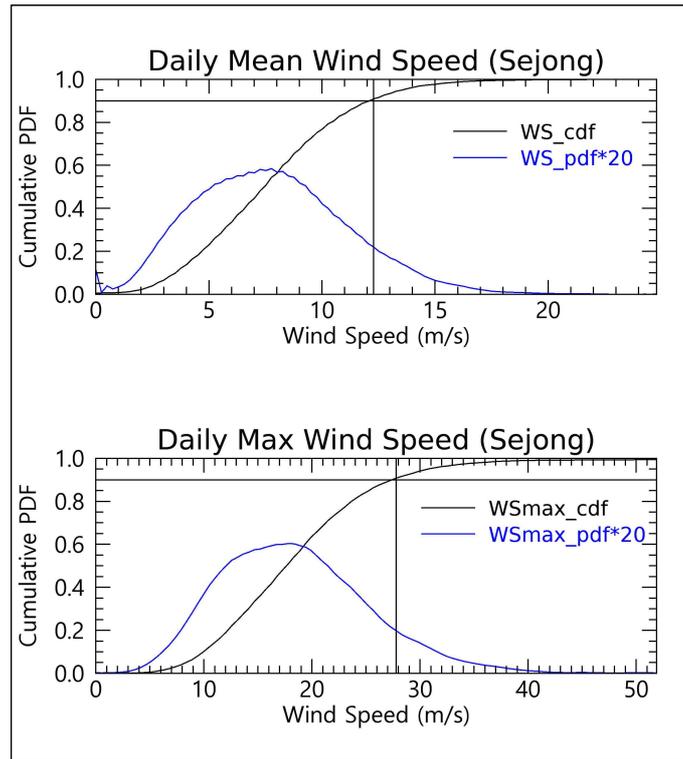


Fig. 3.1.4. 세종기지에서의 일평균풍속과 일최대풍속의 확률분포 (1988-2019)

Table. 3.1.1. 1988년부터 2019년까지의 세종기지에서 관측된 풍속, 온도, 강수, 그리고 강설의 백분위값

Percentiles (%)	1	5	10	25	50	75	90	95	99
Daily mean wind speed (m/s)	1.5	2.8	3.8	5.3	7.5	9.8	12.3	13.8	16.5
Daily maximum Wind Speed (m/s),	5.8	8.4	10.5	13.6	17.8	22.5	27.8	30.9	40.9
Daily mean temperature (°C)	-15.4	-10.5	-8.1	-3.5	-0.8	1.1	2.3	2.9	4.8
Daily max temperature (°C)	-12.3	-7	-4.5	-1	1.1	3.3	4.7	5.8	8.9
Daily min temperature (°C)	-18.6	-14.1	-11.4	-6.5	-2.6	-0.4	0.8	1.4	2.6
Daily precipitation (mm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.9	2.5	6.6	10.6	25.1
Daily snowfall (cm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	4.2	10.4	18.7	45.6

○ 장기 자료 기반 상위 15개 강풍, 저온, 폭설일 사례 추출하였다.

- 일평균풍속 기준으로 2002년 10월 10일이 24.8 m/s를 기록하여 최고 강풍일이었으며, 순간최고풍속 기준으로는 2014년 7월 1일에 51.9m/s를 기록하여 최고 강풍일이었다.

Table. 3.1.2. 세종기지 15개 강풍 사례 (1988-2019)

Ranking	Daily mean WS (m/s)	Date	Daily max WS (m/s)	Date
1	24.8	2002-10-10	51.9	2014-07-01
2	23.9	1991-09-11	51.7	2014-09-22
3	22.2	1992-05-31	50.8	2013-08-19
4	22	2003-07-07	50.7	2014-06-30
5	21.9	1995-08-01	50	2008-04-20
6	21.8	2004-09-17	49.7	2014-08-15
7	21.7	1991-05-25	49.5	2003-08-16
8	21.7	2000-07-31	49.1	2015-08-05
9	21.4	1988-12-30	48.9	2014-09-23
10	21	1998-09-09	47.3	2013-08-17
11	20.7	2003-06-05	46.6	1990-06-16
12	20.6	2011-07-21	46.6	1991-09-11
13	20.5	2007-07-03	46.5	2000-06-07
14	20.4	2013-08-19	46	2014-05-13
15	20.3	2007-05-19	45.9	2013-01-27

- 기온의 경우 일평균기온 기준으로는 1994년 7월 24일에 -23.4℃를 기록하여 가장 추웠으며 일최저기온 기준으로도 같은 날 -25.6℃를 기록하여 가장 낮은 기온을 보였다.

Table. 3.1.3. 세종 기지 15개 저온 사례 (1988-2019)

Ranking	Daily mean Tair (°C)	Date	Daily minimum Tair (°C)	Date
1	-23.4	1994-07-24	-25.6	1994-07-24
2	-23.0	1991-08-04	-25.2	1994-07-25
3	-22.5	1994-07-23	-25.1	1995-07-22
4	-22.4	1994-07-25	-24.4	1991-08-05
5	-22.0	2007-07-15	-24.2	2007-07-14
6	-21.5	2007-07-14	-24.2	2007-07-26
7	-20.9	1994-07-14	-24.0	1991-08-04
8	-20.8	2007-07-25	-24.0	1994-07-23
9	-20.7	1991-08-03	-23.9	2007-07-15
10	-20.5	1995-08-01	-23.8	1994-07-26
11	-20.4	1995-07-17	-23.6	1992-07-13
12	-20.3	2007-07-03	-23.5	2009-07-12
13	-20.1	2005-07-01	-23.1	1998-09-14
14	-20.0	1998-09-09	-23.1	2005-06-29
15	-19.8	2006-08-24	-23.0	2005-07-01

- 강수량과 신적설량도 분석하였으며, 눈비를 포함한 일누적강수량 기준으로는 1990년 6월 26일 80.0 mm가 최고강수 기록이었고, 신적설량으로는 2007년 10월 15일에 205cm가 기록되어 최고를 기록하였다. 이에 앞선 10월 14일도 155.5cm 신적설로 기록되어 이틀을 더할 경우 360cm라는 기록적인 신적설량으로 나타났다. 다만 당시 순보 및 월동보고서에 따르면 이 사례는 블리자드에 의해 날려 쌓인 눈을 기록했을 개연성이 높아 순수한 신적설량으로 판단하기는 어려웠다.

Table. 3.1.4 세종 기지 15개 강수/강설 사례 (1988-2019)

Ranking	Precipitation (mm)	Date	Snowfall (cm)	Date
1	80.0	1990-06-26	205.0	2007-10-15
2	70.0	1989-04-19	155.5	2007-10-14
3	70.0	1988-06-26	97.9	2009-05-05
4	59.0	2003-02-25	83.3	2009-05-17
5	58.0	2003-03-06	80.0	1990-06-26
6	57.0	2013-03-25	78.0	2003-11-07
7	55.2	1995-08-01	77.0	2000-07-31
8	53.7	2013-02-15	70.5	2017-04-19
9	52.2	2003-12-06	70.5	2005-04-20
10	50.0	1988-06-27	70.0	1990-10-13
11	50.0	1989-04-20	70.0	1989-04-19
12	47.6	2006-04-04	70.0	2015-10-19
13	46.8	2009-09-24	70.0	1988-06-26
14	46.5	2013-08-16	68.6	2009-11-30
15	46.2	1995-07-24	65.0	1989-08-31

- 1988년-2019년까지 남극세종기지 장기 자료 기반 상위 15개 고온 사례 추출하였다.
 - 우선 고온사례의 분포를 보면 일평균기온 기준으로 상위 10%는 2.3℃, 상위 5%는 2.9℃, 상위 1%는 4.8℃였으며, 일최고기온 기준으로는 상위 10%는 4.7℃, 상위 5%는 5.8℃, 상위 1%는 8.9℃로 분석되었다.
 - 품질관리가 완료된 1988-2019년 기간 전체 계절을 대상으로 상위 15위까지의 고온 사례를 선정해보면, 일평균기온 기준으로는 2006년 1월 22일에 6.9℃, 일최고기온 기준으로는 2004년 1월 24일에 13.2℃가 기록되어 가장 따뜻한 날이었다. 그러나 2022년 2월 7일부터 8일에 걸쳐 남극반도 북부 전역에 강한 온난다습 이류가 발생하여 기존의 최고기온 기록이 경신되었으며 세종기지 시각 2월 7일의 일평균기온 7.0℃, 10분 평균값 기준 일최고기온 13.7℃, 순간값 기준 일최고기온 13.9℃를 기록하였다.

Table. 3.1.5. 세종 기지 15개 고온 사례 (1988-2019)

Ranking	Daily mean Tair (°C)	Date	Daily max Tair (°C)	Date
1	7.0	2022-02-07	13.9	2022-02-07
2	6.9	2006-01-22	13.2	2004-01-24
3	6.7	1998-01-13	12.0	1999-01-11
4	6.5	1988-12-30	11.6	2016-01-01
5	6.3	2020-01-08	11.3	2016-01-02
6	6.0	1988-01-09	11.3	2017-03-20
7	5.8	2012-03-04	11.2	1992-01-23
8	5.8	2012-03-02	11.0	1997-01-22
9	5.8	2004-01-24	10.7	2018-02-21
10	5.7	2017-03-20	10.6	2020-01-08
11	5.6	2018-02-21	10.4	2004-12-29
12	5.6	1996-02-19	10.4	1999-12-26
13	5.6	1999-01-11	10.4	1988-12-12
14	5.5	2006-03-16	10.2	1998-01-14
15	5.5	2006-12-26	10.2	1998-01-13

- 위 표에서 보이듯이 고온사례는 대부분 하계 (12-2월)에 발생하는데, 겨울철로 제한하여 고온 사례를 선정해보면, 최고 온난일은 1998년 6월 19일로서 일평균기온 기준으로 3.6°C였고 일최고기온 기준으로는 7.9°C를 기록하였다. 겨울철 기온 중 상위 10%는 일평균기온 기준 -0.1°C이고, 일최고기온 기준으로 2.0°C를 기록하여 겨울철에도 상위 10% 고온일은 영상의 기온을 보임을 알 수 있다. 겨울철 상위 15개 고온 사례는 아래 표와 같이 선정되었고 일평균기온 기준 1.8°C, 일최고기온 기준 4.9°C로 겨울철에 높은 영상 기온으로 변동하는 특성을 알 수 있다.

Table. 3.1.6. 세종 기지 겨울철 15개 고온 사례 (1988-2019)

Ranking	Daily mean Tair (°C)	Date	Daily max Tair (°C)	Date
1	3.6	1998-06-19	7.9	1998-06-19
2	3.3	1998-06-20	7.0	2017-07-05
3	2.7	1997-06-03	6.1	2004-06-01
4	2.7	2000-06-05	6.0	2004-06-03
5	2.6	1995-06-01	5.8	2001-06-29
6	2.4	1997-06-02	5.5	2010-06-01
7	2.4	2004-06-01	5.4	2006-06-02
8	2.1	1998-06-18	5.3	2006-06-04
9	2.0	2008-06-24	5.2	2010-06-11
10	1.9	1989-08-14	5.1	1997-06-04
11	1.9	1996-06-08	5.1	2017-07-26
12	1.8	2017-08-09	5.1	2004-07-19
13	1.8	2017-06-03	5.0	2004-06-04
14	1.8	2004-07-19	5.0	1997-06-02
15	1.8	1992-08-14	4.9	2016-07-20

- 장기관측자료 기반 극한기상 사례들에 대해 기상자료 시계열을 추출하고 DB를 등록하였다.
 - 1차년도에 경우 강풍 상위 15개 사례에 대해 전후 1일씩 총 3일 기간의 기상관측자료 시계열을 추출하고 KPDC에 등록을 완료하였다. 이 시계열 자료를 이용해 대표 강풍사례에 대한 수치모델링 실험 결과를 검증 평가하였다.
 - 2차년도에는 저온 상위 15개 사례에 대해 각각 3일 기간의 기상관측자료 시계열을 추출하여 KPDC에 등재하여 저온사례 수치모델링 실험에 활용하였다.
 - 3차년도에는 폭설 상위 15개 사례 및 추가적으로 고온 사례에 대해 각각 3일 기간의 기상관측자료 시계열을 추출하여 KPDC에 등재하여 폭설 및 고온 사례 수치모델링 실험에 활용하였다.

나. 극한기상 종류별 상위 10% 사례일을 대상으로 발생시기 분석

○ 아래 그림에서 일평균풍속 기준 상위 10% 강풍 사례일들의 발생시기를 월별로 나타내었다. 대체로 월평균풍속이 강한 겨울철에 발생빈도가 높은 경향이 있으나 평균풍속의 월별 차이보다 큰 계절적 변동을 나타내고 있어 6월부터 10월에 전체의 60% 가량 발생하며 하계기간인 12월부터 2월에는 합계 10% 미만의 발생빈도를 나타냈다. 한편 상위 10%에 해당하는 사례일들의 월별 평균풍속은 13.6(1월)에서 14.6(8월) m/s의 분포를 보여 빈도수에 비해서 상대적으로 편차는 작았다.

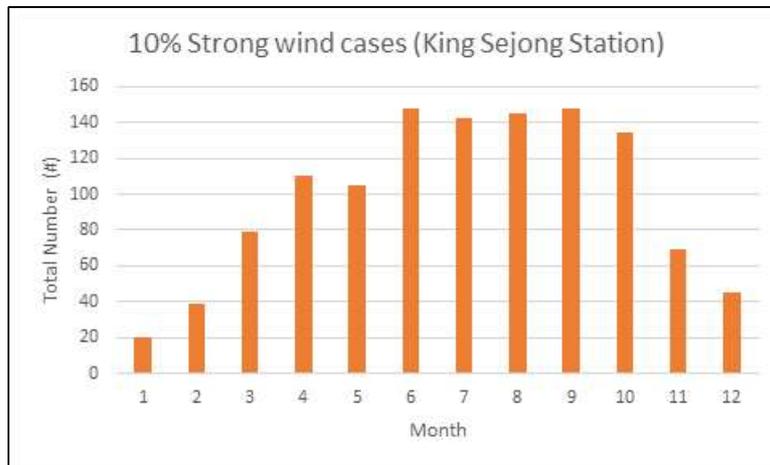


Fig. 3.1.5. 세종 기지 상위 10% 강풍 사례 발생 빈도(1988-2019)



Fig. 3.1.6. 세종 기지 상위 10% 강풍 사례 발생 빈도 점유율 (1988-2019)

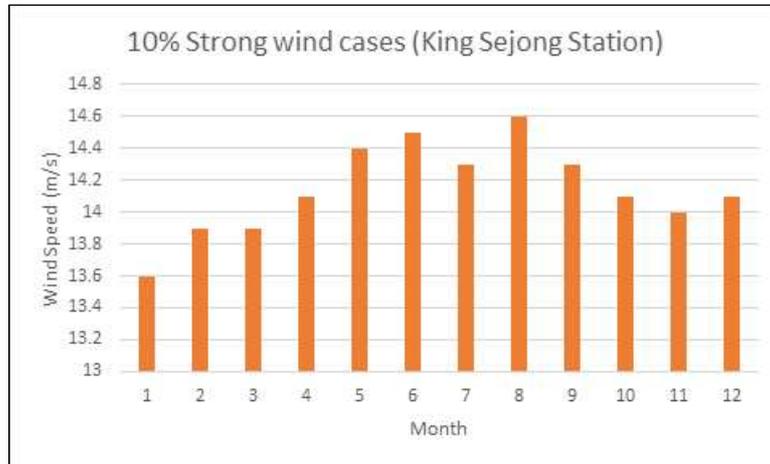


Fig. 3.1.7. 세종 기지 상위 10% 강풍 사례의 월별 평균 풍속

- 아래 그림에서는 상위 10% 강풍 사례일의 연도별 빈도를 나타내었다. 대체로 연 20회에서 60회 범위에서 큰 변동을 보여주는데 2010년 또는 2012년 이후로는 강풍 사례의 빈도가 지속적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 세종기지 연평균기온에서 급격한 온난화가 발생하는 시기와 유사하여 연관성에 관한 후속 분석이 필요하다.

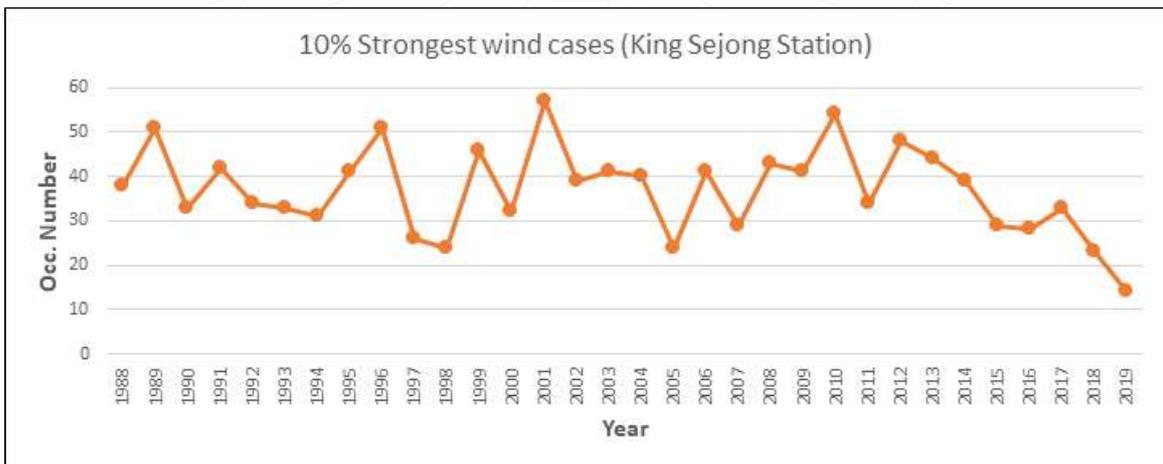


Fig. 3.1.8. 세종 기지 강풍 사례 발생의 격년변동

- 아래 그림은 일평균기온 기준 저온 10% 사례일들의 발생시기를 월별로 나타내고 있다. 강풍 사례의 분포에 비해 더욱 뚜렷한 계절성을 보여주고 있어 6-8월 동계에 합계 약 70%가 집중적으로 발생하고 있으며 11월부터 3월은 발생하지 않았다. 저온 10%에 해당하는 사례일들의 월별 평균 기온은 4월부터 9월에 영하 10℃ 이하의 값을 보여주고 있다. 동계기간인 6-8월의 저온 사례 빈도가 월등하게 높으면서 동시에

기온도 가장 낮다는 것을 알 수 있다.

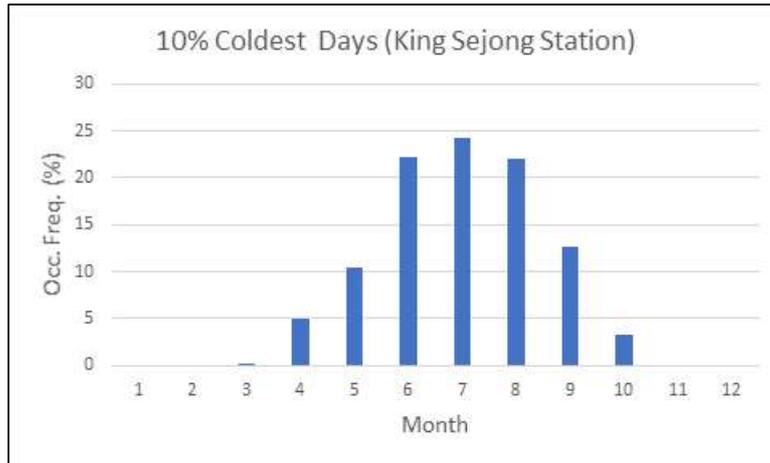


Fig. 3.1.9. 세종 기지 상위 10% 저온 사례 발생 빈도(1988-2019)

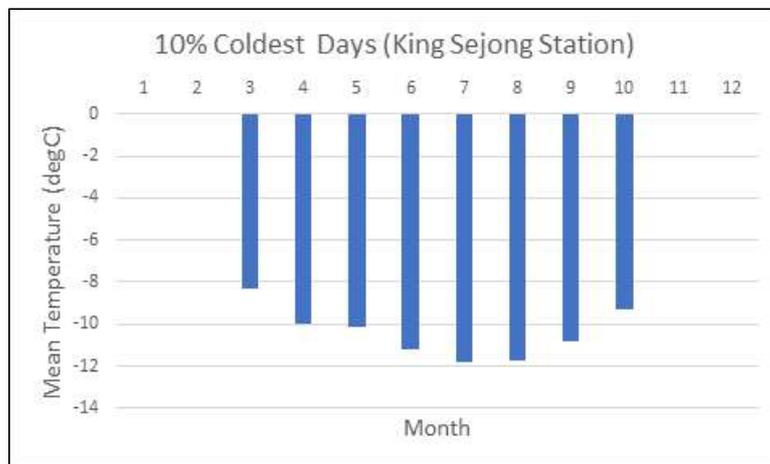


Fig. 3.1.10. 세종 기지 상위 10% 저온 사례 월별 평균 온도(1988-2019)

- 아래 그림은 상위 10% 저온 사례일의 연도별 빈도를 나타내고 있다. 대체로 연 20회에서 70회 범위에서 큰 경년변동을 보여주는데 1996년부터 2006년 무렵까지 저온 사례일 수가 적었던 것을 알 수 있고 2011년 이후로는 다소 감소 추세에 있다.

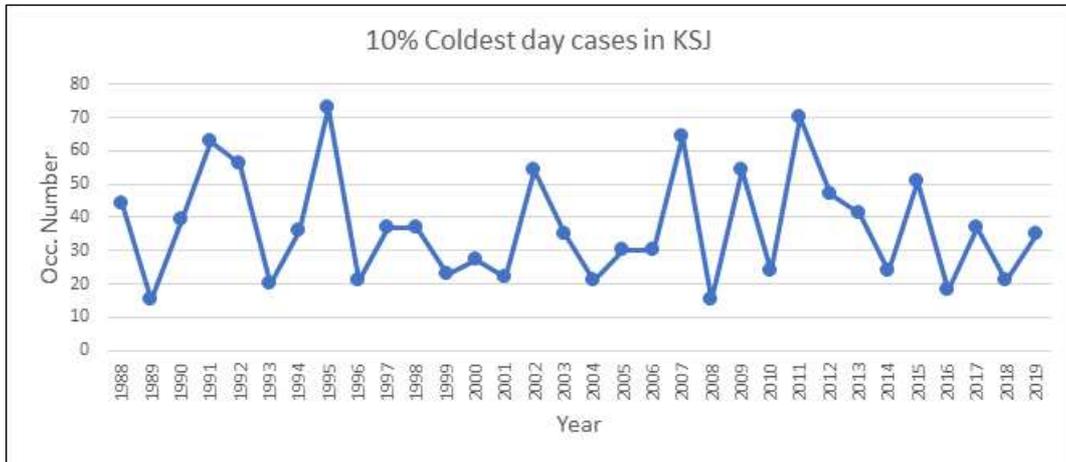


Fig. 3.1.11. 세종 기지 저온 사례의 격년 변동

- 아래 그림은 일신적설량 기준 상위 10% 사례일들의 발생시기를 월별로 나타내고 있다. 적설 현상은 주로 기온이 낮을 때 발생하기 때문에 적설 사례일이 겨울철에 많이 분포하며 상위 10% 사례일 역시 6월부터 10월에 약 12% 내외로 가장 빈번하여 5개월 합계 약 60%를 차지하는 것을 확인할 수 있다. 일적설량 상위 10%에 해당하는 사례일들의 월별 평균 적설량은 1월을 제외하고는 약 12cm 내외의 비교적 비슷한 값을 보여주고 있으며, 역시 1월을 제외하면 상위 10% 적설 사례일은 11cm 이상의 일적설량을 기록한 사례일들이다.

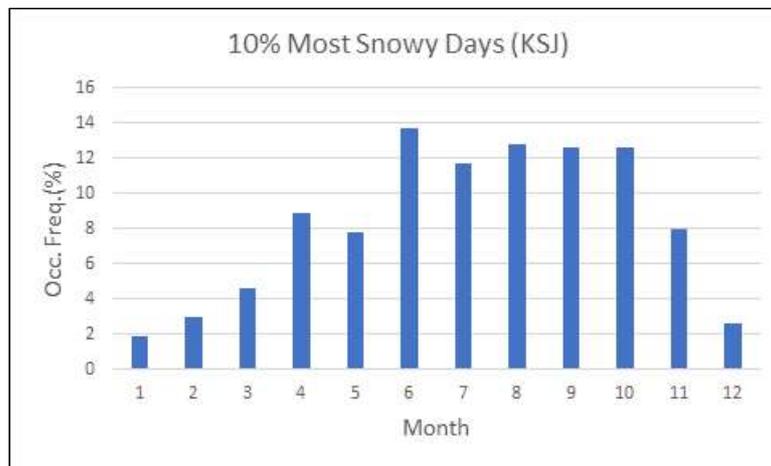


Fig. 3.1.12. 세종 기지 상위 10% 폭설 사례 발생 빈도 (1988-2019)

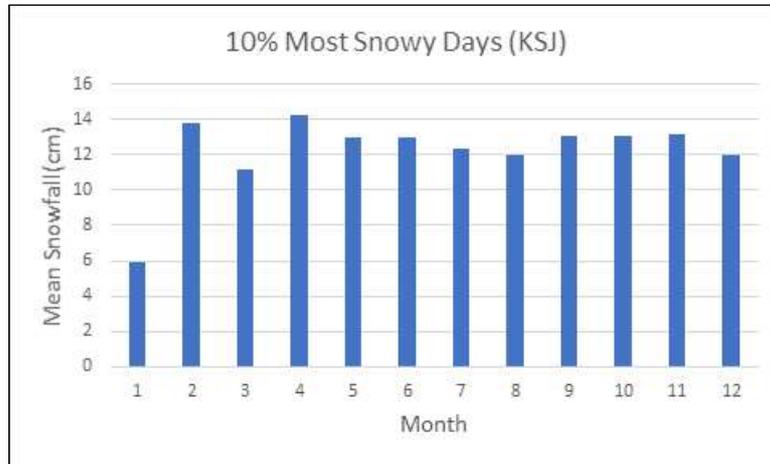


Fig. 3.1.13. 세종 기지 상위 10% 폭설 사례 월별 일누적 강설량 (1988-2019)

- 아래 그림은 상위 10% 적설 사례일의 연도별 빈도를 나타내고 있다. 가장 눈에 띄는 특징은 2004-2005년을 기점으로 이전 기간은 연도별 빈도수의 경년변동이 작는데, 이후 기간에는 매우 극단적인 경년변동을 보여주는 것이다.

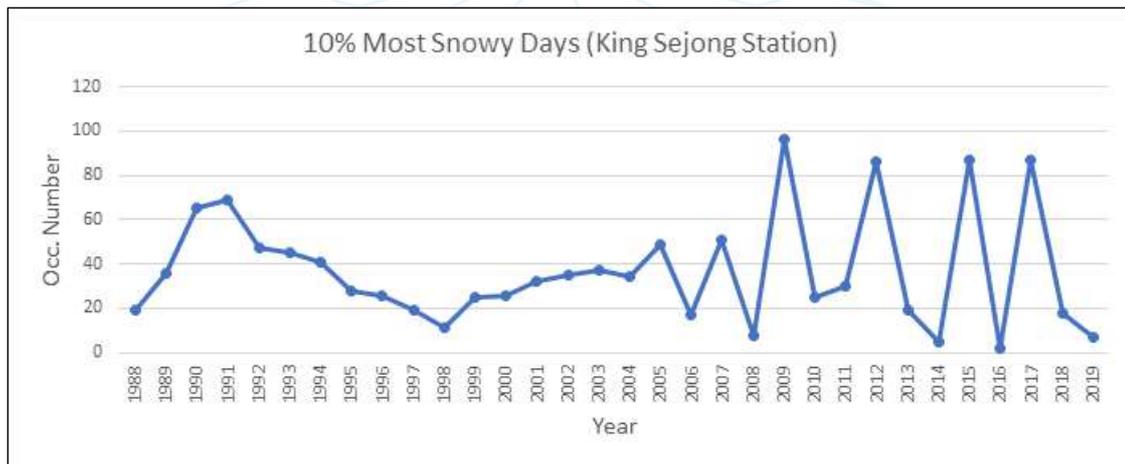


Fig. 3.1.14. 세종 기지 폭설 사례의 격년 변동

다. 남극과학기지 정상 기상관측수행 및 DB 구축

- 남극과학기지 정상 기상관측을 지속 수행하고 DB를 구축하였다.
 - 남극기지 기상관측시스템을 연중 정상운영하며 관측자료를 KPDC에 등록완료 하였다.
 - 세종기지의 경우 2020년 1월에 레이저적설계 운영을 시작하여 5분 간격의 정량적인

적설량 관측을 시작하였다. 이는 기존에 기상대원에 의한 1일 단위 수동관측과 비교하여 시간별로 세밀한 강설현황 파악에 기여할 것이며 기상대원 교대로 인해 발생하는 적설 관측의 변동성을 감소시켜 기후 모니터링 관점에서 강설관측의 수준을 제고할 것으로 기대한다.

- 2022년 2월부터 세종기지에 시정계를 시험운영하고 있으며 약 1년간 시정 데이터를 확보한 후 동일 기간 기상대원의 목측 시정값과 비교하며 관측 성능을 평가하고 향후 기상관측자동화에 활용할 예정이다. 연속 시정 자료가 확보되면 기상모델의 저층대기 기온, 습도, 안개 현상 모의성능 평가 및 모의성능 개선에 기여하여 장기적으로 기지활동 안전도 제고에 기여할 것으로 기대한다.

라. 남극기상기후 연구 국제프로그램(YOPP-SH) 참여

- 남극기상기후 특성 파악 및 남극지역 기상예측 정확도 향상을 목적으로 하는 국제공동프로그램(YOPP-SH)의 1차 집중관측이 2018년 11월부터 2019년 2월까지 하계에 시행되었다.
- YOPP-SH 하계 집중관측 이후 남극 동계 특별관측 필요성이 대두됨에 따라 2022년 동계 (애초 2021년 동계에 시행할 예정이었으나 COVID-19 상황에 따라 남극활동에 지연이 불가피하여 1년 연기되었음)에 Target Observation Period 방식으로 각 기지에서 특별관측을 시행하기로 협의되었다.
 - YOPP-SH 동계 특별관측에 참여하기 위해 2020년 및 2021년 정기보급을 통해 라디오존데, 헬륨가스 등 관측물품을 준비하여 기지에 보급하였다.
 - 준비 기간에 매월 1회 YOPP-SH 참여자간 정기 화상회의에 참석하여 연구목표 설정 및 관측계획을 논의하고 TOP (Target Observing Period) 방식 관측을 위해 대상지역(예: 로스해, 남극반도)별로 목표 현상 및 기준 설정 협의하였다.
 - 세종기지 및 장보고기지의 2022년 기상/대기과학 월동연구대원을 대상으로 라디오존데 관측과정 직무교육을 실시하였다.
 - 본 연구팀이 관심 현상으로 선정한 안개/안개비 사례의 동계 발생빈도를 확인하기 위해 2021년 4-7월 세종기지 기상월보 자료를 검토하였고, 월별로 4월(7 fog cases and 8 foggy-rain cases), 5월(4 fog cases and 14 foggy-rain cases), 6월(1 fog case and 7 foggy-rain cases), 7월(3 fog cases and 5 foggy-rain cases)임을 확인하였다. 대략적으로 4달간 안개 사례가 15일로 약 1/8 확률로 발생하였고

안개비는 34개 사례일이 기록되어 약 1/4 이상의 확률로 발생하였다.

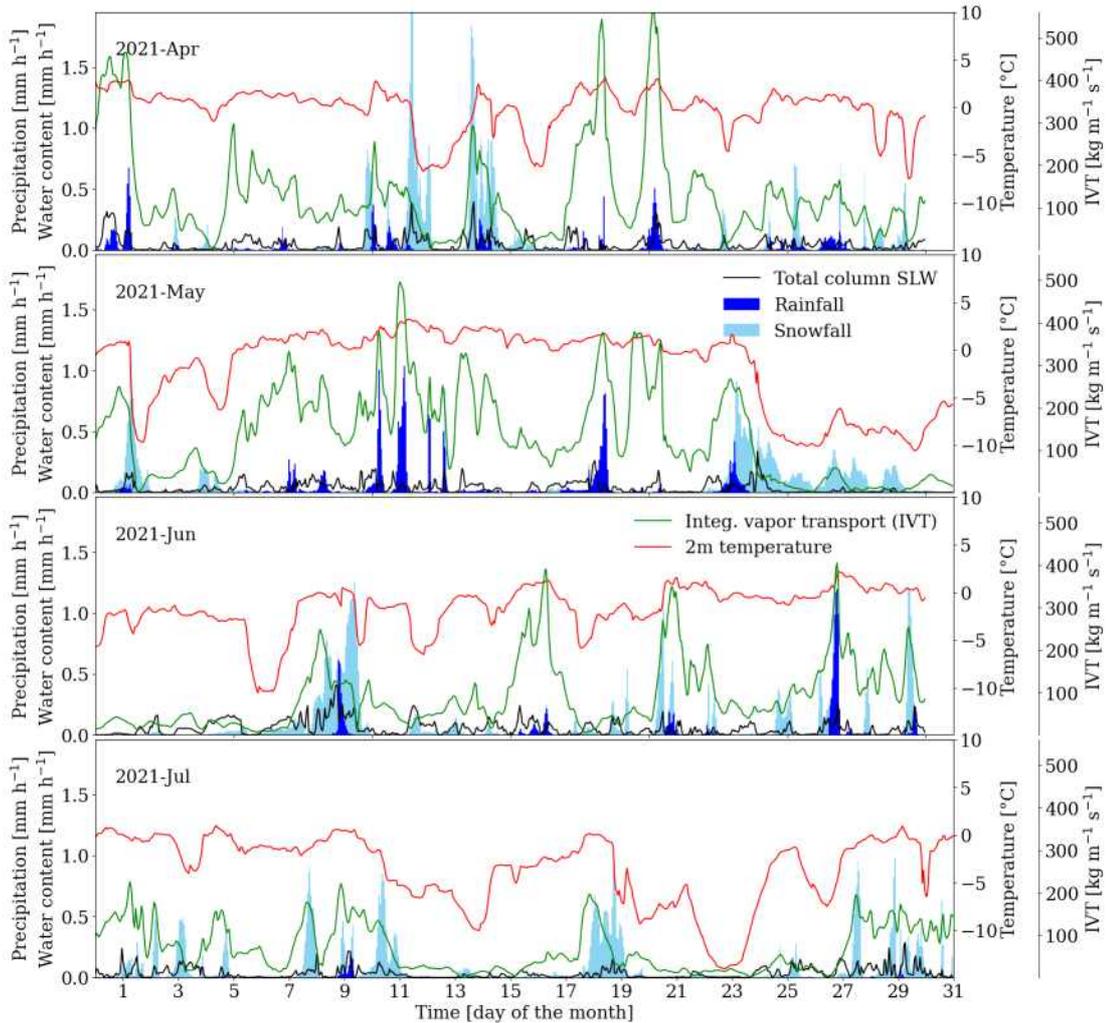


Fig. 3.1.15. ERA5 재분석자료로부터 산출한, 2021년 4월부터 7월까지의 Escudero 관측지점의 강수량과 온도, YOPP-SH SOP2 대기의 강 분석의 예시

- 남극지역 기상현상 이해 제고 및 예보정확도 향상을 위한 국제협력활동 (YOPP-SH) 2차 TOP (Target Observation Period, 일정 조건 만족시 관측 실시 방식, 2022년 4월 15일부터 8월 31일까지 기간 대상)에 세종기지 및 장보고기지가 참여하였다.
 - 세종기지는 TOP 관측시 라디오존데 관측을 하루 1회 실시하였으며 5월 12-16일(5회), 6월 2-4일(3회), 7월 14-18일(5회), 7월 23-27일 중 3회, 8월 22-31일 중 5회를 실시하였다.
 - 획득된 집중관측 자료는 세계기상기구 통신망(GTS)에 실시간 전송되어 참여 예보기관에서 입력자료로 활용되었으며, 향후 YOPP-SH 아카이브에 수집하여 공동

데이터로서 모델실험 및 성능향상에 기여하게 될 것이다.



Fig. 3.1.16. YOPP-SH 참여를 위한 2022년 7월 14일, 세종 기지에서 라디오존데 관측

극지연구소

3.1.2 수치모델 활용 남극 극한기상 재현 및 원인 파악

가. 극한기상 사례의 수치모의를 위한 수치모델 설치

- 연구소 계산서버 및 국가슈퍼컴퓨팅센터의 누리온 시스템에 WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock et al., 2019) 모델 4.1.5 버전 설치하였다.
- 관련 분야 선행연구 (예, Kwon et al., 2019) 조사를 통해, 수치모의를 위한 모의영역, 수평해상도, 초기 및 경계자료, 물리과정 결정한다.
- 수평해상도가 27, 9, 3 km인 3개의 모의영역을 two-way nesting 방법으로 설정하고, 해상도가 가장 높은 모의영역은 세종기지를 중심으로 한다.
- 초기 및 측면경계조건으로는, 자료동화를 통해 초기조건을 개선하는 과정이 포함되어 있지 않으므로 ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecasts) ERA5 재분석자료를 사용한다.
- 물리과정 가운데, 행성경계층과정으로는 MYJ 방안 (Janjic, 1994),

미세물리과정으로는 WSM5 방안 (Hong et al., 2004), 적운모수화과정 (27-km 모의영역에만 적용)으로는 Grell-Devenyi 방안 (Grell and Devenyi, 2002), 장파 및 단파복사과정으로는 RRTMG 방안 (Iacono et al., 2008), 그리고 지면모형으로는 Noah LSM (Tewari et al., 2004)을 선택한다.

- 극한기상 특성 분석을 위한 자료 (세종 기지, 장보고 기지, 타기지 관측자료, 재분석자료)를 확보하였다.

WPS Domain Configuration

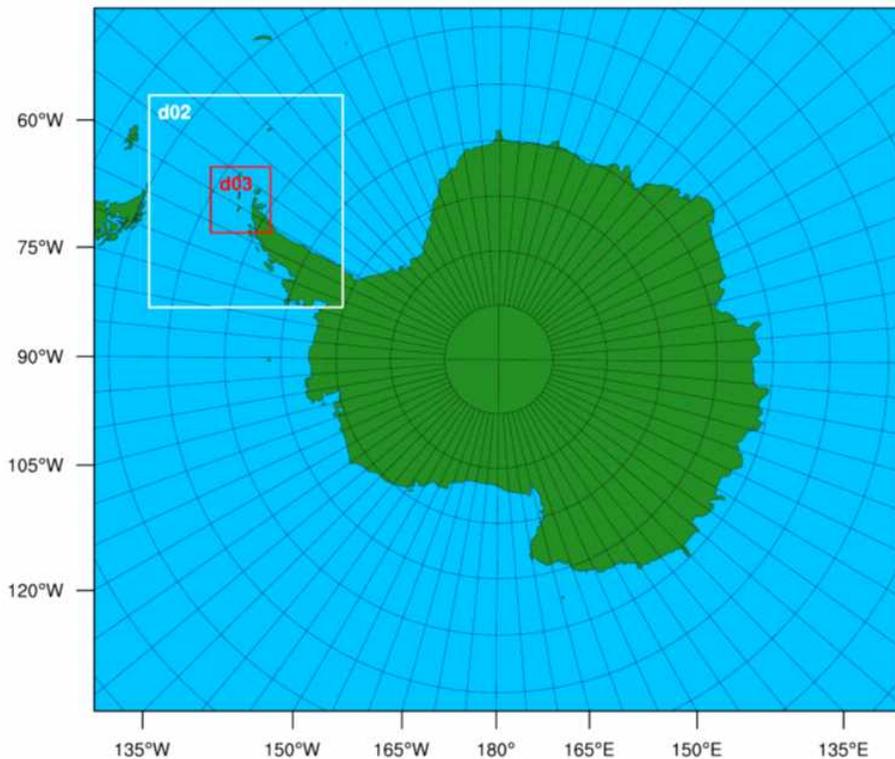


Fig. 3.1.17. WRF 모델 수행을 위한 수평해상도가 27, 9, 3 km인 3개의 모의영역

나. 선정된 극한기상 사례 가운데 강풍 사례에 대한 수치모의 수행

- 세종기지 기상관측자료를 이용하여, 2개의 기준으로, 각각의 기준에 대해 15개씩, 총 30개의 강풍 사례를 선정하였다.
- 일 평균 풍속 (daily average wind speed)을 기준으로 15개의 사례를, 그리고 일 최대 풍속 (daily maximum wind speed)을 기준으로 15개의 사례를 선정하였다.
- 총 30개의 강풍 사례에 대해, WRF 모델을 이용하여 72시간 예측을 수행하고 (Table.

3.1.7), 앞 12시간과 뒤 12시간을 뺀 48시간, 즉 강풍 발생 일을 기준으로 12시간 전부터 12시간 후까지의 모의결과를 분석하였다.

Table. 3.1.7. 일평균풍속 (좌)과 일최대풍속 (우)을 기준으로 선정한 15개 강풍사례의 수치모의를 위한 모형 초기시각

일평균풍속 기준 강풍사례		일최대풍속 기준 강풍사례	
사례 번호	모형 초기시각 (UTC)	사례 번호	모형 초기시각 (UTC)
1	2002100900	1	2014063000
2	1991091000	2	2014092100
3	1992053000	3	2013081800
4	2003070600	4	2014062900
5	1995073100	5	2008041900
6	2004091600	6	2014081400
7	1991052400	7	2003081500
8	2000073000	8	2015080400
9	1988122900	9	2014092200
10	1998090800	10	2013081600
11	2003060400	11	1990061500
12	2011072000	12	1991091000
13	2007070200	13	2000060600
14	2013081800	14	2014051200
15	2007051800	15	2013012600

- 세종기지 풍속 관측 시계열을, 세종기지와 가장 가까운 격자점으로부터 추출한 WRF 모델 모의결과, 그리고 ERA5 재분석자료와 비교하였다.
- 일평균풍속을 기준으로 한 사례에서는, WRF 모델 모의결과와 관측 시계열 사이의 상관계수 (correlation coefficient)가 최소 -0.33에서 최대 0.95, 평균절대오차 (mean absolute error)가 최소 3.58 m s⁻¹에서 최대 9.47 m s⁻¹로 나타났다.
- ERA5 재분석자료는 관측과 비교하여, 일부 사례에서 풍속 최대값보다 작은 값을 갖지만 전반적으로 관측 시계열과 비슷한 경향을 보였다.
- 일최대풍속을 기준으로 한 사례에서는, WRF 모델 모의결과와 관측 시계열 사이의 상관계수가 최소 -0.18에서 최대 0.95, 평균절대오차가 최소 1.88 m s⁻¹에서 최대 7.09 m s⁻¹로 나타났다.
- 일평균풍속을 기준으로 한 15개 사례의 상관계수와 평균절대오차의 사례평균은 각각 0.62, 5.73 m s⁻¹, 그리고 일최대풍속을 기준으로 한 15개 사례의 평균은 각각 0.72,

3.71 m s⁻¹로, 일평균풍속을 기준으로 한 강풍 사례보다는 일최대풍속을 기준으로 한 강풍 사례의 모의성능이 더 나은 것을 확인할 수 있다.

- 일최대풍속을 기준으로 한 강풍 사례에서도, ERA5 재분석자료는 관측 시계열의 변화를 잘 반영하고, 이를 통해 ERA5 재분석자료를 강풍 사례 분석을 위한 기준자료 (reference or truth)로 사용할 수 있을 것으로 판단한다.

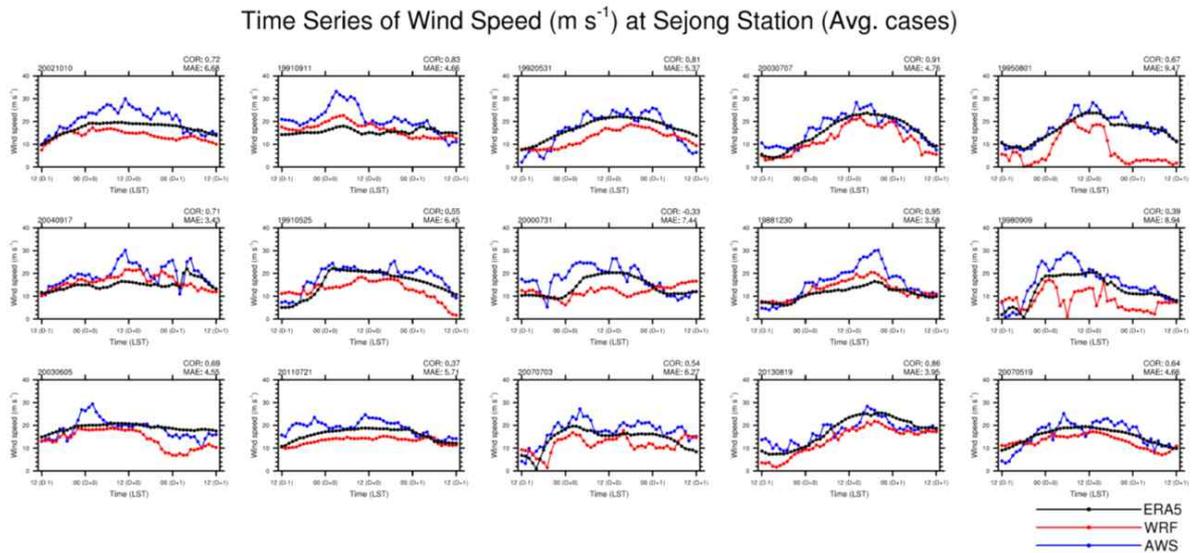


Fig. 3.1.18. 일평균풍속 기준 15개의 강풍 사례에 대한, 세종기지 풍속 시계열 (강풍 발생일 기준 12시간 전부터 12시간 후까지의) 비교. WRF 모의결과 (빨간색), 세종기지 관측 (파란색), 그리고 ERA5 재분석자료 (검은색)의 비교

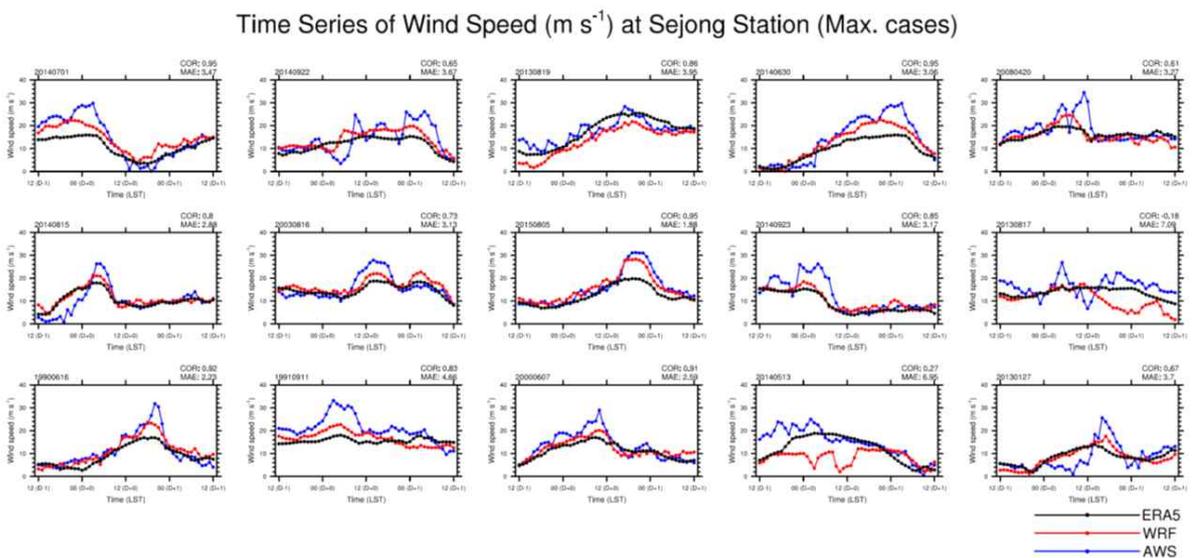


Fig. 3.1.19. 일최대풍속 기준 15개의 강풍 사례에 대한, 세종기지 풍속 시계열 (강풍 발생일 기준 12시간 전부터 12시간 후까지의) 비교. WRF 모의결과 (빨간색), 세종기지 관측 (파란색), 그리고 ERA5 재분석자료 (검은색)의 비교

- 세종기지 기상관측자료를 이용하여, 총 30개의 강풍 사례에 대해 바람장미도를 분석하고 이를 WRF 모델 모의결과와 비교하였다.
- 일평균풍속을 기준으로 한 15개 사례 가운데, 12개의 사례에서 주풍이 동풍 계열로 나타났으며 WRF 모델의 모의결과에서도 (풍속이 관측에 비해 약하지만) 이를 잘 반영하였다.
- 일최대풍속을 기준으로 한 15개 사례 가운데, 12개의 사례에서 주풍이 북풍 계열로 나타났으며 WRF 모델의 모의결과에서도 이를 잘 반영하였다.
- 일평균풍속을 기준으로 한 강풍 사례에서는 동풍 계열의 바람이, 그리고 일최대풍속을 기준으로 한 강풍 사례에서는 북풍 계열의 바람이 주풍으로 나타나 선행연구 (Kwon et al., 2019)의 결과와 일치하였다.
- 결론적으로, WRF 모델의 모의결과에서 일평균풍속과 일최대풍속 기준 강풍 사례의 주풍 방향을 잘 반영하고 있으며, (사례에 따라 다르지만 평균적으로) 일평균풍속을 기준으로 하는 강풍 사례보다는 일최대풍속을 기준으로 하는 강풍 사례의 풍속 변화를 더 잘 모의한다.

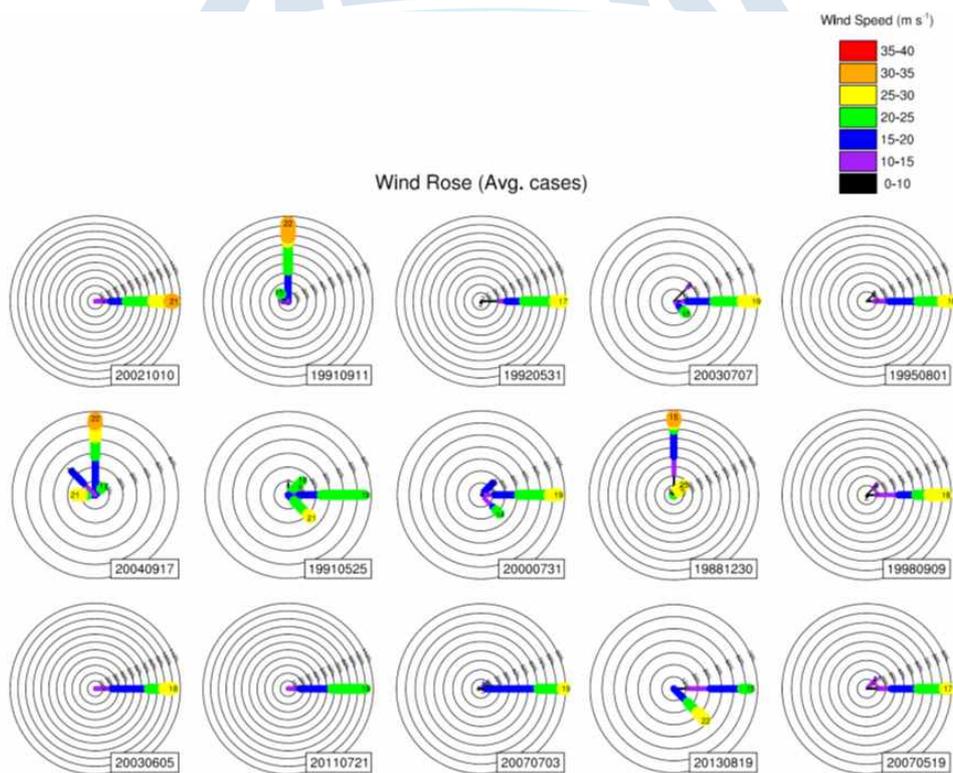


Fig. 3.1.20. 일평균풍속 기준 강풍사례 15개에 대한 바람장미도 (세종기지 기상관측자료)

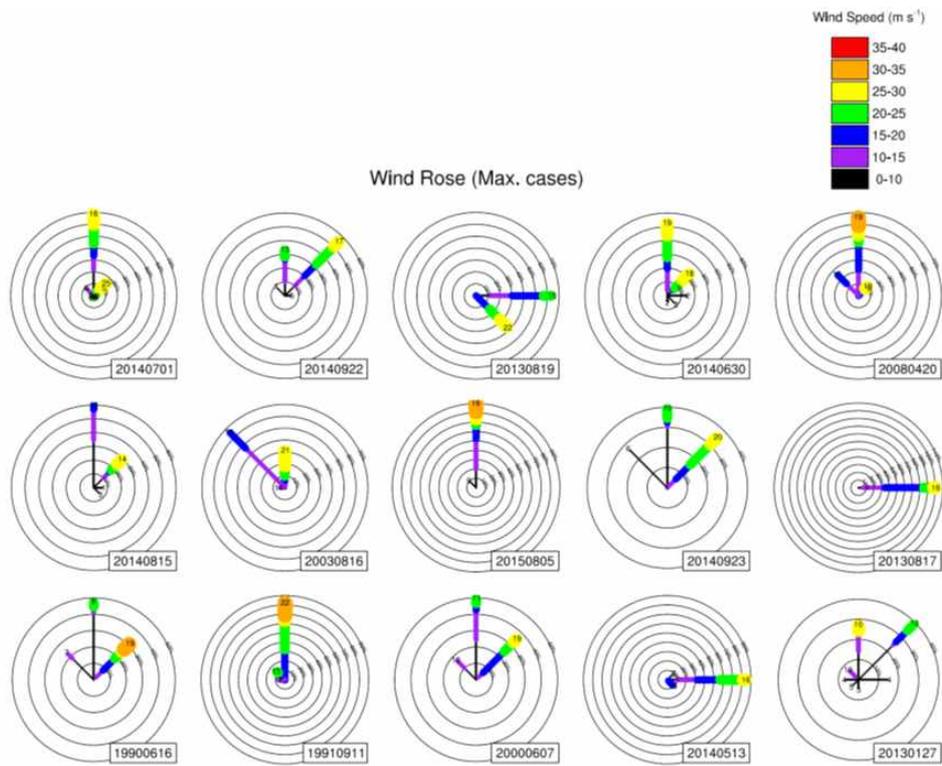


Fig. 3.1.21. 일최대풍속 기준 강풍사례 15개에 대한 바람장미도 (세종기지 기상관측자료)

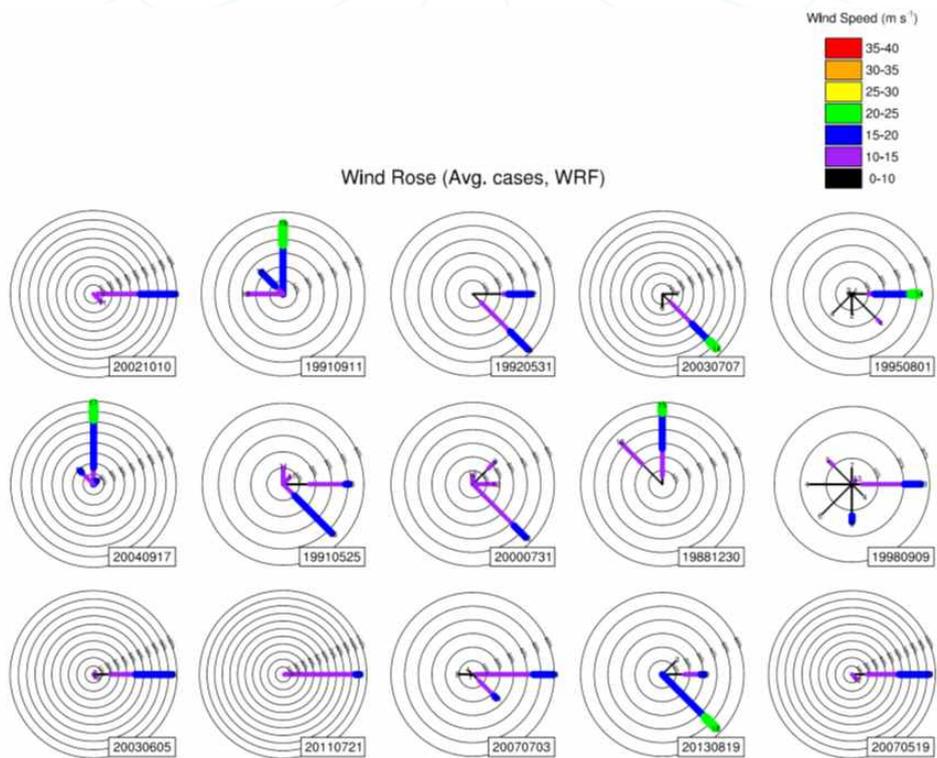


Fig. 3.1.22. 일평균풍속 기준 강풍사례 15개에 대한 바람장미도 (WRF 모델 모의결과)

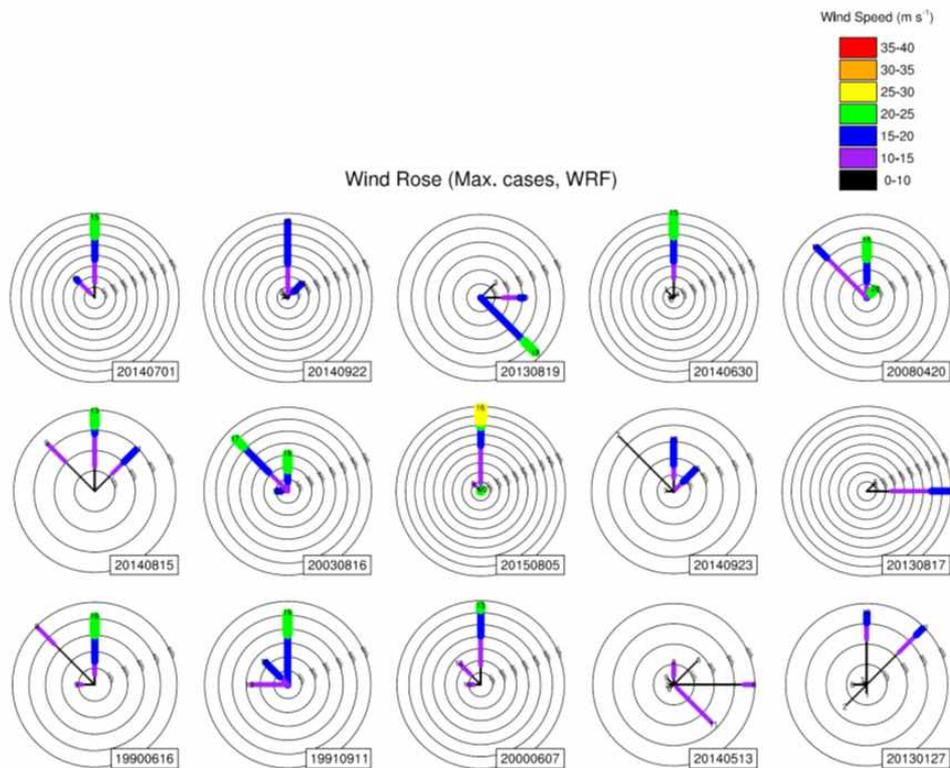


Fig. 3.1.23. 일최대풍속 기준 강풍사례 15개에 대한 바람장미도 (WRF 모델 모의결과)

- 세종기지 기상관측자료만으로 WRF 모델 모의결과를 분석하기에는 한계가 있으므로, (세종기지 관측 시계열을 잘 반영하는 것으로 판단된) ERA5 재분석자료를 이용하여 WRF 모델의 모의결과를 분석하였다.
- 강풍 발생 시 종관적인 배경의 모의정도를 분석하기 위하여, 일평균풍속 기준 15개의 사례, 그리고 일최대풍속 기준 15개의 사례에 대해, 해면기압 (Sea Level Pressure, SLP)과 500-hPa 지위고도 (geopotential height)의 근제곱평균오차 (Root Mean Square Error, RMSE)를 계산하였다.
- 일평균풍속 기준 15개 사례의 모의결과에서는, 대부분의 사례 (1988년 12월 30일 사례 예외)에서 해면기압의 근제곱평균오차가 6 hPa에서 10 hPa 사이의 값을 갖고 있다.
- 500-hPa 지위고도의 근제곱평균오차는 대부분의 사례에서 10 m와 30 m 사이의 값을 갖으나, 일부 사례 (1991년 5월 25일 사례)에서는 60시간 예보오차가 40 m에 도달하기도 한다.
- 일최대풍속을 기준으로 선정한 15개 사례 모의결과에서는, 해면기압의

근제곱평균오차가 2013년 1월 27일 사례를 제외한 모든 사례에서 6 hPa과 10 hPa 사이의 값을 갖고 있다.

- 500-hPa 지위고도의 근제곱평균오차는 모든 사례에서 10 m와 30 m 사이의 값을 갖고, 대부분의 사례에서는 60시간 예보 후에도 20 m 내외의 오차를 나타냈다.

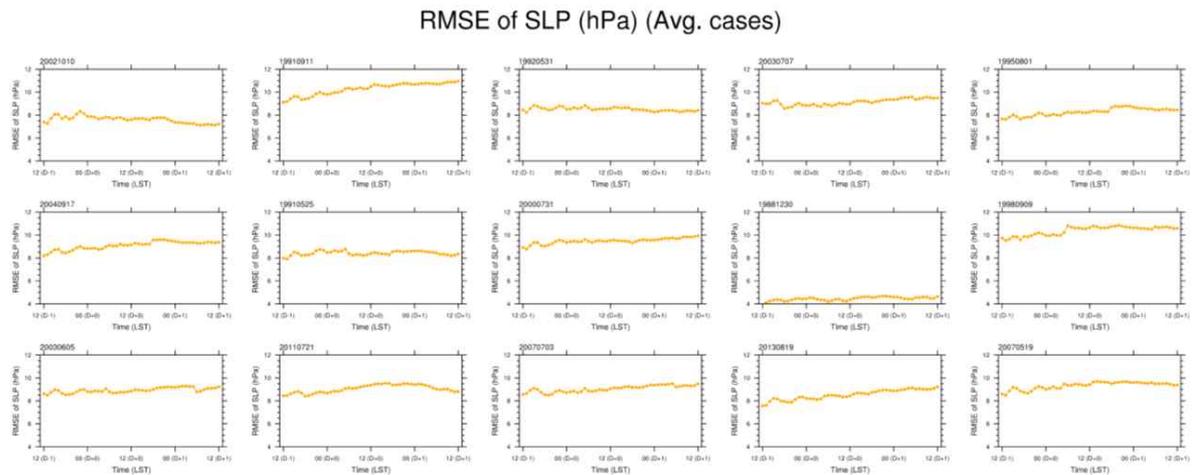


Fig. 3.1.24. 강풍 발생일 기준 12시간 전부터 12시간 후까지의, ERA5 재분석자료를 기준으로 계산한 해면기압의 근제곱평균오차 변화 (일평균풍속 기준 15개 사례)

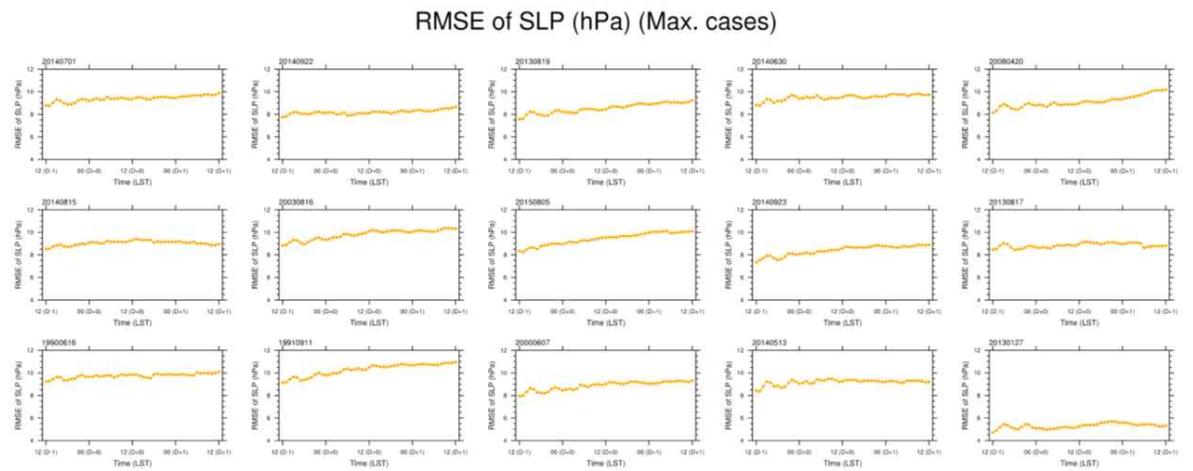


Fig. 3.1.25. 강풍 발생일 기준 12시간 전부터 12시간 후까지의, ERA5 재분석자료를 기준으로 계산한 해면기압의 근제곱평균오차 변화 (일최대풍속 기준 15개 사례)

RMSE of 500-hPa geopotential height (m) (Avg. cases)

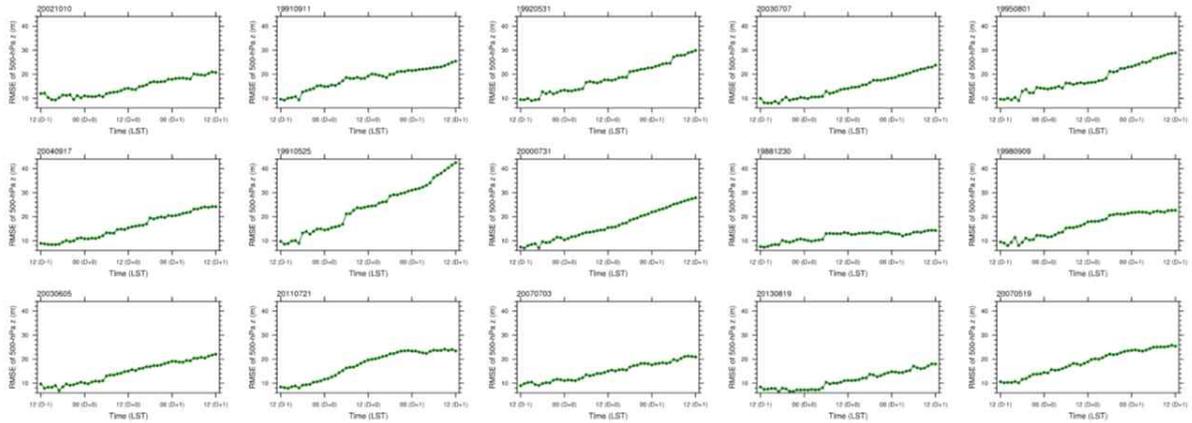


Fig. 3.1.26. 강풍 발생일 기준 12시간 전부터 12시간 후까지의, ERA5 재분석자료를 기준으로 계산한 500-hPa 지위고도의 근제곱평균오차 변화 (일평균풍속 기준 15개 사례)

RMSE of 500-hPa geopotential height (m) (Max. cases)

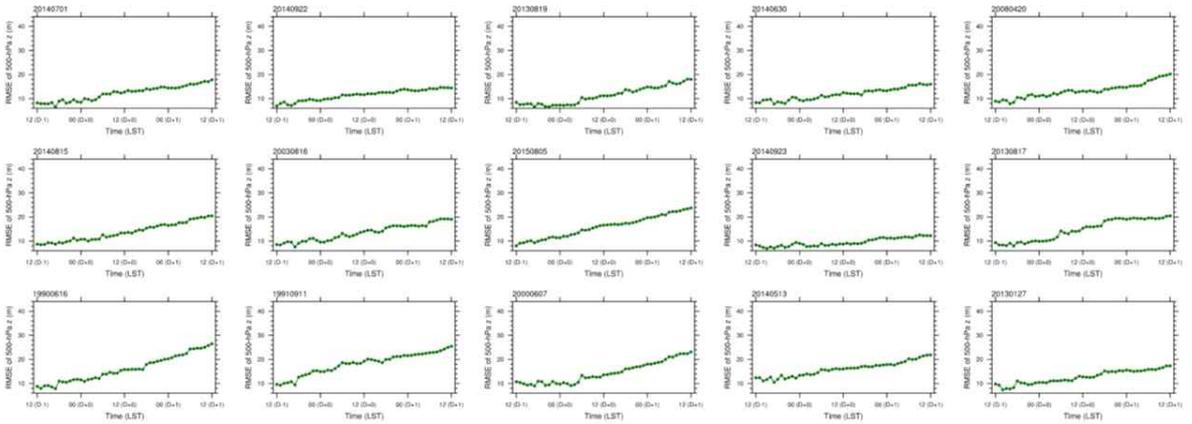


Fig. 3.1.27. 강풍 발생일 기준 12시간 전부터 12시간 후까지의, ERA5 재분석자료를 기준으로 계산한 500-hPa 지위고도의 근제곱평균오차 변화 (일최대풍속 기준 15개 사례)

- WRF 모델의 전반적인 강풍 사례 모의정도를 분석하기 위하여, 일평균풍속 기준 15개 사례와 일최대풍속 기준 15개 사례에 대해, 해면기압과 10-m 바람 벡터의 분포를 ERA5 재분석자료와 비교 (강풍 발생일을 기준으로, 12시간 전부터 발생일까지의 시간 평균)하였다.
- 일평균풍속을 기준으로 한 15개 사례에서는, 세종기지에 영향을 준 저기압에 의해 12개의 사례에서 동풍 계열의 강풍이 나타나고, WRF 모델의 모의결과에서도 저기압의 위치 및 풍향이 잘 모의되었다.

- 일최대풍속을 기준으로 한 15개 사례에서는, 바람장미도에서와 같이, 저기압의 영향으로 12개의 사례에서 북풍 계열의 강풍이 나타나고, WRF 모델의 모의결과에서도 저기압의 위치 및 연관된 풍향이 잘 모의되었다.
- ERA5 재분석자료에 비해, WRF 모델의 모의결과에서는 남극대륙에서의 해면기압이 낮게 모의되는 경향이 있어, 향후 이에 대한 추가적인 분석이 요구된다.

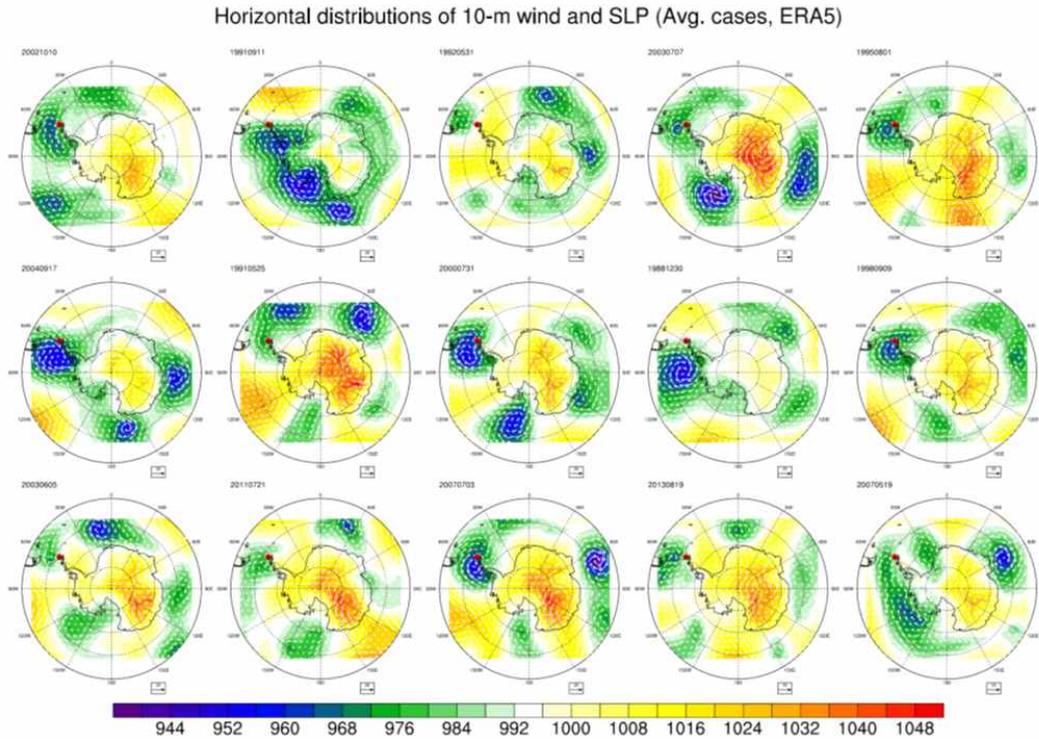


Fig. 3.1.28. 일평균풍속 기준 15개의 강풍사례에 대한, 해면기압과 10-m 바람벡터의 수평 분포도 (ERA5 재분석자료)

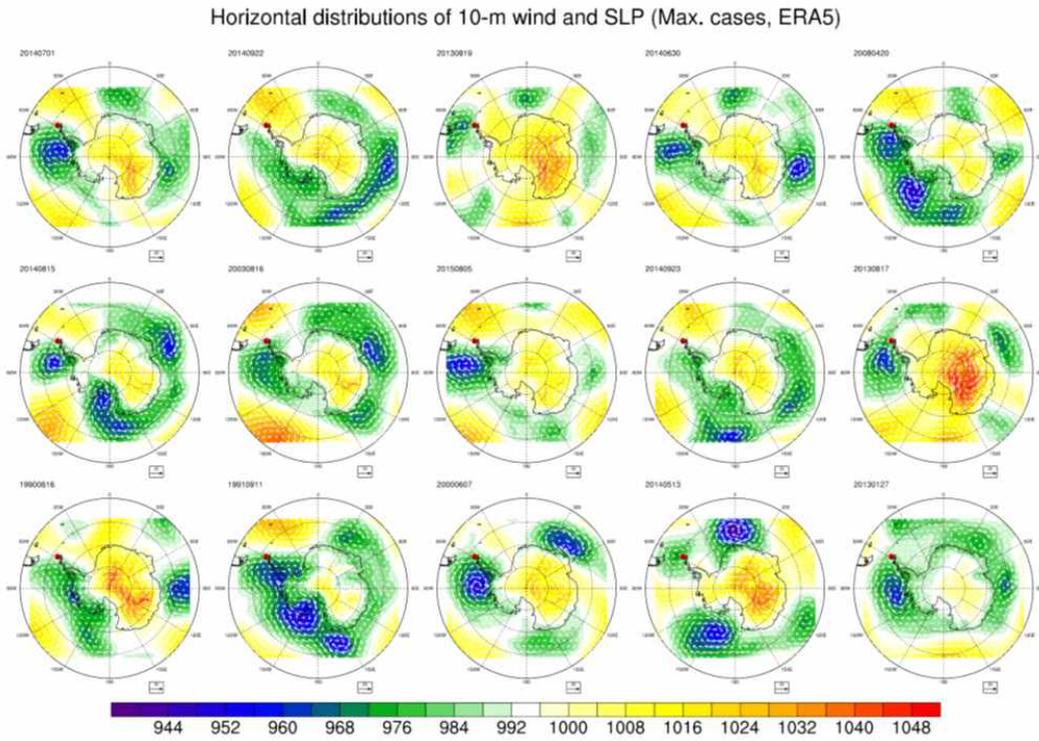


Fig. 3.1.29. 일최대풍속 기준 15개의 강풍사례에 대한, 해면기압과 10-m 바람벡터의 수평 분포도 (ERA5 재분석자료)

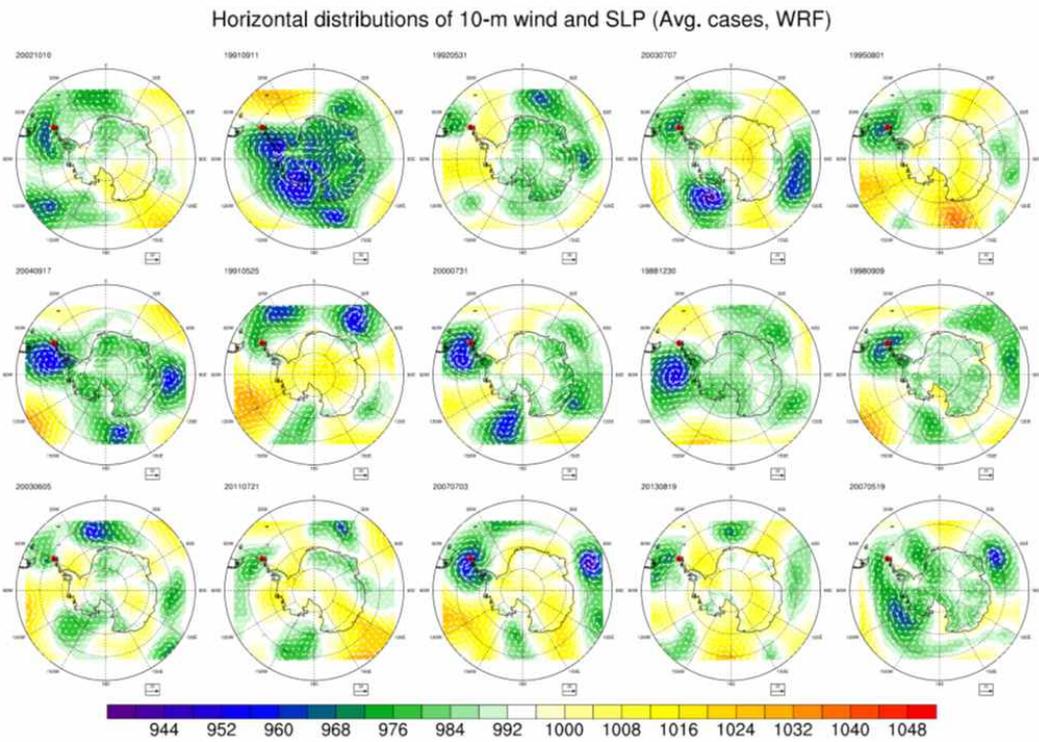


Fig. 3.1.30. 일평균풍속 기준 15개의 강풍사례에 대한, 해면기압과 10-m 바람벡터의 수평 분포도 (WRF 모델 모의결과)

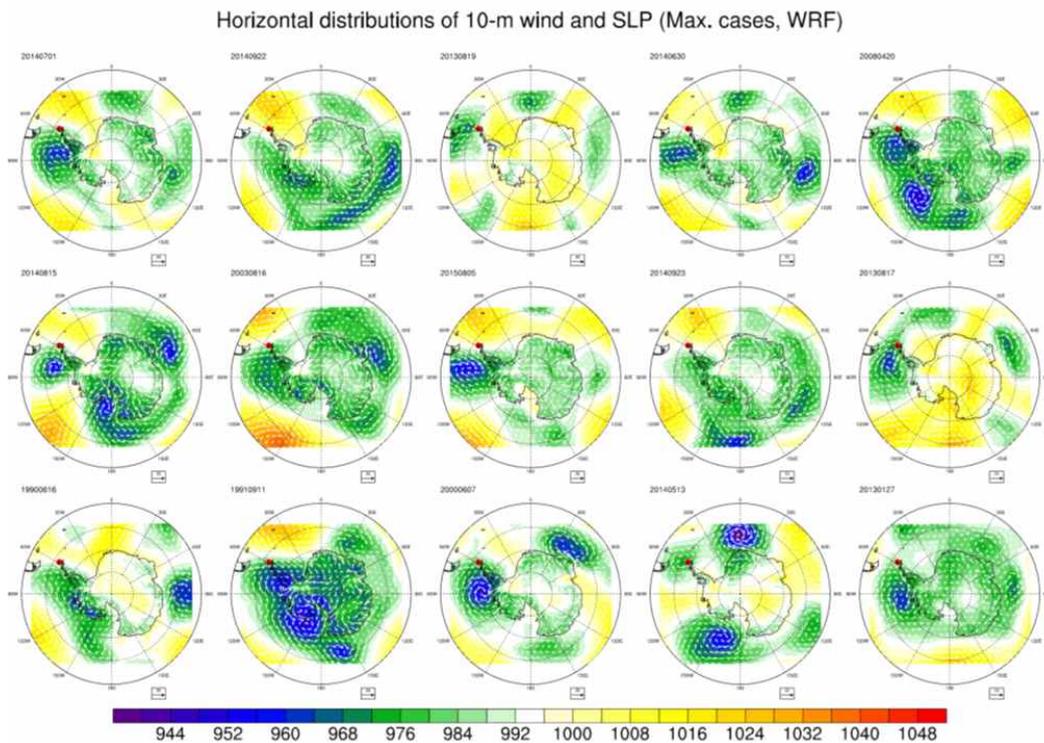


Fig. 3.1.31. 일최대풍속 기준 15개의 강풍사례에 대한, 해면기압과 10-m 바람벡터의 수평 분포도 (WRF 모델 모의결과)

- 세종기지 강풍 사례와 연관된 종관적인 특성을 일반화하기 위하여, 일평균풍속을 기준으로 하는 강풍 사례와 일최대풍속을 기준으로 하는 강풍 사례에 대해, 해면기압과 10-m 바람벡터를 사례 평균하여 합성장 분석 (composite analysis)을 수행하였다
- 일평균풍속을 기준으로 선정된 사례에서는, 세종기지의 북쪽에 저기압의 중심이 위치하여 동풍 계열의 강풍이 나타나고, WRF 모델 모의결과에서도 세종기지에 영향을 준 저기압의 위치 및 강도가 잘 나타났다.
- 반면, 일최대풍속을 기준으로 선정된 사례에서는, 세종기지의 서쪽에 저기압의 중심이 위치하여 북풍 계열의 강풍이 나타나고, 이러한 패턴이 WRF 모델의 모의결과에서도 비교적 정확하게 나타났다.
- 세종기지 강풍과 연관된 저기압의 위치와 그에 따른 풍향 (동풍 혹은 북풍)은 선행연구 결과와 일치하며, 향후 남극대륙에서 해면기압이 낮게 모의되는 현상에 대한 추가적인 분석 (예, 지형효과, 물리과정, 플럭스 모수화 등)을 진행할 예정이다.

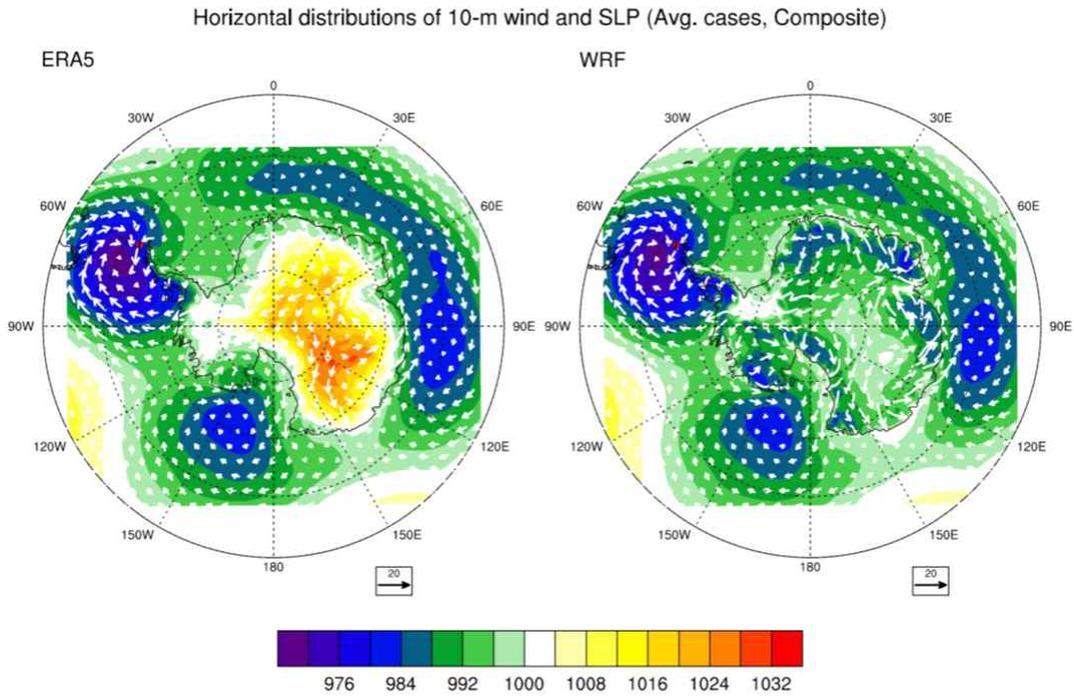


Fig 3.1.32. 일평균풍속 기준 15개의 강풍사례에 대해 평균한, 해면기압과 10-m 바람벡터의 합성장.
(좌) ERA5 재분석자료, (우) WRF 모델 모의결과

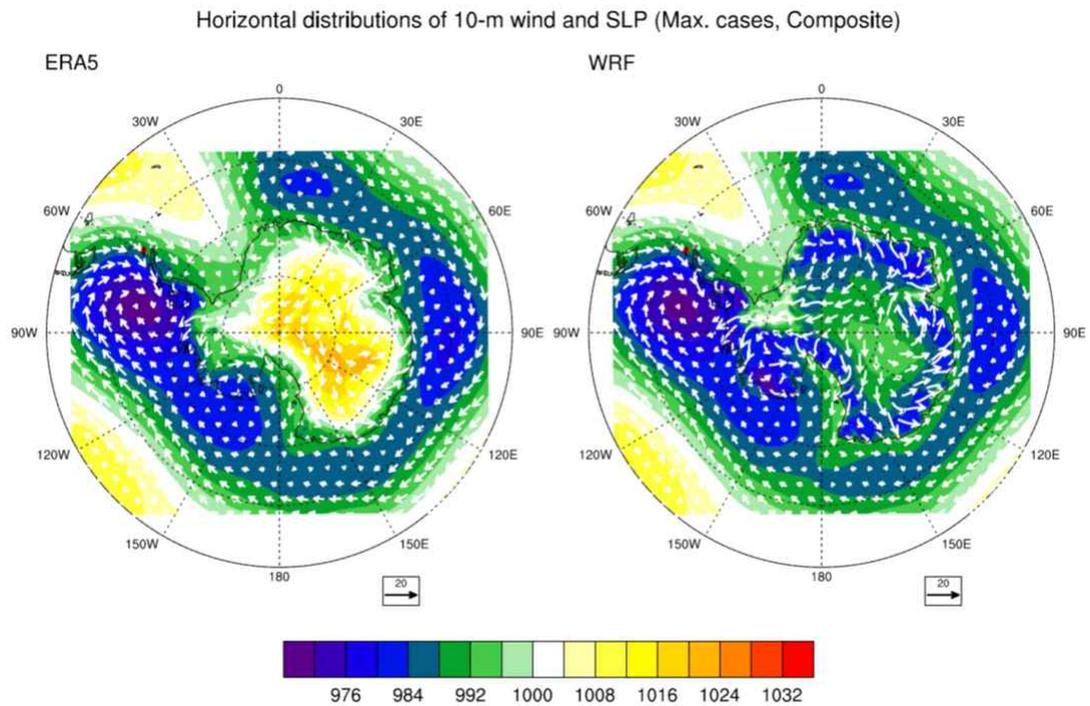


Fig. 3.1.33. 일최대풍속 기준 15개의 강풍사례에 대해 평균한, 해면기압과 10-m 바람벡터의 합성장.
(좌) ERA5 재분석자료, (우) WRF 모델 모의결과

다. 선정된 극한기상 사례에 대한 수치모의 수행

- 1차년도 연구를 통해, WRF 모형 기반 수치모의 시스템을 구축한 바 있다.
- 세종과학기지 AWS 관측 자료를 기준으로 선정한, 15개의 저온 사례 (cold-temperature cases)에 대해 WRF 모형을 이용한 수치모의 수행하였다.
- 수치모의를 위한 모의 영역, 초기 및 측면경계 조건, 물리과정 등은 1차년도의 설정을 그대로 이용하였다.
- 1차년도에 수치모의를 수행한 강풍 사례 (strong-wind cases)의 경우, 강풍 발생에 있어 세종과학기지 주변 지형의 영향을 알아보기 위하여, 주변 지형의 높이를 0 m로 변경한 실험을 수행하였다.
- 저온 사례의 경우, 저온 발생에 있어 대규모 대기장의 역할을 알아보기 위한 스펙트럴 너징 (spectral nudging) 실험, 초기 시각에 따른 모의 정도를 비교하기 위한 실험, 물리과정 조합을 다르게 하는 물리과정 민감도 실험을 추가로 수행하였다.

Table. 3.1.8. 세종기지 AWS 관측자료를 이용하여 선정한 15개 저온사례와 수치모형 수행 초기시각

사례 번호	수치모의 초기시각 (UTC)
1	1994072300
2	1991080300
3	1994072200
4	1994072400
5	2007071400
6	2007071300
7	1994071300
8	2007072400
9	1991080200
10	1995073100
11	1995071600
12	2007070200
13	2005063000
14	1998090800
15	2006082300

라. 관측자료와 수치모의 결과를 이용하여 남극기지 극한기상 종류별 특성 분석

- 강풍 사례 1차년도 연구를 통해, 세종과학기지 AWS 관측 자료를 이용하여, 총

30개의 강풍 사례 (일 평균 풍속 기준 15개, 일 최대 풍속 기준 15개)를 선정한 바 있다.

- WRF 모형을 이용한 모의결과는, 일 평균 풍속 기준 사례와 일 최대 풍속 기준 사례 모두에서 관측과 유사하게 나타났으나, 상대적으로 일 최대 풍속 기준 사례의 예측성이 더 높게 나타났다.
- 관측(AWS 관측과 ERA5 재분석자료)과 WRF 모의결과 모두에서, 일 최대 풍속 기준 사례에서는 북풍이, 그리고 일 평균 풍속 기준 사례에서는 동풍이 주풍으로 나타났다.
- 세종과학기지 강풍 현상은, 저기압이 세종기지를 지나가면서 저기압에 동반된 강한 바람에 의해 발생하지만, 풍향에 따라서는 지형의 영향을 받을 수 있다고 가정하여 지형 실험 (TOPO EXP)을 추가로 수행하였다.
- 주풍이 동풍 계열인 일 평균 풍속 기준 사례에서는, 규준실험 (CTL EXP)과 지형실험에서 모의된 풍속의 시계열에 큰 차이가 없었다(북풍 계열의 바람이 우세한 사례 제외).
- 반면 주풍이 북풍 계열인 일 최대 풍속 기준 사례에서는, 규준실험과 지형실험에서 모의된 풍속 시계열에 차이가 나타나며 (주풍이 북풍이 아닌 사례 제외), 특히 최대 풍속이 나타나는 시각에서 두 실험 간의 차이가 가장 크게 나타났다.
- 결론적으로, 북풍이 우세하게 나타나는 강풍 사례에서는, 세종기지 주변 지형에 의해 풍하측에서 풍속이 증가하는 downslope wind strom과 같은 현상이 발생할 수 있고, 저기압 통과와 함께 세종기지 강풍 현상의 주요 원인이라 할 수 있다.

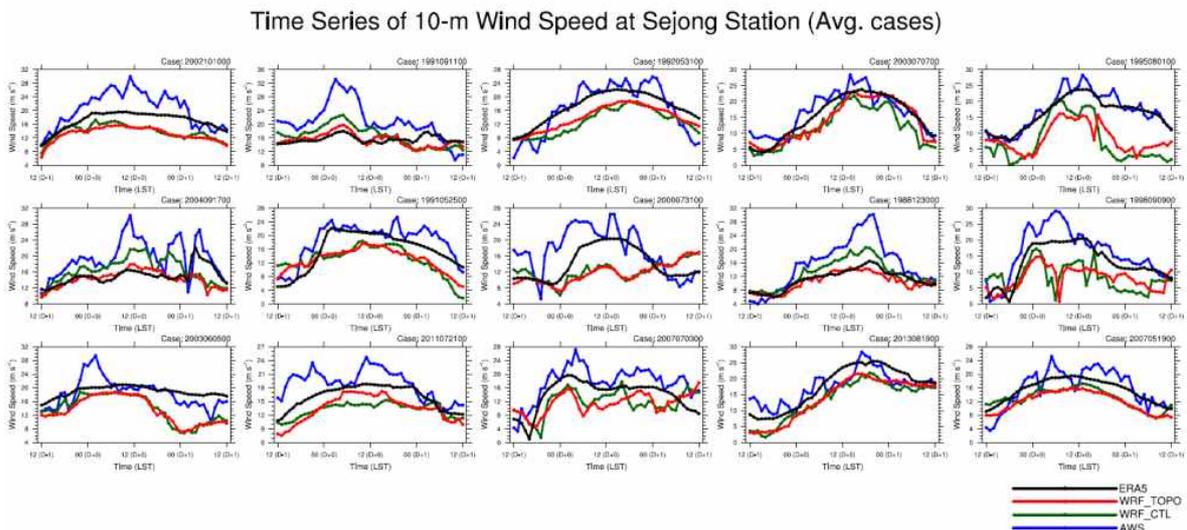


Fig. 3.134. 일 평균 풍속 기준 15개 강풍 사례에 대한, 세종기지 10-m 풍속의 시계열 비교. WRF CTL_EXP (초록색), WRF TOPO_EXP (빨간색), AWS 관측자료 (파란색), ERA5 재분석자료 (검은색)

Time Series of 10-m Wind Speed at Sejong Station (Max. cases)

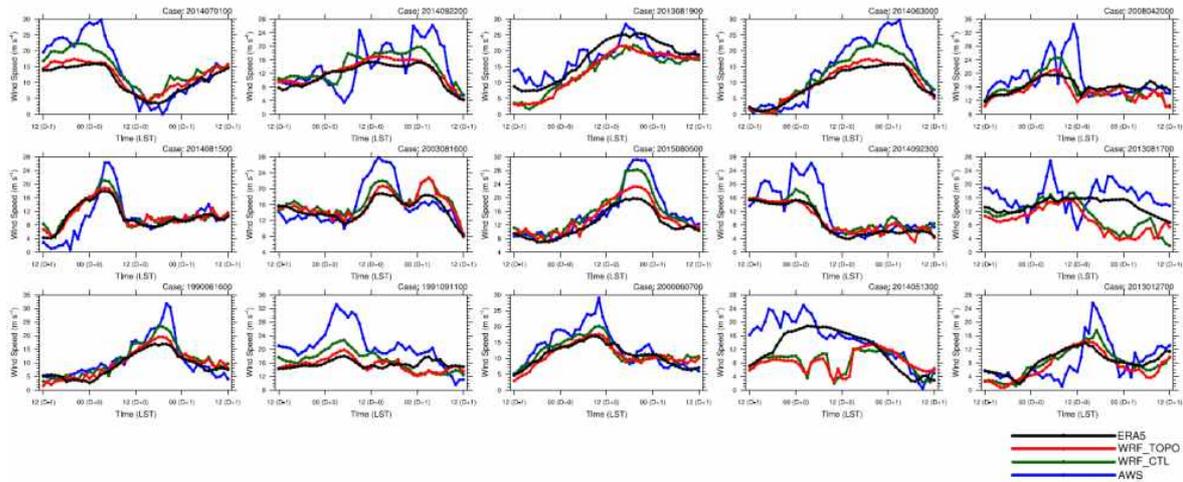


Fig. 3.1.35. 일 최대 풍속 기준 15개 강풍 사례에 대한, 세종기지 10-m 풍속의 시계열 비교. WRF CTL_EXP (초록색), WRF TOPO_EXP (빨간색), AWS 관측자료 (파란색), ERA5 재분석자료 (검은색)

- 저온 사례 세종과학기지 AWS 관측자료를 기준으로 선정한 15개의 저온 사례에 대해 WRF 모형을 이용한 수치모의를 수행하고, 세종기지에서의 2-m 온도 시계열을 AWS 관측자료 (일부 사례에서는 결측이 존재), ERA5 재분석자료와 비교하였다.
- 저온이 발생한 날 (Day D+0)을 기준으로 12시간 전인 12 LST D-1부터 다음날 (Day D+1) 12 LST까지의 시계열을 비교하였다.
- ERA5 재분석자료로부터 산출한 시계열은, 관측과 차이가 나는 경우도 있지만 대체적으로 관측 시계열과 유사하였다.
- 15개의 저온 사례는, 저온 사례일에 저기압이 세종과학기지를 통과하는 사례와 그렇지 않은 사례로 나눌 수 있는데, 두 경우의 예측성이 다르다.
- 저기압이 세종기지를 통과하는 저온사례의 경우, 저기압의 위치나 강도 모의정도에 따라 차이가 있지만, 대체적으로 세종기지에서의 2-m 온도 시계열을 관측과 유사하게 모의하였다.
- 반면, 그렇지 않은 사례의 경우, 2-m 온도의 시간에 따른 변화는 관측과 유사하게 모의하지만 음의 온도 편차 (cold bias)가 나타났다.

Time Series of 2-m Temperature at Sejong Station (Effects of Spectral Nudging)

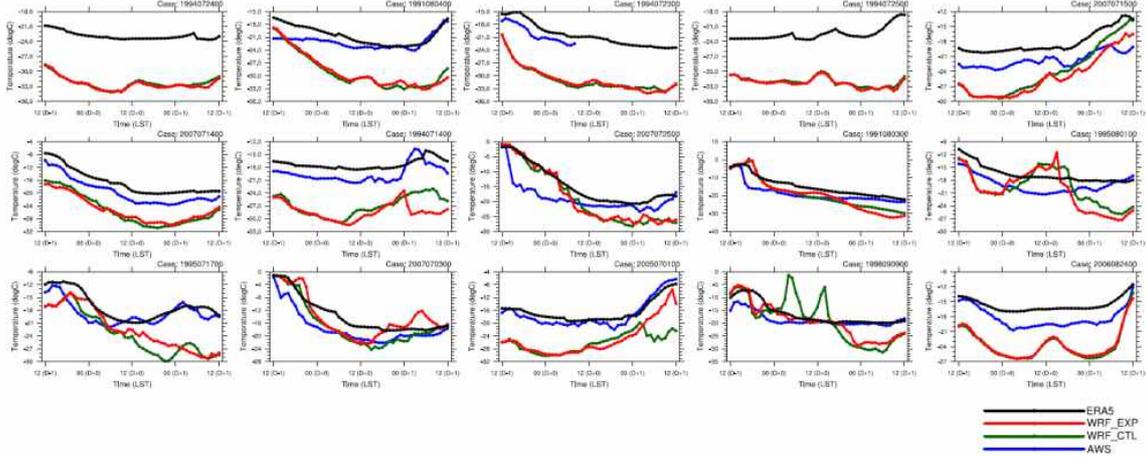


Fig. 3.1.36. 15개 저온사례에 대한, 세종기지 2-m 온도 시계열 비교. WRF CTL_EXP (초록색), WRF SN_EXP (빨간색), AWS 관측자료 (파란색), ERA5 재분석자료 (검은색)

Time Series of Sea Level Pressure at Sejong Station

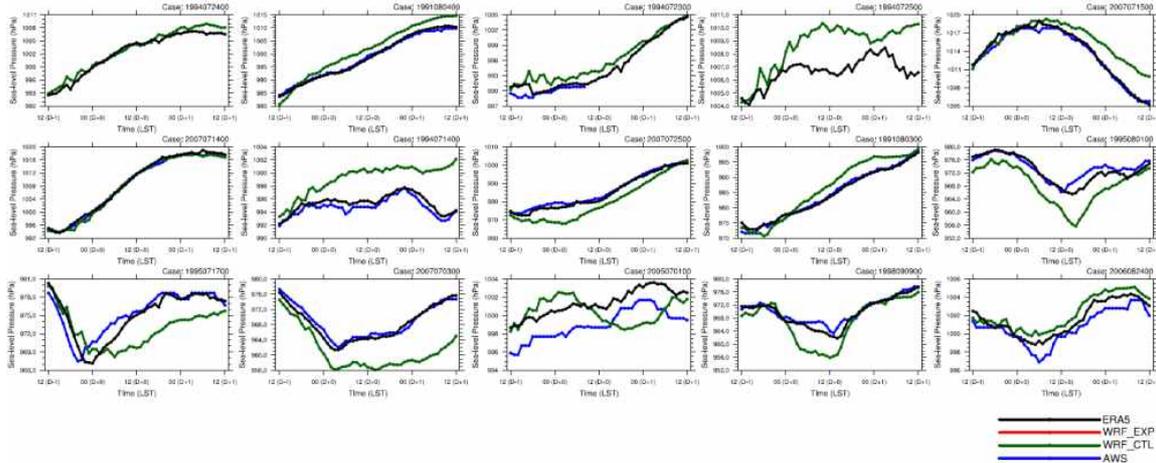


Fig. 3.1.37. 15개 저온사례에 대한, 세종기지 해면기압 시계열 비교. WRF CTL_EXP (초록색), AWS 관측자료 (파란색), ERA5 재분석자료 (검은색)

- 저온 사례 모의결과에서 나타나는 음의 온도 편차의 원인을 파악하기 위하여, 1) 스펙트럴 너징 실험 (SN EXP), 2) 초기 시각 실험 (IT EXP), 3) 물리과정 민감도 실험 (PHYS EXP)을 수행하였다.
- WRF 모형과 같은 지역규모 모형 (limited-area model)에서는, 대규모 대기장 (large-scale atmospheric field)의 모의가 실제와 동떨어져 (drift) 전체 모의성능이 저하되는 경우가 발생하기도 한다.

- 이러한 현상을 완화하기 위하여 스펙트럴 너징이라는 방법을 사용하는데, 스펙트럴 너징에서는 일정 규모 이상에 대해 전구모형의 대기장 (예, ERA5 재분석자료) 방향으로 강제 (nudge)하여 대규모 대기장의 모의성능을 유지한다.
- 스펙트럴 너징 실험을 규준실험과 비교하면, 세종과학기지 주변 기압장 모의가 향상되어 일부 사례에서 모의된 2-m 온도 시계열이 관측에 더 가깝게 나타나기도 하나, 전반적으로 규준실험과 큰 차이가 없고 음의 온도 편차가 사라지지 않는다.
- 미국 오하이오 주립대학교 (OSU)와 국립대기과학연구소 (NCAR)에서 운영중인 AMPS (Antarctic Mesoscale Prediction System)의 물리과정 조합, RRTMG 장파복사, Goddard 단파복사, MYJ 대기경계층, Noah LSM, WSM5 미세물리, 그리고 KF 적운모수화 과정을 이용하여 수치모의를 수행하였다.
- 규준실험과 비교하면, 물리과정을 변경한 실험 (적운모수화과정과 단파복사과정 변경)과 규준실험에서 모의된 2-m 온도 시계열에 거의 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.
- 세종과학기지 온도 모의에 영향을 미칠 것으로 예상되는 대기경계층 과정과 미세물리 과정의 여러 옵션들 가운데 각각 4개 (YSU, MYJ, MYNN3, ACM2)와 5개 (WSM6, Thompson, Morrison, WDM6, P3)를 선택하여, 총 20개의 물리과정 조합에 대해 물리과정 민감도 실험을 진행중이다.

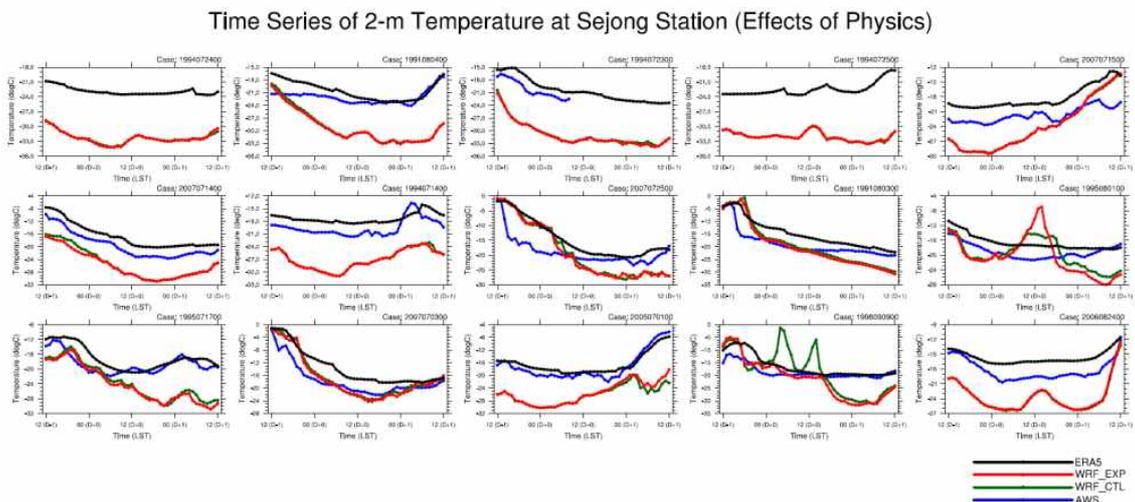


Fig. 3.1.38, 15개 저온사례에 대한, 세종기지 2-m 온도 시계열 비교. WRF CTL_EXP (초록색), WRF PHYS_EXP (빨간색), AWS 관측자료 (파란색), ERA5 재분석자료 (검은색)

- 대기수상 (hydrometeor)의 형성 등 모형의 스핀업 (spin-up)을 위한 시간을 늘리기 위하여, 저온 발생일을 기준으로 하루 전이 아닌, 3일 전에 WRF 모형 모의를 시작하는 실험을 수행하였다.
- 표준실험과 초기시각 실험에서 모의된 2-m 온도 시계열을 비교해 보면, 저기압이 세종기지를 통과하는 사례와 그렇지 않은 사례 일부에서 두 실험 간의 차이가 나타났다.
- 저기압이 세종기지를 통과하는 저온사례의 경우, 저기압의 발달 시점, 저기압의 위치 및 강도 모의에 차이가 발생하면서 2-m 온도 모의결과에도 차이가 발생하였다.
- 반면, 저기압이 세종기지를 통과하지 않고 음의 온도 편차가 나타나는 사례 가운데 일부 (1991080400, 2006082400 사례)에서, 음의 온도 편차가 줄어들었다.
- WRF 모형에서 모의된 2-m 온도 시계열에서 나타나는 음의 온도 편차가 모의된 구름의 양과 지면에 유입되는 복사량의 차이에 기인하는지 확인하기 위하여, 모의된 하향단파복사와 하향장파복사를 AWS 관측 및 ERA5 재분석자료와 비교하였다.
- 하향단파복사의 경우, 선정된 저온사례가 모두 남반구 겨울에 발생하여, 정오를 중심으로 제한된 시간 동안만 단파복사가 지면에서 흡수되고, 표준실험과 초기시각 실험 모두에서 관측과 유사하게 모의된 것을 확인하였다.
- 반면, 하향장파복사의 경우, 저기압과 관련된 구름에 의해 그 양이 조절된다고 생각할 수 있는데, 표준실험에서, 저기압이 세종기지를 통과하는 저온사례에서는 모의된 하향장파복사의 양이 관측과 유사한 데 반해, 저기압이 통과하지 않는 저온사례에서는 관측된 하향장파복사량에 비해 과소모의하는 경향을 보였다.
- 초기시각 실험의 결과를 보면, 저기압이 통과하지 않는 일부 저온사례 (1991080400, 2006082400 사례)에서, 표준실험에서 과소모의되던 하향장파복사량이 관측과 가깝게 모의되고 이로 인해 2-m 온도 시계열에서 나타나던 음의 온도 편차가 사라지는 것을 확인할 수 있다.

Time Series of 2-m Temperature at Sejong Station (Effects of Initial Time)

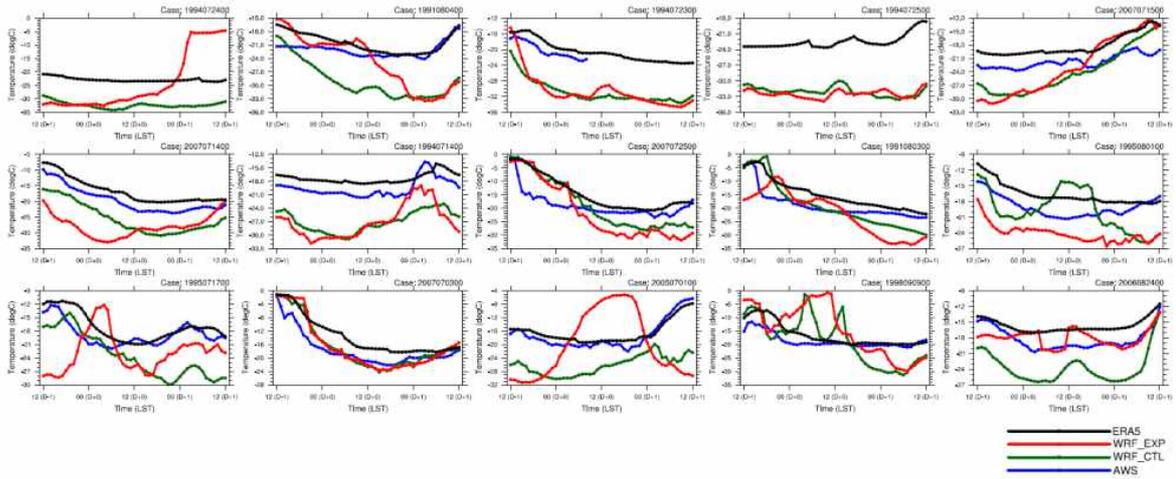


Fig. 3.1.39. 15개 저운사례에 대한, 세종기지 2-m 온도 시계열 비교. WRF CTL_EXP (초록색), WRF IT_EXP (빨간색), AWS 관측자료 (파란색), ERA5 재분석자료 (검은색)

Time Series of Downward Shortwave Radiation at Sejong Station (Effects of Initial Time)

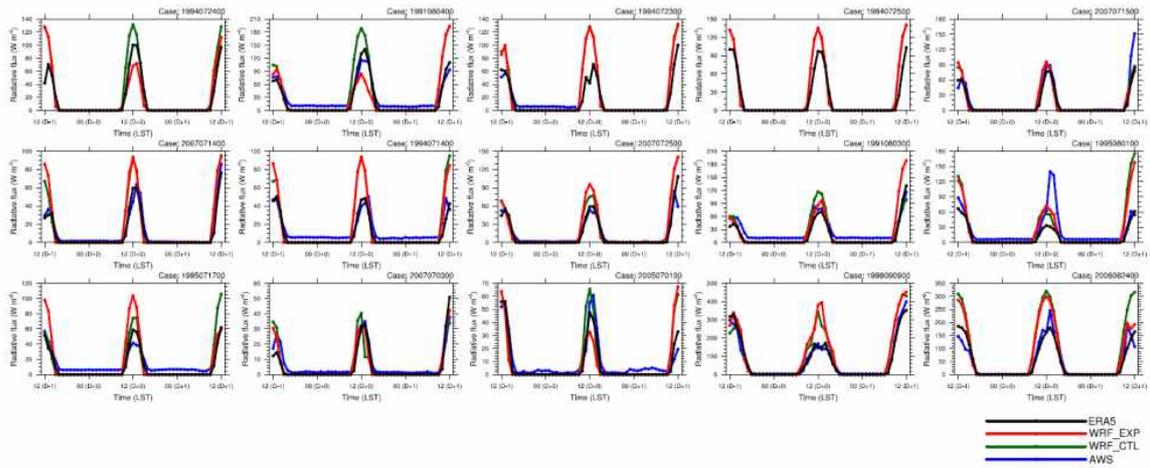


Fig. 3.1.40. 15개 저운사례에 대한, 세종기지 하향단파복사플럭스 시계열 비교. WRF CTL_EXP (초록색), WRF IT_EXP (빨간색), AWS 관측자료 (파란색), ERA5 재분석자료 (검은색)

Time Series of Downward Longwave Radiation at Sejong Station (Effects of Initial Time)

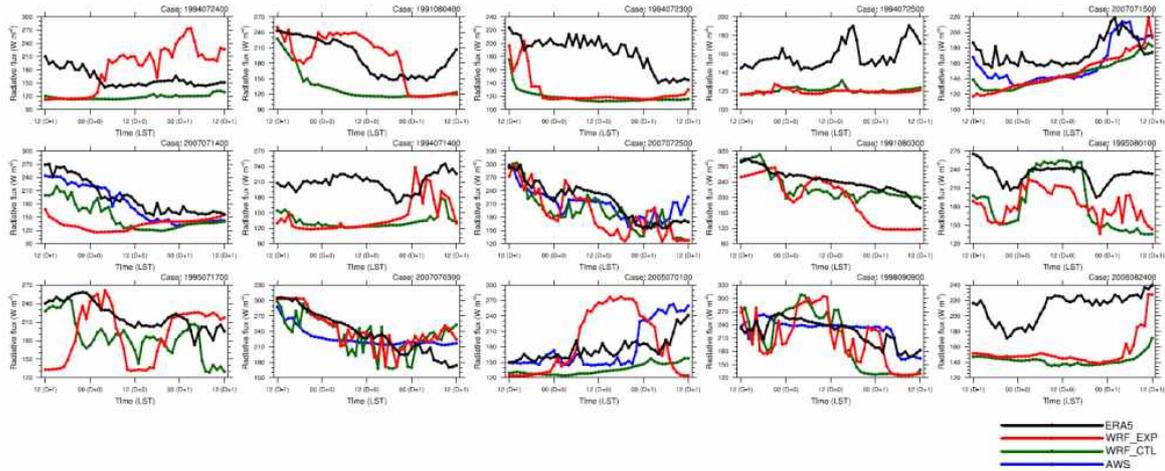


Fig. 3.1.41. 15개 저온사례에 대한, 세종기지 하향장파복사플럭스 시계열 비교, WRF CTL_EXP (초록색), WRF IT_EXP (빨간색), AWS 관측자료 (파란색), ERA5 재분석자료 (검은색)

- 세종과학기지에서 발생한 15개 저온 사례의 원인을 알아보기 위하여, WRF 모형 모의결과를 이용하여 지면 근처에서의 온도 이류항 (temperature-advection term)을 계산하였다.
- 15개의 저온 사례 모두에서, 남극 대륙의 차가운 공기가 세종기지가 위치한 남극반도 쪽으로 이류되는 현상이 모의되어, 세종기지 부근에서 수평 온도 이류에 의한 온도 경향 (temperature tendency)은 음의 값을 가짐을 확인할 수 있다.
- 세종기지 부근의 기압계 분포를 재분석자료와 유사하게 모의하는지 확인하기 위하여, 15개의 저온 사례에 대해, WRF 모형에서 모의된 10-m 바람 벡터와 해면기압 분포를 ERA5 재분석자료와 비교하였다.
- 앞에서 언급한 바와 같이, 15개의 저온사례는 저기압이 세종기지를 통과하는 경우와 그렇지 않은 경우로 나눌 수 있는데, 각각의 경우를 재분석자료와 유사하게 모의하였다.
- 저온사례 발생시의 기압패턴을 일반화하기 위하여, 15개 사례의 평균을 통해 합성장 (composite)을 도출하면, 저기압이 세종기지를 통과하는 사례와 그렇지 않은 사례가 합쳐져 세종기지 부근에 약한 저기압이 나타나고 WRF 모형의 모의결과가 ERA5 재분석자료와 유사함을 확인할 수 있다.

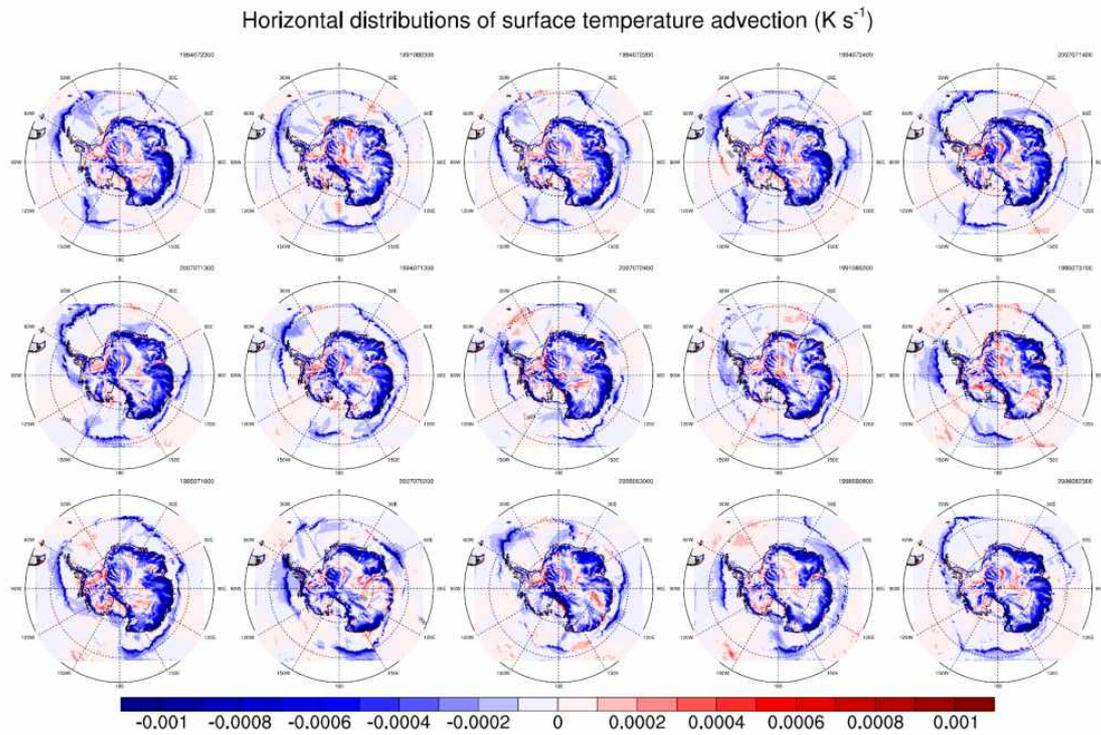


Fig. 3.1.42. 15개 저온사례에 대한, 지면 근처 온도 이류의 수평 분포 (WRF 모의결과)

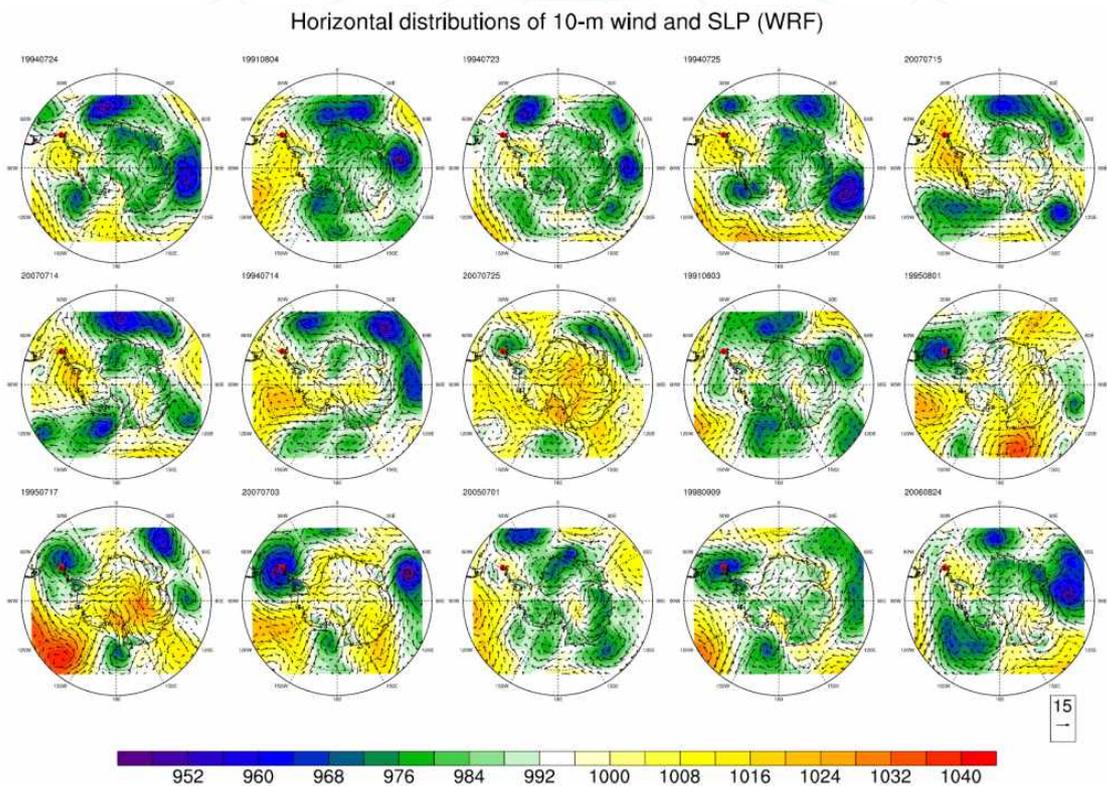


Fig. 3.1.43. 15개 저온사례에 대한, 해면기압과 10-m 바람벡터의 수평 분포도 (WRF 모의결과)

Horizontal distributions of 10-m wind and SLP (ERA5)

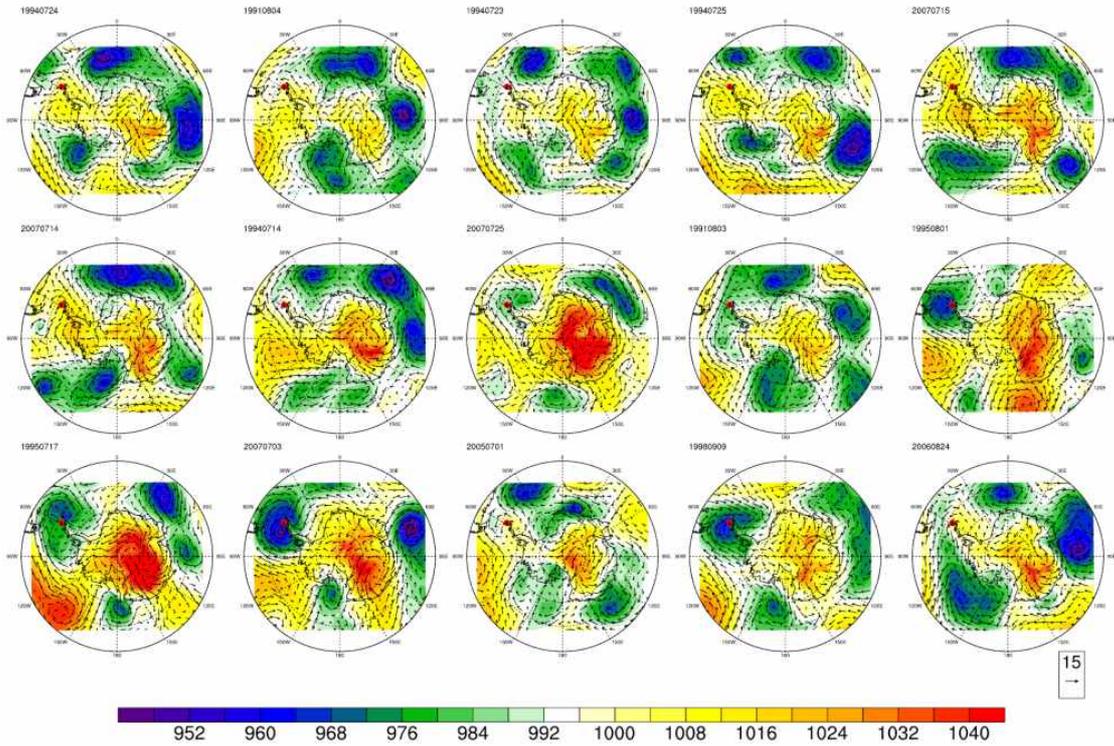


Fig. 3.1.44. 15개 저온사례에 대한, 해면기압과 10-m 바람벡터의 수평 분포도 (ERA5 재분석자료)

Horizontal distributions of 10-m wind and SLP (Composite)

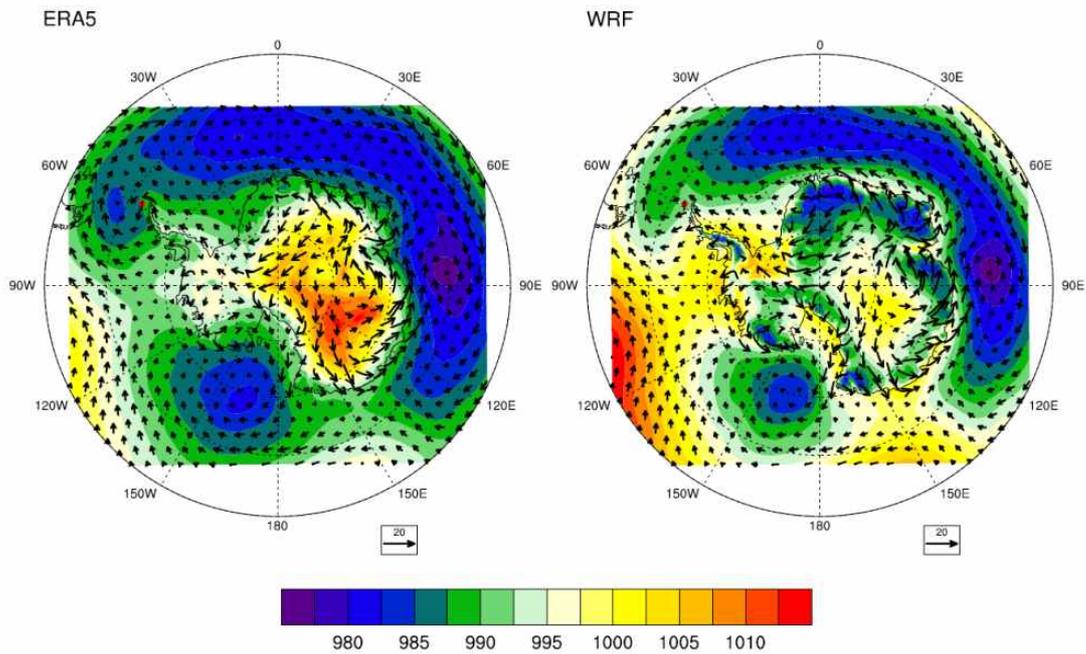


Fig. 3.1.45. 15개 저온사례에 대해 평균한, 해면기압과 10-m 바람벡터의 합성장. (좌) ERA5 재분석자료, (우) WRF 모의결과

- 마지막으로, 15개의 저온사례에 대해, WRF 모형 모의결과로부터 2-m 온도와 10-m 바람벡터의 분포를 산출한 후, 이를 ERA5 재분석자료와 비교하였다.
- 모든 사례에서 남극대륙의 차가운 공기와 남극대륙으로부터 주변부 (세종기지가 위치한 남극반도 포함)로의 온도 이류가 잘 모의되었다.
- 하지만, 세종기지 주변의 온도는 ERA5 재분석자료에 비해, WRF 모형의 모의결과에서 더 낮게 모의되는 것을 확인할 수 있다.
- 15개의 사례에 대한 결과를 평균하여 합성장을 도출하면, 전반적인 온도 분포와 대기 흐름을 재분석자료와 유사하게 모의하나 세종기지 부근에서의 온도가 재분석자료에 비해 낮게 모의되는 것을 확인할 수 있다.
- 결론적으로, 세종과학기지 주변 저온 현상의 주요 원인은 남극대륙의 찬 공기가 남극반도 쪽으로 이류되는 음의 온도 이류이고, WRF 모형의 모의결과에서도 잘 나타난다.
- 저기압이 세종기지를 통과하지 않는 저온사례에서는, WRF 모형의 모의결과에서 음의 온도 편차가 나타나는데, 이는 WRF 모형을 이용한 모의에서 구름이 관측에 비해 적게 모의되어 지면에 도달하는 하향장파복사량이 과소모의되기 때문으로 추정된다.
- 향후, WRF 모형 내 물리과정에 대한 조사와 현재 수행중인 물리과정 민감도 실험 결과 분석을 통해 음의 온도 편차에 대한 추가적인 해석을 제시할 예정이다.

Horizontal distributions of 10-m wind and 2-m temperature (WRF)

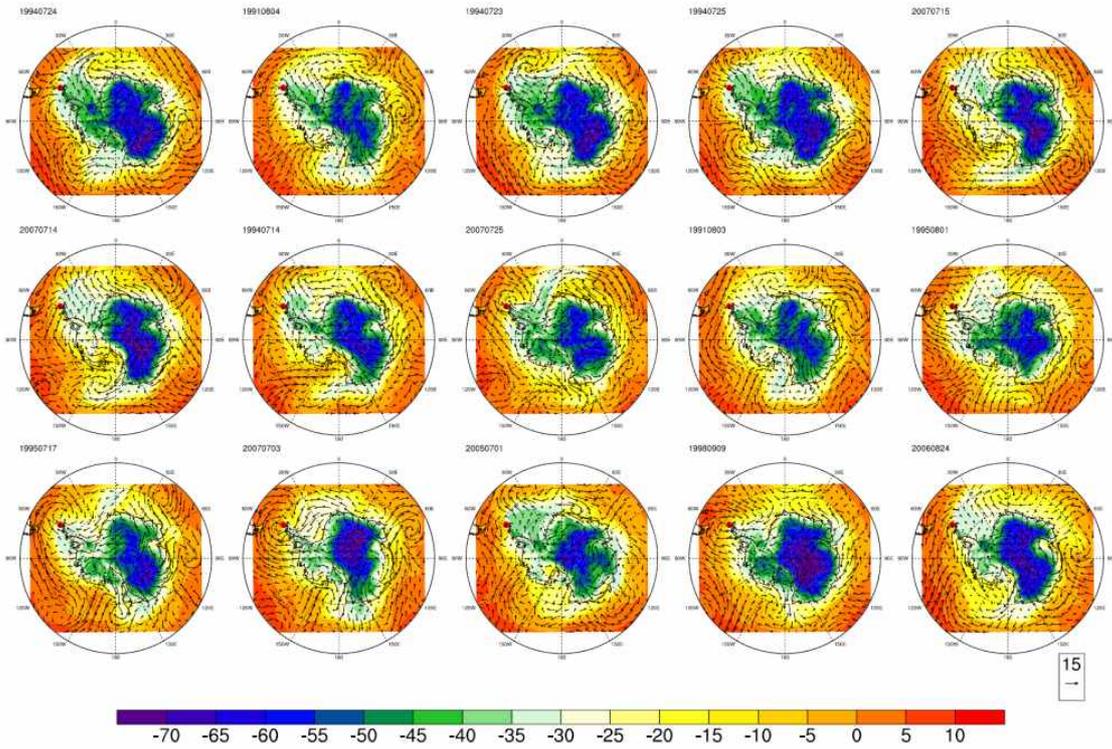


Fig. 3.1.46. 15개 저온사례에 대한, 2-m 온도와 10-m 바람벡터의 수평 분포도 (WRF 모의결과)

Horizontal distributions of 10-m wind and 2-m temperature (ERA5)

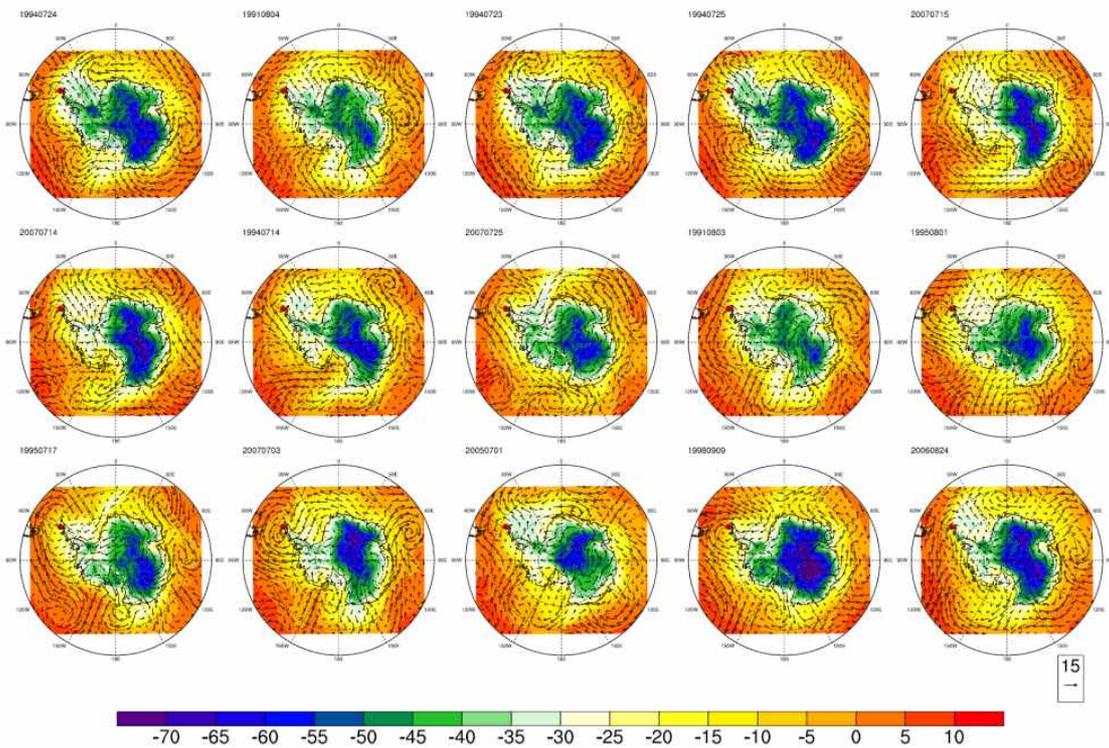


Fig. 3.1.47. 15개 저온사례에 대한, 2-m 온도와 10-m 바람벡터의 수평 분포도 (ERA5 재분석자료)

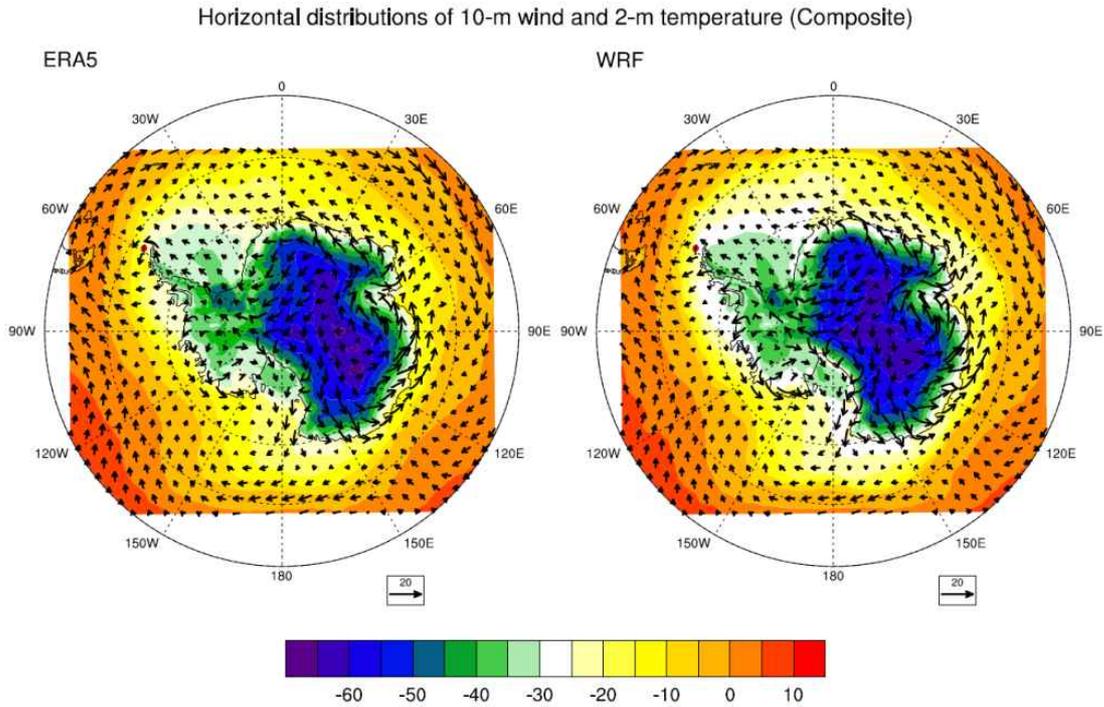


Fig. 3.1.48. 15개 저온사례에 대해 평균한, 2-m 온도와 10-m 바람벡터의 합성장
(좌) ERA5 재분석자료, (우) WRF 모의결과

마. 폭설 사례에 대한 고해상도 수치모의 및 특성 분석

- 세종과학기지 대기 관측자료를 기준으로 선정한, 15개의 폭설 사례에 대해 WRF 모형을 이용한 고해상도 수치모의 수행하였다.
- 수치모의를 위한 모의 영역, 초기 및 측면경계 조건, 물리과정 등은 1차년도 설정을 그대로 이용하였다.
- 폭설 사례에 대한 WRF 모의결과를 검증하기 위하여, 세종기지 AWS 관측을 ERA5 재분석자료, WRF 모의결과와 비교하였다. 이 때, 수치모의결과와 재분석자료에서 강우 (rainfall)와 강설 (snowfall)의 구분에 많은 불확실성이 존재하므로, 세종기지와의 가장 가까운 격자점에서의 강수량 (precipitation) 변수를 AWS 관측자료와 비교하였다.
- 폭설이 발생한 날 (Day D+0)을 기준으로 12시간 전인 12 LST D-1부터 다음날 (D+1) 12 LST까지의 시계열을 비교하였다.
- AWS 관측이 존재하지 않거나 (목측에서 관측되었음에도) 관측된 강수량이 0인 경우를 제외하고, AWS 관측자료에서 나타난 강수 현상이 ERA5 재분석자료나 WRF

모의결과에서 잘 나타나는 것을 확인하였다.

- AWS 관측에서 강수량이 0인 경우에도, WRF 모의결과에서의 강수 시계열이 ERA5 재분석자료와 유사한 것을 확인하였다.
- AWS 관측자료 및 ERA5 재분석자료와의 비교·검증을 통해 WRF 모형의 폭설 사례 모의 성능을 확인하였고, 이후 세종기지 폭설 사례의 원인을 파악하기 위하여 합성장 분석을 수행하였다.
- 누적 강수량과 10-m 바람 벡터의 합성장 분석 결과를 보면, 세종기지 부근에 강수가 집중되어 있으며 세종기지 북쪽으로 저기압 중심이 위치하고 있어 남동풍 계열의 바람이 우세함을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 ERA5 재분석자료에서도 나타났다.
- 850-hPa 고도에서의 지위고도와 수증기 혼합비의 합성장 분석 결과를 통해, 세종기지 부근에 저기압이 위치하고 저기압성 흐름에 의해 남미 부근의 수증기가 세종기지 방향으로 수송되고 있음을 확인하였다.
- 정리하면, 세종기지에서 폭설이 발생하는 경우, 저기압의 영향으로 저위도 지역의 수증기가 수송되고 저기압과 관련된 불안정성에 의해 강설 시스템이 유지되며, 이 때, 세종기지 부근 지형의 영향으로 상승운동이 강화될 수 있음을 확인하였다.

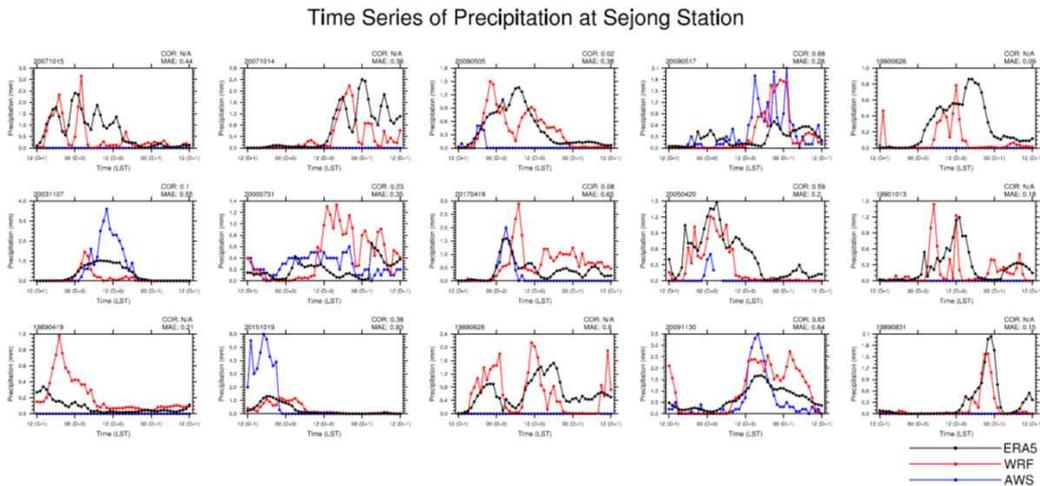


Fig. 3.1.49. 선정된 15개 폭설 사례에 대한, 세종기지에서의 강수 시계열 비교. AWS 관측 (파란색), WRF 모의결과 (빨간색), ERA5 재분석자료 (검은색)

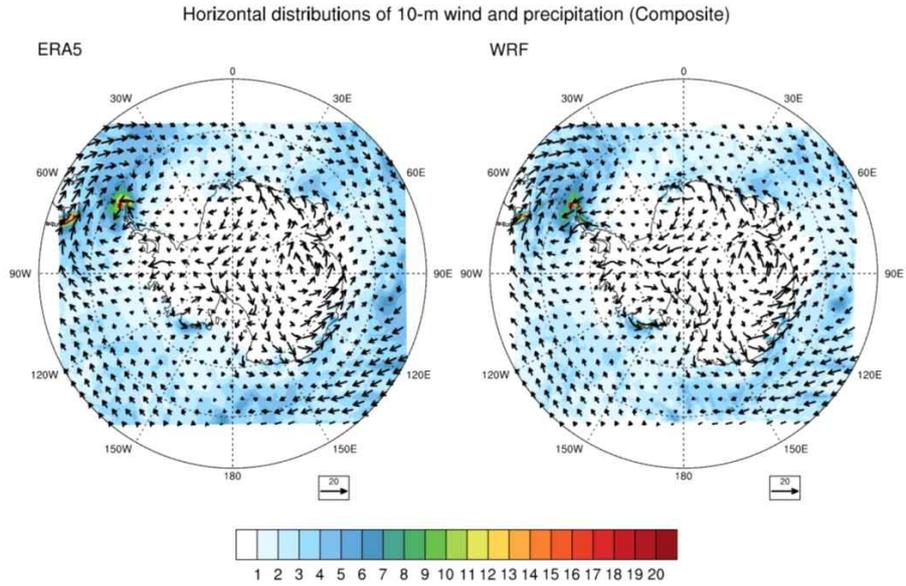


Fig. 3.1.50. 15개의 폭설 사례에 대해 합성장 분석을 통해 도출한, 누적 강수량과 10-m 바람의 수평 분포. (좌) ERA5 재분석자료, (우) WRF 모의결과

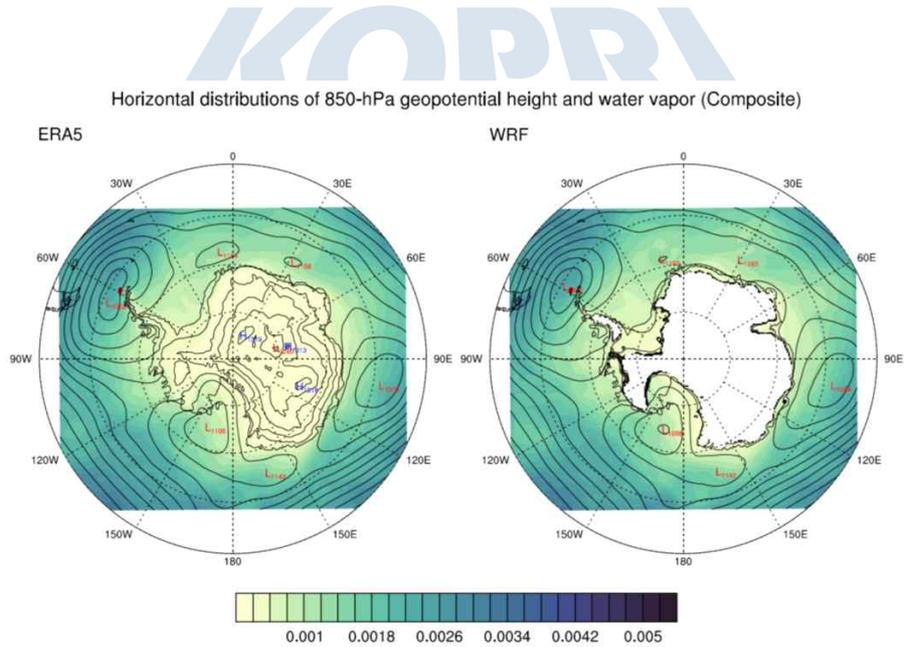


Fig. 3.1.51. 15개 폭설 사례에 대해 합성장 분석을 통해 도출한, 850-hPa 지위고도와 수증기 혼합비 수평 분포. (좌) ERA5 재분석자료, (우) WRF 모의결과

바. YOPP-TOP 관측자료 활용 자료동화실험 수행 및 결과 분석

- YOPP-SH (Year of Polar Prediction in the Southern Hemisphere) TOP (Target Observing Period) 기간 동안 획득한 라디오존데 관측자료의 동화 효과를 알아보기 위하여 OSE (Observing System Experiment) 수행하였다.

- 세종기지 부근에서 발생한 대기천 (AR; atmospheric river) 현상의 예측성을 높이기 위하여 수행된 라디오존데 관측자료를 사용하였다.
- 2022년 7월 27일 12 UTC에 획득한 라디오존데 관측자료를 동화한 실험 (DA 실험)과 자료동화를 수행하지 않은 실험 (CTL 실험)을 비교하였다./-1
- 자료동화방법으로는 3차원 변분 자료동화 방법을 사용하고, 라디오존데 외에 다른 관측자료는 동화하지 않았다.
- ERA5 재분석자료를 기준값 (truth)으로, CTL 실험의, 925~500-hPa 고도에 대해 누적한 수증기 혼합비 오차를 3시간 간격으로 분석하였다.
- 예측 초기부터 세종기지 부근에 음의 수증기 혼합비 편차가 나타나고 9시간 이후부터는 더욱 넓은 범위에서 나타났다.
- YOPP-TOP 라디오존데 관측자료 추가 동화가 AR 현상 예측성에 미치는 영향을 알아보기 위하여, DA 실험과 CTL 실험의 차이를 분석하였다. CTL 실험에서 나타났던, 세종기지 부근의 음의 수증기 혼합비 편차를 상쇄하는 수증기 혼합비 차이가 나타났다(분석장 제외).
- YOPP-TOP 라디오존데 추가 관측의 AR 현상 예측성에의 영향을 일반화하기 위하여, 세종기지 외에 다른 지역에서 수행한 라디오존데 관측자료에 대해서도 추가 실험을 진행하고 결과를 분석할 예정이다.

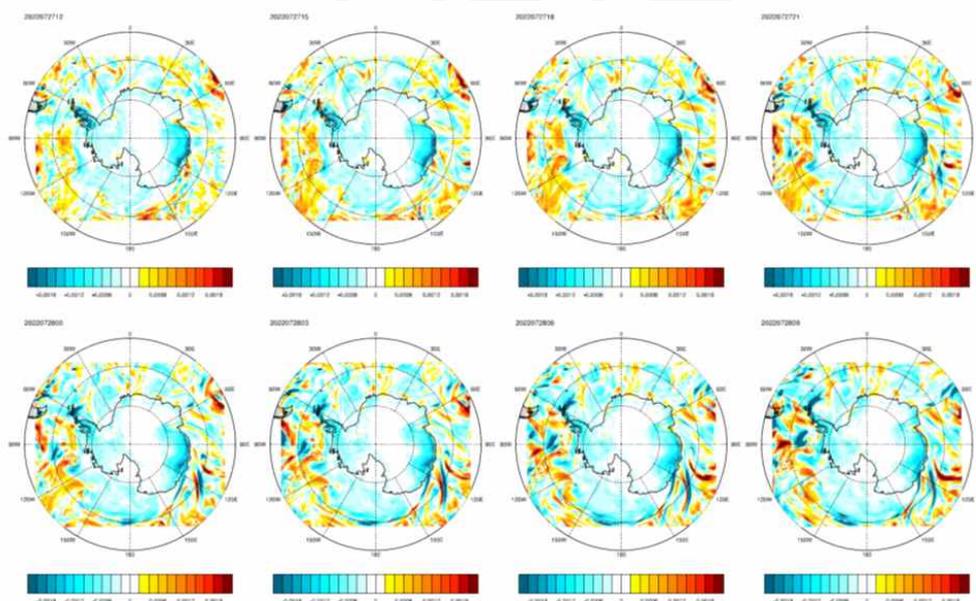


Fig. 3.1.52. 925-hPa부터 500-hPa 고도까지 누적한 수증기 혼합비 변수의, CTL 실험 오차. 2022년 7월 27일 12 UTC부터 28일 09 UTC까지 3시간 간격으로 제시

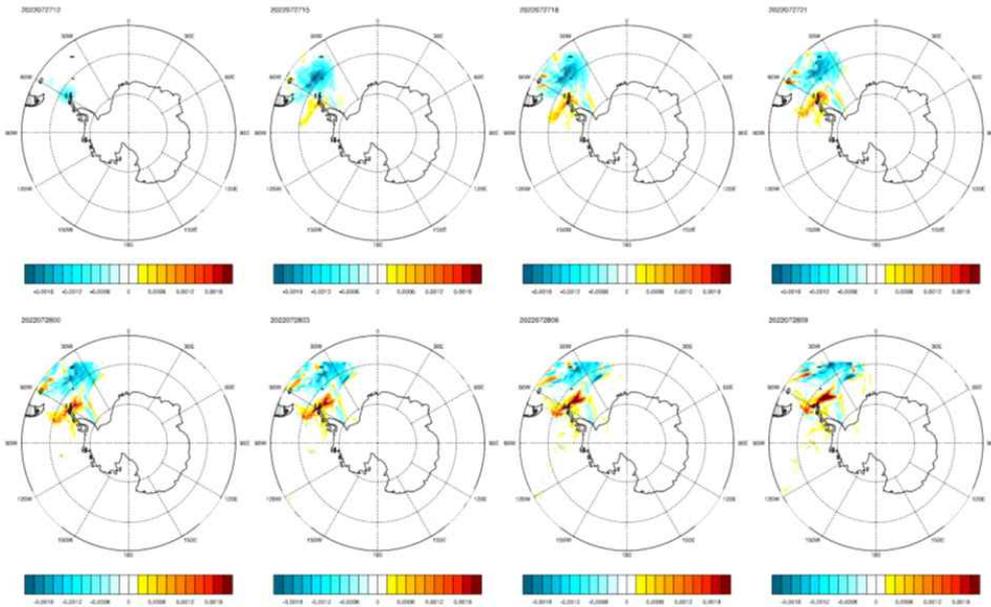


Fig. 3.1.53. CTL 실험과 DA 실험에서 모의된, 연직 방향으로 누적한 (925-hPa ~ 500-hPa) 수증기 혼합비 변수의 차이 (DA - CTL). 2022년 7월 27일 12 UTC부터 28일 09 UTC까지의 모의결과를 3시간 간격으로 제시

사. 이상 고온 사례에 대한 수치모의 및 결과 분석

- 2022년 3월 중순, 동남극 (Vostok, Concordia 기지 등)에서 발생한 이상 고온 현상에 대해 WRF 모형을 이용한 수치모의를 수행하고 그 결과를 분석하였다.
- Vostok 기지에서 관측한, 2022년 3월 14일 12 UTC부터 19일 00 UTC까지의 2-m 온도 시계열을, WRF 모형을 이용한 모의결과 (Vostok 기지와 가장 가까운 격자점)와 비교하였다.
- 관측에서는, 16일 00 UTC까지 영하 60도 부근에서 변동하던 온도가 이후 급상승하여 18일 00 UTC에는 영하 20도 근처의 값을 가졌다.
- WRF 모형을 이용한 모의결과에서도 16일 이후의 온도의 급격한 상승이 모의되어 관측과 유사한 변화 경향을 보였다.
- AR 현상에 의해 동남극 쪽으로 다량의 고온다습한 공기가 유입되고, 이후 발생한 구름과 강수에 의해 고온 현상이 나타났으며, 기압계의 정체로 인해 고온 현상이 상당 기간 유지된 것으로 보였다.
- 향후 물리과정에 대한 민감도실험 등 WRF 모형을 이용한 추가실험과 재분석자료 분석을 통해 이상 고온 현상이 나타난 원인에 대해 밝힐 예정이다.

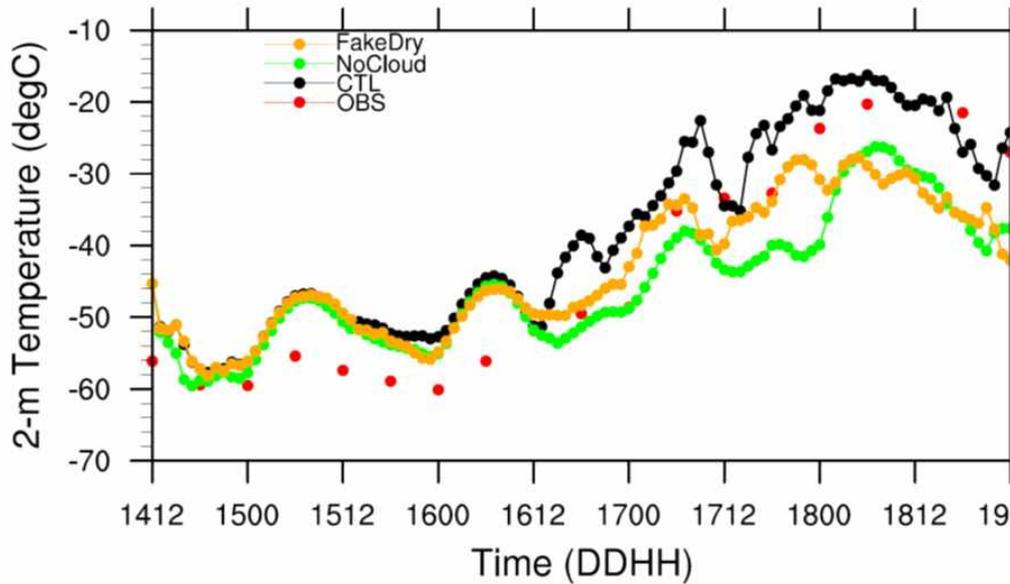


Fig. 3.1.54. Vostok 기지에서 관측한, 2022년 3월 14일 12 UTC부터 19일 00 UTC까지의 2-m 온도 시계열 (빨간색)과 WRF 모형 모의 결과 (검은색)

아. 극한기상 종류별 특성을 선행연구 결과와 비교

- 강풍 사례의 경우, 세종기지 부근에 저기압이 통과하면서 발생한 기압경도력에 의해 발생하며, 풍향에 따라 지형의 영향이 더해지는 것으로 파악된다.
- 선행연구 (Kwon et al., 2019; Kwon et al., 2021)에서도 저기압과 지형의 영향으로 세종기지 부근에 강풍이 발생할 수 있음을 보였다.
- 저온 사례의 경우, 세종기지가 위치한 남극 반도로 남극 내륙의 찬공기가 이루어지면서 세종기지 부근의 온도가 낮아지는 것으로 파악된다..
- 선행연구 (Turner et al., 2009)에서도, Vostok에서 나타난 기록적인 저온 현상에 대해, 대기 중층 와도에 의한 온도 이류와 더불어, 기압계의 정체와 구름이 없는 대기 조건이 저온 현상 지속에 기여함을 보였다.
- 폭설 사례의 경우, 세종기지 부근을 통과하는 저기압에 의해 수증기가 유입되고 저기압과 관련된 강수 현상이 나타난 것으로 파악된다. 이 때, 풍향에 따라 세종기지 부근 지형에 의해 상승기류가 강화될 수 있다.
- 선행연구 (Welker et al., 2014)에서도 저기압, 블로킹 고기압과 연관된 수증기 유입량 증가, 그리고 지형의 효과 등을 Dronning Maud Land에서 발생한 강수 현상의 원인으로 제시하고 있다.

3.1.3 남극기지 극한기상 종류별 개념모델 제시

가. 자기조직화 지도 (Self-Organizing Map, SOM) 군집 분류법을 이용한 남극기지 강풍 사례의 특징 분류

- 1년에 걸쳐 강풍 사례가 주로 발생하는 겨울철 (6-8월) 동안, 세종기지에서 관측된 풍속기록의 상위 10% 이상인 날, 총 295일을 강풍 사례로 선정하였다.
- 강풍 사례일의 세종기지를 포함한 남위 40-80도, 서경 20-110도 영역의 해면기압 (SLP) ERA5 재분석 자료를 이용하여 SOM 군집 분류를 실시하고, 군집 내 요소 간 상관계수는 높고, 군집 간 상관 거리는 큰 최적의 군집 격자로 (4x1)를 정한다.

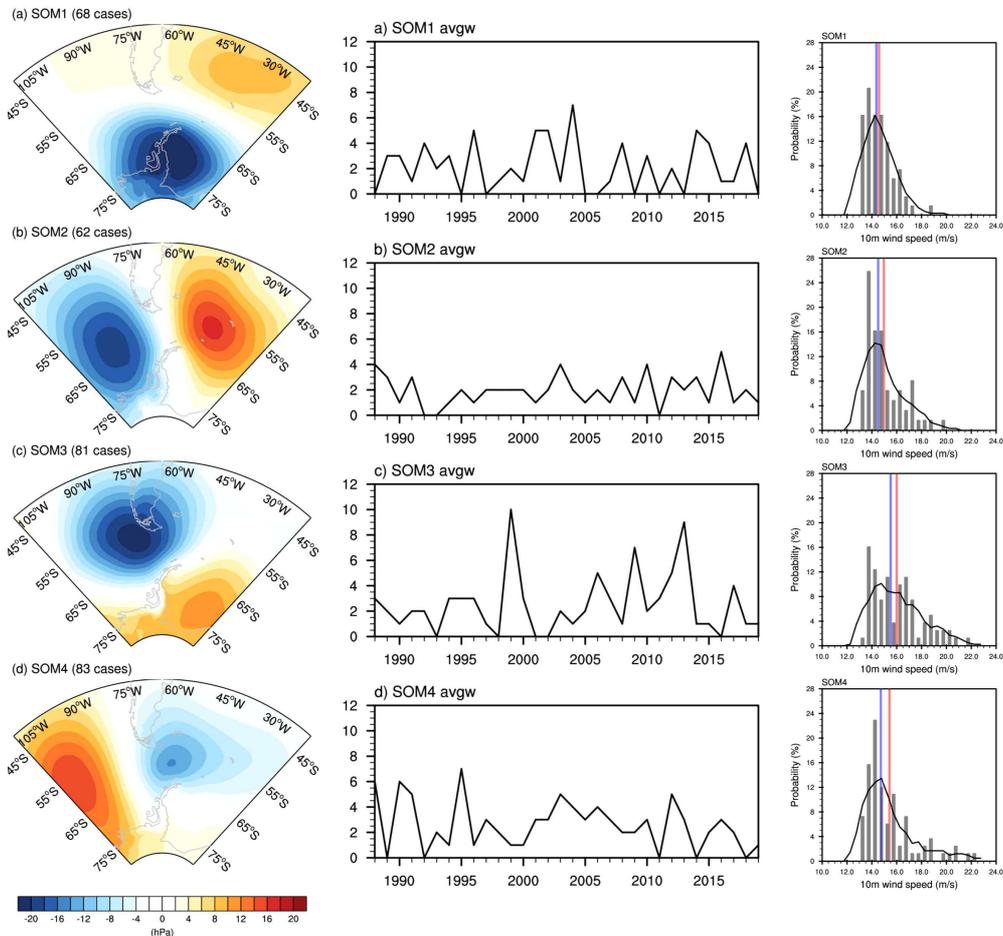


Fig. 3.1.55. 세종기지 강풍 사례일의 해면기압편차를 이용한 SOM 분석 결과. 공간 패턴 (좌), 발생 빈도 (중), 풍속확률분포 (우) 및 풍속의 평균값 (붉은 실선), 중간값 (파란 실선)

- 선행 연구 및 수치모델 모의에서와 마찬가지로 저기압 주변의 강해진 기압경도력과 관련하여 세종기지 주변에 강풍이 유발되는데, 저기압의 위치에 따라 군집이 분류한다.

- 군집별 대표 패턴에서도 앞선 수치모의에서와 마찬가지로 세종기지 강풍 사례를 유발하는 기압 배치장은 주로 북풍, 동풍 계열의 바람을 유발하는 형태를 띠고 있다.
- 군집별 풍속의 확률 분포도를 보면, SOM3로 분류된 날들의 풍속이 tail이 두껍고 긴 형태로 나타나고 있고 풍속의 평균도 가장 강하며, SOM2와 SOM4의 풍속 평균은 유사하나, 강풍 쪽 tail은 SOM4에서 더 세계 나타남을 볼 수 있다. SOM1은 풍속 평균 및 tail을 고려할 때 4개 패턴 중 가장 약한 바람이 나타나는 형태로 보이며, 풍향은 동풍 계열이 우세하다. 나머지 SOM2-4는 기압 배치 상 북풍 내지 북동풍 계열의 바람이 불 것으로 보이며 앞선 수치 모의 실험에서 북풍 계열의 경우 지형 효과가 더해진다는 점을 감안할 때 동풍 계열인 SOM1보다 SOM2-4가 다소 강한 사례를 보이는 것은 이러한 효과가 반영된 결과로 해석된다.

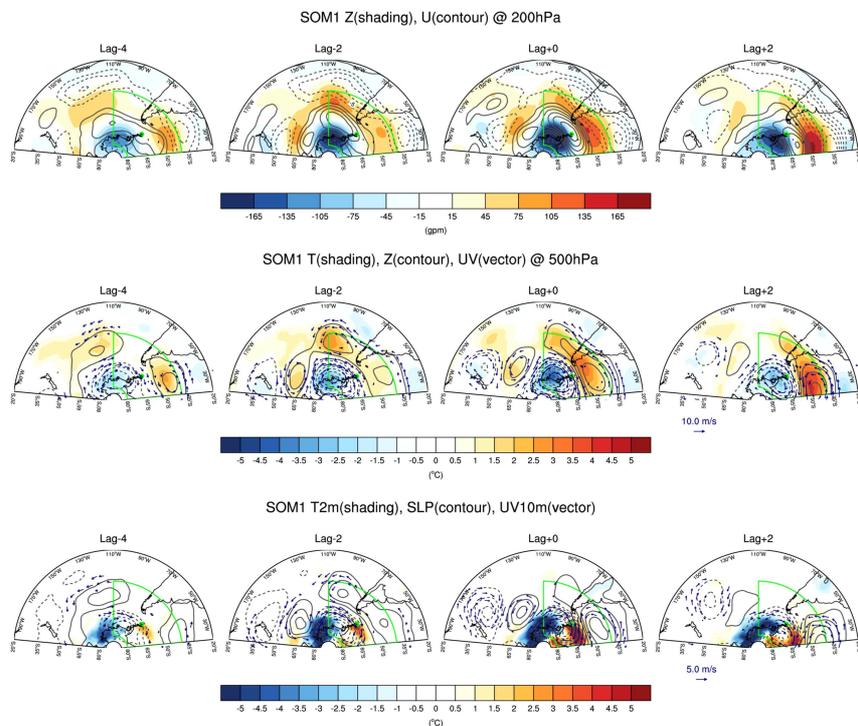


Fig. 3.1.56. SOM1에 분류된 강풍사례일 4일 전부터 2일후까지의 200 hPa (상) 지위고도 (shading), 동서바람 (contour), 500 hPa (중) 온도 (shading), 지위고도 (contour), 바람장 (vector), 지표면 (하)의 2m 온도 (shading), 해면기압 (contour), 10m 바람장 (vector) 합성 편차

- SOM1과 관련된 대기장의 변화를 살펴보면, 상층 세종기지가 있는 남위 60도 주변에서 서풍 강화, 그 이북과 이남 지역에는 서풍의 약화가 나타나는 형태가 강풍 사례

이전부터 이후까지 유지되는 형태가 나타난다. 이와 관련하여 하층도 기압 배치 형태는 남극 지역을 위주로 저압 패턴이, 중위도 지역에 고압 패턴이 유지되며, 이 기압 배치 사이에 위치한 세종기지에 동풍 계열의 강풍이 나타나는 것으로 보인다.

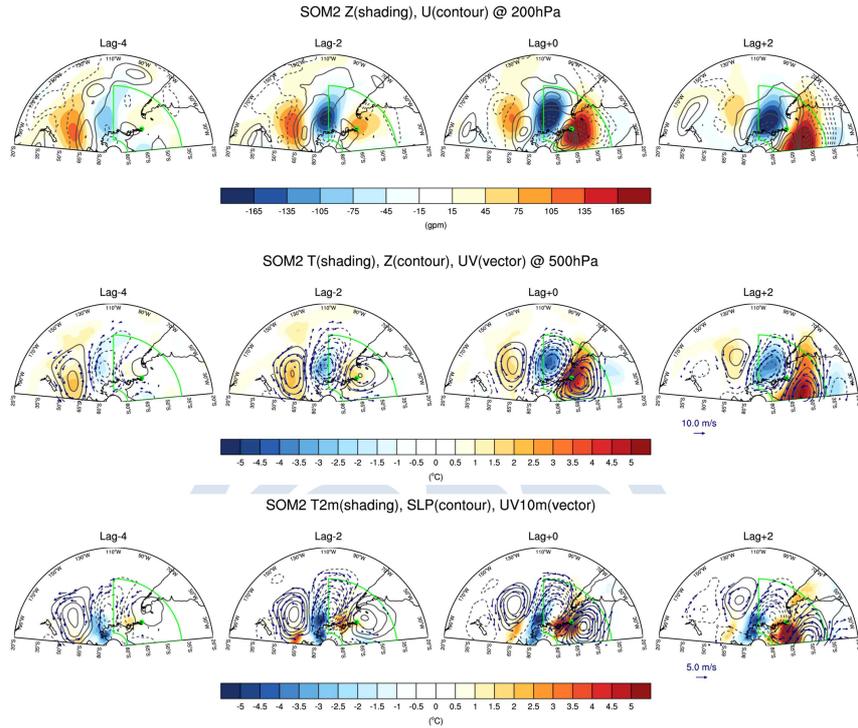


Fig. 3.1.57. SOM2에 대해 앞그림과 동일

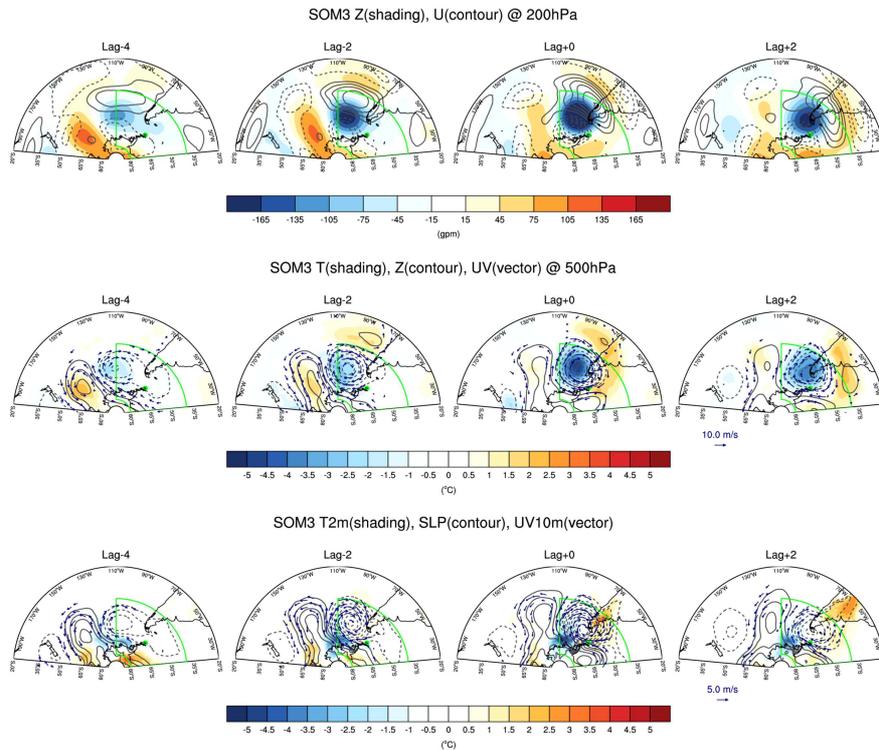


Fig. 3.158. SOM3에 대해 앞그림과 동일

- SOM2와 관련된 상층 대기장 합성편차는 SOM1과 달리 남북으로 세워진 형태로 바람대나 지위고도장 모두 동진하는 형태가 보인다. 마찬가지로 하층에서도 4일 전부터 뉴질랜드쪽에서 고/저/고기압으로 이어지는 wave 형태의 합성편차가 시간이 지날수록 강도가 강해지며 세종기지로 접근하며 강풍을 유발하는 것으로 보인다.
- SOM3는 SOM2처럼 wave 형태가 이동하는 것처럼 보이나, 그 방향이 동진보다는 북동진에 가깝고, 하층 기압 배치 또한 남극 전체 고압성 패턴은 유지되면서, 뉴질랜드 동쪽 로스해 지역으로 장출된 기압능 동쪽으로 저기압이 발달하는 형태로 보인다. 상층 바람장도 서경 80-100도, 남위 40-50도 지역에 서풍 계열이 강화되어 유지되는 형태를 보인다.

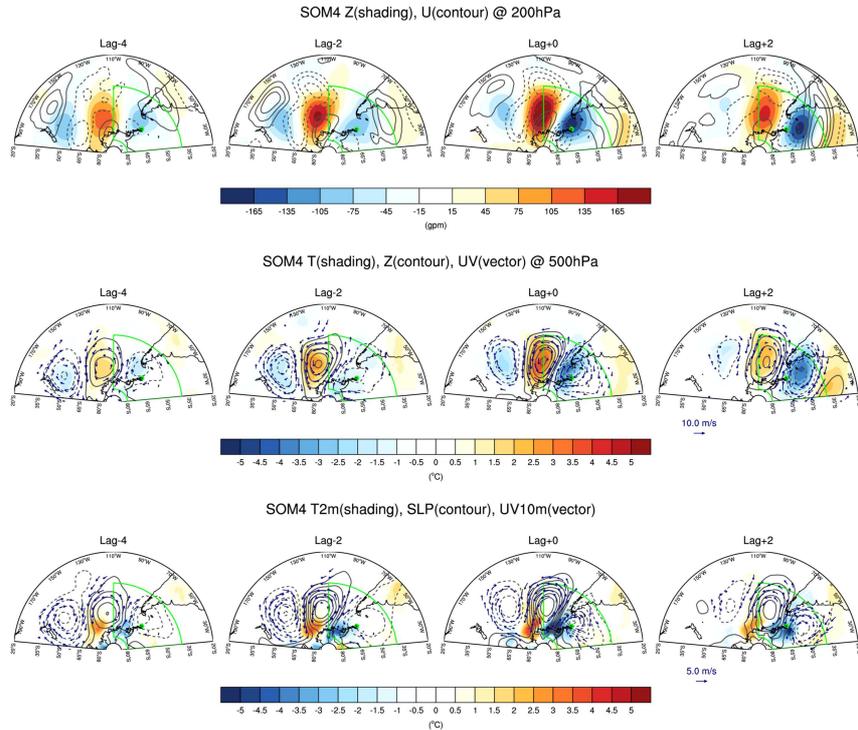


Fig. 3.1.59. SOM4에 대해 앞그림과 동일

- SOM4는 SOM2처럼 동서보다는 남북으로 이어진 상층 바람장의 형태가 보이고, 뉴질랜드부터 남미대륙까지 이어지는 wave 형태의 고/저기압 형태가 하층부터 상층까지 이어져 나타난다. 고/저기압 이동경로는 SOM2와 유사하나, 기압배치는 반대의 형태를 띠어 강풍이 발생한 날 기지 동쪽에 저기압이 존재한다.

나. SOM 군집 분류법을 이용한 남극기지 저온 사례의 특징 분류

- 저온 사례 역시 강풍과 마찬가지로 주 발생 계절이 겨울철임을 감안해 6-8월에 세종기지에서 관측된 일최저기온이 하위 10프로 이하인 날을 사례로 선정하였다. 그러나 온도의 경우 연속되어서 나타나는 사례가 많고, 이 경우 동일한 시스템의 영향을 받는 경우가 많아서 다른 극한 기상 사례와 달리 저온 사례에서는 연속되어 탐지된 날은 하나의 이벤트로 판단, 그 중 가장 낮은 온도가 발생한 날을 대표 사례로 간주하고 총 112개 사례의 해면기압 편차를 바탕으로 SOM 분석을 실시하였다.
- 최적 군집 격자는 (4x1)로 선정되었으며, 각 군집으로 분류된 이벤트 수는 SOM1/SOM2/SOM3/SOM4 각각 37, 19, 21, 34개이지만 연속된 날, 즉 유지일수를

반영하여 해당 군집으로 분류된 날의 수는 88, 60, 64, 83일이다.

- 평균 유지일수의 경우 2.4, 3.2, 3.0, 2.4일로 SOM2, SOM3에서 길게 나타나고, 온도확률분포도에서 평균과 tail의 길이 및 두께 역시 해당 군집에서 크게 나타난다. 유지일수와 강도가 가장 큰 SOM2 패턴은 2014년 이후 나타나지 않는다.

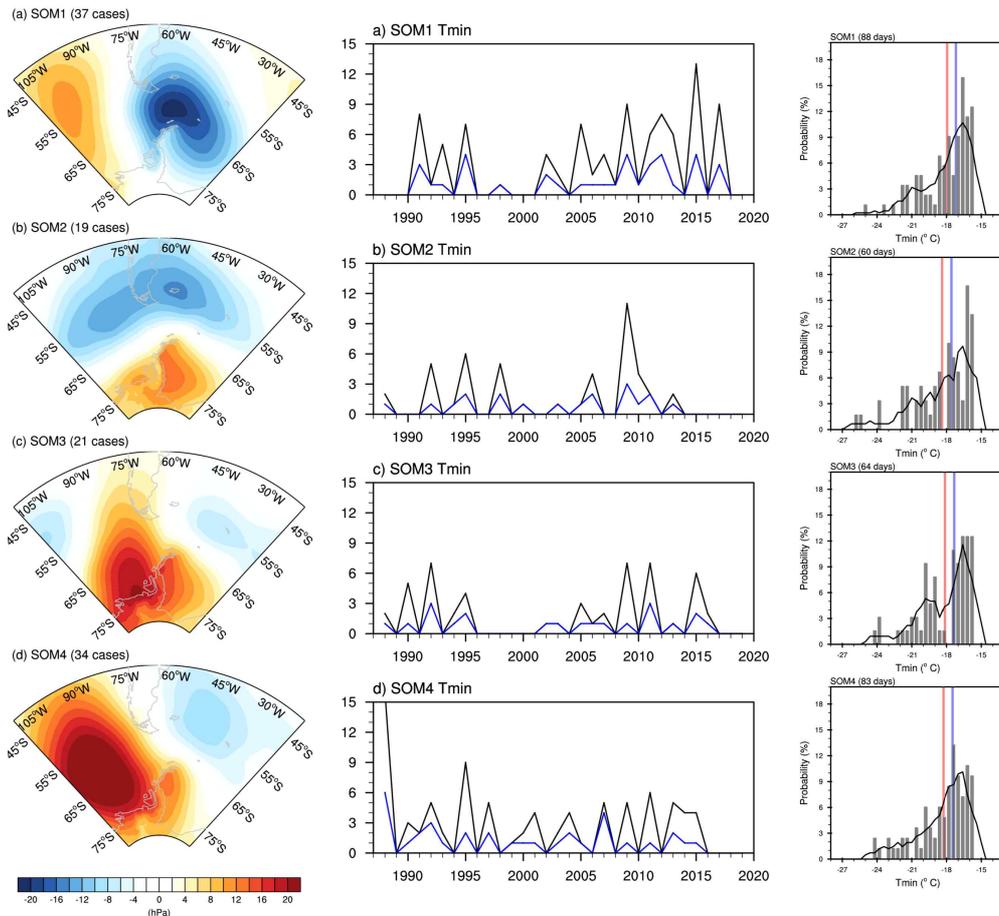


Fig. 3.1.60. 세종기지 저온 사례일의 해면기압편차를 이용한 SOM 분석 결과. 공간 패턴 (좌), 발생 빈도 (중), 풍속확률분포 (우) 및 풍속의 평균값 (붉은 실선), 중간값 (파란 실선)

- 저온 사례의 경우 강풍 사례처럼 세종기지에 반드시 저기압이 우세한 형태라기보다, 남쪽으로부터의 온도 한랭 이류가 유리한 기압 배치들이 주요 패턴으로 나타난다. SOM1을 제외한 나머지 경우는 모두 고기압 가장자리를 따라 일어나는 한랭이류의 기여가 클 것으로 보인다. 재미있는 것은 저기압 가장자리를 따른 한랭이류 형태인 SOM1의 강도가 가장 약하고, 지속일도 상대적으로 짧은데 이러한 패턴이 최근에 더 우세해졌다는 점이다.

- 관련된 대기장 합성 편차를 살펴보면, SOM1의 경우 뉴질랜드에서부터 남극기지로 이어지는 저/고기압의 wave 형태가 저온 현상 4일 전부터 발달하며 core가 기지 쪽으로 옮겨오는데, 지표면 시스템의 이동 경로는 북동진하면서 점차 남극 대륙에서 멀어지는 형태가 나타난다. 이벤트 발생일에 가까워질수록 기지 위치가 저기압 중심에 들면서 남동풍 계열의 바람과 함께 한랭이류가 나타난다.
- SOM2는 상층에서 나타나는 남위 40도대 서풍대 강화와 그 이남 지역의 서풍대 약화 특성과 더불어, 지표 지역의 남극 고압, 중위도 저압 형태의 기압 배치가 지속적으로 유지되는 형태가 나타남. 남극 대륙을 중심으로 한 큰 고기압 배치 형태는 세종기지 주변에 강한 남동풍 계열의 기류를 형성하고 이것이 오래 유지되면서 한랭이류가 지속되어 가장 강도가 강한 저온 현상을 야기하는 것으로 보인다.

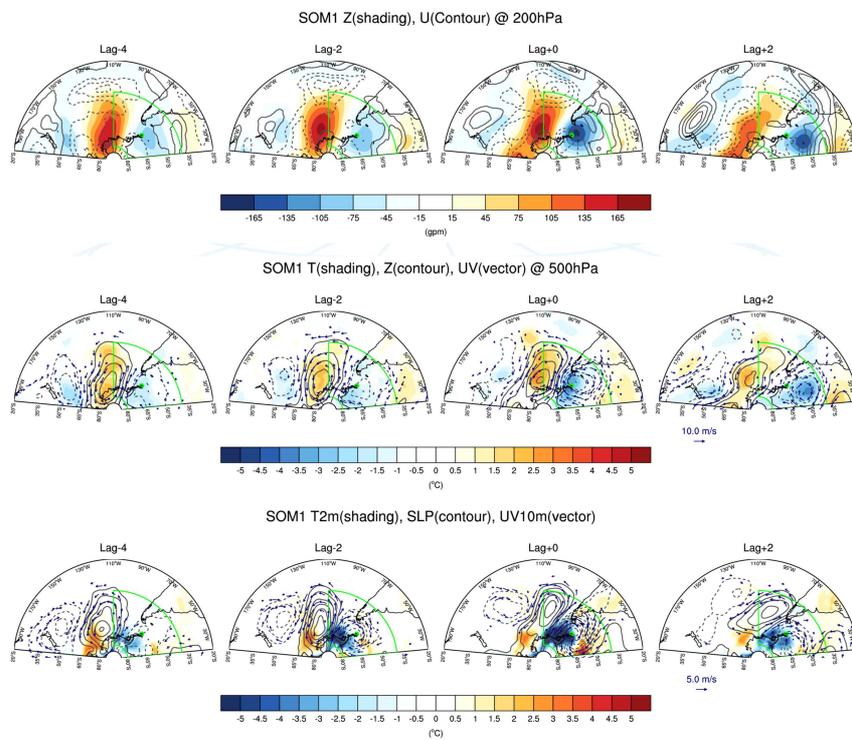


Fig. 3.1.61. SOM1에 분류된 저온 사례일 4일 전부터 2일후까지의 200 hPa (상) 지위고도 (shading), 동서바람 (contour), 500 hPa (중) 온도 (shading), 지위고도 (contour), 바람장 (vector), 지표면 (하)의 2m 온도 (shading), 해면기압 (contour), 10m 바람장 (vector) 합성 편차

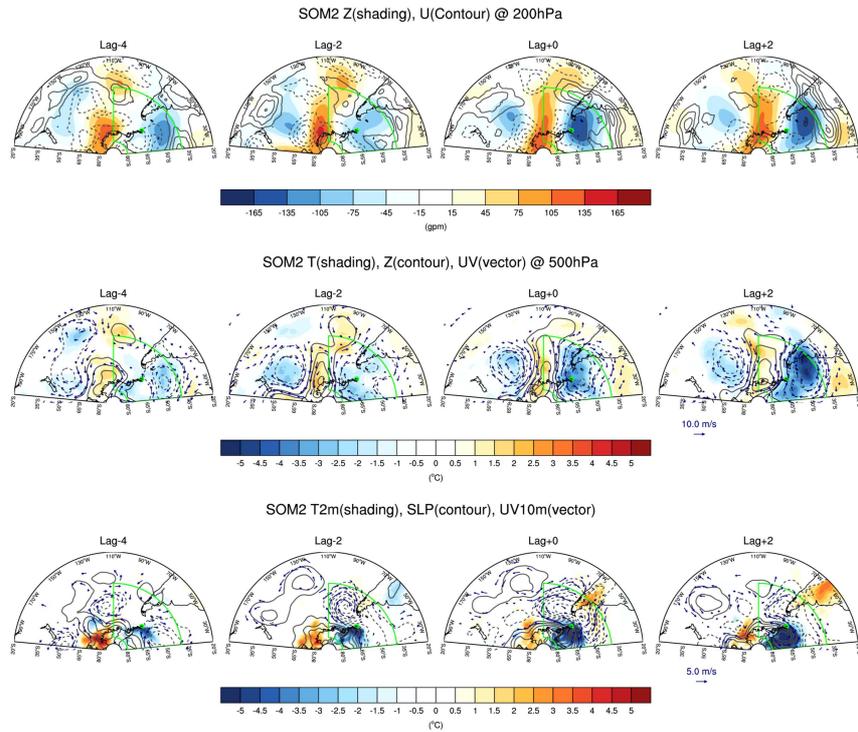


Fig. 3.1.62. SOM2에 대해 앞그림과 동일

- SOM3는 SOM2처럼 고기압이 남극 대륙의 상당부분을 덮고 있어 남쪽으로부터의 한랭이류의 강도가 강한 것은 유사하나, SOM2에 비해 남북보다는 동서배치의 시스템 형태를 가져 날이 갈수록 북동진하며 기압의 중심이 해양쪽으로 이동하면서 세력이 약화되는 형태가 나타난다.
- SOM4는 wave의 이동 경로는 SOM1과 유사하나 강도나 남극대륙에 근접한 정도가 더 가까운 형태라 SOM1보다는 한랭이류가 더 강한 것으로 보인다.

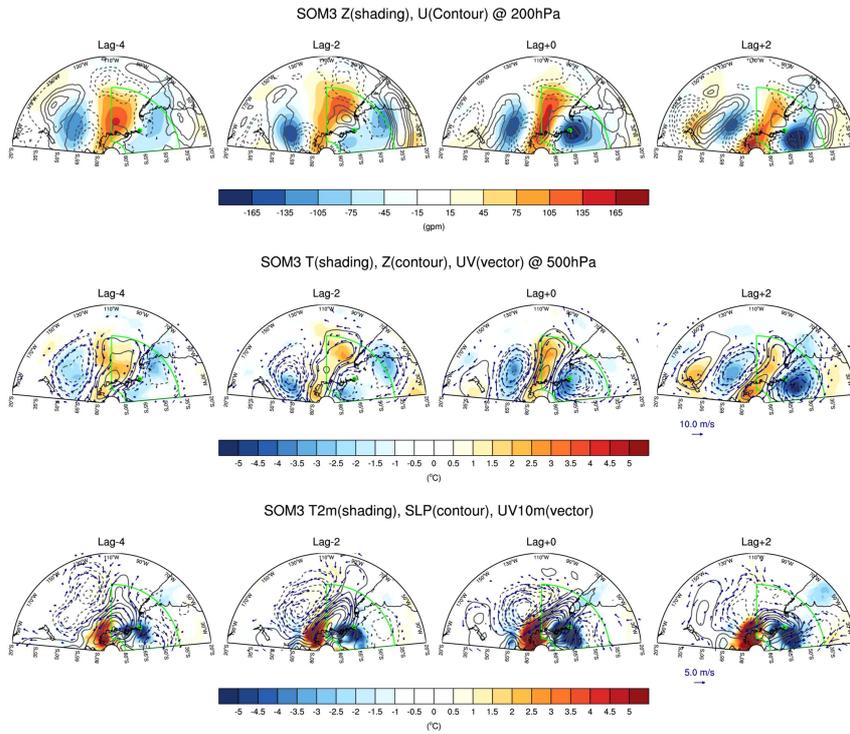


Fig. 3.1.63. SOM3에 대해 앞그림과 동일

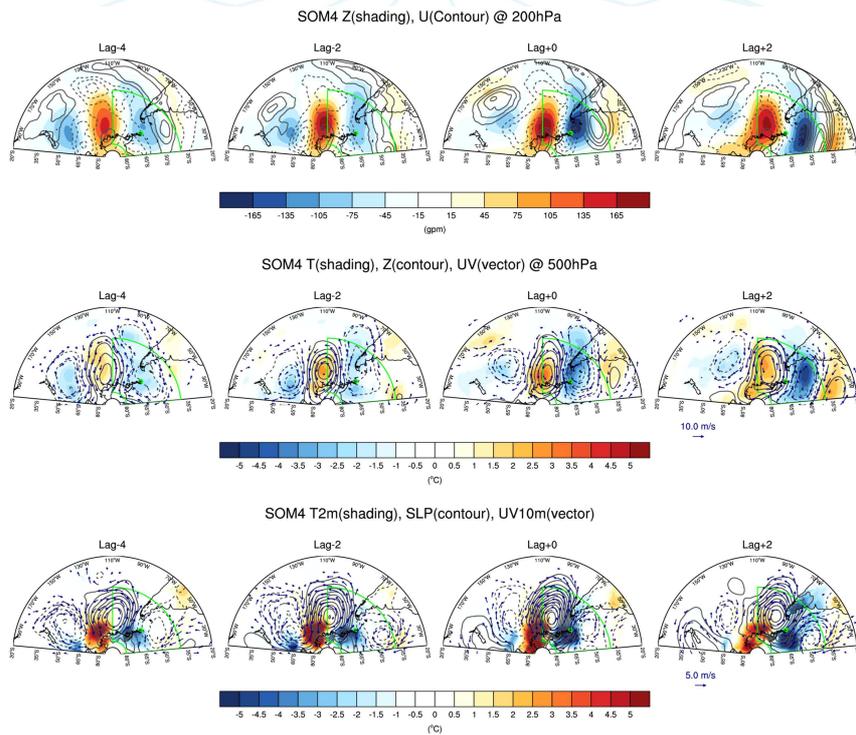


Fig. 3.1.64. SOM4에 대해 앞그림과 동일

다. SOM 군집 분류법을 이용한 남극기지 폭설 사례의 특징 분류

- 폭설 사례는 6-8월에 세종기지에서 관측된 적설이 관측된 날 중 상위 10%에 해당하는 기록을 가진 198일의 해면기압 편차를 이용하여 SOM 분석을 시행하였다.
- 폭설 SOM 분석에서 최적 군집 격자로는 (3x1)이 선정되었다.

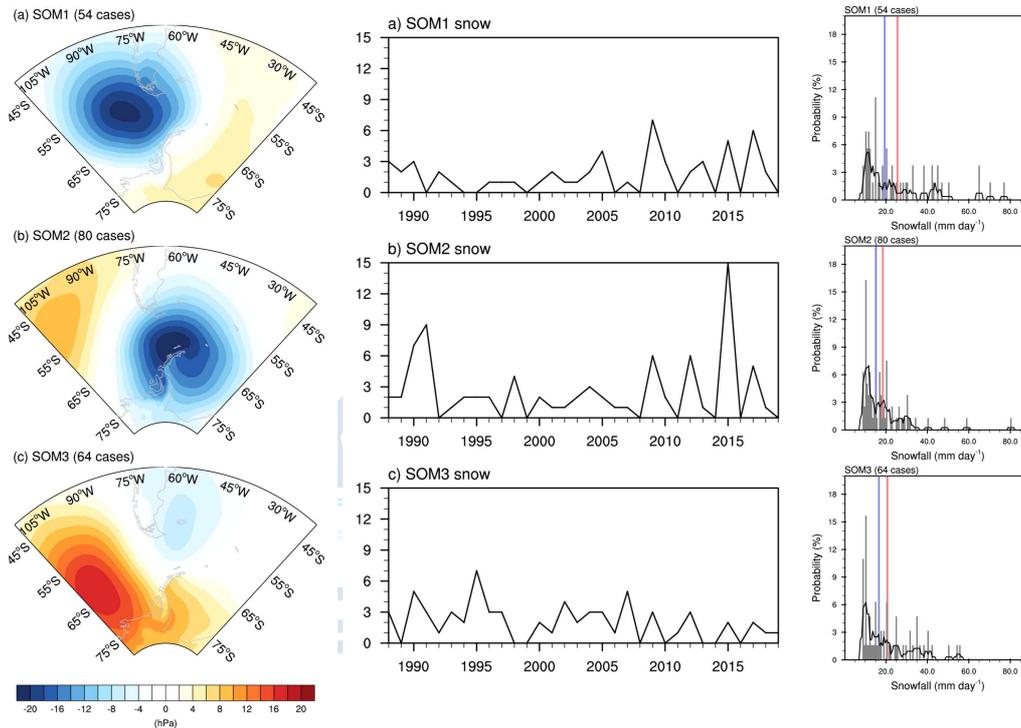


Fig. 3.1.65. 세종기지 폭설 사례일의 해면기압편차를 이용한 SOM 분석 결과. 공간 패턴 (좌), 발생 빈도 (중), 풍속확률분포 (우) 및 풍속의 평균값 (붉은 실선), 중간값 (파란 실선)

- SOM1-3 모두 저기압을 동반한 형태를 띠며, SOM1은 저기압 풍하 측에, SOM2는 저기압 중심에, SOM3는 저기압 남쪽 가장자리에 세종기지가 위치한다. 폭설 강도는 SOM1에서 평균과 tail 모두 제일 강하게 나타나며, 발생 빈도 또한 1990년대에 비해 2010년대에 많아진 것으로 보인다. SOM2는 평균 폭설 강도는 가장 약하지만, 몇몇 기록적인 이벤트들이 SOM2로 분류되었고, 1990년, 2015년에 많은 사례가 발생하였다. SOM2는 20-40mm/day 강도대의 폭설 빈도가 높으며, 최근보다는 1990년대에 더 자주 발생한 것으로 보인다.
- SOM1은 서경 90-130도 남위 50도 근처로 서풍대가 유지되며 동쪽으로 확장되는 동안, 남극기지 서편의 저기압이 발달하는 형태를 보인다. 기지 동쪽의 고기압은 남극

대륙에서부터 장출한 형태로 4일 전에는 저기압 서쪽 고기압이 강하다가 폭설 이벤트 당일에는 기지 동쪽 고기압이 함께 강해지면서 기지쪽으로 북동풍 계열 바람을 야기하고, 이벤트 이전 남서쪽에서 이동해 온 수분 속이 함께 유입되며 폭설이 야기되는 것으로 보인다.

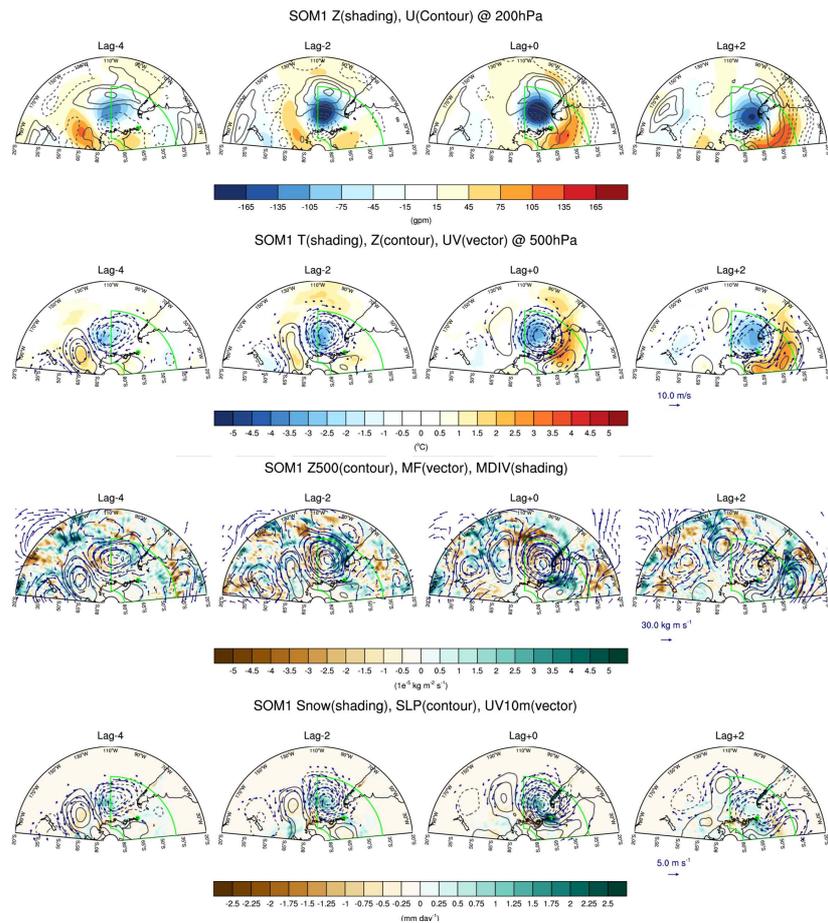


Fig. 3.1.66. SOM1에 분류된 폭설 사례일 4일 전부터 2일 후까지의 (1행) 200 hPa 지위고도 (shading), 동서바람 (contour), (2행) 500 hPa 온도 (shading), 지위고도 (contour), 바람장 (vector), (3행) 500 hPa 지위고도 (contour), 전층 누적 수분속 (vector), 수분속의 수렴장 (shading), 지표면 (4행)의 적설량 (shading), 해면기압 (contour), 10m 바람장 (vector) 합성 편차

- SOM2는 SOM1보다 서풍 강화 지역이 더 남하하고, 더 넓은 경도대를 덮고 있고, 이 패턴에 상응하게 기지를 중심으로 한 저기압과 북서쪽 고기압이 상하층 전반에 걸쳐 자리잡고 있다. 저/고/저기압으로 이어지는 wave의 패턴이 다른 패턴들은 SOM1에 비해 좀더 북서쪽으로부터 세종기지 쪽으로 연결되는 형태를 보인다. 기지에 중심을

둔 저기압의 가장자리를 따라 북서쪽에서 유입되는 수분속의 수렴이 남극반도 동쪽을 중심으로 나타난다.

- SOM3는 서풍대의 강화도 남북 방향으로 나타나고, 상하층의 기압 배치도 이동하면서 점점 남극 내륙으로부터 멀어지는 전과 양상을 띠고 있다. 수분 속도 앞선 패턴들은 북서쪽으로부터 유입되는 수분 속의 영향이었던 것에 반해, 이 패턴에서는 기지 북쪽에 중심을 둔 저기압의 가장자리를 따라 대서양 쪽으로부터 유입되는 수분속이 주를 이룬다.

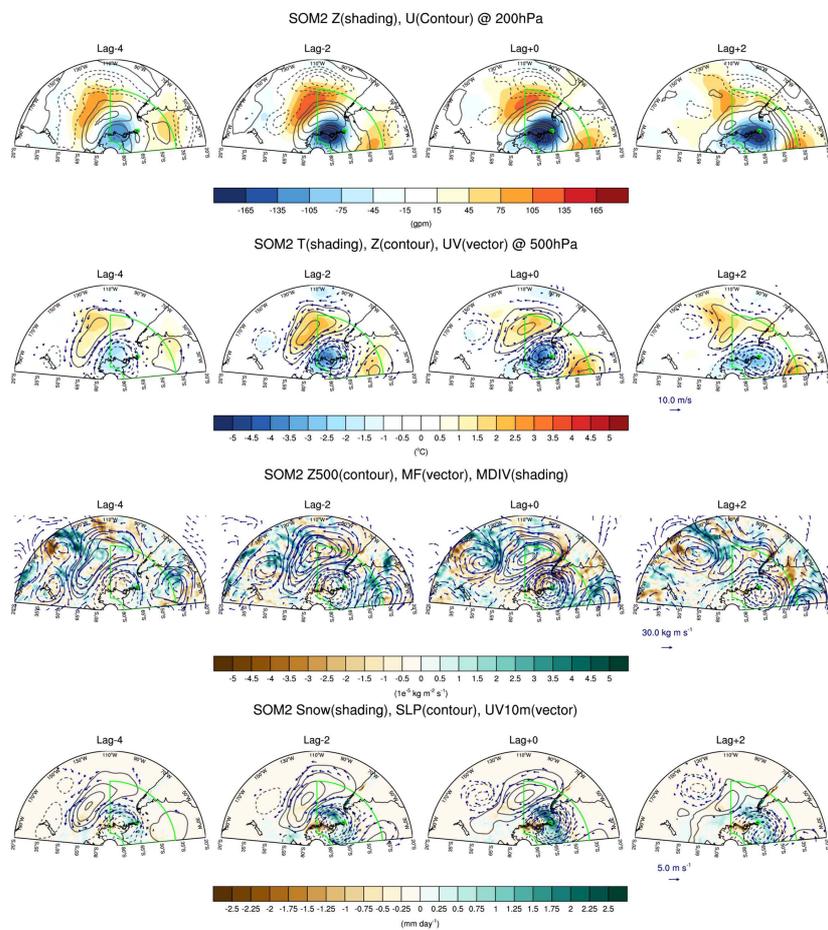


Fig. 3.1.67. SOM3에 대해 앞그림과 동일

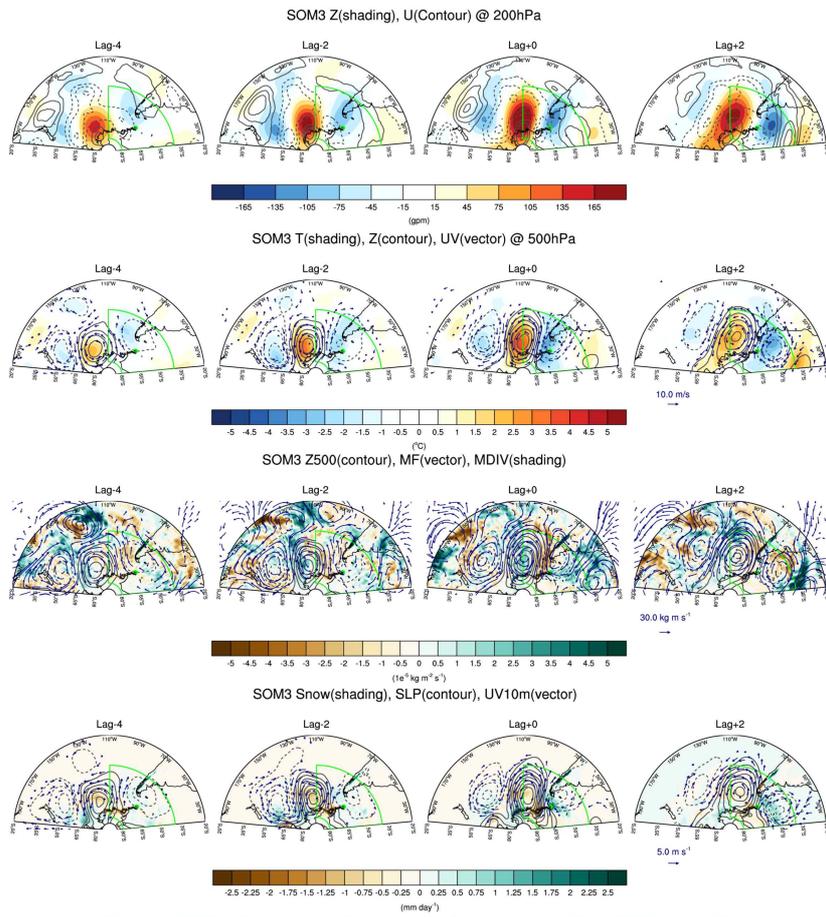


Fig. 3.1.68. SOM4에 대해 앞그림과 동일

- 극한기상현상 종류별 특성을 바탕으로 각 극한기상현상별 전형적 사례를 이용해 배경장, 원인, 입체적 구조, 소멸과정 등을 설명하는 개념모델 구성한다.

3.2 남극 성층권 오존 및 지상 라돈 농도 시공간 변동 특성 파악

3.2.1 남극기지기반 성층권 오존농도의 기후학적 변동 특성 파악 및 대기순환 관계 분석

가. 배경 및 목적

- 남극 성층권에서 매년 봄철 발생하는 오존홀은 남극 및 남반구 기후에 상당한 영향을 끼쳐왔다. 특히, 2000년대 이후 회복 중인 남극 성층권 오존에 대한 지속적인 변화 감시와 기후에 미치는 영향은 향후 남극 기후변화연구에 매우 중요하다. 본 사업에서는 남극 지역에서 수행되는 다양한 관측 자료를 이용해 성층권 오존의 시공간 분포의 특징을 수평 및 수직 방향으로 이해하며, 오존량의 변화와 기온 또는 바람과 같은 기상 요소들과의 관계를 분석하여 남반구 기후 변화에 대한 반응성을 살펴보고자 한다. 남극 지역에서 계절에 따른 성층권 오존량 변화는 오존층 파괴 및 회복과 관련되어 있으므로, 해당 현상을 상세하게 이해함으로써 기후변화에 상호간 미치는 영향 규모를 파악할 수 있을 것으로 예상된다. 남극 성층권 오존 변화 특징을 본격적으로 남극 기상장의 시공간적 변동 특성과 연계시켜 분석함으로써 남극과 남반구 대기 순환 및 기후변동성이 오존층 변화와 갖는 상관성의 이해도를 높이고자 한다. 지상 및 위성 관측자료를 활용, 남극 성층권 오존량의 월별 및 경년 변동성을 위도, 경도, 고도별로 나누어 분석하여 시공간 규모에서 유사/차이점을 살펴보고 그 원인을 찾고자 한다.

나. 연구수행 방법

1) 지상 관측

- 지상에서 성층권 오존 감시에 대표적으로 사용되는 브루어 분광광도계는 Kipp & Zonen 사에서 만들어진 모델 MK-IV, MK-III 두 종류의 표준 기기가 보편적으로 사용되고 있다. 관측 원리는 관측 대상 기체에 반응하는 특정 파장 영역대의 태양 복사량 변화를 측정하여 대기 중 오존 및 자외선을 정량화하는 것이다. 브루어 관측은 기기의 퀴르츠 창(Quartz Window)에 직접 도달하는 태양 복사량을 관측하는 직달 일사 관측(DS, Direct Sun), 대기에서 산란되어 도달한 복사량을 관측하는 산란

일사 관측(ZS, Zenith Sky) 방법 두 종류가 있다.

- 본 연구사업 수행을 위해 지상 관측 자료는 남극세종과학기지와 남극장보고과학기지에서 관측된 자료를 주로 이용하였으나 필요에 따라 다른 남극기지 자료도 함께 이용하였다. 남극세종과학기지(이하, 세종기지)는 남극반도 북쪽 끝단의 남쉐틀랜드 군도(South Shetland Islands)의 킹조지섬(남위 62.22도, 서경 58.79도)에 위치한다. 1988년 개소된 세종기지에서의 성층권 오존 관측은 1996년부터 브루어 분광광도계(Brewer Spectrophotometer)를 통해 시작되었다. 세종기지에서 수행되던 브루어 관측은 2020년 4월 이후 기기의 결함으로 인해 중단된 상태이며 이에, 본 연구 과제에서 수행하고자 했던 브루어 관측 자료 구축 및 분석은 과거의 장기간 자료에 대해 수행되었다. 1999년부터 2018년까지, 20년 동안 수행된 오존 전량 관측수는 Table 3.2.1에는 연도별로, Table 3.2.2에는 월별로 정리되어 있다. DS 관측 방법은 ZS 관측 방법에 비해 관측 횟수가 적었으며, 기기의 상태에 따라 2014년, 2017년 등의 기간에는 관측이 이루어지지 못했다. Table 3.2.2에 나타난 월별 관측 횟수는 5, 6, 7월에 관측이 수행되지 않았는데 이 기간은 남반구 겨울로 세종기지에서 하루에 유입되는 태양 복사량이 적고, 세종기지가 특히, 기후학적으로 구름이 끼는 날이 많은 곳에 위치하여 관측의 제약이 크다. DS 관측은 남반구 겨울과 가까운 4월과 8월에 각각 174회, 63회 이루어졌고, 나머지 기간에는 351회에서 1,427회로 훨씬 많은 관측이 수행되었다. 남극의 오존 전량은 남반구 봄철인 9, 10, 11월에 크게 감소하는데, 이 시기의 월별 관측 횟수는 남극 오존 농도 변동 분석을 하기에 충분하다.



Fig. 3.2.1. 세종기지에서 1996년부터 2020년 까지 운영한 브루어 분광광도계(MK-IV)



Fig. 3.2.2. 장보고기지에서 2015년부터 2019년까지 운영한 브루어 분광광도계 (MK-III)

Table 3.2.1. 1999년부터 2018년까지 남극세종기지에서 브루어 분광광도계의 연간 DS 및 ZS 측정 횟수

연도	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
DS 관측 (회)	325	364	235	301	674	355	87	52	89	3
ZS 관측 (회)	1556	991	1235	1332	2865	1183	1487	1409	1499	455
연도	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
DS 관측 (회)	99	556	817	1387	123	0	180	24	0	7
ZS 관측 (회)	523	1397	6721	5987	1497	0	516	1108	0	34

Table 3.2.2. 1999년부터 2018년까지 남극세종기지에서 브루어 분광광도계의 월간 DS 및 ZS 측정 횟수

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DS 관측 (회)	1427	780	939	174	0	0	0	63	351	464	608	872
ZS 관측 (회)	7592	4628	3306	556	0	0	0	323	2134	3828	4548	4880

Table 3.2.3. 2016년부터 2020년까지 남극장보고기지에서 브루어 분광광도계의 연간 DS 및 ZS 측정 횟수

연도	2016	2017	2018	2019	2020
DS 관측 (회)	338	2070	3756	1566	792
ZS 관측 (회)	7812	10015	3479	1687	1003

Table 3.2.4. 2016년부터 2020년까지 남극장보고기지에서 브루어 분광광도계의 월간 DS 및 ZS 측정 횟수

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DS 관측 (회)	1929	1481	131	0	0	0	0	338	0	555	1837	2251
ZS 관측 (회)	7229	4300	128	0	0	0	0	288	0	438	3862	7751

- 남극장보고과학기지(이하, 장보고기지)는 남극대륙의 동쪽(위도 74.7°S, 경도 164.2°E) 연안에 위치한다. 장보고기지에서의 브루어 분광광도계 관측은 2015년부터 MK-III를

이용하여 수행되었으나 설치 초기 장비의 이상으로 본격적인 관측은 2016년부터 시작되어 2020년 초에 종료되었다. 2020년 브루어 분광광도계는 제작사 검보정 후 세종기지에 설치하기 위해 반출되었다. 장보고기지에서의 오존 전량 관측수는 Table 3.2.3에는 연도별로, Table 3.2.4에는 월별로 정리되어 있다. 세종기지에서의와 같이 동계 기간 자료는 없으며, 하계 기간 자료가 많다. 다만, 오존홀 발생시기인 9월 자료가 없다는 것이 활용에 큰 제약이다. 한편, 장보고기지에서의 오존 존데 관측은 2015년부터 시작되었으며, 비양 시작 시각은 23:00 UTC에서 00:00 UTC 사이이다. 본 보고서에서 사용된 자료의 기간은 2019년부터 2022년이며, 이 기간 매년 오존 존데 비양 횟수는 Table 3.2.5에 정리되어 있다. 오존 존데 비양은 남반구 봄철에 성층권 오존 파괴가 많이 발생하는 8월-11월에 관측이 집중되었다. 오존 존데는 Vaisala사의 RS-41G 라디오존데와 EN-SCI사의 전기화학 농도전지(ECC, Electro Chemical Cell) 방식 오존 센서를 TOTEX사의 1200 g의 풍선에 연결되어 비양된다. 오존 존데 관측 자료에는 비양 시간, 고도, 기압, 오존 분압(Partial Pressure), 기온, 상대습도, 수평 속도 및 연직 속력, 위도와 경도, 그 외 오존 센서의 세부 측정값이 포함되어 있다. 오존 분압값은 기압자료와의 계산을 통해 오존 용적 혼합비 (VMR, Volume Mixing Ratio)로 전환 후 분석되었다. 오존 농도를 이용한 대류권계면 고도 산출 시, 산출된 대류권계면의 최대 고도가 20km로 설정되기 때문에, 존데 관측이 20km 이상 고도에서 수행되지 못한 경우는 분석에서 제외하였다. GPS 센서로 기록된 위치 정보와 수평 이동 거리 및 속도는 계절에 따라 세기와 규모가 변화하는 극 순환의 영향을 파악하는 데에 이용될 수 있다. 오존 존데 관측은 In-Situ 방식으로, 원격 탐사 방식인 위성 관측과 비교했을 때 고해상도의 연직 자료를 획득할 수 있다. 오존 존데의 정밀도(Precision)는 3-5%, 정확도(Accuracy)는 5-10% 사이의 값으로 알려져 있다(Komhyr, 1986; Komhyr et al., 1995; Thompson et al., 2007). 오존 존데의 연직 해상도는 WMO(World Meteorological Organization) 산하 기관인 GAW(Global Atmosphere Watch)에서 발간되는 GAW Report No. 201 지침에 따라 약 100-150m 단위로 권장된다. 존데의 평균 상승 속력은 5m/s이고, ECC 내부 반응 시간은 약 20-30초이므로, 두 값을 곱한 값을 유효한 연직 해상도로 간주될 수 있다.

Table 3.2.5. 2019년부터 2022년까지 남극장보고기지에서 오존존테의 월간 관측 횟수

	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	총계
2019	1	1	1	1	1	1	1	2	4	4	4	0	21
2020	0	0	1	0	1	1	1	2	5	6	1	0	18
2021	1	1	1	1	1	1	1	3	5	5	4	1	25
2022	1	1	1	1	1	1	1	2	5	5	3	2	24
총합	3	3	4	3	4	4	4	9	19	20	12	3	

2.) 위성 자료

○ 남극 대륙의 큰 공간 규모(한반도 면적의 60배 이상)에 비해 남극 기지 기반의 지상 관측 지점의 수는 매우 적다. 또한 남극의 극한 기상(블리자드, 극야, 저온 등)으로 인해 저위도 지역에 비해 관측자료 확보가 어렵다. 이는 대륙 규모의 오존 농도 변동 현상 및 그 원인을 이해하는데 지상 관측 자료만을 활용하는 것만으로는 매우 부족하다. 따라서 관측 빈도가 많고 공간 규모가 넓은 위성 자료 및 다양한 자료를 종합하여 제공되는 재분석장의 활용이 성층권 오존의 시공간 분포의 특징을 수평 및 수직 방향으로 이해하고, 오존량의 변화와 기온이나 바람과 같은 기상 요소들과의 관계를 분석하여 남반구 기후 변화에 대한 반응성을 분석하는데 필수적이다. 위성 자료는 원격 탐사로, 지상 관측이 수행되기 어려운 장소에 대해 관측 자료를 확보할 수 있는 장점이 있으며, 지상 관측에 영향을 주는 오차 요인들이 없는 자료를 생산함으로써 관측 결과에 대해 상호 검증이 가능하게 한다. 위성 관측은 탐사 방식에 따라 지표를 수직으로 바라보는 Nadir-Viewing과 대기를 수평으로 바라보는 Limb Sounding 2가지 종류로 구분된다(Fig. 3.2.3). Nadir-Viewing 탐사 방식 관측 위성 센서는 Ozone Monitoring Instrument(OMI)가, Limb Sounding 방식관측하는 위성 센서는 Microwave Limb Sounder(MLS)가 대표적이다.

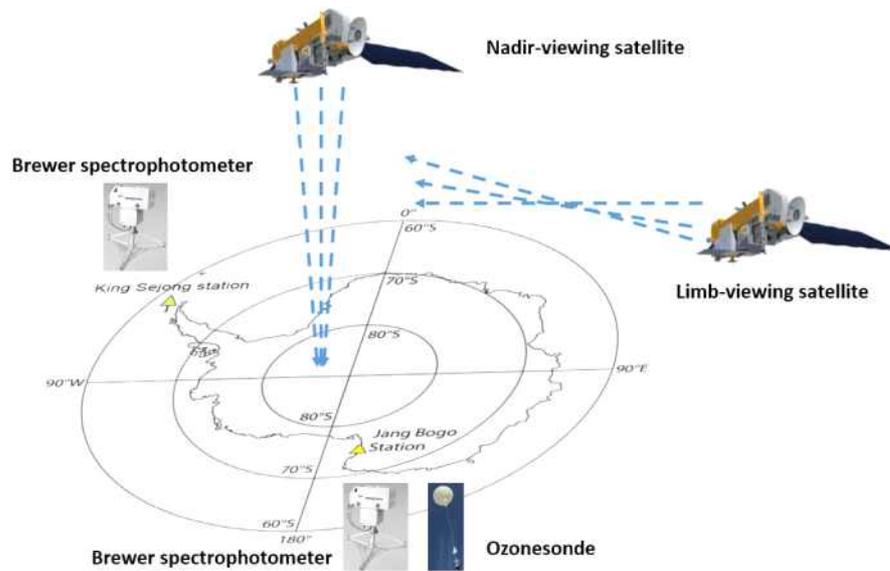


Fig. 3.2.3. 세종기지 및 장보고기지의 위치 및 관측방법

- 이에 본 연구 사업에서 사용된 위성 자료는 총 5개 위성에서 생산된 Level 2, Level 3 자료를 이용하였다. 위성 자료의 Level은 자료 처리 수준을 의미하며, 지상관측과의 비교를 위해 각 기지에 해당하는 위치에 맞게 격자를 생성하여 처리되었다. 사용된 위성 및 센서는 AURA 위성의 OMI(Ozone Monitoring Instrument)와 MLS(Microwave Limb Sounder), Sentinel-5 Precursor 위성의 TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument), ESA ERS-2 위성의 GOME-2(Global Ozone Monitoring Experiment-2), Suomi-NPP 위성의 OMPS(Ozone Mapping and Profiler Suite), AIRS(Atmospheric Infrared Sounder) 이다. 위성 자료는 관측한 데이터를 사용하기 편리하도록 공간 해상도를 맞추어 후처리 과정을 거친다. Level 3 자료는 위, 경도의 격자를 맞추어 처리된 수준을 의미한다.

3) 품질 평가

가) 브루어 분광광도계 관측과 위성 관측 비교: 오존 전량

- 브루어 분광광도계 관측 자료의 품질 평가를 위해 세종기지 자료의 경우 DS와 ZS 관측의 오존 전량을 상호 비교하고, 특히, 세종 및 장보고의 두 기지에서 두 가지 방법으로 측정된 오존 전량을 위성 자료와 비교하여 표로 정리하였다(Table 3.2.6 - 3.2.9). 1999년부터 2018년까지 세종기지에서 DS와 ZS의 두 관측 방법에 따른 오존 전량을 비교하면 높은 상관관계($R=0.98$)를 보이지만, 오존 전량값은 ZS 관측

방법에서 약 -45DU 낮게 나타났다. 이러한 차이는 ZS 관측 방법이 산관광을 이용하므로, 관측지 주변 높은 언덕을 덮고 있는 눈의 높은 지면 반사도로 인해 광학적 오차로 인해 발생할 수 있다. 양 기지에서의 위성 자료와의 비교는 Table 3.2.6에는 Pearson 상관계수 R을, 3.2.7에는 RMSE(Root Mean Square Deviation), 3.2.8에는 MBE(Mean Bias Error)와 MABE(Mean Absolute Bias Error)가, 끝으로 3.2.9에는 사용된 자료 수가 요약되어 있다. 지상 관측 자료와의 비교에서 TROPOMI 관측이 가장 작은 MBE, MABE, RMSE 값을 보였지만, 데이터 수가 다른 관측에 비해 적었다. 따라서 TROPOMI 관측 횟수가 늘어나면 현재 결과에서 나타나는 낮은 편차값이 변할 수도 있을 것이다. OMI는 장기간 수행된 관측으로 데이터 수가 많아 가장 신뢰할만한 오존 전량값을 가진다. OMPS와 GOME-2 관측은 OMI보다는 큰 값이지만 AIRS 보다는 작은 MBE, MABE, RMSE 값을 보였다. 세종기지의 관측은 대부분 MBE 값이 양의 값으로 나타났는데, 이는 위성 관측이 지상 관측보다 높은 오존 전량을 나타냄을 의미한다. 장보고기지에서는 OMI와 GOME-2 자료가 낮은 MBE 값을 보임으로써 지상관측과 잘 일치함을 보였다. RMSE는 보통 MABE와 비슷한 경향 값의 변동을 보였으며, MBE와 MABE 값을 비교함으로써 지역에 따른 위성의 성능 차이를 알 수 있다. 결론적으로 위성 관측 자료는 처리 정도인 Level 2와 Level 3에서 큰 차이를 보이지 않았으며, 브루어 분광광도계의 직달 일사와 산란 일사 관측 방법 또한 서로 차이가 적어, 지상 관측 및 위성 자료의 후속 연구를 위해 사용 가능하다.

Table 3.2.6. 브루어 기기 관측과 위성 자료의 기지별 상관계수 R 값

Station	Measure Type	Product Level	OMI	TROPOMI	OMPS	AIRS	GOME-2
King Sejong	DS	2	0.95	0.98	0.94	0.88	0.96
	ZS	2	0.95	0.98	0.94	0.85	0.93
	DS	3	0.94		0.95	0.82	0.92
	ZS	3	0.93		0.95	0.82	0.89
Jang Bogo	DS	2	0.97	0.98	0.87	0.77	0.93
	ZS	2	0.98	0.98	0.82	0.72	0.88
	DS	3	0.95		0.87	0.84	0.94
	ZS	3	0.87		0.88	0.77	0.87

Table 3.2.7. 브루어 기기 관측과 위성 자료의 기지별 RMSE 값

Station	Measure Type	Product Level	OMI	TROPOMI	OMPS	AIRS	GOME-2
King Sejong	DS	2	15.40	12.45	17.64	26.24	17.41
	ZS	2	15.32	11.61	16.54	26.79	16.35
	DS	3	18.37		17.65	33.79	21.56
	ZS	3	17.43		14.45	32.01	21.52
Jang Bogo	DS	2	11.05	9.00	23.71	29.65	15.12
	ZS	2	7.99	7.52	25.62	29.66	20.11
	DS	3	12.98		12.21	27.42	14.75
	ZS	3	19.83		19.41	29.16	20.97

Table 3.2.8. 브루어 기기 관측과 위성 자료의 기지별 MBE(MABE) 값

Station	Measure Type	Product Level	OMI	TROPOMI	OMPS	AIRS	GOME-2
King Sejong	DS	2	6.5 (10.93)	3.38 (8.9)	1.02 (13.0)	10.49 (19.7)	10.11 (13.7)
	ZS	2	5.3 (11.38)	-0.72 (8.9)	-2.43 (12.2)	8.83 (20.1)	6.13 (12.3)
	DS	3	7.8 (13.45)		6.75 (13.1)	11.20 (23.0)	9.68 (13.6)
	ZS	3	5.5 (13.08)		3.22 (11.4)	9.10 (23.8)	5.75 (12.6)
Jang Bogo	DS	2	2.9 (6.80)	-0.13 (6.4)	-8.78 (15.6)	-11.73 (21.0)	2.75 (10.3)
	ZS	2	2.0 (6.01)	0.44 (5.9)	-6.98 (13.4)	-8.79 (19.1)	3.79 (9.2)
	DS	3	0.3 (6.65)		2.68 (6.5)	-12.46 (18.4)	1.02 (9.7)
	ZS	3	-0.1 (6.57)		2.46 (6.6)	-9.44 (16.8)	1.51 (8.1)

Table 3.2.9. 브루어 기기 관측과 위성자료의 기지별 데이터 수

Station	Measure Type	Product Level	OMI	TROPOMI	OMPS	AIRS	GOME-2
King Sejong	DS	2	466	159	375	785	629
	ZS	2	1107	316	766	1690	1206
	DS	3	696		373	865	486
	ZS	3	1599		758	2002	909
Jang Bogo	DS	2	164	195	345	349	332
	ZS	2	246	199	449	448	432
	DS	3	327		327	343	276
	ZS	3	428		428	442	362

나) 오존 존데 관측과 위성 관측 비교: 오존 농도 프로파일

- 몬트리올 의정서가 제정된 1987년 이후, 남극 오존층의 회복이 2000년대부터 관측되었고, 오존 전량과 오존 연직 분포의 변화가 Solomon et al. (2016) 에서 확인되었다. 반면에 UTLS(Upper Troposphere Lower Stratosphere) 지역에서는 오존 손실이 꾸준히 보고되고 있어(Ball et al., 2018), 오존 연직 분포가 실제 오존층 회복에 반응하고 있는지 이해될 필요가 있다(Steinbrecht et al., 2017; Bais et al., 2018). 남극 오존 존데 관측 자료는 기존 연구에서 위성자료와의 비교 시 불확실성이 있다고 보고되었거나, 충분한 연구가 이루어지지 않았지만(Huang et al., 2017), 오존 연직 분포의 분석에서 핵심적인 자료로 기능하기 때문에 엄밀한 검증 방법을 찾아야 한다.
- 오존 존데와 함께 비양되는 RS41 라디오존데는 GPS 기능을 탑재하여 위경도 정보가 수신되고 이 위경도는 풍향과 풍속 계산에 사용된다. Fig. 3.2.4은 2015-2018년 봄철에 수행된 장보고 기지 오존 존데 비양 각 사례에서 나타난 시공간 이동 모습이다. 여기서 수평 이동의 규모는 최소 ~70.9km(2015년 10월), 최대 ~261km(2017년 10월)이었다. 평균 수평 이동 거리는 158.6km로 나타났으며, 위도 1.5도, 경도 5도 범위 내에서 이동했다. 위성 자료의 위경도 해상도에 맞추기 위해 공간 해상도를 위도 3도, 경도 10도 이내의 범위로 설정하고 자료를 가공했다. 사용된 위성자료는 AURA 위성의 OMI, MLS, 그리고 Suomi-NPP 위성의 OMPS LP 관측이다. 존데와 위성 자료의 비교는 연직 해상도를 맞추어 진행되었다. 위성은

존데보다 낮은 해상도를 갖고 있으며, 관측된 자료도 존데보다 관측에 대한 민감도가 낮다(Fig. 3.2.5). 또한 위성과 존데가 관측을 수행한 시간에 따른 수평 거리의 차이 또한 존재한다(Fig. 3.2.6). 따라서 존데 관측 오존 농도를 averaging kernel convolution 방법으로 위성 관측의 고도에 맞추었다(Bak et al., 2015). Convolution의 식은 아래와 같다. 결과에 해당하는 X_{smooth} 값은 X_{sonde} (오존 존데를 위성 관측 자료 고도에 맞춘 값), $X_{apriori}$ (위성 관측 retrieval에 이용된 존데 자료 값), AKs (위성의 평균 kernel matrix)를 이용해 합성곱이 계산된다.

$$X_{smooth} = X_{apriori} + AKs (X_{sonde} - X_{apriori})$$

- MRE(Mean Relative Error)는 위성과 smoothing된 오존 존데 관측값 간의 차이를 의미한다. 즉, MRE값이 작을수록 존데와 위성자료가 잘 일치함을 의미한다. 아래첨자의 설명은 Convolution에서의 값과 같다.

$$MRE_{sat}(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_{sat} - X_{smooth}}{X_{apriori}} \right) \times 100.$$

$$MRE_{apriori}(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_{apriori} - X_{smooth}}{X_{apriori}} \right) \times 100.$$

- Fig. 3.2.7은 PROFOZ(OMI), MLS, OMPS 위성에서 관측한 오존 연직 분포자료를 4년 간의 오존 존데 연직 분포자료와 함께, 또한 각각의 a priori를 역시 4년 간의 오존 존데 연직 분포자료와 비교한 것이다. Limb-viewing 위성 관측 자료(MLS, OMPS)가 Nadir-viewing 위성 관측 자료 PROFOZ(OMI) 보다 더 나은 결과를 보였다. 이에 대해 분석한 결과 산출 알고리즘에서 a priori 자료가 잘 설정되었기 때문인 것으로 보인다(Fig. 3.2.7). 또한 오존층이 존재하는 하부 성층권에서는 확실히 PROFOZ(OMI) 위성자료 정확도가 낮게 나타나는 경향은 있었다. 비록 PROFOZ(OMI) 위성 자료가 연직 해상도는 떨어지나 대류권까지 오존 연직 분포를 추정할 수 있다는 장점이 있기 때문에 향후 성층권-대류권 오존 교환 연구와 관련하여 여전히 자료 활용도가 높을 것으로 예상된다.

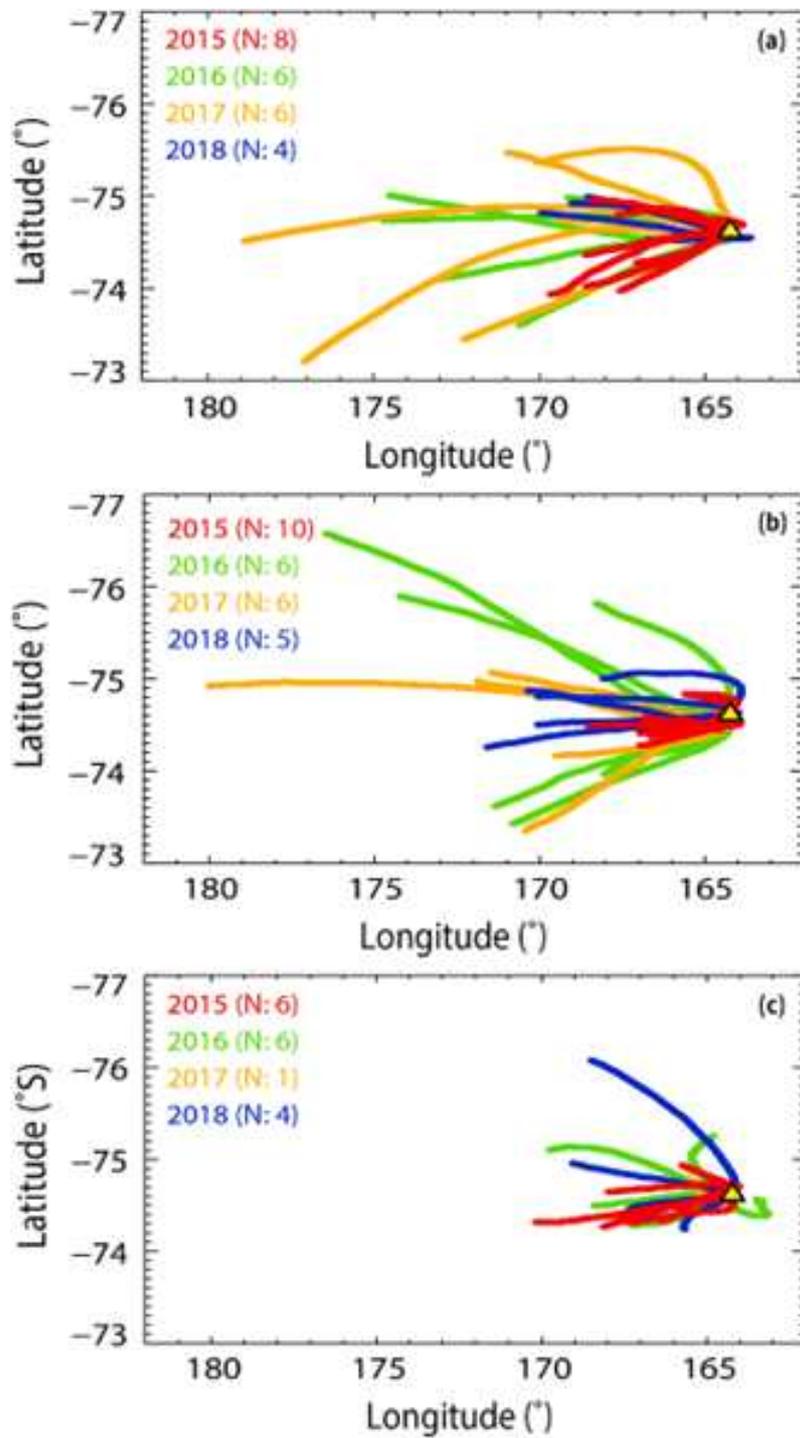


Fig. 3.2.4. 오존 존데 비양 경로를 연도와 월에 따라 나타낸 그래프. (a) 9월, (b) 10월, (c) 11월. 연도는 색상으로 구분되었으며, 범례의 괄호 안 숫자는 해당 기간의 데이터 수를 의미함

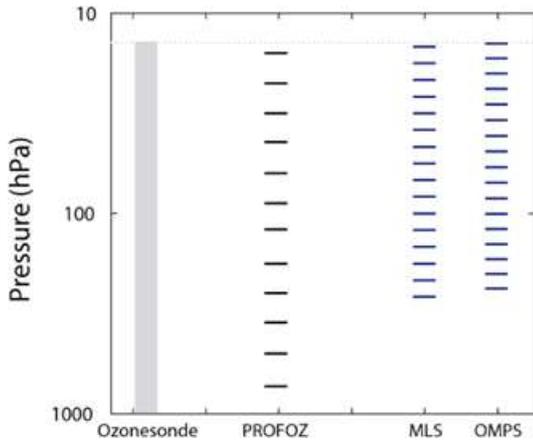


Fig. 3.2.5. 왼쪽부터 오존 존데, PROFOZ, MLS, OMPS 관측 자료의 연직 범위 및 해상도

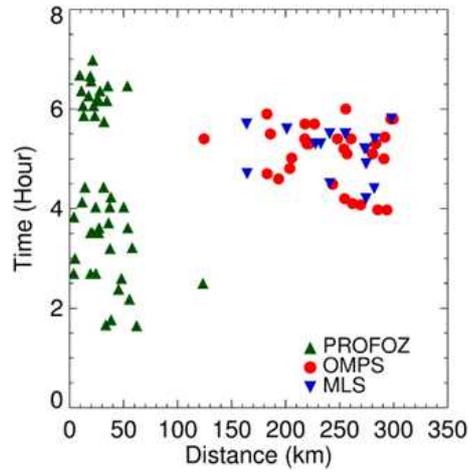


Fig. 3.2.6. 오존 존데와 위성 관측의 시간 및 수평 거리 차이

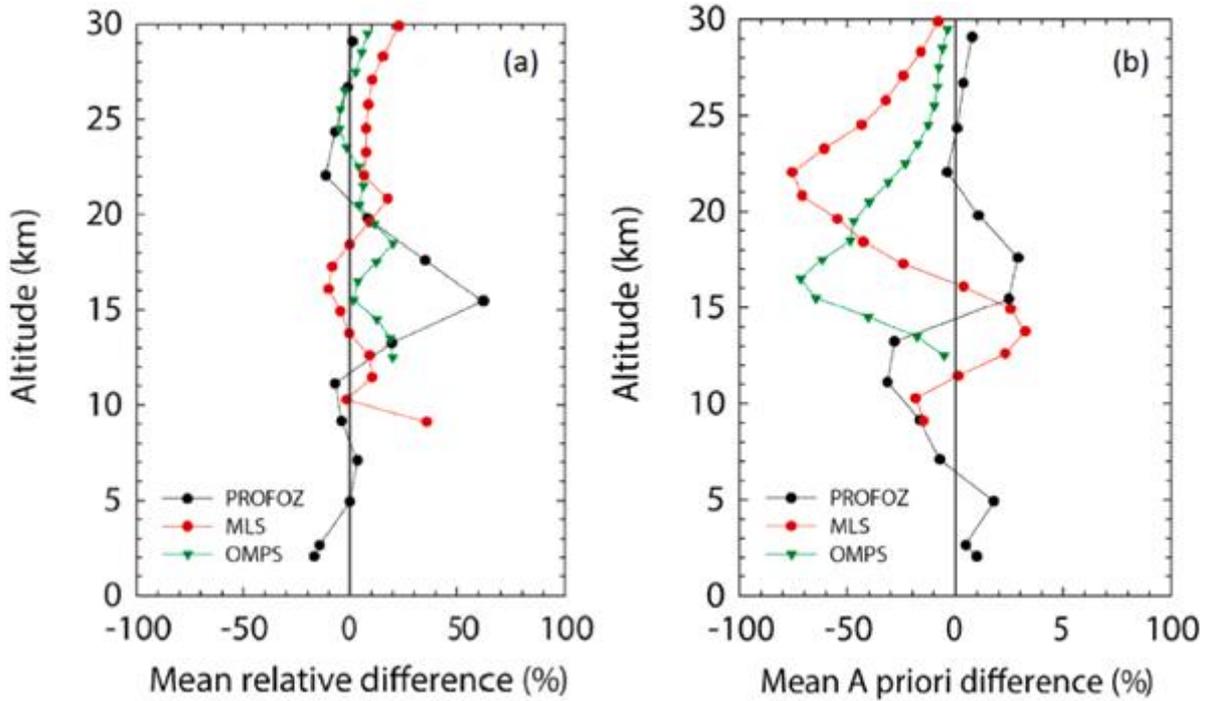


Fig. 3.2.7. 4년간 오존 존데 관측 대비 평균 위성 관측의 MREsat 값과 MREpriori 값의 평균 차이(%)

다. 결과

- 1) 남극 기지기반 성층권 오존 농도의 기후학적 변동 특성
 - 가) 오존 전량 변동

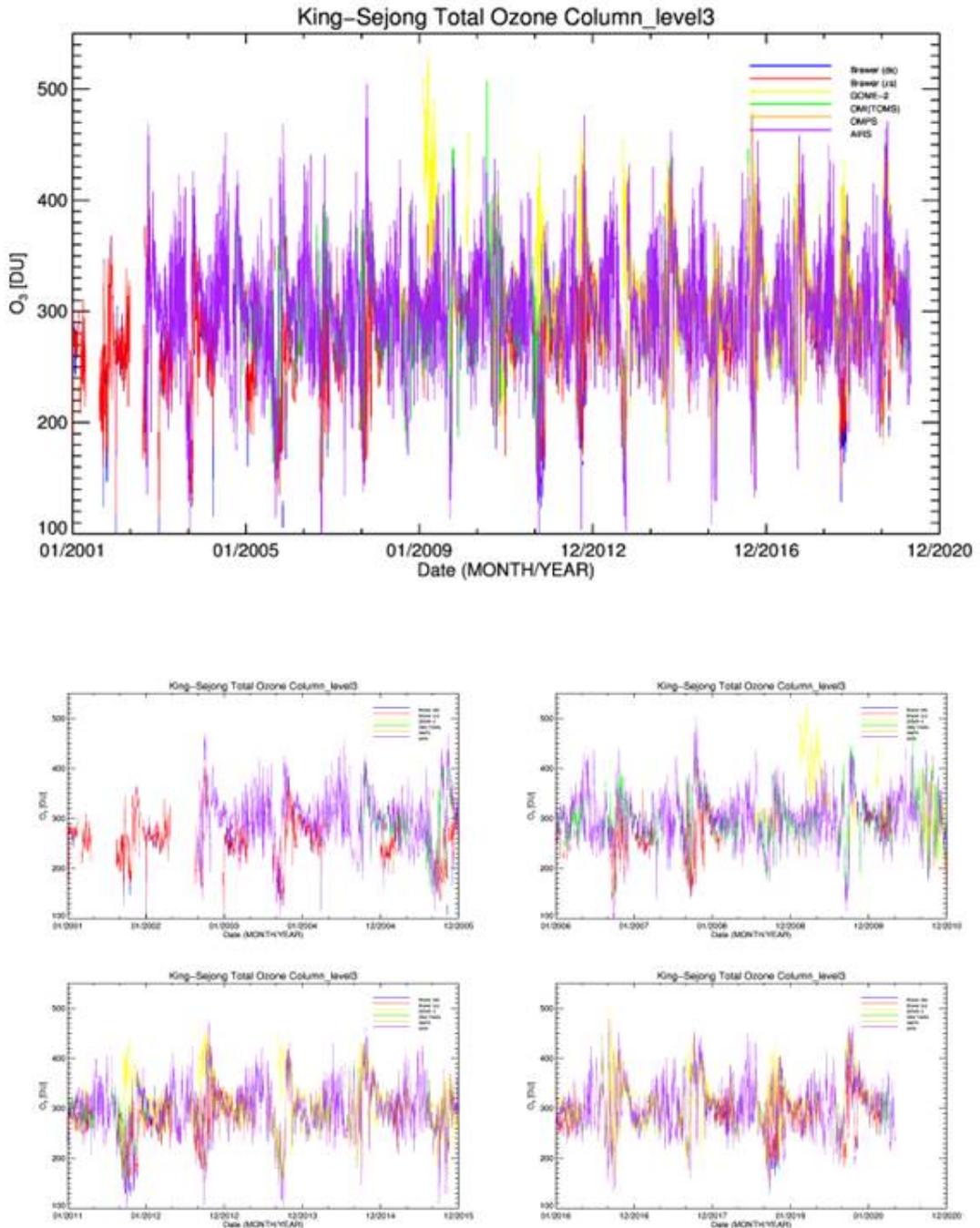


Fig. 3.2.8. 2001-2020년 세종 기지 위치에서 관측된 브루어 직달, 산란 관측 오존 전량(DU)과, 동일한 기간에 관측된 GOME-2, OMI(TOMS), OMPS, AIRS 위성센서 오존 전량(DU) 시계열 자료. 아래 4개 그래프는 왼쪽에서 오른쪽, 위에서 아래 순서로 각각 2001-2006년, 2006-2011년, 2011-2015년, 2015-2020년 기간에 대한 시계열임

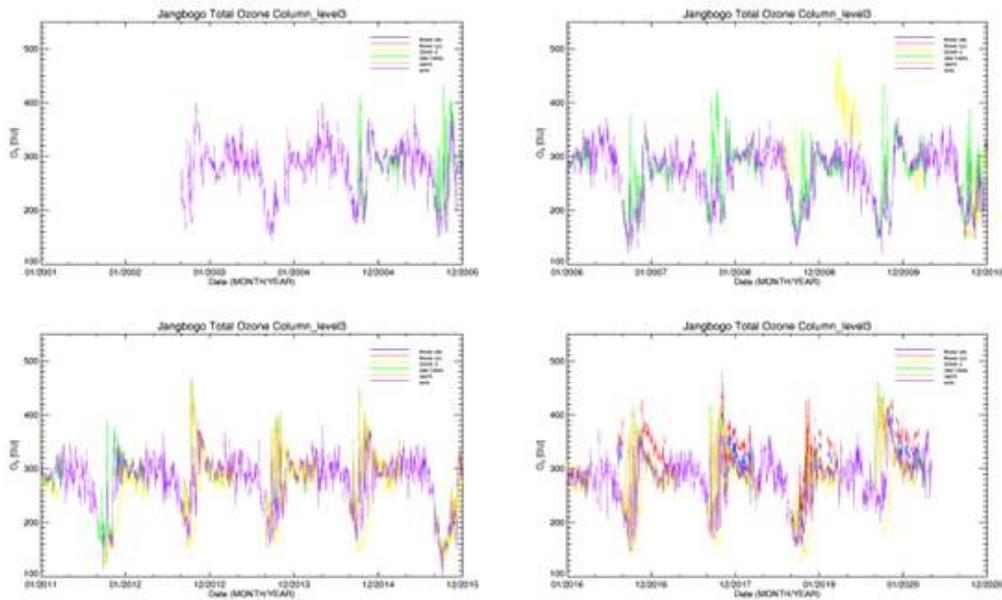
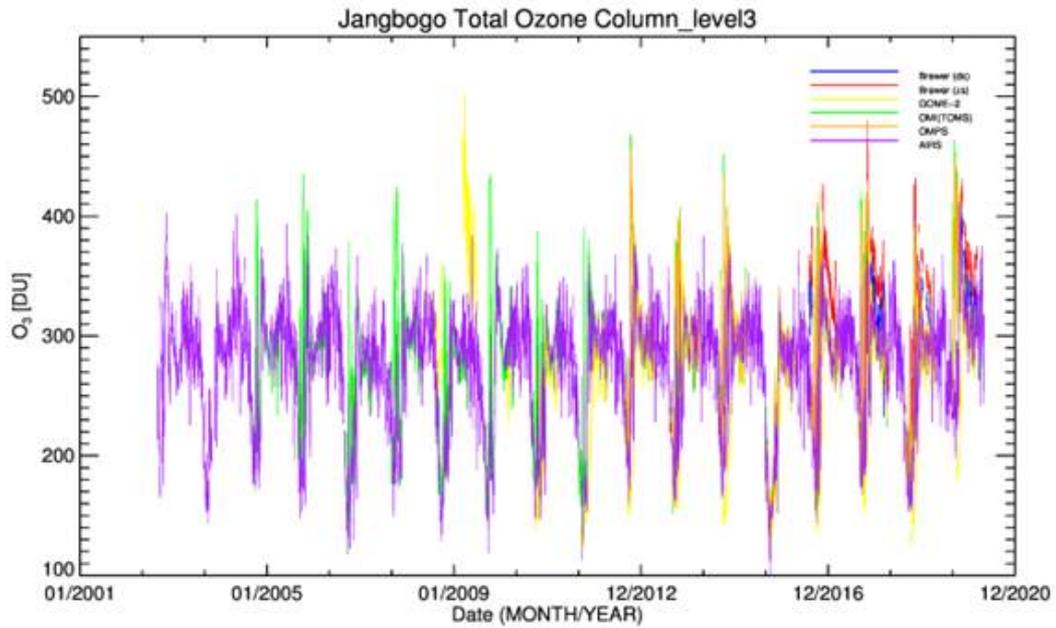


Fig. 3.2.9. 2001-2020년 장보고 기지 위치에서 관측된 브루어 직달, 산란 관측 오존 전량(DU)과, 동일한 기간에 관측된 GOME-2, OMI(TOMS), OMPS, AIRS 위성센서 오존 전량(DU) 시계열 자료. 아래 4개 그래프는 왼쪽에서 오른쪽, 위에서 아래 순서로 각각 2002-2006년, 2006-2011년, 2011-2015년, 2015-2020년 기간에 대한 시계열임

○ Fig. 3.2.8와 3.2.9는 각각 장보고 기지와 세종 기지의 브루어 직달 및 산란 일사 관측 결과를 Level 3 위성 센서 자료와 비교한 시계열 그래프이다. 2001년에서 2020년

기간에 대해, 브루어 분광광도계(직달 일사, 산란 일사) 관측 및 GOME-2, OMI, OMPS, AIRS 센서 관측 결과를 색상으로 구분하여 나타냈다. 두 기지의 결과는 모두 오존량의 연간 변동을 잘 보여주고 있다. 장보고 기지 오존 전량의 연간 변동 폭은 180DU - 400DU 사이로, 세종 기지의 100DU - 450DU 수준의 연간 변동 폭에 비해 전반적으로 낮게 나타났다. 또한, 2016년 남극 봄철 (9-11월) 두 기지의 오존 전량을 비교하면, 장보고 기지는 최대값이 약 400DU에서 나타나는 반면 세종기지는 480DU에서 나타나고 있다. 이는 최소값에 대해서도 마찬가지로, 연간 변동의 경향이 전체적으로 계절에 영향을 받으나 지역과 연도에 따라 개별 사례로써 연구되어야 함을 가리킨다.

나) 오존 농도 프로파일

- 2015년부터 2018년 수행된 장보고 기지 오존 존데 관측 결과를 월별로 분류하여 나타내고 분석을 진행하였다. 존데 비양은 계절과 기상 상황에 큰 영향을 받아 월별 관측 횟수가 다르지만, 장기간 관측 결과를 통해 오존 연직 분포의 연간 변동 특징을 알 수 있다. Fig.3.2.10과 Fig.3.2.11은 각각 1월부터 6월, 7월부터 12월의 월 평균 오존 연직 분포를 나타낸다. 세로축은 0km부터 14km까지의 고도, 가로축은 0ppb부터 400ppb까지의 오존 혼합비 범위를 나타냈다. 오존홀이 발생하는 봄철의 연직 분포부터 살펴보면, 10월과 11월은 14km 고도에서도 오존 혼합비가 300ppb이며 이는 다른 월에 비해 낮은 수치이다. 10월은 9월과 달리 13km 인근 고도에서, 고도가 상승할 때 오존 혼합비가 약간 감소했다가 다시 상승하는 모양의 연직 분포를 보인다. 11월이 되면 고도에 따라 오존 혼합비가 감소되는 구간이 11km 고도 인근에서 시작하며, 14km 인근에서 감소가 중첩되는 모양의 그래프로 나타난다. 12월에는 6-8km 사이에서 오존량이 주변에 비해 약 20ppb 증가했다가 다시 감소하는 peak가 존재한다. 또한 10km 이상 고도를 따라 오존량이 봄철에 비해 가파르게 증가하는 모습을 보인다. 1월과 2월은 이러한 경향을 따르되, peak가 나타나는 고도가 변화하며 약 12km 고도에서 400ppb 오존 혼합비에 도달하게 된다. 3월은 오존 혼합비가 급격한 상승을 시작하는 고도가 8km까지 내려오고, 4월부터는 극야가 진행됨에 따라 오존의 생성이 크게 발생하지 않는 시기가 되어 서로 유사한 패턴의 연직 분포를 유지한다. 이는 7, 8월도 마찬가지이며, 4-6월에 비해 7-8월의 연직분포가 고도에 따른 오존량 변동이 적고 단순한 모습을 보인다. 존데 자료는

높은 연직 해상도를 통해 세밀하게 오존량의 변화를 살펴볼 수 있는 실측 자료라는 점에서 위성 관측에 비해 신뢰도가 높으므로, 다른 지역의 남극 기지에서 장기간 생산된 존데 자료를 포함해 비교를 진행할 필요가 있다.

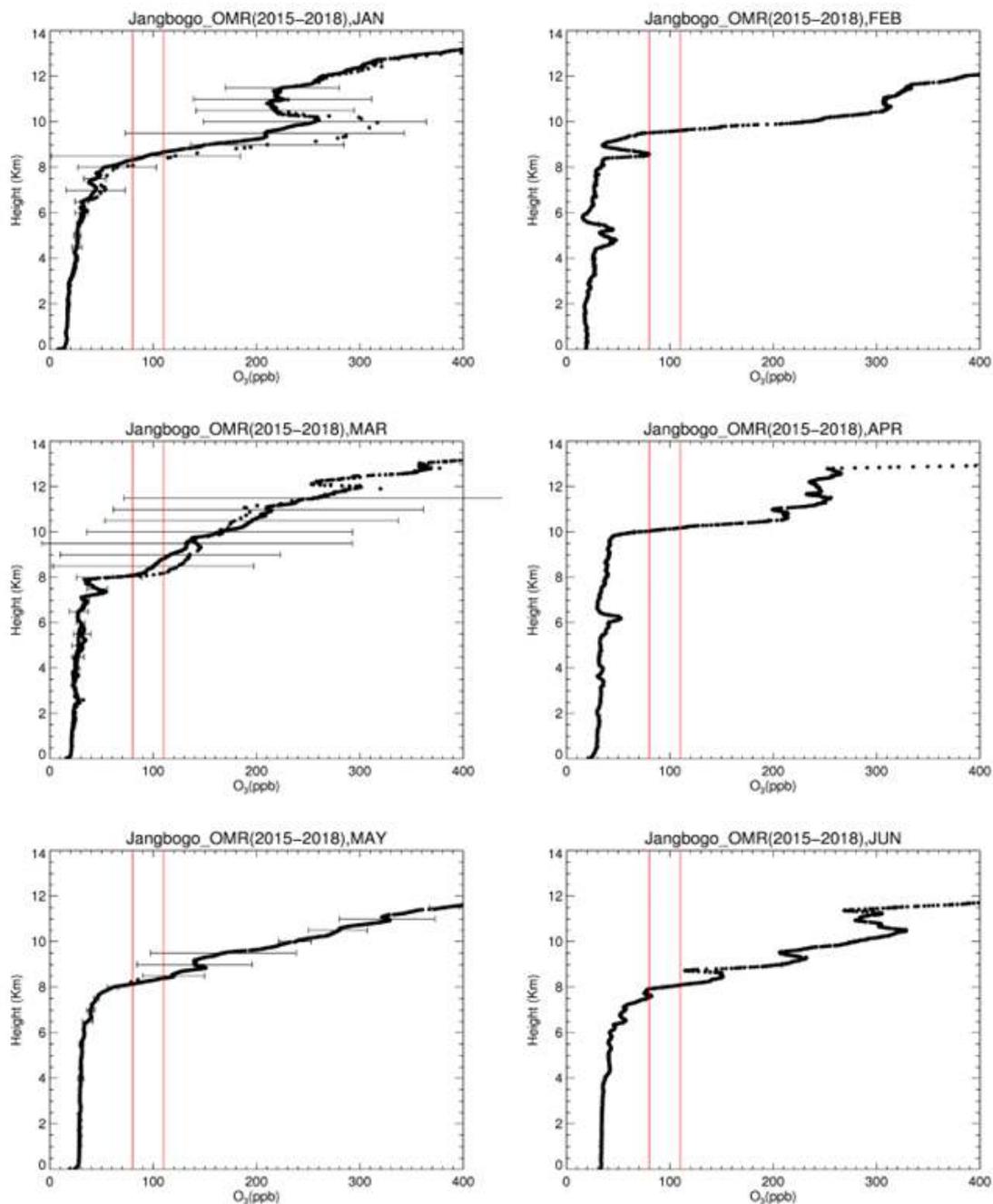


Fig. 3.2.10. 2015-2018년 장보고 기지 오존 존데 자료로부터 계산된 월별 평균 오존 용적 혼합비 연직 분포. 위에서 아래, 왼쪽에서 오른쪽 순서로 1월-6월

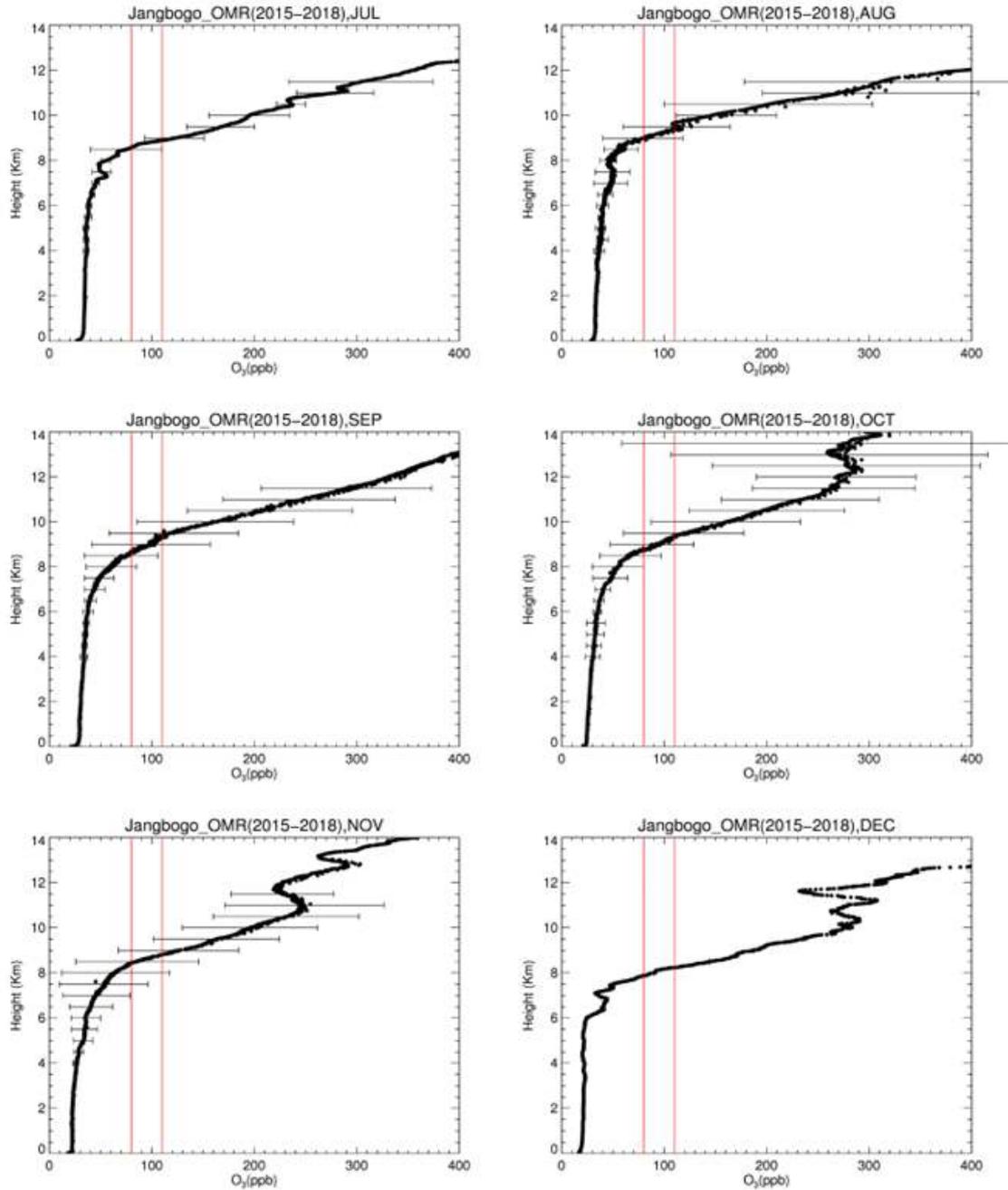


Fig. 3.2.11. 2015-2018년 장보고 기지 오존 존데 자료로부터 계산된 월별 평균 오존 용적 혼합비 연직 분포. 위에서 아래, 왼쪽에서 오른쪽 순서로 7월-12월

- 오존 존데 및 위성 자료를 이용하여 2015년 10월 오존홀 발생을 극 소용돌이와 함께 분석하였다. Fig. 3.2.12은 오존 존데에서 관측된 모든 오존 용적 혼합비의 연직 분포를 나타낸 결과이다. 봄 기간인 9월부터 10월에는 모든 결과가 오존량이 감소하는 모습을 보이며, 2015년 10월 19일에 160.1DU의 오존 전량 최솟값이 관측되었다. 이 기간 475K의 온위에 해당하는 잠재와도는 극 순환의 가장자리 값에 해당하는 $-45 \times 10^{-6} \text{ Km}^2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 이며

(Kuttippurath et al., 2015), 낮은 오존 전량 값이 극 순환에 영향을 받은 것으로 생각할 수 있다. 다음으로, 이 사례에 대해 오존 존데 관측, 3개의 위성 관측, convolution이 적용된 존데 관측, priori 위성 관측 결과를 비교분석하였다. 오존량 감소는 성층권 하부에 해당하는 10-20km 고도에서 발생한 것으로 나타났으며, 이 고도에서 존데 자료는 약 0.2ppmv의 오존농도를 보였다. Fig.3.2.13은 각 위성 자료의 원 관측값과 Convolution 기법이 적용된 결과를 함께 나타낸 연직분포 자료이다. 여기서 위성 관측과 존데 관측이 보이는 차이를 알 수 있다. 차이를 수치적으로 계산한 MRE값은, 가장 큰 오존량 감소가 나타난 18km 고도 근처에서 각각 20.1%(OMI PROFOZ), 14.1%(MLS), 21.4%(OMPS)의 크기를 나타냈다. 존데 자료에서 오존량 감소는 13km 고도 인근에서 가장 크게 나타났으며, 해당 고도의 위성 자료 MRE값은 18km보다 훨씬 큰 값을 나타냈다. 이를 통해 위성 자료의 성능을 평가할 수 있는데, 위성 관측이 존데 관측값의 경향을 파악하는 데에는 도움이 되나 양적인 차이를 보여 위성 자료만을 이용한 오존량 분석 시 유의해야 한다.

- Averging Kernel 값은 각 기기가 특정 고도에서 오존 농도에 대해 가지는 민감도를 알려준다. MLS와 OMPS는 0.6과 0.7 사이에 해당하는 AK 값을 가지지만, OMI-PROFOZ 결과는 0.5 이하의 값을 보였다(Fig. 3.2.14). AK 값의 차이는 OMI 센서의 오존 농도에 대한 민감도가 다른 기기보다 낮음을 의미한다. 한편, MLS와 OMPS 자료는 대류권에 대해 관측 결과가 없기 때문에 OMI 자료가 의미가 있다. 위성 관측은 대체적으로 존데 관측보다 1ppm 정도 높은 값을 보였고, 상대적으로는 -20에서 30% 정도의 차이를 가졌다. 이러한 차이가 존재함에도 불구하고, 남극은 존데 관측이 꾸준히 진행되기 어려운 지역이기 때문에 위성과의 비교를 통해 위성 자료의 활용성을 확장할 필요가 있다.

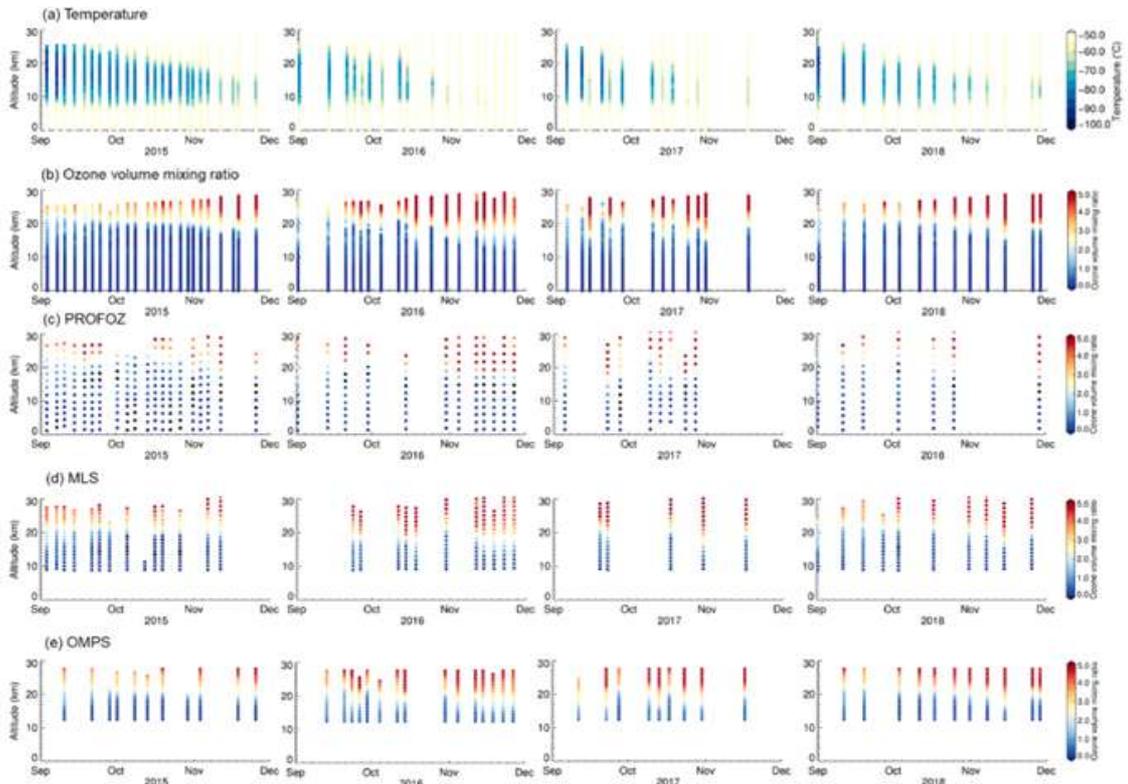


Fig. 3.2.12. 2015-2018년에 나타난 (a) 오존 존데 관측의 기온, (b) 오존 존데 관측의 오존 용적 혼합비, (c) OMI-PROFOZ 위성 관측, (d) MLS 위성 관측, (e) OMPS 위성 관측 오존농도 연직 분포

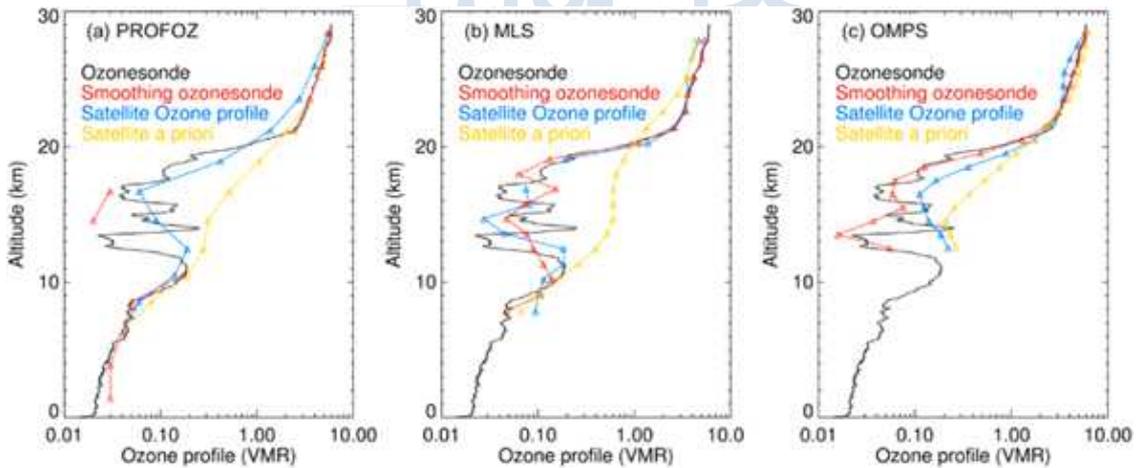


Fig. 3.2.13. 오존 전량이 최소로 나타난 2015년 10월 19일 오존존데 관측 결과와 (a) OMI-PROFOZ, (b) MLS, (c) OMPS 위성자료에서 나타난 오존 연직 분포

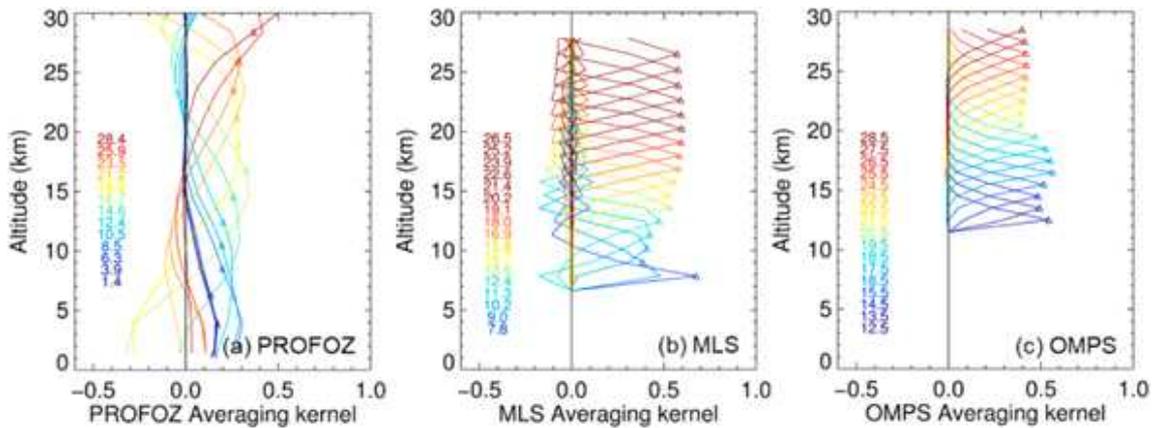


Fig. 3.2.14. 2015년 10월 19일에 해당하는 각 위성 관측과 존대의 Averaging Kernel 계산 결과 연직 분포

2) 남극 지역별 평균 오존 전량 비교

- 남극 오존층은 봄철에 파괴가 일어나 오존 농도가 감소한다. 이는 남극 대륙 전체에 대해 위도에 따라 균일하게 일어나는 현상이기보다는 각 사례의 오존층 파괴 규모에 따라 범위가 달라지는 현상이다. 남극 겨울철 극야 기간 성층권의 기온이 영하 ~ 80℃까지 하강하고 건조한 대기 상태에 이르면 생성되는 극 성층권 구름(PSC, Polar Stratospheric Cloud)이 생성된다. 극 성층권 구름의 표면에는 염소 reservoir가 활동성 기체로 변하는 화학 반응이 발생한다. 봄이 되면 자외선과 reservoir의 반응으로 염소 원자가 방출되고, 이는 오존층 파괴의 원인이 된다. 오존홀의 존재는 1986년에 처음 보고되었으며(Solomon et al., 1986), 1987년에 염화불소화합물(CFCs, chlorofluorocarbons)의 배출을 제한하기 위한 몬트리얼 의정서가 제정되었다. 오존 파괴 물질의 규제를 통해 오존 파괴 속도는 감소하였고(Salby et al., 2011) 오존층은 2000년대 이후 회복세를 보이는 것으로 나타났다(Solomon et al., 2016).

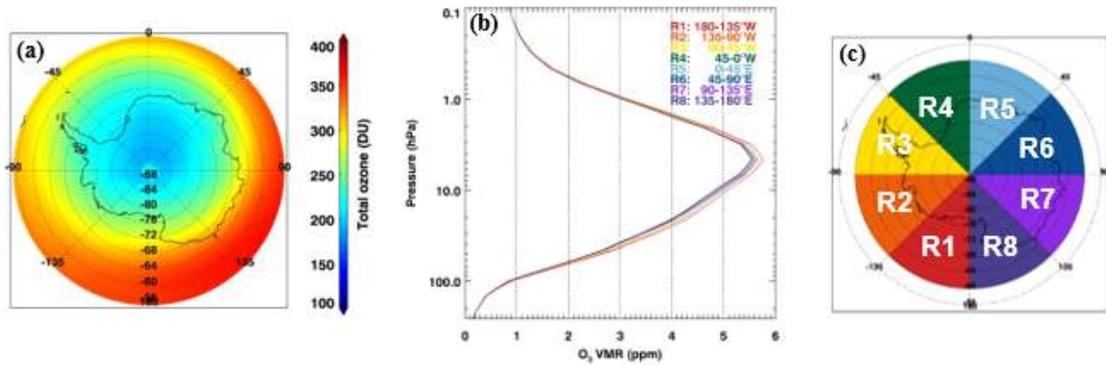


Fig. 3.2.15. 2004년 10월부터 2021년 12월, 남위 54-90도 지역에 대한 (a) OMI 위성 오존 전량(DU) 관측 평균값 (b) MLS 위성으로 관측된 지역별 오존 혼합비(ppm) 연직 분포 및 (c) MLS 위성 관측에 해당하는 지역

○ OMI 센서와 MLS 센서 관측 자료를 이용해, 2004년 10월부터 2021년 12월까지, 남극 대륙을 포함하는 남위 54-90도 지역에 대해 오존 전량 및 연직 오존농도 분포 자료를 분석하였다. 관측값은 Fig. 3.2.15의 (c)와 같이 지역을 분류했고, 지도상에 나타낸 월별 평균값의 변화를 확인할 수 있다. 그리고, 오존과 기온의 상관관계를 공간 분포에 따라 확인하였다. ENSO(El Nino Southern Oscillation)와 QBO(Quasi Biennial Oscillation) 등의 기후 변동은 남반구에 위치하는 현상이므로, 남극 지역 기후에도 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 또한, 오존량은 오존 파괴 물질의 농도에 영향을 받고 이 물질들은 EESC(Equivalent Effective Stratospheric Chlorine)으로 불린다(Krzyscin and Baranowski, 2019; Strahan et al., 2019; Szelag et al., 2020). 이러한 영향을 제거하기 위해 아래의 다중 선형 회귀 모델을 이용한 오존량의 선형 트렌드 그래프를 작성했다(Szelag et al., 2020). 다중 선형 회귀 모델에 사용된 변수들은 Fig. 3.2.16에 나와 있다.

	Variable	Data source
Satellite ozone measurements	Total ozone column	Ozone Monitoring Instrument (OMI)
	Ozone volume mixing ratio and temperature profile (300-0.02hPa)	Microwave Limb Sounder (MLS)
Natural cycles affecting ozone concentration	QBO30, QBO50	Equatorial winds at 30 and 50hPa (NOAA CPC)
	El Niño/Southern Oscillation (ENSO)	Multivariate ENSO Index V2 (NOAA PSL)
	Solar cycle	Solar 10.7cm flux (Space Weather Canada)
	Brewer Dobson Circulation	45-day total eddy heat flux at 100hPa (MERRA-2)
	Antarctic Oscillation (AAO)	AAO index (NOAA CPC)
	Stratospheric Aerosol	Anomaly of stratospheric aerosol optical depth at 550nm (NASA GISS)

Fig. 3.2.16. 분석에 사용한 위성 자료와 다중 선형 회귀 모델에 입력된 기후 변동성 지수 정보

$$\begin{aligned}
 &O_3(t) \\
 &= a + bt + cQBO_{30}(t) + dQBO_{50}(t) + eENSO(t) \\
 &+ fSolar(t) + gEHF_{100}(t) + hAAO(t)
 \end{aligned}$$

- Fig. 3.2.17와 Fig. 3.2.18은 각각 OMI 센서로 관측된 월평균 오존 전량 분포와 월평균 오존 전량의 연간 변동량 분포를 나타낸 그림이다. 9월과 10월은 오존층이 발생한 모습을 보이며 11월에는 오존층이 회복되는 모습이 나타난다(Fig. 3.2.17). 10월은 9월에 비해 오존량이 150DU 이하인 지역의 넓이가 감소하였지만, 오존층 파괴가 완전히 회복되지 않은 모습이다. 연구 대상인 2004년부터 2021년까지의 기간이 충분히 긴 점을 고려하면, 10월에 나타난 오존홀이 장보고 기지가 위치한 지역보다는 세종 기지와 가까운 동쪽으로 약간 치우치는 경향이 있음을 알 수 있다. 4월부터 8월까지의 남극점을 기준으로 극야에 해당하는 범위가 하지 때까지 확장하였다가 다시 줄어들어가는 시기이다. 이 때 OMI 센서를 탑재한 AURA 위성은 극야가 일어난 지역에서 관측을 수행하지 않아 관측값이 표현되어있지 않다. 한편 8월의 월 평균 오존 전량 분포는 극야가 끝난 지 얼마 되지 않은, 결측 위치의 주변 위도에서 남반구 봄이 됨에 따라 오존이 파괴된 영향을 보인다. 오존층 파괴가 회복된 이후인 12월부터, 남극대륙 내부는 전반적으로 260DU에서 300DU 사이의 오존 전량 값을 가지는 것으로 확인된다.

- 월평균 오존 전량의 연 변동량은 9월과 10월에 각각 R4-R5 중위도, R1-R2 고-중위도 지역에서 증가의 폭이 큰 것으로 나타난다(Fig. 3.2.18). 11월은 남극점을 중심으로 모든 방향에 대해 증가량이 크게 나타난다. 이는 오존홀의 회복과 관련된 값이라고 볼 수 있다. 11월은 파괴되었던 오존층이 회복되는 시기인데, 연간 변동량 양의 값을 가지므로 오존층 파괴의 정도가 약했음을 알 수 있다.



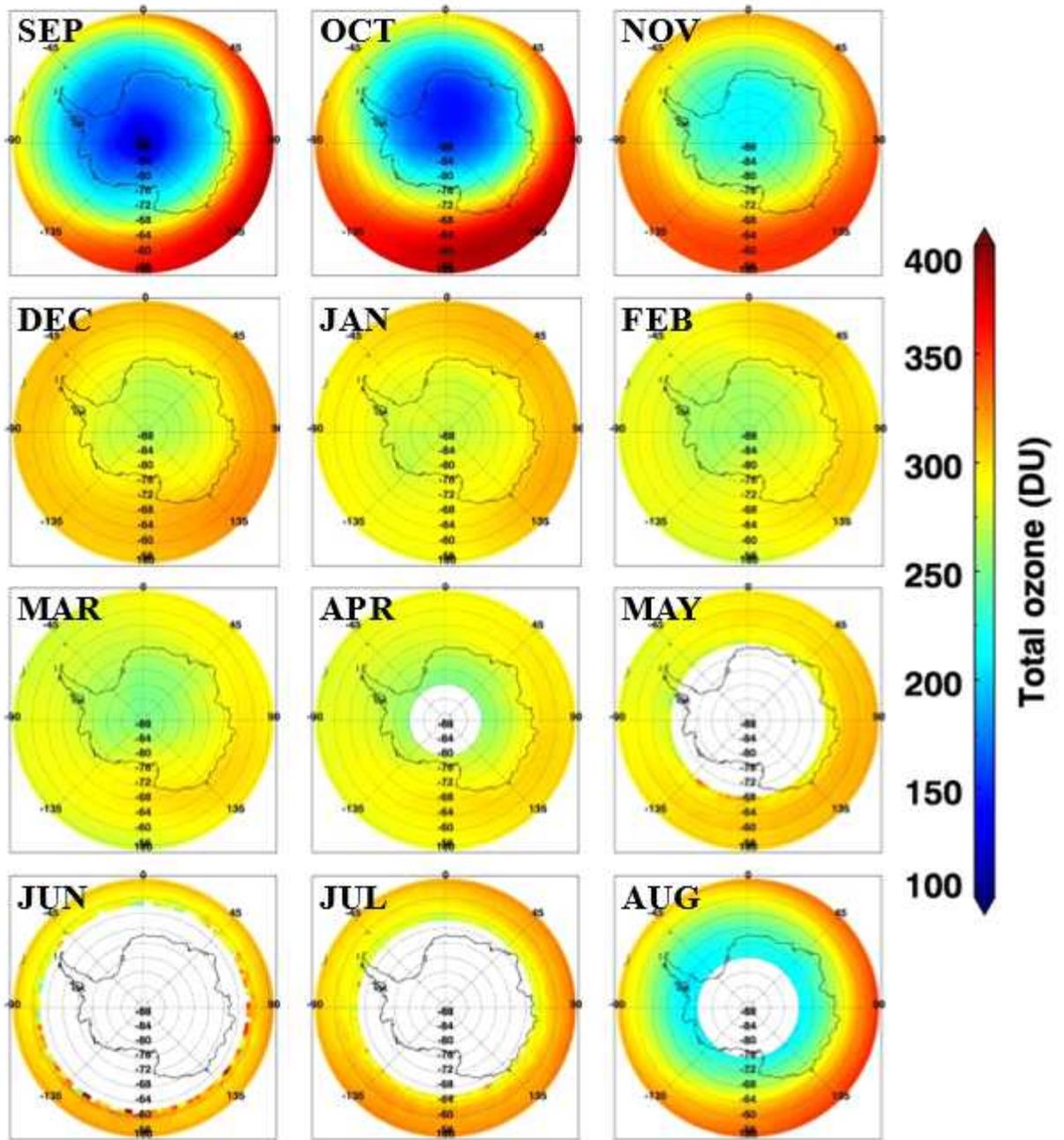


Fig. 3.2.17. 2004년 10월부터 2021년 12월, 남위 54-90도 지역에 대한, OMI 센서로 관측된 월 평균 오존전량(DU)

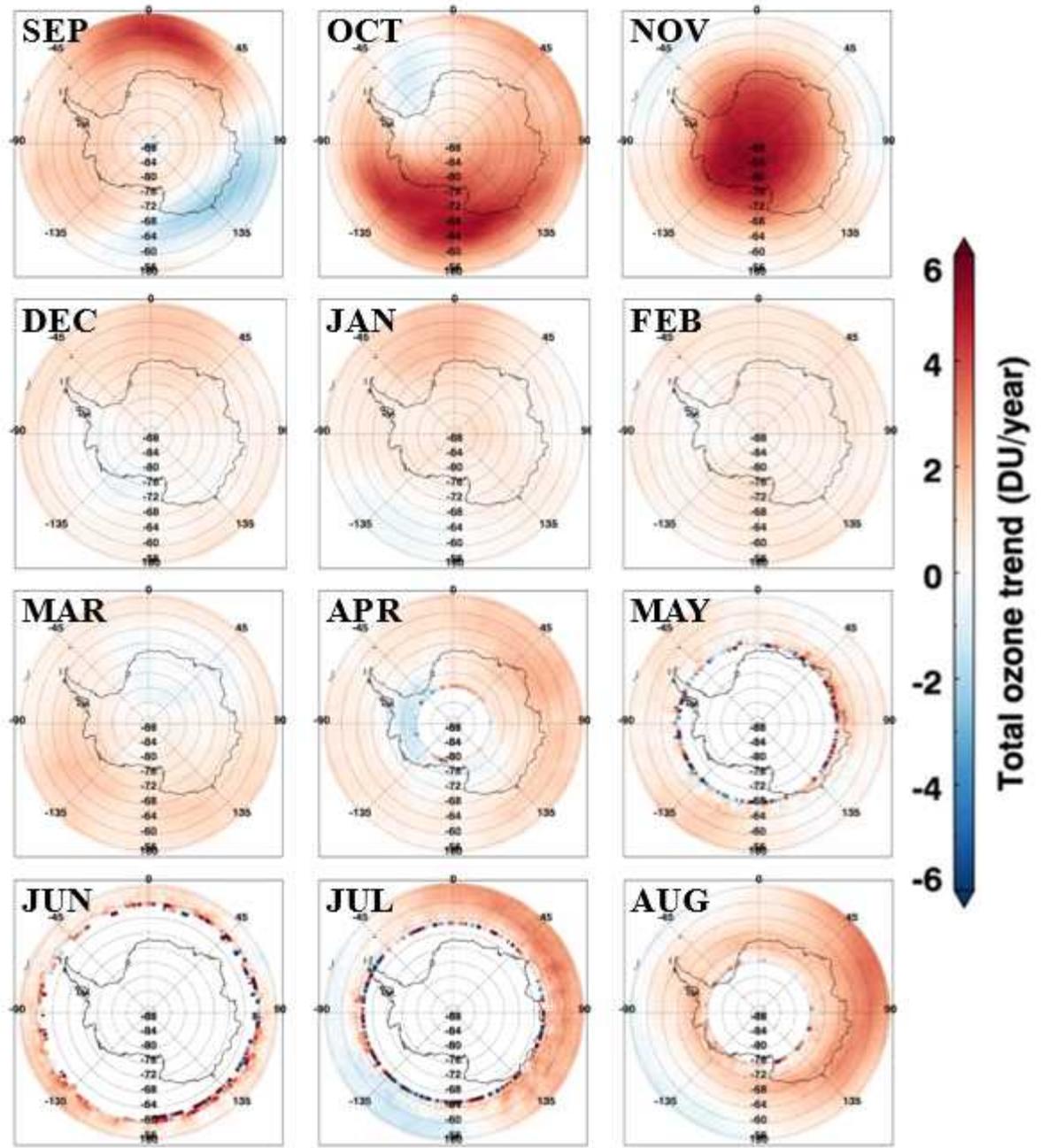


Fig. 3.2.18. 2004년 10월부터 2021년 12월, 남위 54-90도 지역에 대한, OMI 센서로 관측된 월 평균 오존전량의 연간 변동량

- Fig. 3.2.19과 Fig. 3.2.20은 남위 54-90도 지역에 대해 각각 MLS로 관측된 연직 월평균 오존량 분포 및 월평균 오존량의 연간 변동을 경도에 따라 나타낸 그림이다. 오존 농도는 용적 혼합비(VMR, Volume Mixing Ratio)로 나타내었다. 전반적으로 5-10hPa 사이의 고도에서 오존 농도가 가장 높게 나타났고, 그 이상의 고도에서는 2ppm 이하로 농도가 감소하였다. 오존층 파괴가 일어나는 봄철 9월과 10월 결과에서, 다른 계절에 비해 브루어-돕슨 순환(Brewer-Dobson Circulation)에 의해 5-10hPa 사이의 고도에서 최대 오존 농도가 나타난 것을 알 수 있다. 동일한 시기에 경도 -50°에서 0° 사이 지역의 5-10hPa 고도에서 오존층 파괴에 의해 오존 농도가 감소하는 모습을 보인다. 이것은 극 순환이 한쪽으로 치우침에 따라 비대칭적인 모습을 보이기 때문이다. 11월은 전체 경도에 대해 해당 고도의 오존농도가 회복된 것으로 나타나며, 극야가 발생하는 4월부터 8월 사이의 기간에는 성층권 고도의 오존 농도가 6ppm 이하로 감소함을 알 수 있다. Fig. 3.2.18은 월 평균 연직 오존 분포의 연간 변동이다. 다른 시기보다 오존량이 적은 4-8월 기간은 연간 변동량 또한 작았다. 9월에서 11월 사이에는 모든 지역에 대해 100hPa 인근에서 오존 농도가 약 20% 혹은 그 이상 증가하는 모습이 보인다. 이러한 증가는 10월에 가장 큰 폭으로 발생하고, 11월에는 지역과 고도에 무관하게 연간 변동량이 증가했다. Fig. 3.2.19에서 오존층 파괴가 일어난 것으로 추정되는 10hPa-1hPa 사이의 구간에 비해 낮은 고도에서 이러한 증가량이 나타난 점에 대해 추가적인 연구가 필요하다.
- Fig. 3.2.21은 ENSO와 QBO의 영향을 제거하기 위해 선형 회귀 모델을 적용하고 그 결과로 산출된 오존 용적 혼합비 변동량 경향 그래프이다. 그래프 선의 색상은 각각 월별로 가장 큰 증가가 나타난 지역(빨간색), 가장 큰 감소가 나타난 지역(파란색)을 선정한 결과이다. 점선은 모델을 통해 보정된 트렌드를 의미한다. 기후 변동성 지수들이 제거된 결과는 원래의 오존 농도 변화의 경향을 따라가는 모습을 보이나, 9월과 같이 증감의 폭이 큰 시기에는 관측값과 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 4월부터 8월 사이의 오존 관측은 극야로 인해 남극 전체에 대한 분석을 수행하기에 약간의 어려움이 있으며, 이에 따라 해당 기간의 모델 적용값과 관측값의 차이는 기후 변동성이 오존 농도의 변화에 영향을 주고 있다고 판단하기에는 이르다. 한편, 9월은 지역에 따른 오존량 증감 경향이 크며 관측값을 안정적으로 확보할 수 있는 시기인데, 기후 변동성을 제거한 오존량 증감 경향이 관측값과 큰 차이를 보인다는 점은 기후 변동과 오존층 파괴의 관계를 살펴보아야 하는 근거로써 작용한다.

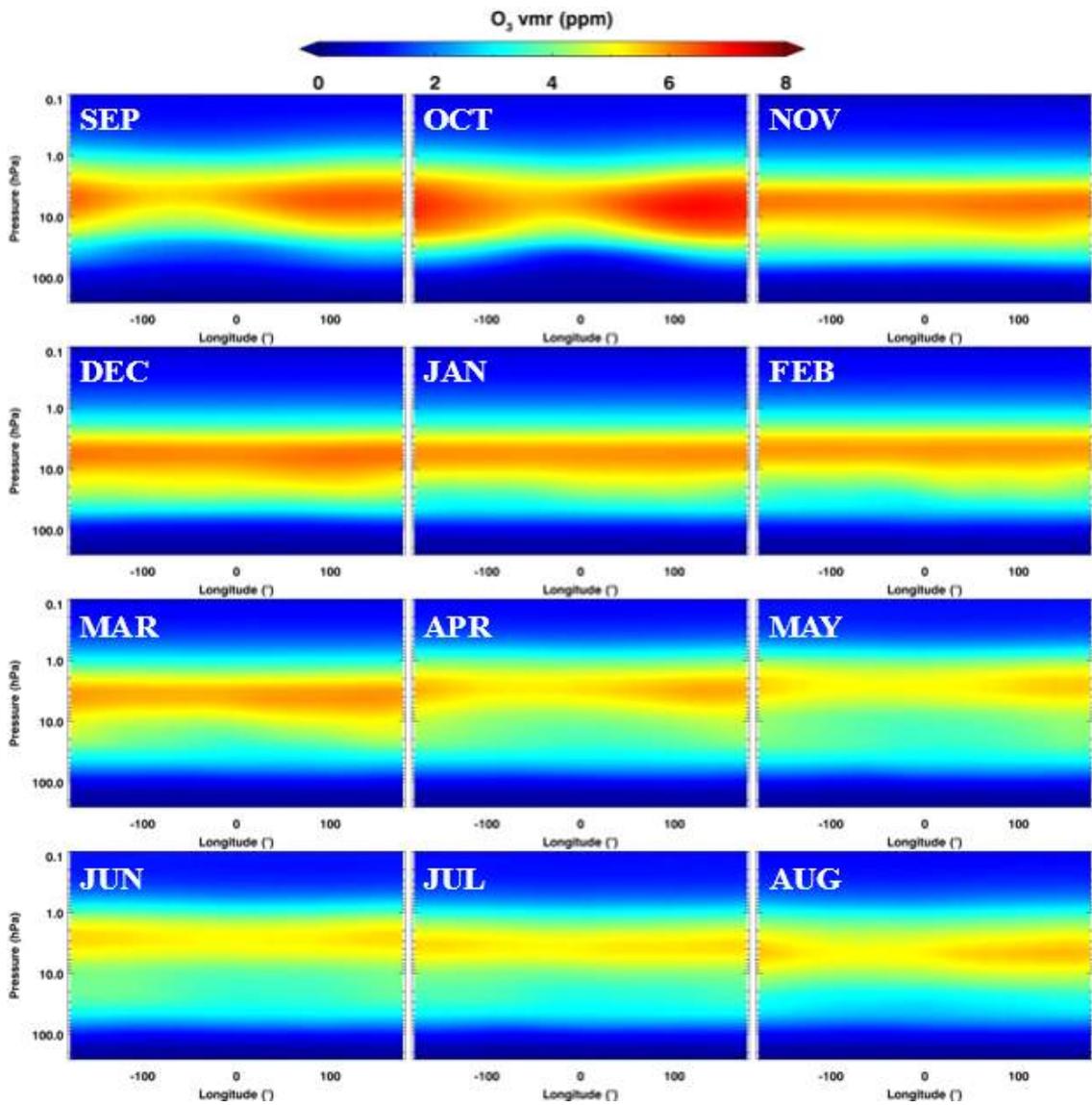


Fig. 3.2.19. 2004년 10월부터 2021년 12월, 남위 54-90도 지역에 대한, MLS 센서로 관측된 오존 용적 혼합비(ppm)의 경도 및 연직분포

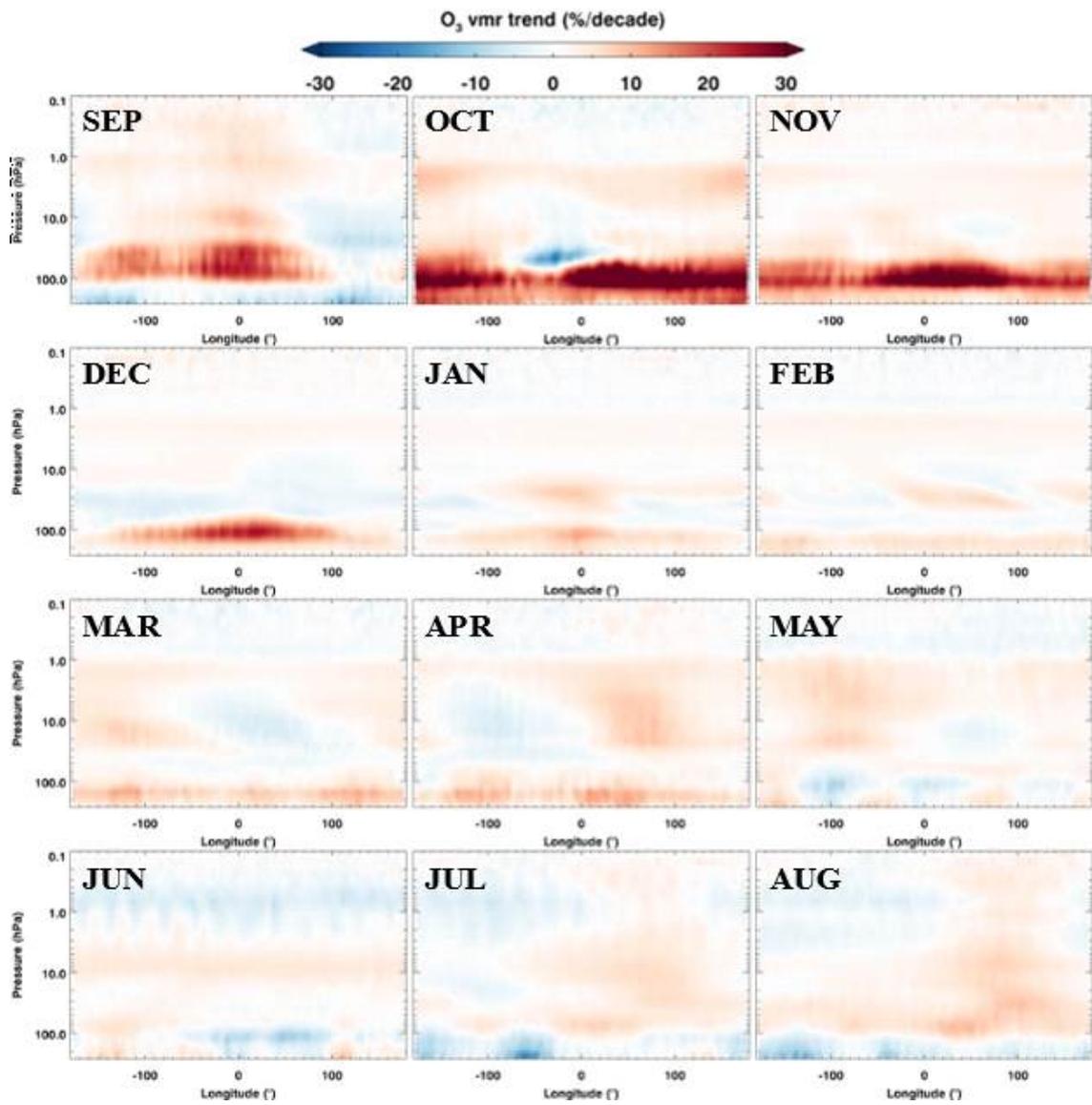


Fig. 3.2.20. 2004년 10월부터 2021년 12월, 남위 54-90도 지역에 대한, MLS 센서로 관측된 오존 용적 혼합비의 연간 변동량 백분율

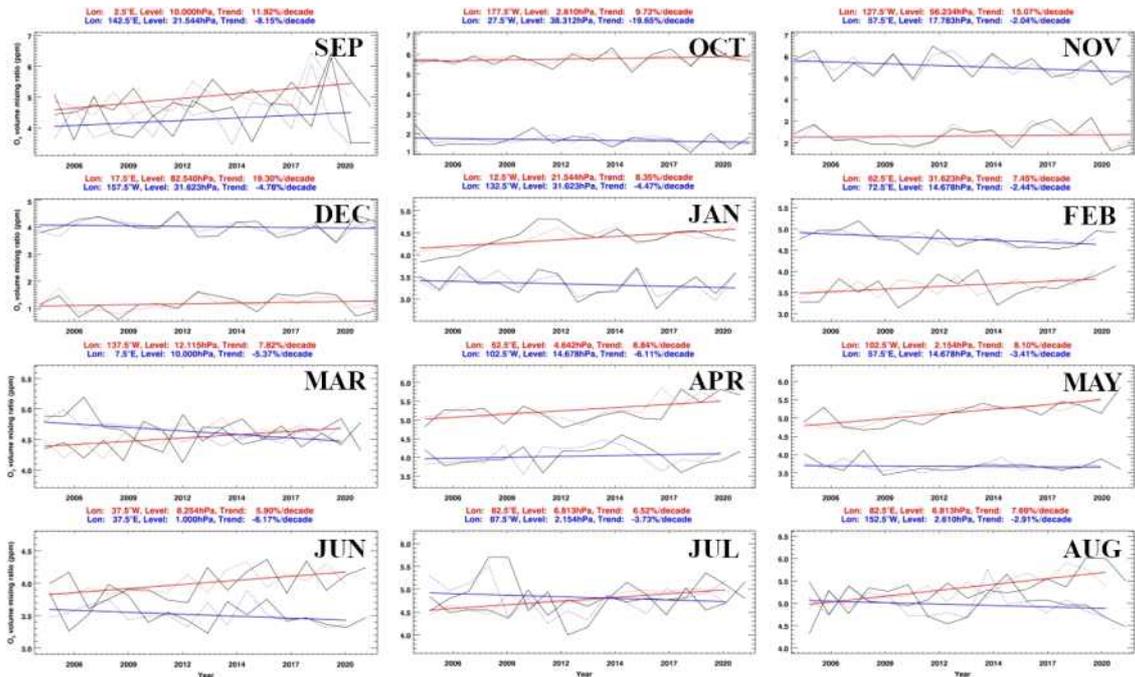


Fig. 3.2.21. ENSO와 QBO가 제거된 오존 용적 혼합비(VMR, Volume Mixing Ratio) (ppm) 변동 중 월별 가장 큰 증가(빨간색) 및 감소(파란색)가 나타난 지역과 고도에 대한 그래프. 전체 기간에 대한 오존 용적 혼합비(VMR, Volume Mixing Ratio) (ppm) 변동 경향은 각 색상의 실선, 월평균 VMR은 검은색 실선, QBO, ENSO, 기온 등의 proxy를 이용해 보정된 VMR은 각 색상의 점선으로 나타남. 그림 3.2.15와 동일한 기간 및 지역임.

- Fig. 3.2.22은 오존 농도와 기온의 상관계수를 나타낸 그래프이다. 상관계수가 1에 가까울수록 두 변수의 증감 경향이 비례, -1에 가까울수록 반비례 관계임을 의미한다. 모든 월에 대해, 10hPa 이하의 고도에서는 양의 상관관계가 나타나고 그 이상에서는 상관계수가 0의 값을 보이다가 급격히 음의 상관관계로 전환된다. 오존 농도가 가장 높은 고도인 10-1hPa 이상에서 기온에 따른 오존 농도의 상관관계가 전이되는 점, 그리고 해당 고도에서는 양의 상관관계가 나타나는 점은 기온과 오존 농도의 연간 변화 분석에서 주의가 필요하다.

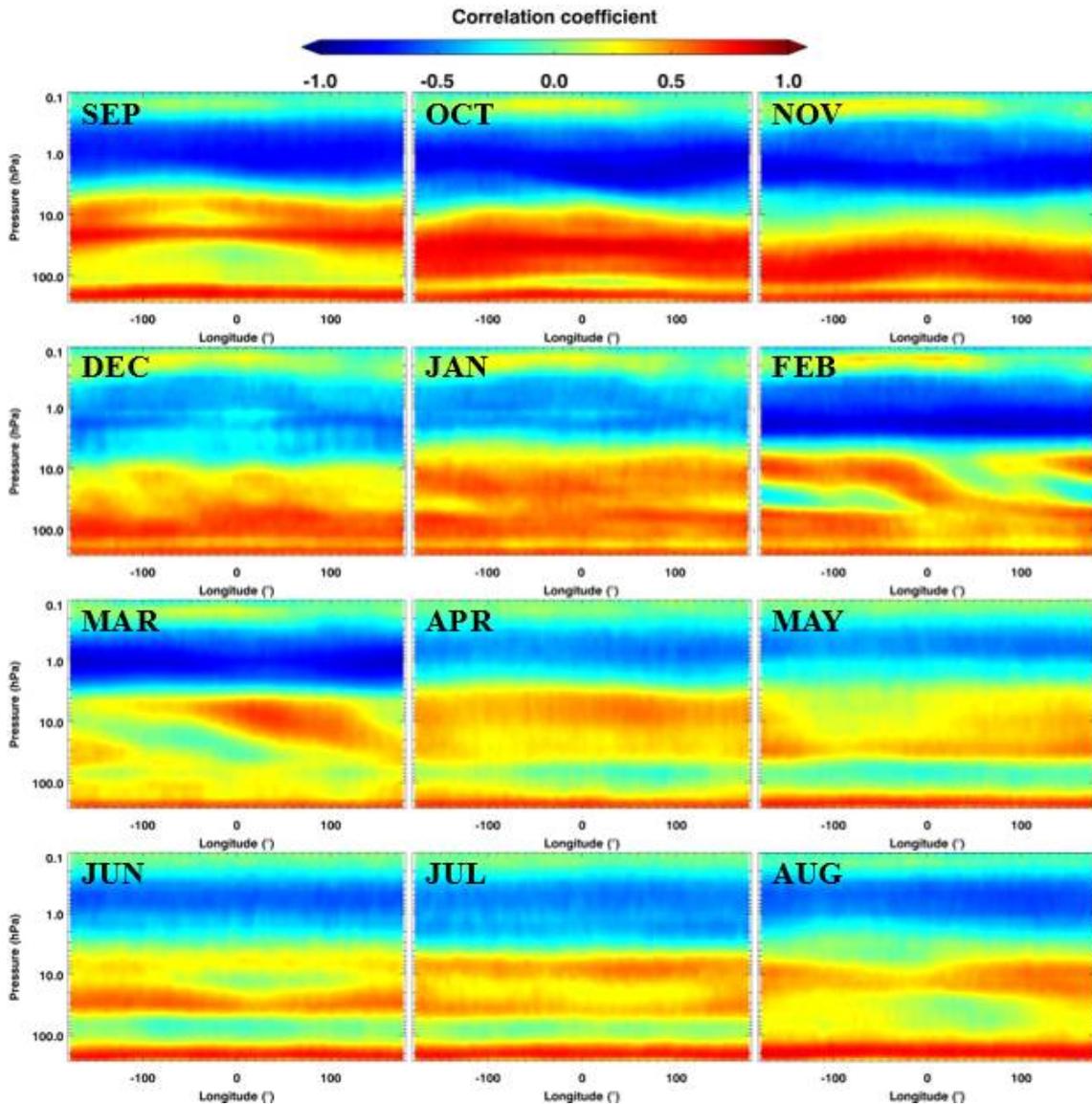


Fig. 3.2.22. 2004년 10월부터 2021년 12월, 남위 54-90도 지역에 대한, MLS로 관측된 오존 용적 혼합비 (VMR)과 기온의 월 평균 Pearson 상관계수 분포

○ Fig. 3.2.23은 기온의 월평균 분포를 경도, 고도에 따라 나타냈고, 기온과 오존 용적 혼합비의 상관계수를 함께 분석하였다(Fig. 3.2.24). 9월에서 11월 사이 10hPa 인근의 고도는 오존량이 높고, 일부 오존층 파괴가 일어났던 지역에 대해 회복에 의한 오존량 상승이 나타나는 구역이다. 또한, 극야가 끝난 후 전체적으로 대기가 가열되기 때문에 해당 고도 기온의 상승이 나타날 것으로 예상된다. 이에 따라, 오존량의 증가와 기온의 증가가 9월에는 동시에 일어나는 현상이라고 볼 수 있다. 9월 한 달, 100hPa에서 26hPa 사이의 고도에 대해 관측 지점마다의 기온-오존농도 상관계수 산포도를 Fig. 3.2.24에 나타냈다. 주로 오존 농도가 높은 지역에서는 기온과

오존농도가 0.5 이상의 상관계수를 가지지만, 오존농도가 낮은 지역에서는 0-0.3 사이의 상관계수를 보였다. 각 지역은 기온이 180-220K, 190-220K 구간에서 나타났으며, 상관계수가 낮은 지역이 조금 높은 기온을 가지는 것으로 보인다. 양의 상관계수가 나타나는 고도는 9월에서 11월로 갈수록 점점 하강하는 모습을 보인다. 11월에 오존층이 완전히 회복된다는 점을 고려하면, 오존 농도와 기온의 상관계수가 0.3 정도의 값을 나타내는 것은 오존량은 상승하되 기온이 급격히 상승하지는 않는 시기이기 때문에 감소한 상관계수라고 볼 수 있다. 나머지 월에서, 2월에서 4월 이후로 갈수록 남극 대기 기온은 하강하고, 10hPa 인근의 고농도 오존이 나타나는 구간에서 여전히 기온과의 상관계수가 나타난 점은 앞서 살펴본 월평균 오존량 감소에 의해 설명되는 부분이기도 하다.

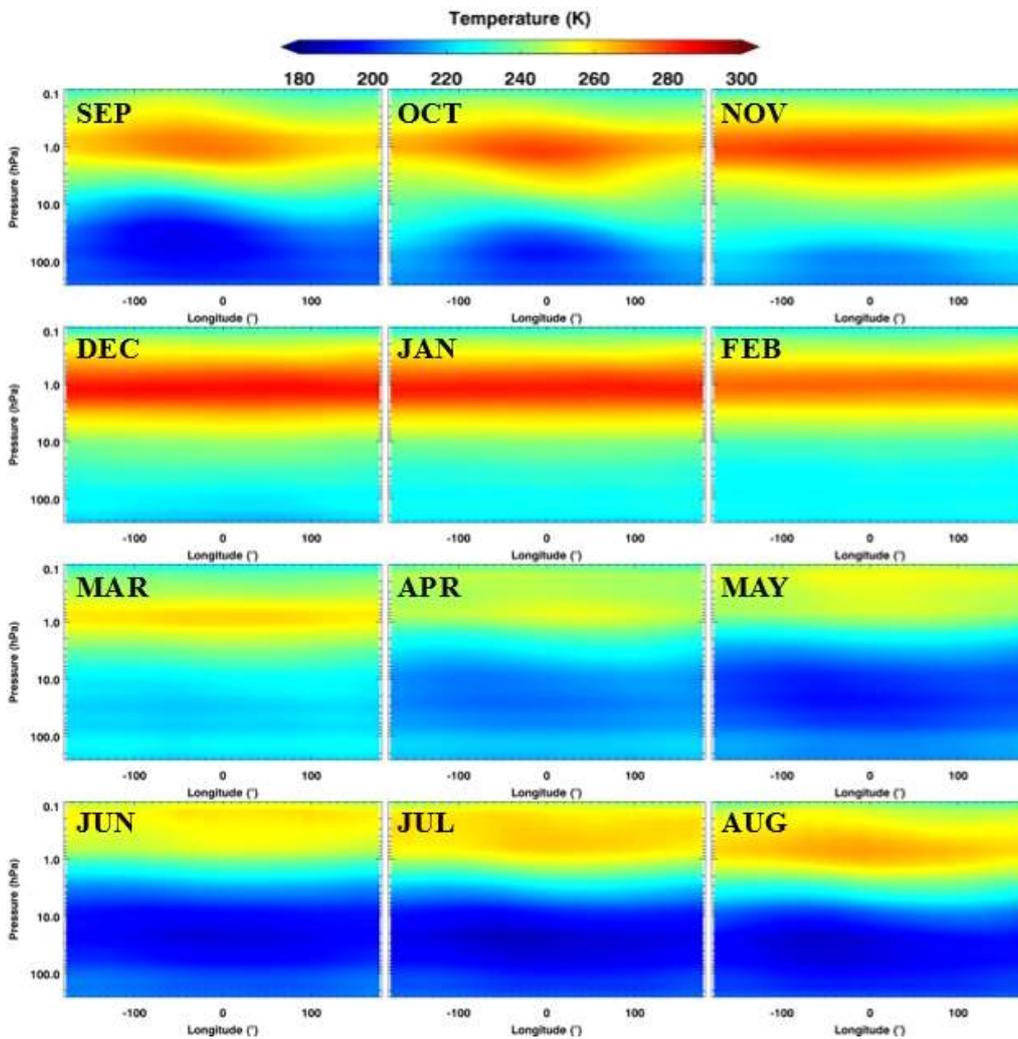


Fig. 3.2.23. 2004년 10월부터 2021년 12월, 남위 54-90도 지역에 대한, MLS 센서를 이용한 월 평균 기온

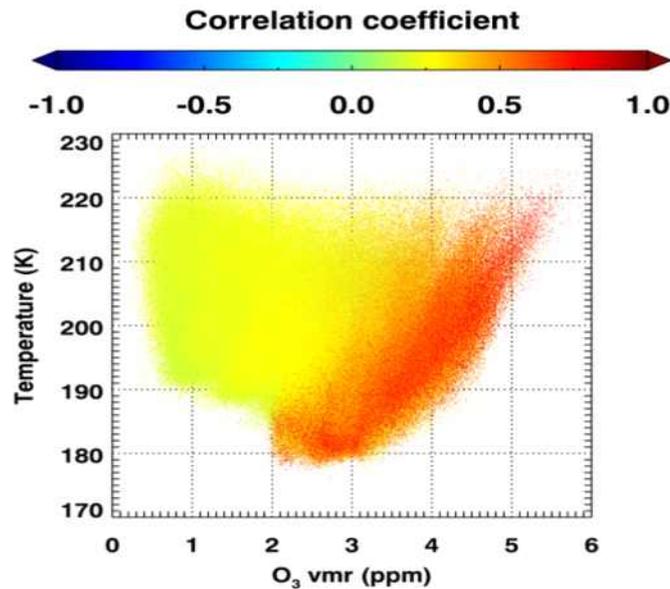


Fig. 3.2.24. 관측기간 중 9월 100-26hPa 고도에서 관측된 오존 용적 혼합비와 기온의 Pearson 상관계수

다) 오존층 파괴 빈도와 평균 오존량과의 관련성 비교

- 남극 대륙 전체를 다루는 자료는 위성과 재분석장 자료가 있다. 위성 기반의 오존 전량 관측 자료는 TOMS-EP(Total Ozone Mapping Spectrometer-Earth Probe)와 Aura 위성의 OMI(Ozone Monitoring Instrument) 센서에서 생산된 자료를 이용했다. TOMS는 1979년 1월부터 2004년 9월, OMI는 2004년 10월부터 2018년 12월 기간에 대해 자료를 제공한다. 위성 기반의 연직 오존 분포 자료는 MLS(Microwave Limb Sounding)을 이용해 1979년부터 2018년까지 생산된 자료를 이용하였다. 위성 자료는 원격 탐사로 관측된 오존 농도, 기온 등의 정보를 제공한다. Fig. 3.2.25는 2014-2019년 동안 9월에서 11월의 오존 전량(OMI 센서)와 오존 농도 프로파일(MLS)을 보여준다. 남극 지역 오존층의 파괴와 회복은 주기적으로 반복되는 모습을 보이며, 극 지역의 대규모 대기 순환과 기후 변동은 성층권 오존 농도에 영향을 주는 요인으로, 장기간 관측 결과에 대해 분석해야 하는 대상이다. 남극대륙에 해당하는 공간 규모는 남위 90도부터 60도까지 이르는 넓은 지역이다. 지상 기반 관측 자료는 신뢰도 측면에서 이점이 있지만, 오존층 파괴 현상을 설명하기에는 연구 대상 시공간 전체를 다루지 않아 다른 자료와의 비교 및 교차 연구가 필요하다.

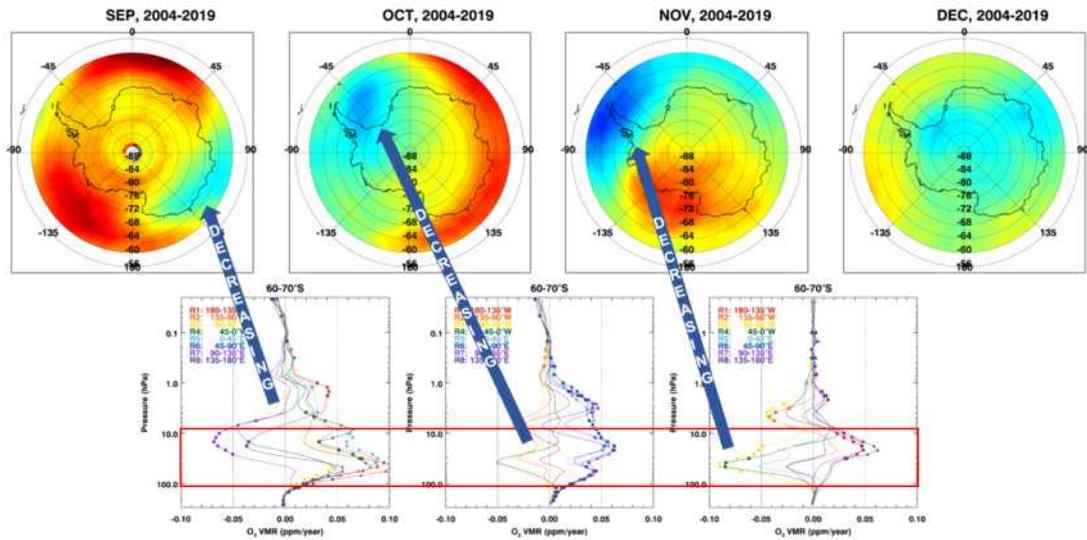


Fig. 3.2.25. 2014-2019년 9월-12월 남극지역 월평균 오존량(위, OMI 관측)과 감소가 많이 나타난 지역의 오존 용적 혼합비 연직 분포(아래, MLS 관측)

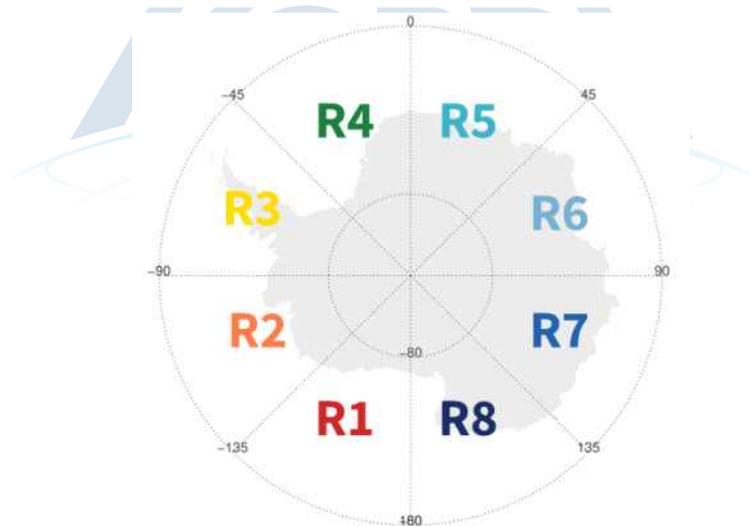


Fig. 3.2.26. 60-90°S에 대한 경도 45° 마다 설정된 남극 권역

- 극 순환은 고위도 지역 상공에서 대규모 대기 순환의 일부로써 나타나는 현상이다. 극 순환은 상당위도 65도 이상 지역에서 250-950K 사이에 해당하는 지역에 대해 발생하는 것으로 정의된다(Kuttippurath and Nair., 2017). 상당위도(Equivalent Latitude)는 2차원 지표상에 주어진 대기장에 대해 등고선을 그려 나타낸 라그랑지안 좌표계의 위도이다(Añel et al., 2013). 우선, 1979년부터 2018년까지 수행된 위성관측 자료를 경도 45°의 8권역(Fig. 3.2.26)에 대해 10° 단위의 위도에 따라 분류하고,

오존 전량의 월 평균값을 Fig. 3.2.27에 나타냈다. 그래프는 위에서부터 차례대로 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도의 결과이다. 70-80°S, 80-90°S 지역은 각각 4-8월, 2-9월에 극야 현상으로 인해 위성 관측이 수행되지 않았다. 오존 전량은 1월부터 7월까지의 권역에 상관없이 유사한 증감의 폭을 보인다. 해당 기간에 극야의 영향 없이 관측이 수행된 60-70°S 지역의 그래프를 보면, 각 권역의 오존 전량은 약 30DU 정도 이내의 차이를 보이지만 변화의 경향은 유지된다. 8월부터는 오존량이 급격히 변화하는 모습을 확인할 수 있다. 고위도 지역일수록 오존 전량이 큰 폭 감소한 것으로 나타나고, 80-90°S 지역은 150-200DU, 70-80°S 지역은 200-250DU 사이의 값을 가진다. 이는 1월경에 오존 전량이 300DU 근처의 값을 보이던 것과 비교하면 상당량 감소한 결과이다. 80-90°S 지역은 오존층 파괴가 진행되는 9-10월 기간 동안 모든 권역이 동일한 변화 패턴으로 감소하였다. 60-70°S 지역의 경우 권역에 따라 오존량이 감소하기도 했지만 반면에 소폭 증가한 곳도 있었다. R2-R5 권역은 최저 250DU에 가까운 값으로 감소하였다. 이후, 10월에는 R2, R3 권역은 증가, R4, R5 권역은 변동이 없는 것으로 나타났다. R1, R7, R8 권역은 10월에 330-350DU 사이의 값을 보이며 연 변동 중 최대의 오존량을 기록했다. 이후 11월에는 60-70°S, 70-80°S 지역에서 모든 권역이 300DU 근처의 값을 향하고, 12월에 이르러서는 다시 권역간 차이가 작고 변화의 패턴이 비슷한 상태가 된다.

- 앞에서는 위, 경도별 오존 전량의 증감 차이를 살펴보았다. Fig. 3.2.28에서 Fig. 3.2.31는 오존량 변화가 기온과 잠재와도와의 관계를 알아보기 위해 연직 자료를 이용한 결과를 나타냈다. 연직 자료를 이용한 분석은 각 요인에 대한 반응이 큰 고도를 알아낼 수 있다는 장점이 있다. Fig. 3.2.28와 Fig. 3.2.29은 각각 오존 전량과 기온, 오존 전량과 잠재와도의 상관계수를 기압고도에 따라 보여준다. 그림에서 왼쪽은 9월, 오른쪽은 10월에 관한 결과이다. 기온과의 상관성은 주로 지표에서 양의 상관계수, 10hPa 이상의 고도에서 음의 상관계수로 나타났다. 기온과 오존 전량의 상관성은 9월과 10월 모두 약 100hPa 인근에서 최대로 나타났다. 상관계수의 최대값은 9월 70-80°S 과 80-90°S 에서는 권역에 따라 그 값이 달랐지만, 나머지 경우에는 권역 간 차이가 크지 않았다. 한편, 10월의 결과는 9월과 달리 상층으로 갈수록 상관계수가 감소만 하는 것이 아니라, 3hPa 이상 고도에서는 소폭 상승하거나 유지되는 것으로 나타났다. 이 중 10월 70-80°S의 결과는 상공에서 권역별로 기온에 대한 상관계수의 차이가 크게 나타나 유의미한 분석 대상으로 보였다. Fig. 3.2.29에

나타낸 오존 전량과 잠재와도의 상관관계는 350K 등온위면 이후로는 양의 상관성을 보였다. 오존층 파괴의 영향을 많이 받는 9월 70-80°S, 80-90°S 에서의 결과는 권역별로 오존 전량과 잠재와도와의 상관계수의 차이가 약 0.3 정도로 큰 편이었다. 그러나 10월에 들어서는 권역에 상관없이 대부분 잠재와도와의 상관계수가 비슷한 양을 보였고, 500K 등온위면 이상에서는 0.8의 높은 양의 상관성을 유지하는 경향이 있다.

- 한편, Fig. 3.2.30과 Fig. 3.2.31는 각각 해당 기압고도 오존농도와 기온, 해당 등온위면 오존농도와 잠재와도의 상관관계를 나타낸 그림이다. 오존 전량에 비해 각 고도에서의 반응이 뚜렷하게 나타나기 때문에, 위도와 권역, 고도에 따른 특징을 더 자세히 알아볼 수 있었다. 같은 고도의 오존농도와 기온, 잠재와도의 상관관계는 각각 10hPa 그리고 600K 이상의 고도에서 오존 전량과의 분석과 비슷한 경향을 나타내었다. 기온은 70-80°S, 80-90°S 위도에서 오존 전량에서와는 다르게 하층에서 각 고도 오존농도에 대해 음의 상관계수를 보였다. 이는 상층의 오존량이 오존 전량의 대부분을 차지한다는 사실을 고려하면 유의미한 비교이다. 또한, 오존층 파괴가 큰 지역에서 이러한 차이가 발생했다는 점에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

극지연구소

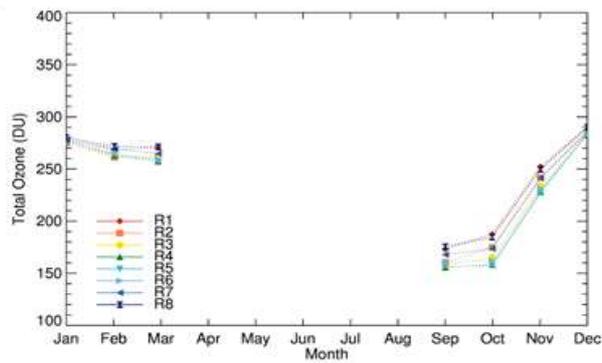
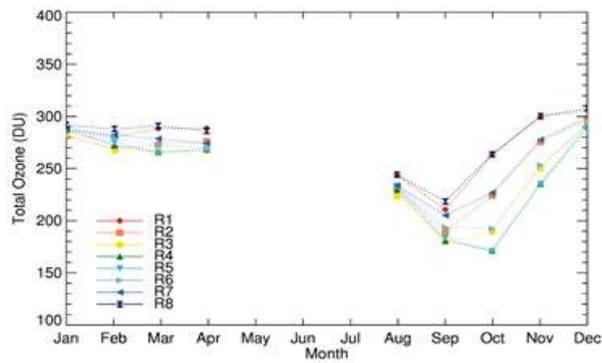
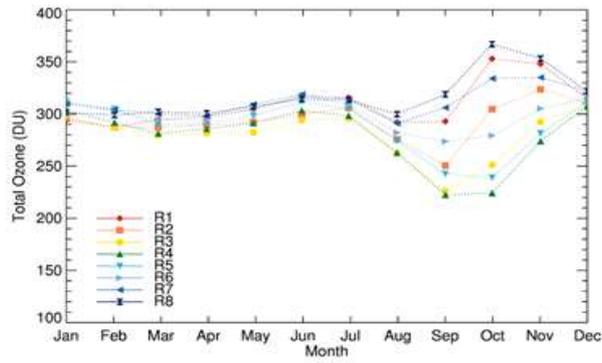


Fig. 3.2.27. 1979년부터 2018년까지 TOMS, OMI 위성으로 관측된 월평균 오존전량(DU). 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

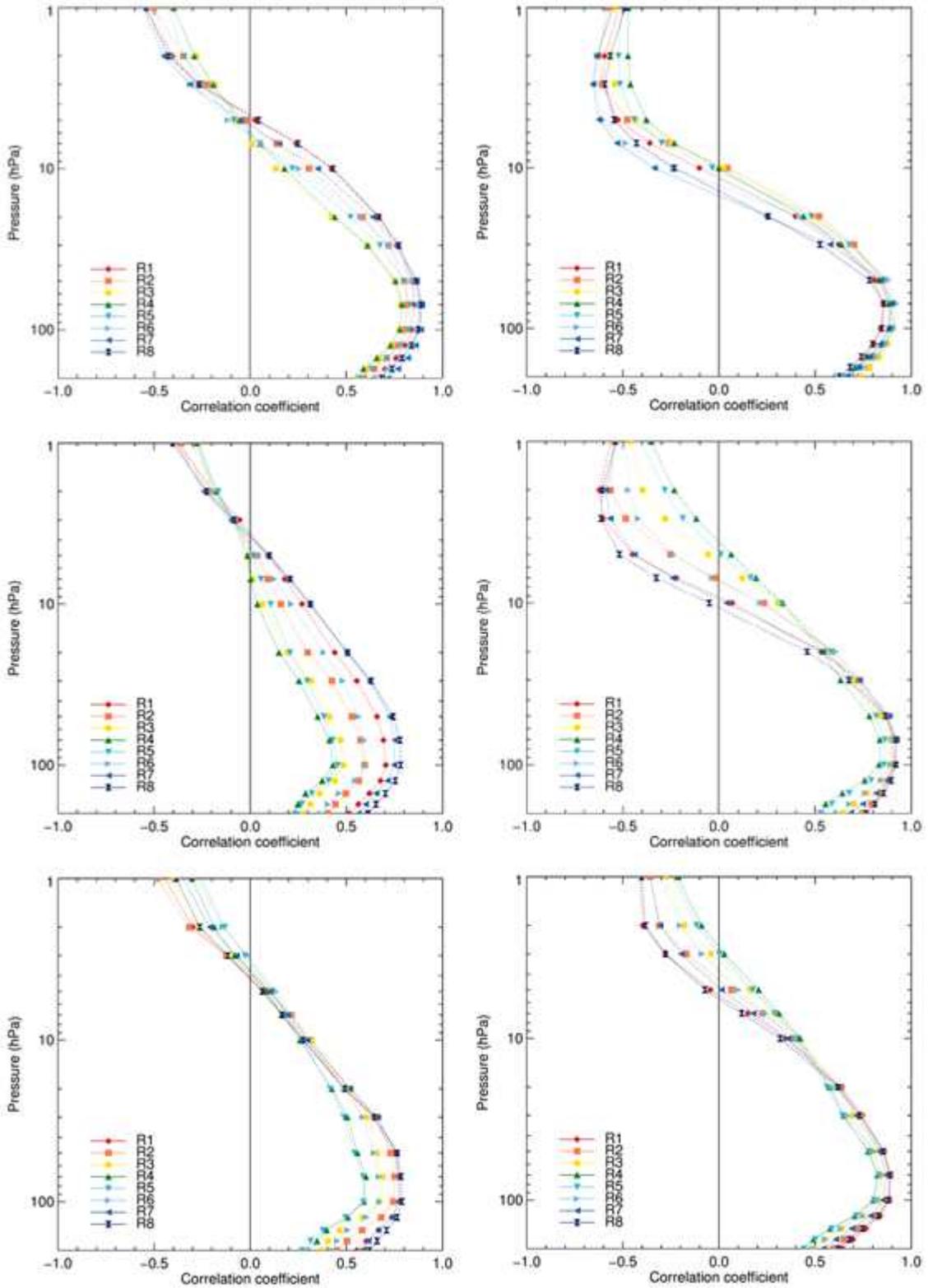


Fig. 3.2.28. 1979년부터 2018년까지 월평균 9월(왼쪽)과 10월(오른쪽) 오존 전량과 각 고도 기온의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

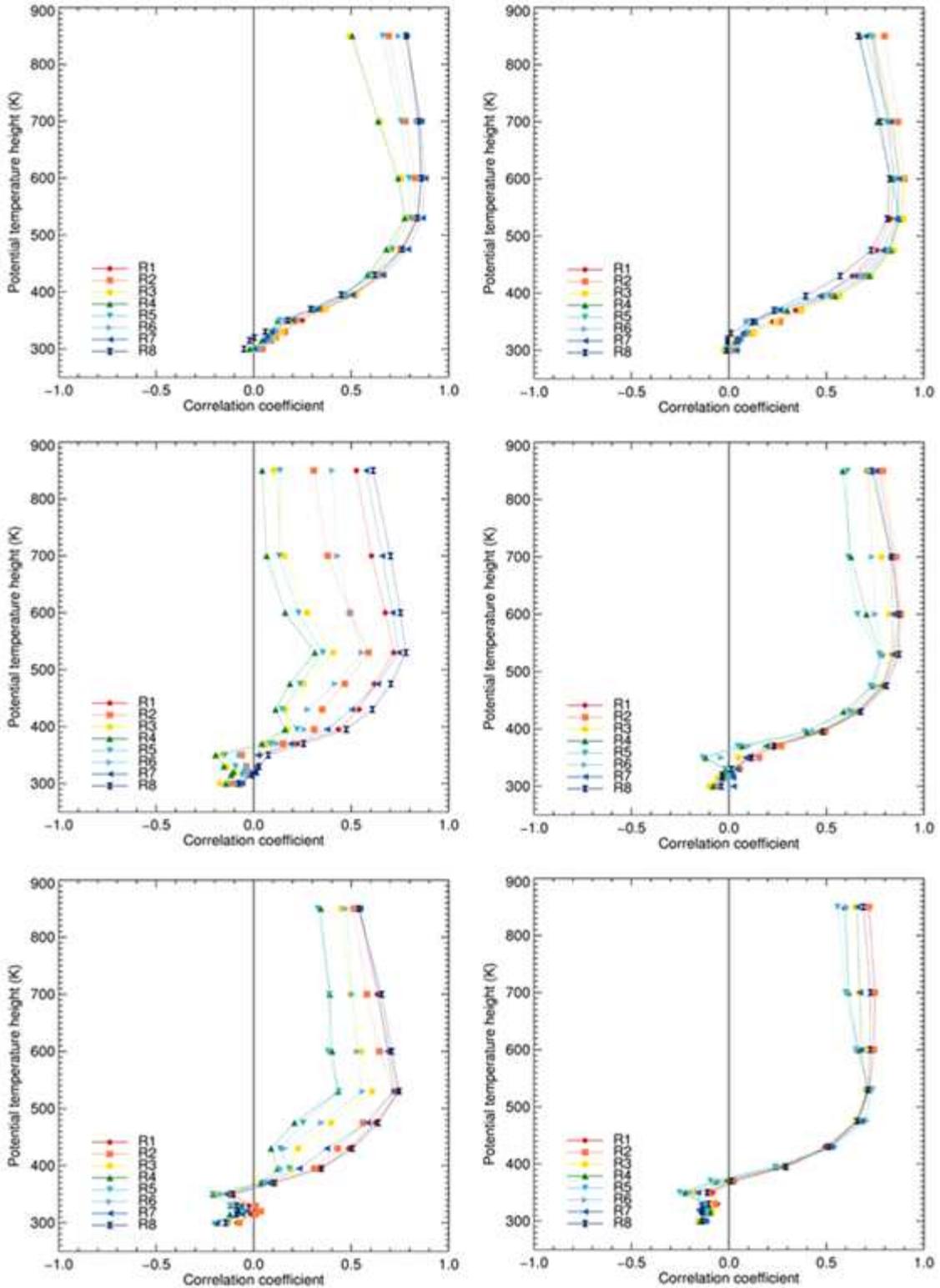


Fig. 3.2.29. 1979년부터 2018년까지 월평균 9월(왼쪽)과 10월(오른쪽) 오존 전량과 각 고도 잠재와도의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

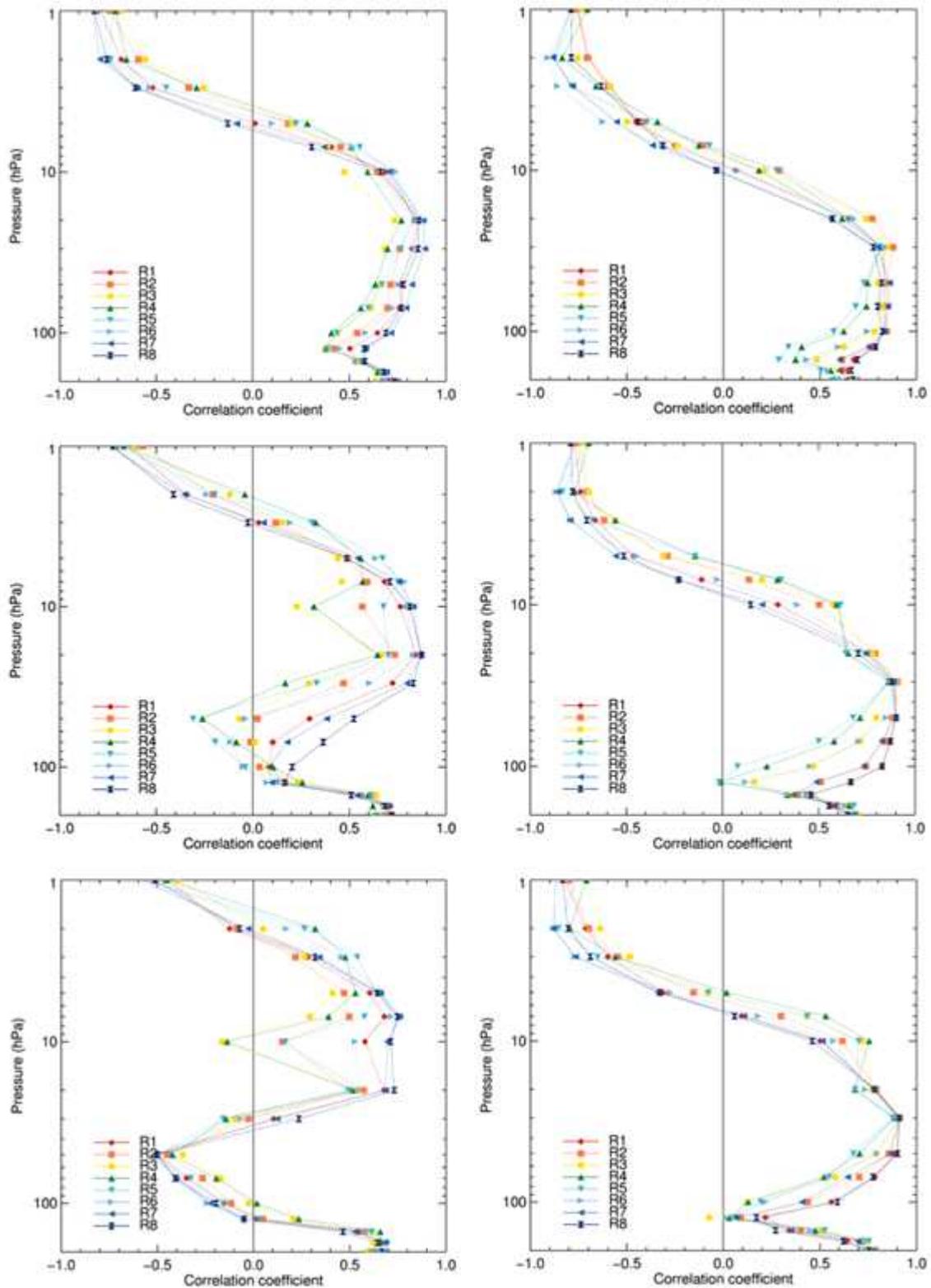


Fig. 3.2.30. 1979년부터 2018년까지 월평균 9월(왼쪽)과 10월(오른쪽) 각 고도의 오존 혼합비와 기온의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

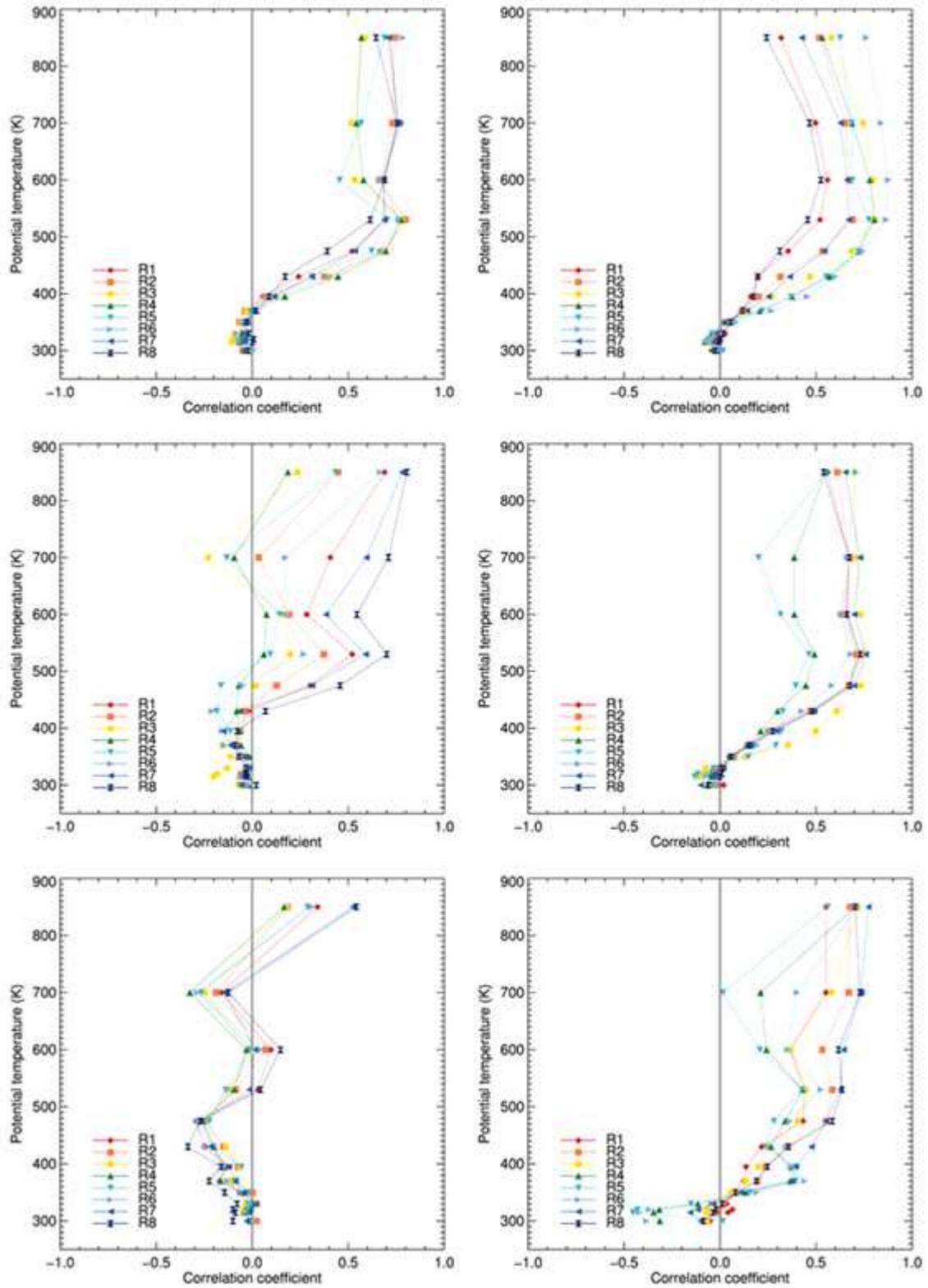


Fig. 3.2.31. 1979년부터 2018년까지 월평균 9월(왼쪽)과 10월(오른쪽) 각 고도의 오존 혼합비와 잠재와도의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당

2) 남극기지기반 성층권 오존농도 변동의 수평, 수직 방향 차이에 대한 원인 규명

1. 성층권 고도별 오존량의 변동특징의 일관성 및 차이점 분석

- 오존은 연직 방향으로 특징적인 분포를 보이고, 연직 전량 중 90%가 성층권에 존재한다. 6-8ppm 사이의 높은 농도를 보이는 성층권 오존은 생성 및 소멸과정에서 태양 복사 중 생명체에 유해한 자외선A(320-400nm), 자외선B(280-320nm)를 흡수한다. 오존은 연간 태양 입사량이 높은 저위도 성층권에서 주로 생성되지만 브루어-돕슨(Brewer-Dobson) 순환에 의해 고위도로 수송되어 중위도 지역에서 높은 값을 보인다. 즉 성층권 오존량 변화는 기후와 연관을 가지므로 지속적인 추적이 필요하다. 대류권 오존은 생명체에 산화제로 작용하며, 인간 활동이 있는 지역에서 배기가스에 포함된 질소산화물(NOx), 휘발성 유기화합물(VOC)을 촉매로 하는 광화학 반응으로 생성되어 감시 대상으로 지정되어있다. 한편, 남극과 같은 고위도 지역은 대류권에서의 생성보다는 성층권에서 자외선에 의한 생성 및 소멸, 그리고 수송에 의한 양 변화가 주를 이루므로 중위도 지역과 다른 관점에서 연구가 필요하다.

가) 지상 관측 환경

- 세종기지와 장보고기지에서의 지역에 따른 오존 농도의 차이는 뚜렷하였다(Fig. 3.2.8과 3.2.9). 각 기지에서의 관측 신뢰도가 충분히 확보되었을 때, 지역별로 오존 전량의 차이가 나타나는 원인은 오존의 생성 및 소멸과 수송에 의한 영향이 있다. 그 과정에서 지역에 따른 일사, 일조량 차이, 대기 조성 물질과 오존 생성 과정에 관련된 물질, 기상 및 기후의 역할을 고려해볼 수 있다. 남극반도 주변의 Weddell해 인근에서의 오존 전량은 바람장의 영향을 받는다고 연구된 바가 있다(Koo et al., 2018). 지상 기상환경이 관측에 미치는 영향을 파악하기 위해 세종기지와 장보고기지에서 관측된 운량과 풍향, 풍속 등을 오존 전량 변화와 연관 지어 분석하였다. 운량의 경우 전천(Total Sky)에 대해 구름이 뒤덮은 정도(Fraction)를 단위로 나타냈으며, 풍향 및 풍속은 월별로 일 평균값과 일 최대값에 대해 나타냈다.
- 운량의 경우 연간 변동보다는 개별 사례에 대한 정보가 필요하다. 운량이 0이면 하늘에 구름이 없고, 운량이 8이면 하늘 전체를 구름이 뒤덮었음을 의미한다. 각 기지에 대해 비교하면, 장보고기지는 운량이 적은 사례가 많은 반면 세종기지는 운량이 0이었던 경우가 없었고 운량이 8로 전천을 덮은 날이 장보고 기지에 비해

월등히 많았다(Fig. 3.2.32). 이 결과는 2018년 한 해의 사례이지만 다른 해도 유사하다. 운량은 브루어 기기의 직달 일사 관측에 영향을 주는 요인이지만, 앞서 기기별 편차 분석 시 브루어 관측 방법에 따른 차이는 크지 않았기 때문에 현재 보유한 운량 관측 결과로는 오존량의 변화를 분석하기 충분하지 않다. 다년간의 자료에 의하면, 바람의 경우 세종기지는 대부분 남풍보다는 북풍 계열이 많았다. 반면에, 장보고 기지의 월평균 풍속 및 풍향은 세종기지에 비해 풍향은 한쪽으로 덜 치우친 결과를 보였으나 풍속은 낮았다. 세종기지와 장보고기지의 월별 일 최대 풍속 및 풍향은 살펴보면, 세종기지는 최대 풍속이 장보고 기지에 비해 사방에 분포한 풍향을 보였고, 장보고기지는 대체로 서풍 계열에서 최대 풍속이 나타났다. 최대 풍속은 세종기지가 장보고기지보다 높았다. 지상 관측 자료는 세종기지와 장보고기지의 오존 전량 차이를 분석하기에는 관측된 시기의 차이와 변수 종류의 한정으로 인해 부족하다. 지상관측은 남극과 같은 극한 환경에서 꾸준히 수행되기 어렵지만, 신뢰도가 높다는 장점이 있다. 한편, 오존 전량은 대류권보다는 성층권에서의 양의 변화가 더 유의미한 영향을 미치며, 이에 따른 분석을 수행하려면 적어도 연직 방향으로의 2차원 정보가 필요하다. 재분석장과 같은 3차원 자료는 남극 지역에서 수집되는 실측 자료의 공간 분포가 넓기 때문에, 개별 사례보다는 경년 변동에 대한 분석이 필요해 보인다.

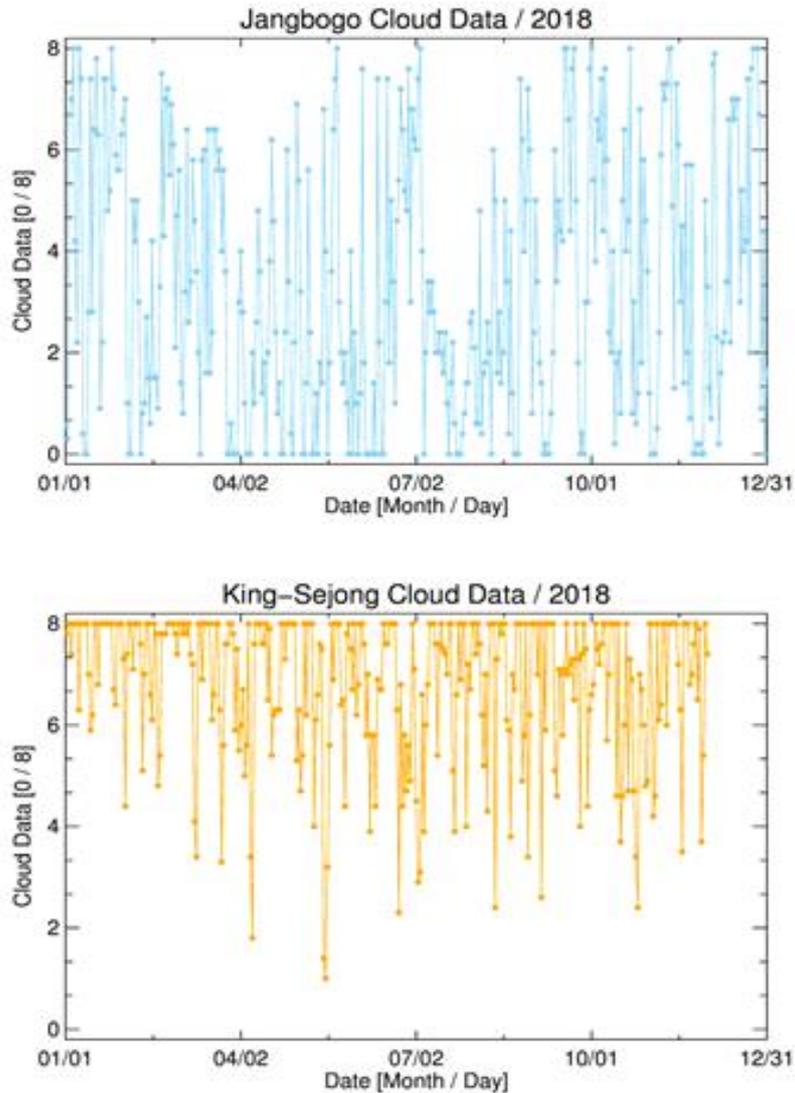


Fig. 3.2.32. 2018년 장보고기지(위)와 세종기지(아래)의 운량의 연변화

나) 연직분포자료 사례 연구

○ 지상 관측 자료를 이용한 오존량 변동의 분석에 어려움이 있기 때문에, 장보고기지에서 수행한 오존 준데 관측 자료를 MERRA-2 (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2) 재분석장의 잠재와도, 비습, 오존 질량혼합비, 기온 자료와 함께 비교 및 분석하였다. 2015년 10월 4일 (Fig. 3.2.33), 2016년 10월 24일과 2018년 9월 27일 (Fig. 3.2.34)에 대해 분석하였으며, 이는 모두 남극의 봄철 관측에 해당한다. 2015년 10월 4일 사례는 12km 고도 인근에서 해당 날짜의 준데 관측 오존 혼합비가 약 300ppb로, 월 평균값으로 나타난 200ppb보다 높게 나타난다. 전체적인 오존 연직 분포는 월 평균값과

유사하게 15km 고도 인근에서 40ppb까지 감소했다가 고도에 따라 다시 증가하는 모습을 보인다. 동일한 날짜와 관측시간에 해당하는 재분석장 자료를 살펴보면, 고위도에서 저위도 방향으로 400hPa 고도 인근에서 오존 농도는 높아지고 비습은 낮아지는 경사면에 위치함을 확인할 수 있다. 잠재와도는 200hPa 고도 부근에서 경사를 보이고, 장보고기지의 지상 기온은 약 237K로 고위도 지역보다 낮지만, 전체 대기의 기온 분포가 위도에 따라 큰 변화가 없는 모습을 보인다. 잠재와도는 대기의 흐름에 역학적으로 영향을 주는 요소로써, 해당 사례에서는 위도에 따른 잠재와도 차이가 크지 않기 때문에 공기과 수송에 의한 영향이 적다고 볼 수 있다. 한편, 비습과 오존 농도의 분포가 위도에 따라 가파른 경사를 보이므로, 두 변수가 가지는 관계에 대해 조사하면 12km 고도에서 나타나는 높은 오존량의 원인을 파악할 수 있을 것으로 추정된다.

- Fig. 3.2.34는 2016년 10월 24일과 2018년 9월 27일 사례로 모두 10km 이상 고도에서 월평균 값보다 해당 사례의 오존량이 낮게 나타나는 모습을 보인다. 2016년 사례의 재분석장 오존 질량 혼합비는 지상에서부터 600hPa 인근 고도까지 낮은 값을 보이며, 고농도의 상층 오존이 고위도에서 저위도 방향으로 하강하며 유입되는 모습을 600hPa - 400hPa 사이 고도에 나타내고 있다. 비습의 분포는 2015년 사례와 마찬가지로 오존 농도와는 반대의 경향을 보이며, 오존 농도보다는 지상에 이르는 고도까지 다다른 영향을 주고 있다. 기온 분포는 지상에서는 위도에 따라 낮아지며, 장보고 기지의 위도에서는 500hPa - 300hPa 사이에서 약한 경사의 기온 차이가 확인되었다. 잠재 와도는 남위 75도에서 상층의 공기가 하강하는 형태를 보이며, 장보고 기지의 위도에서 저위도를 향해, 지상에서 0에 가까운 잠재와도 값이 확인된다. 2016년 사례는 즉 상층에서 하층으로의 공기 유입이 발생했다고 볼 수 있으며, 특히 봄철임을 고려했을 때 오존층 파괴가 일어난 상태에서 상층과 하층의 물질 교환이 일어났기에 평균값보다 낮은 오존농도지만 고도에 따른 균질한 농도변화가 나타나지는 않았다고 생각할 수 있다. 한편, 2018년 사례는 존데 관측 자료에서 월평균 값보다 13km 고도 이상에서 오존농도가 낮게 나타나는 결과를 보여준다. 오존 농도가 13km 고도에서는 350ppb 값을 보였다가, 15km까지 100ppb로 감소하고 다시 고도 상승에 따라 농도가 증가한다. 13km와 15km 사이에서 나타나는 낮은 오존 농도 값은 재분석장의 오존농도 분포에서 500hPa과 300hPa 고도 사이에 나타나는 오존 농도 감소와 일치한다. 나머지 사례들과는 달리, 비습은 오존 농도의

분포와 유사한 모습을 보이지는 않는다. 이에 따라, 비습 외의 다른 요인이 원인을 추정할 수 있다. 장보고도의 경우, 장보고 기지 상공에서 300hPa 이상 고도에 대해 주변의 다른 위도 지역보다 낮은 값이 나타난다. 반면에 오존 농도는 장보고 기지의 지상에서부터 고위도 상공으로 이어지는 고농도의 결과를 보인다. 이 경사는 남극점의 400hPa 고도까지 이어지며, 비습 분포의 기울기와 비슷한 모양을 가진다. 기온의 경우 장보고 기지가 다른 위도 지역에 비해 지상 기온이 낮게 나타나며, 지상부터 600hPa 고도까지 기온의 경사가 장보고 기지를 향해 골을 형성하는 모습이 있다. 오존 농도로 공기괴의 출처를 유추한다면, 이 사례에서 나타나는 600hPa 고도 이하의 고농도 오존을 통해 상층의 공기괴가 장보고 기지 인근의 지상까지 하강한 사례로 볼 수 있다.

[Jangbogo]
2015/10/04

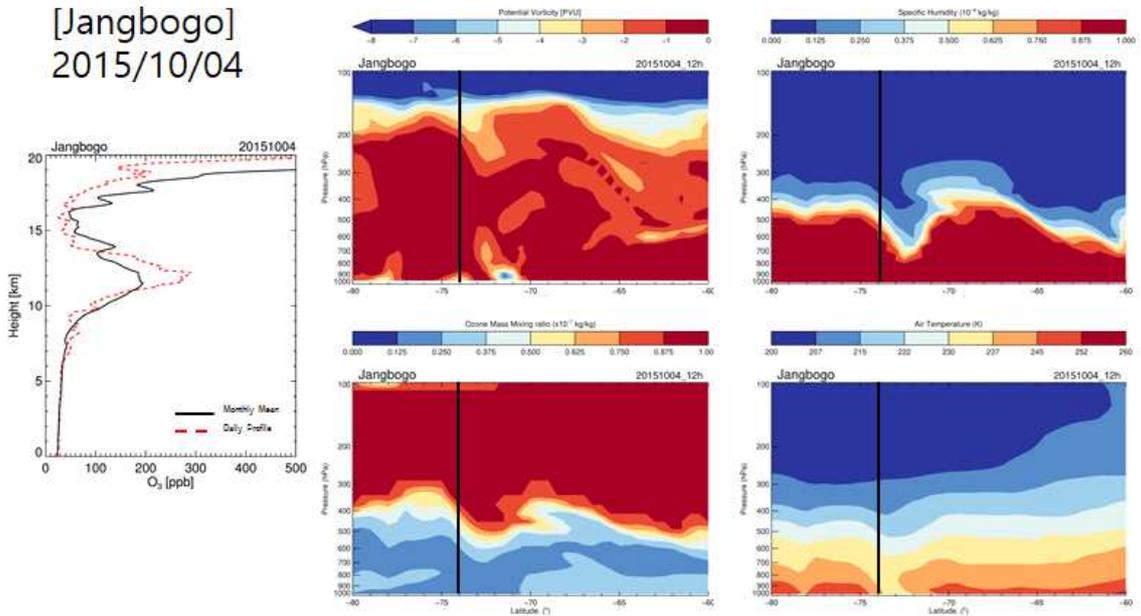


Fig. 3.2.33. 장보고기지에서의 2015년 10월 4일(빨간색 점선) 및 10월 평균(검은색 실선) 오존 연직 프로파일(왼쪽, 오존 관측 자료)과 장보고기지 경도를 중심으로 위도에 따른 잠재와도, 비습, 오존질량 혼합비, 기온 단면(오른쪽, 재분석 자료)

○ Fig. 3.2.35와 Fig. 3.2.36는 각각 2015년 9월 23일과 2018년 11월 14일의 장보고기지 오존존데 관측 결과와 동일한 일자 및 시간의 HYSPLIT 역궤적 모델 결과이다. HYSPLIT 역궤적 모델은 GDAS(Global Data Assimilation System) 자료의 기상 정보를 이용해, 선택 지점의 고도에서부터 지난 수일 동안 공기괴의 이동 경로를 연산한다. 장보고기지 상공 500m, 1000m, 5000m, 8000m 고도에 대해 15일(360시간) 이전까지 공기괴 궤적이 나타나 있으며, 이는 오존의 수송과 연관지어 생각할 수 있는 자료이다. 2015년 9월 23일 사례는 13km 아래에서는 월 평균값보다 40ppb 정도가 높은 오존농도가 나타나지만, 12km 고도에 340ppb의 peak를 기록하고 15km 고도까지 150ppb로 오존농도가 감소하는 모습을 보였다. 같은 날 8km 고도에 위치하는 공기괴 역궤적은 남극대륙의 동쪽으로 치우쳐 시계 방향으로 2회 순환하고 도착한 것으로 나타난다. 5000m 고도의 공기괴는 수평 이동의 범위가 남극 대륙 내부에 해당하며 가장 좁고, 1000m와 500m 고도의 공기괴는 남극 대륙 동쪽의 해상을 따라 이동한 모습을 보인다. 500m와 5000m 고도에 위치한 공기괴들은 15일 전과 비교했을 때 연직 이동의 범위가 넓게 나타났다. 2018년 11월 14일 사례는 월 평균 오존 연직 분포와 비슷한 결과를 보인다. 즉, 해당 연도의 11월 오존 연직 분포의 특징을 잘 설명하는 사례라고 볼 수 있다. 11km 고도에서 300ppb의 peak를 보인 후, 14km 고도까지 약한 변동과 함께 전반적으로 오존 농도가 감소하는 패턴이 나타나고, 이후 고도가 상승함에 따라 500ppb 이상으로 오존 농도가 상승한다. HYSPLIT 모델 연산 결과는, 500m 고도 공기괴의 수평 이동이 가장 작고, 나머지 고도에선 전반적으로 극 순환의 방향과 일치하는 모습의, 남극대륙을 따라 시계 방향으로 순환하는 궤적을 나타냈다. 이 중 8000m 고도의 공기괴는 해상에서 대륙쪽으로 진입하며 지상에서 8000m 이상 고도까지 큰 폭으로 연직 상승하는 모습을 보였다. 오존 농도 분포의 대표성과 역궤적 모델 결과가 전반적으로 극 순환과 일치하는 모습을 고려했을 때, 11월 장보고 지역의 오존 연직 분포는 10km - 15km 고도 구간의 오존농도 감소 및 일부 변동량이 일반적인 특징이라고 생각할 수 있다. 앞서 2019년-2021년 존데 관측 결과를 살펴본 바와 같이, 시기에 따라 오존 연직 분포의 특징이 뚜렷하게 나타나는 고도가 다르다. 오존 농도와 관련지어 HYSPLIT 모델 결과를 분석하려면, 오존 농도 변화 폭이 큰 10km 이상 고도에 대해 추가 모델 연산이 필요하다.

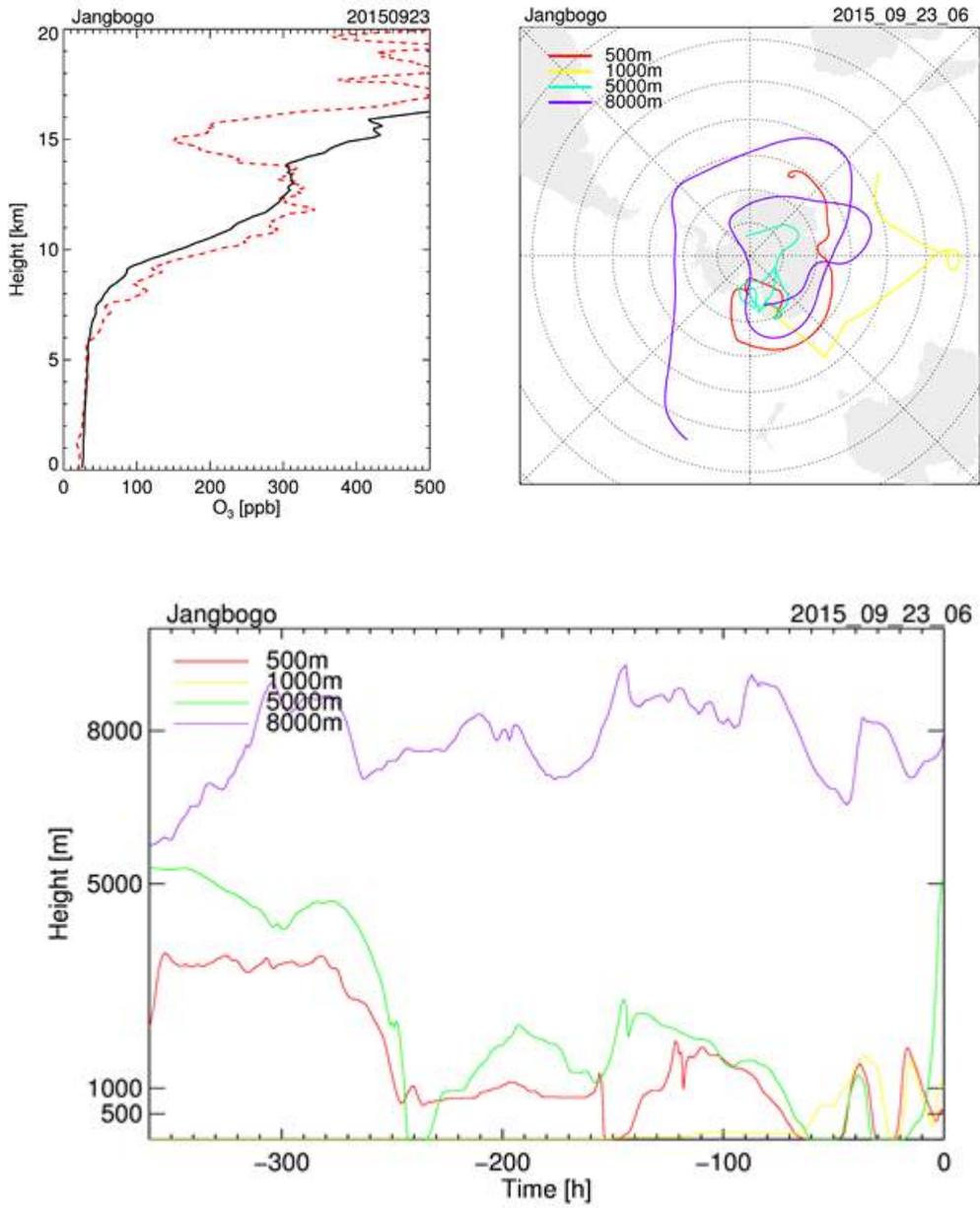


Fig. 3.2.35. 2015년 09월 23일 장보고기지의 연직 오존 프로파일(위 왼쪽)와 HYSPLIT 역궤적 모델을 사용한 고도별(500m, 1km, 5km, 8km) 15일 역궤적(위 오른쪽)과 고도 변화(아래)

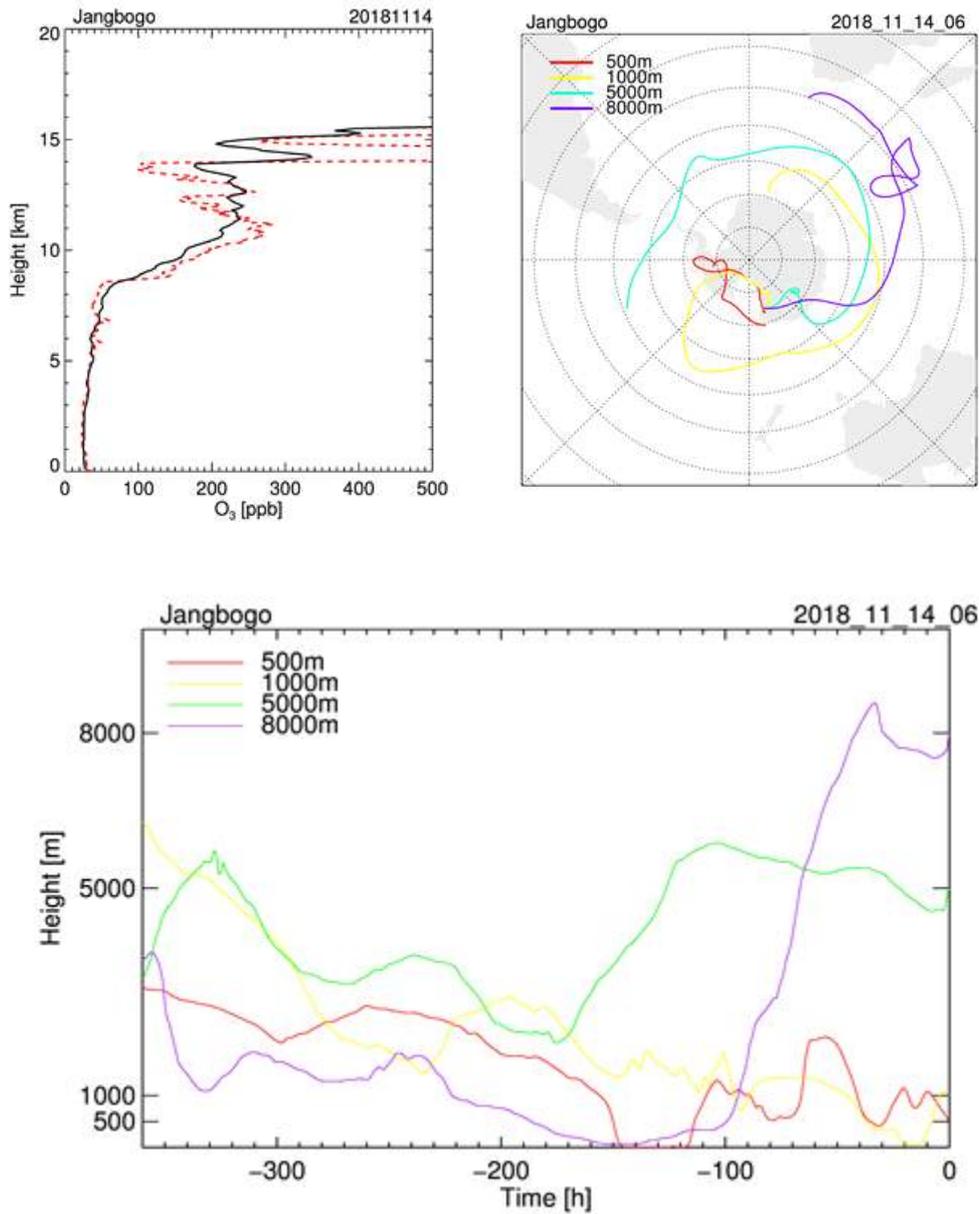


Fig. 3.2.36. Fig. 3.2.35와 동일한 그래프. 단, 2018년 11월 14일에 대한 결과

3) 남극 기지기반 성층권 오존 농도 변동과 대기 순환 관계 파악

가) 오존량과 기상변수와의 상관성 분석

- 앞선 분석에서 오존과 기온, 오존과 잠재와도의 상관관계를 통해 특히 오존홀이 강하게 발생한 지역을 찾을 수 있었다(Fig. 3.2.28-3.2.31). 동일한 방법으로, 대기 순환과 기후변화가 오존 농도에 미치는 영향을 평가하기 위해 여름까지 기간을 확대하여 분석하였다. 가을과 겨울에는 위성 관측이 이루어지지 못하기 때문에

분석에서 제외하였다. 또한, 대기 순환과의 관계를 알아보기 위해 오존과 경도 방향으로 부는 바람장의 상관관계를 남극 전지역에 대해 계산하고 분석했다. Fig. 3.2.37은 1979년부터 2018년까지, OMI 와 MLS 센서로 관측된 오존 전량을 남극대륙을 동서로 나누어 시계열을 작성한 그래프이다. 각 색상은 해당 지역의 관측 자료에서 10(파란색), 50(검은색), 90(빨간색) Percentiles 범위에 해당하는 시계열을 표현한다. 두 지역 모두 270 - 300DU 구간을 중심으로 연 변동을 보이고 있고, 10 Percentiles의 범위에 해당하는 시계열을 볼 때는 오존의 감소가, 90 Percentiles의 범위에 해당하는 시계열은 오존의 증가가 더 큰 폭으로 변화함을 알 수 있다. Fig. 3.2.38은 OMI와 MLS 센서로 관측된 오존 전량을 경도 방향 8권역에 대해 60-70°S(왼쪽), 70-80°S(가운데), 80-90°S(오른쪽) 위도에 대해 각각 월 평균값(위), 월 최솟값(아래)을 나타낸 그림이다. 월 최솟값의 변동 경향은 월 평균값과 달리 대부분의 권역이 비슷한 패턴으로 나타난다. 8월부터 11월까지는 최솟값과 평균값의 변동 특징이 다르게 나타난다. 특히 9월에 60-70°S 지역의 평균값은 250DU에서 350DU 사이로 나타나는데, 최솟값은 150DU에 다다른 낮은 값을 보여 해당 위도의 지역 간 편차가 크다는 사실을 알 수 있다. 오존홀은 남극점 주변을 덮는 규모로 존재하지만, 저위도로 갈수록 같은 위도더라도 경도에 따라 오존홀의 경계에 위치하거나 오존홀의 비대칭적인 형태로 인해 범위에 들어가지 않는다고 해석할 수 있다.

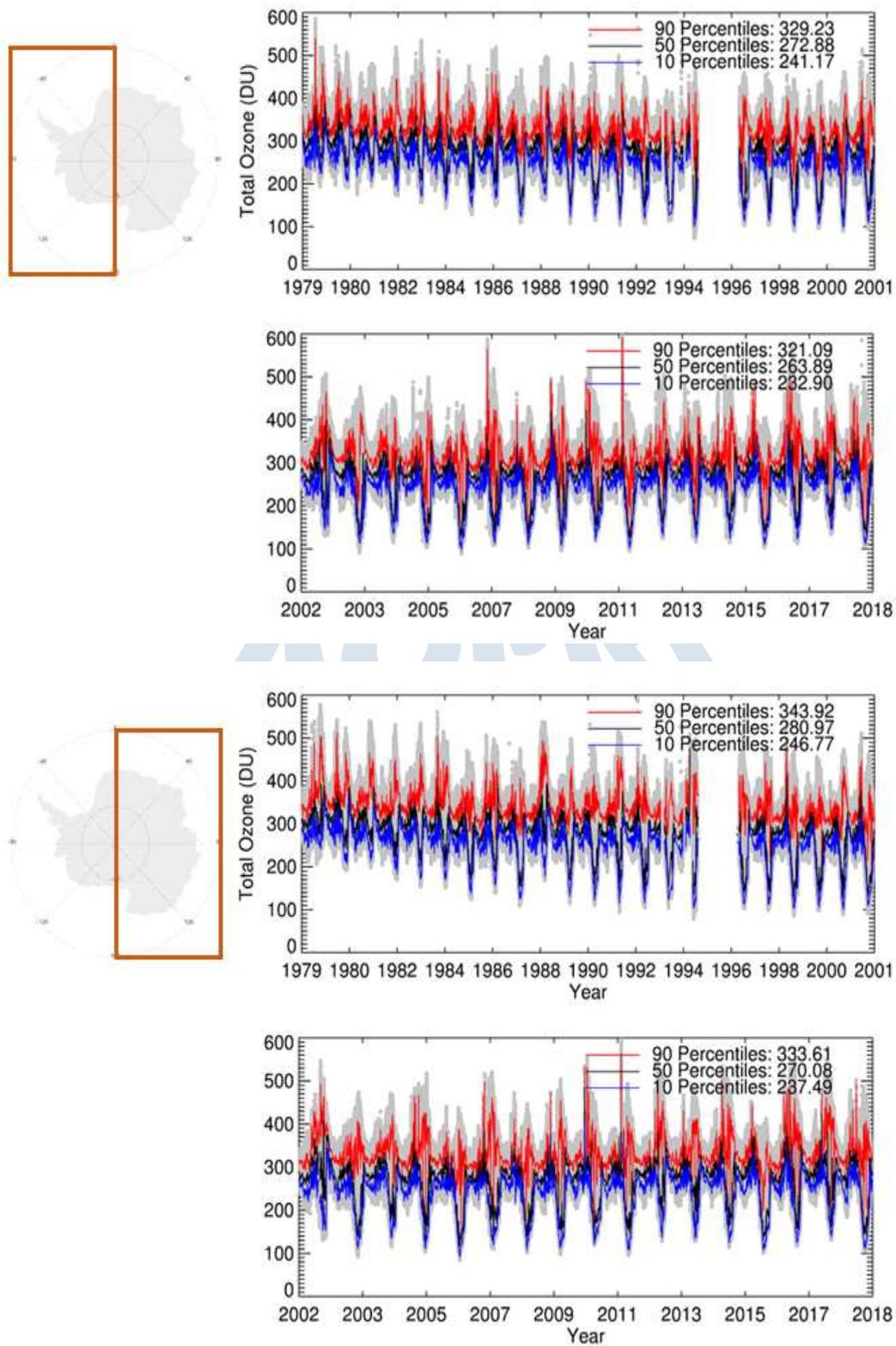


Fig. 3.2.37. 1979년부터 2018년까지, 서남극 (90-60°S, 180-0°W) (위), 동남극(90-60°S, 0-180°E) (아래) 각 지역에 대해 나타낸 TOMS, OMI 위성자료 오존 전량(DU) 시계열. 각각 90(빨간색), 50(회색), 10(파란색) Percentiles에 해당

○ Fig. 3.2.39부터 Fig. 3.2.48까지는 남극 봄철과 여름철 오존 전량 및 오존 농도와, 기온, 잠재와도, 경도 방향 바람에 대해 각각의 상관관계의 연직 분포 및 위도, 경도에 따라 3차원 공간을 분석할 수 있도록 제시하였다. 오존 전량과 기온의 상관관계는 봄과 여름 상관계수의 연직 분포가 차이를 보였다. 여름에 해당하는 1월과 2월에는 고도에 무관하게 대부분 양의 상관계수를 보였다. 반면, 11월과 12월은, 앞서 오존홀이 발생했던 9월과 10월에 대한 분석과 달리, 10hPa 부근에서 -0.8 정도에 해당하는 강한 음의 상관성을 보였다. 해당 기간 오존은 오존홀이 발생했던 지역에서는 오존량이 증가하지만, 나머지 지역에서는 오존량이 감소하는 모습을 보였다. 이에 따라, 기온의 변화가 각 고도에서 오존량과 반대 경향을 보이는 점을 확인해야 한다. 각 고도의 오존 농도와 기온의 상관관계를 분석했을 때, 11월의 10hPa 이상 고도에서는 강한 음의 상관계수가 나타나나, 12월에는 가장 낮은 상관계수가 나타나는 고도가 하강하고, 그 세기도 줄어든다. 1월과 2월은 전체 고도에서 최대가 0.5 정도인 약한 상관계수를 보여 오존과 기온의 관계가 계절에 따라 차이를 크게 보임에 주의해야 한다.

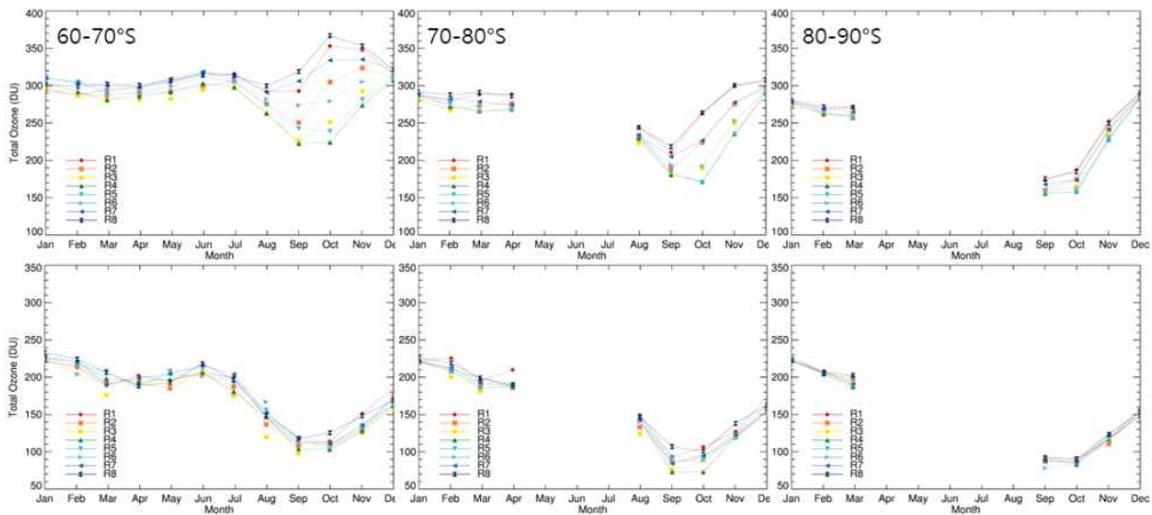


Fig. 3.2.38. 60-90°S 위도대에 대해, 1979년부터 2018년까지 OMI 와 MLS 센서로 관측된 오존 전량을 위도 10°, 경도 45° 단위로 구분하여 나타낸 그림. 경도는 상단 중앙의 지도와 같이 구분됨. 위는 평균값, 아래는 최소값 자료임

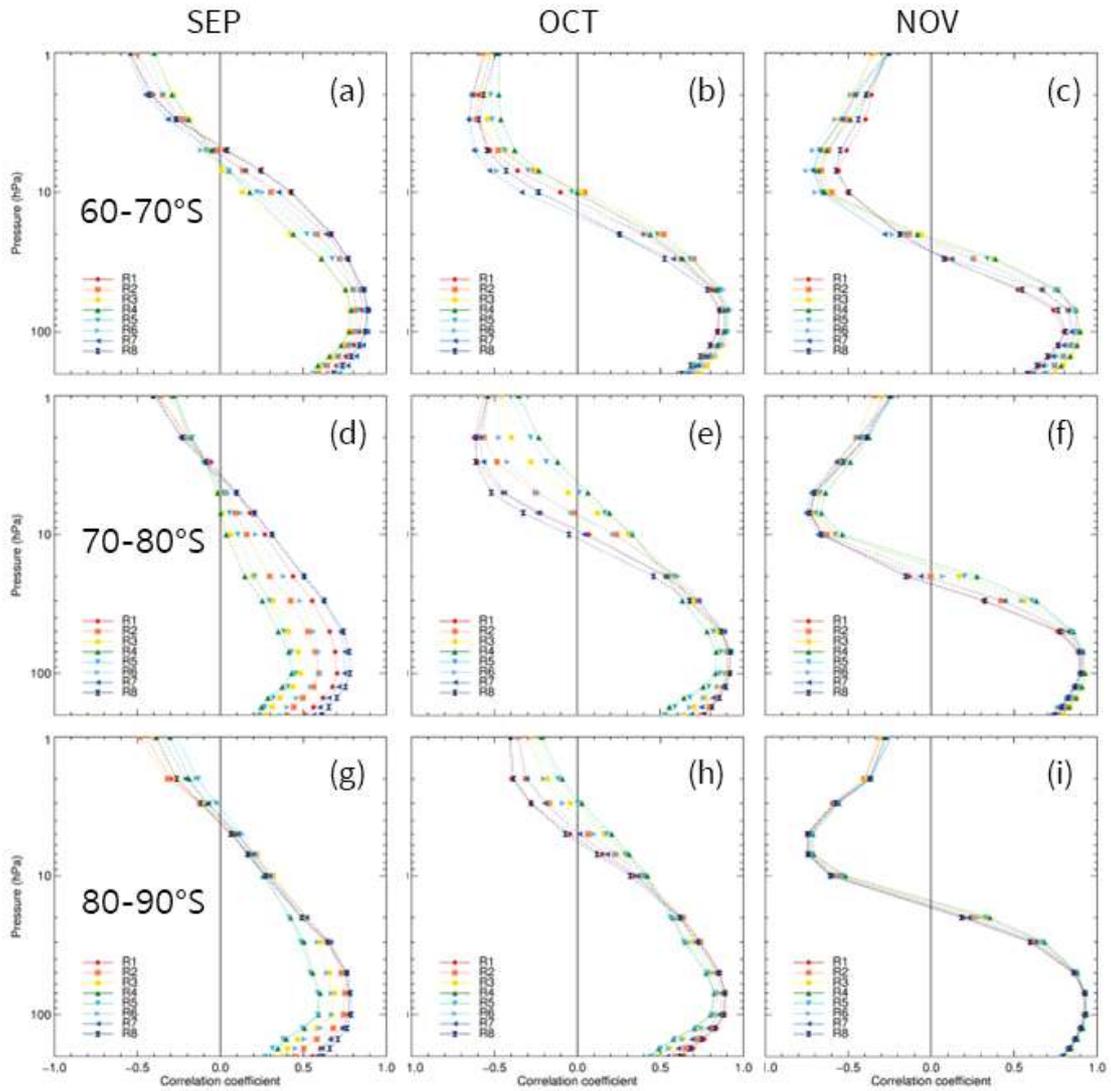


Fig. 3.2.39. 9-11월 오존 전량과 각 기압고도에 해당하는 기온의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

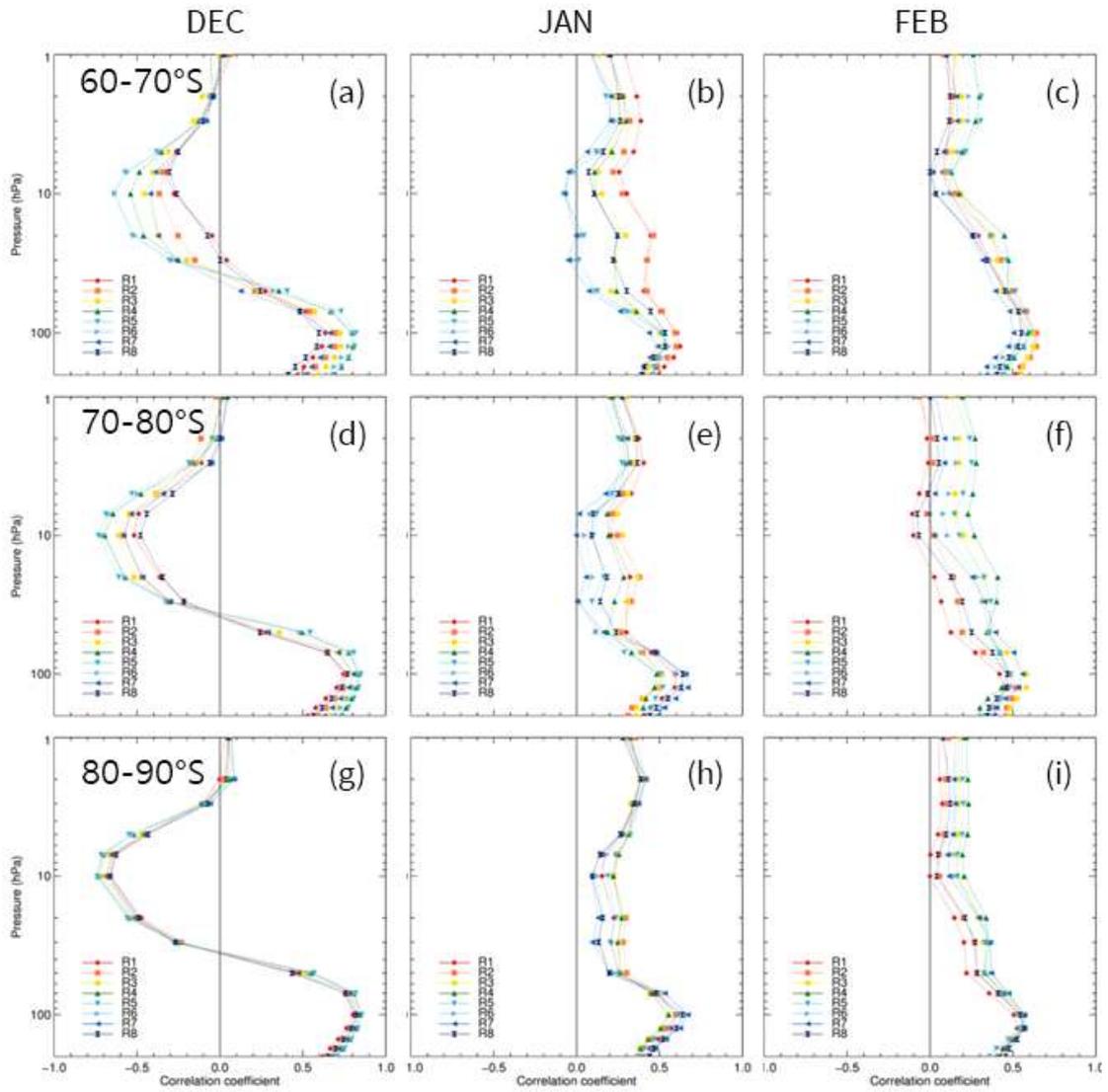


Fig. 3.2.40. 12-2월 오존 전량과 각 기압고도에 해당하는 기온의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

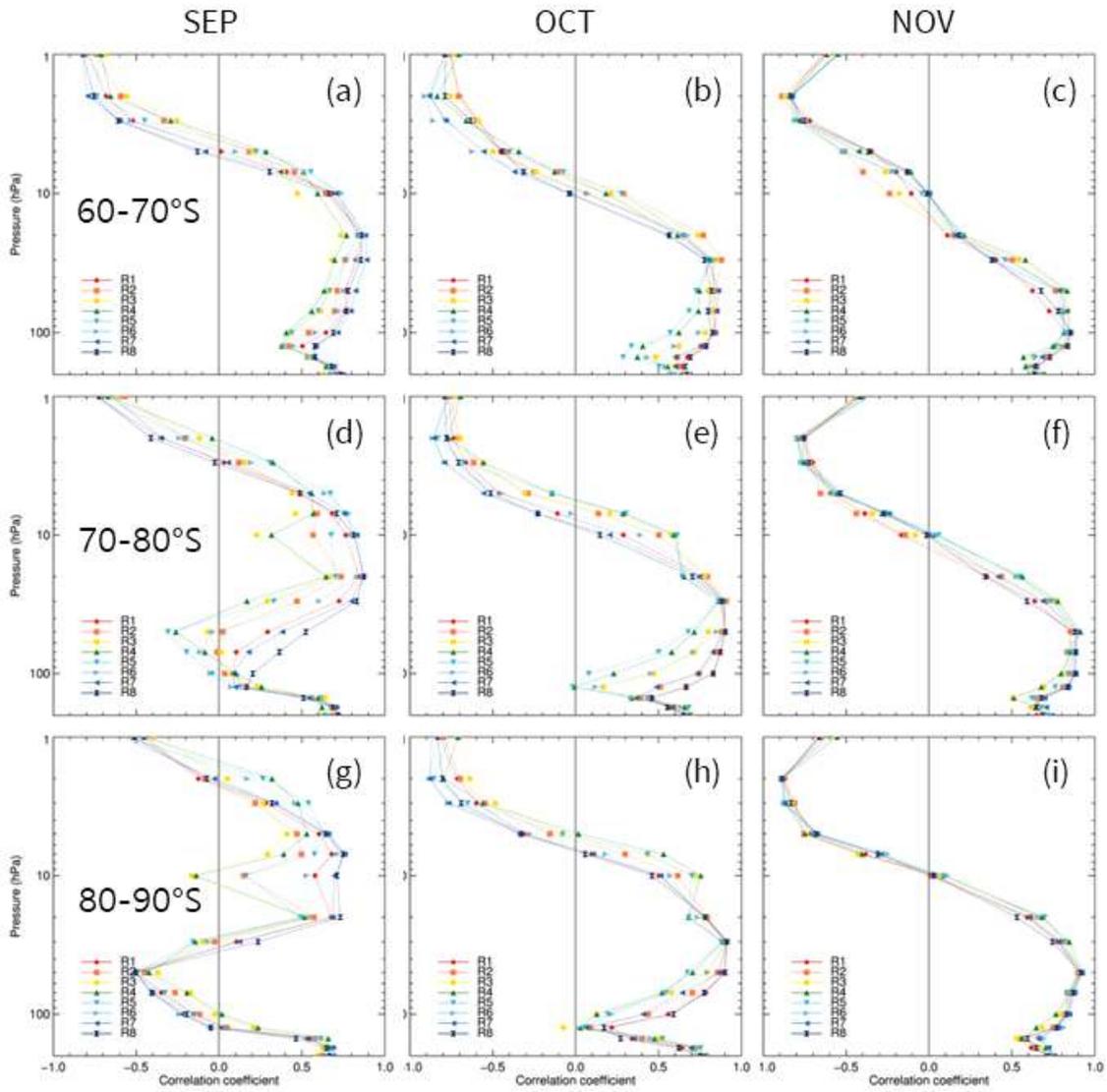


Fig. 3.2.41. 9-11월 각 기압고도에 해당하는 오존 혼합비와 기온의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

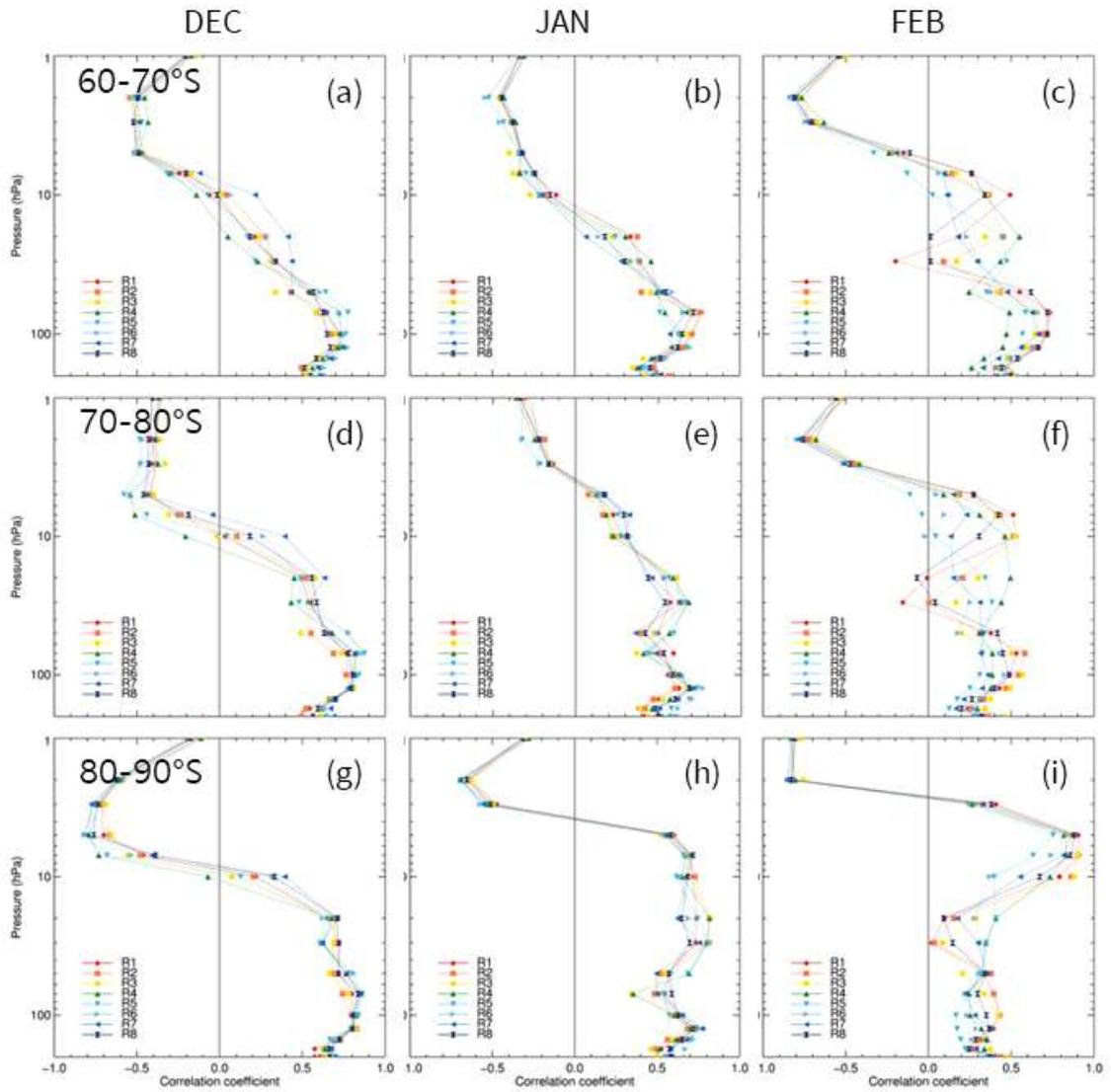


Fig. 3.2.42. 12-2월 각 기압고도에 해당하는 오존 혼합비와 기온의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

- 고도별 오존 혼합비와 기온의 상관관계는, 9월에서 10월로 넘어갈 때, 위에서부터 3hPa 기압고도까지 지배적으로 나타나던 음의 상관성이 7hPa 기압고도까지 확장됨을 확인할 수 있었다. 한편, 오존층 파괴는 특히 350-600K 온위 (약 12-20km 고도), 그리고 300-10hPa 사이의 기압고도에 대해 일어나는 것으로 알려져 있는데(Kuttippurath, 2018) 해당 고도에서의 잠재와도, 경도 방향 바람과의 상관성을 보임을 Fig. 3.2.43부터 Fig. 3.2.46에서 확인할 수 있다.

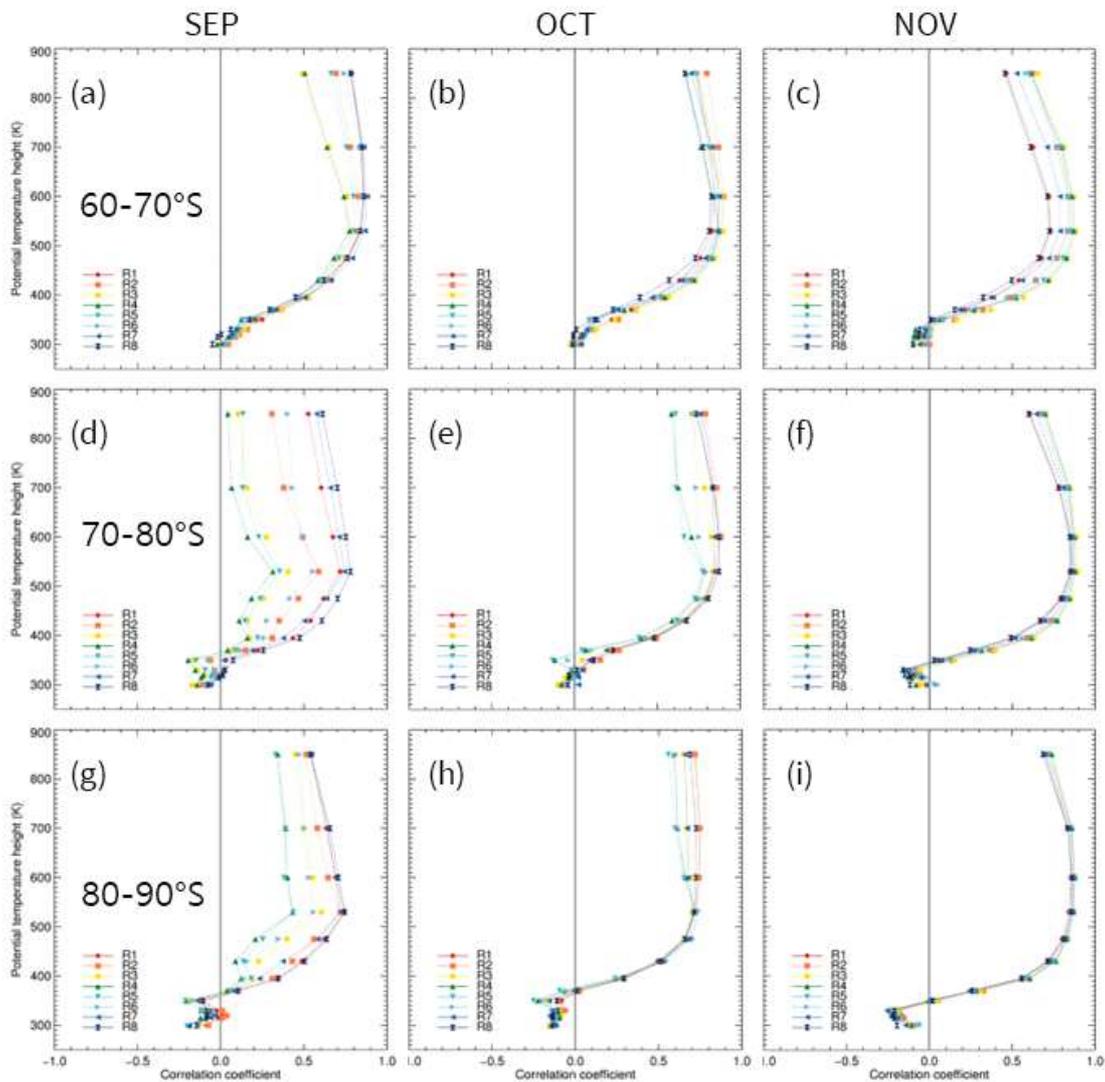


Fig. 3.2.43. 9-11월 오존 전랑과 각 온위에 해당하는 잠재와도의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

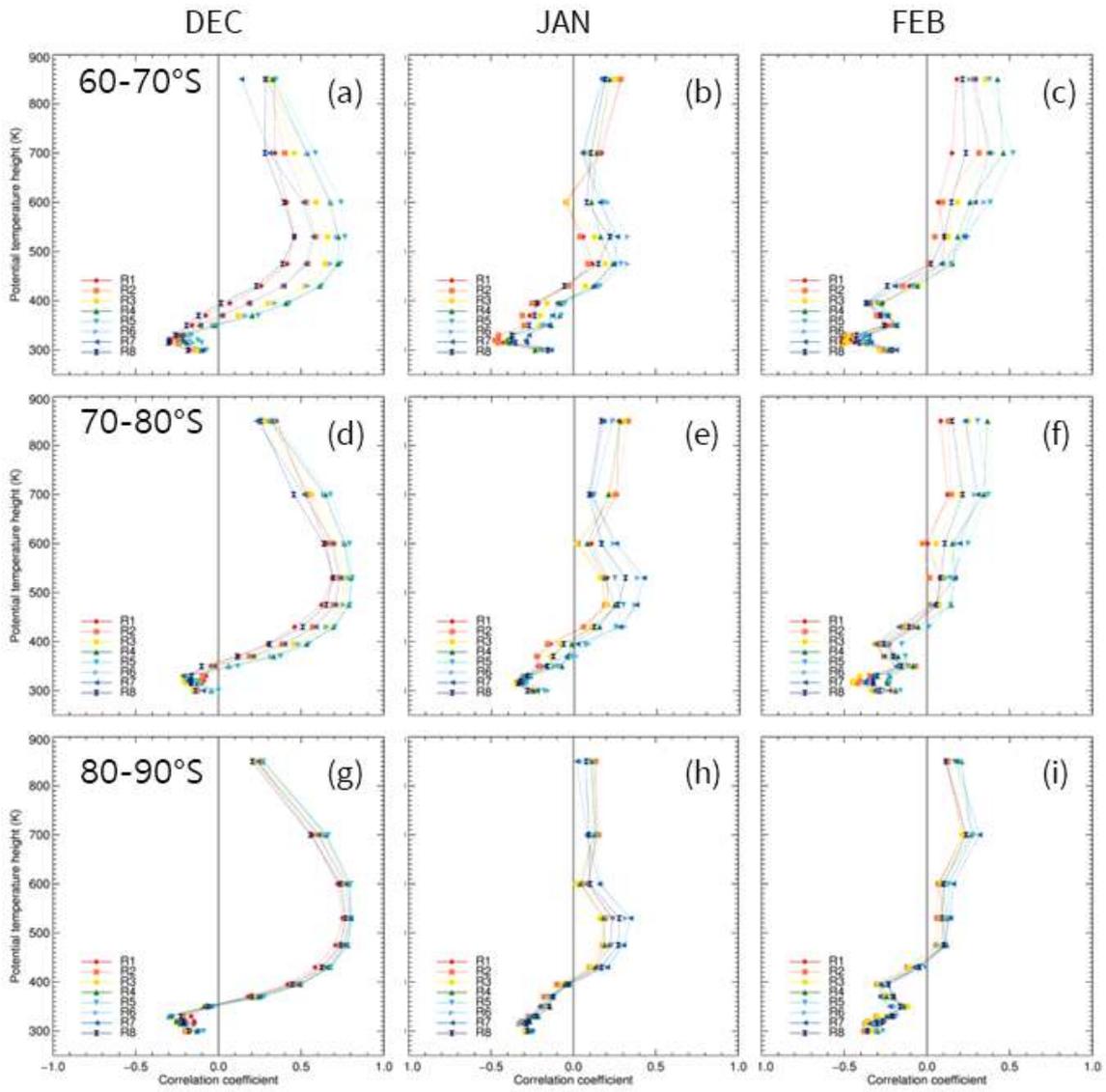


Fig. 3.2.44. 12-2월 오존 전량과 각 은위에 해당하는 잠재와도의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

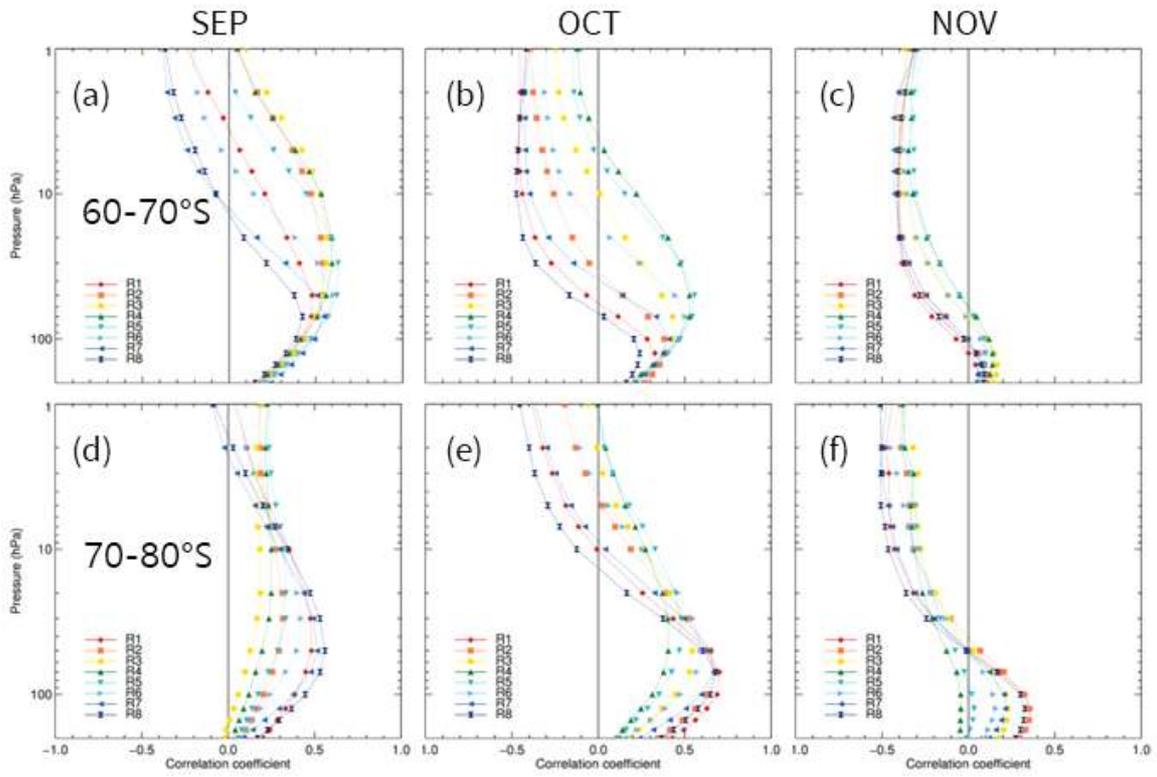


Fig. 3.2.45. 9-11월 오존 전량과 각 기압고도에 해당하는 경도 방향 바람의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

극지연구소

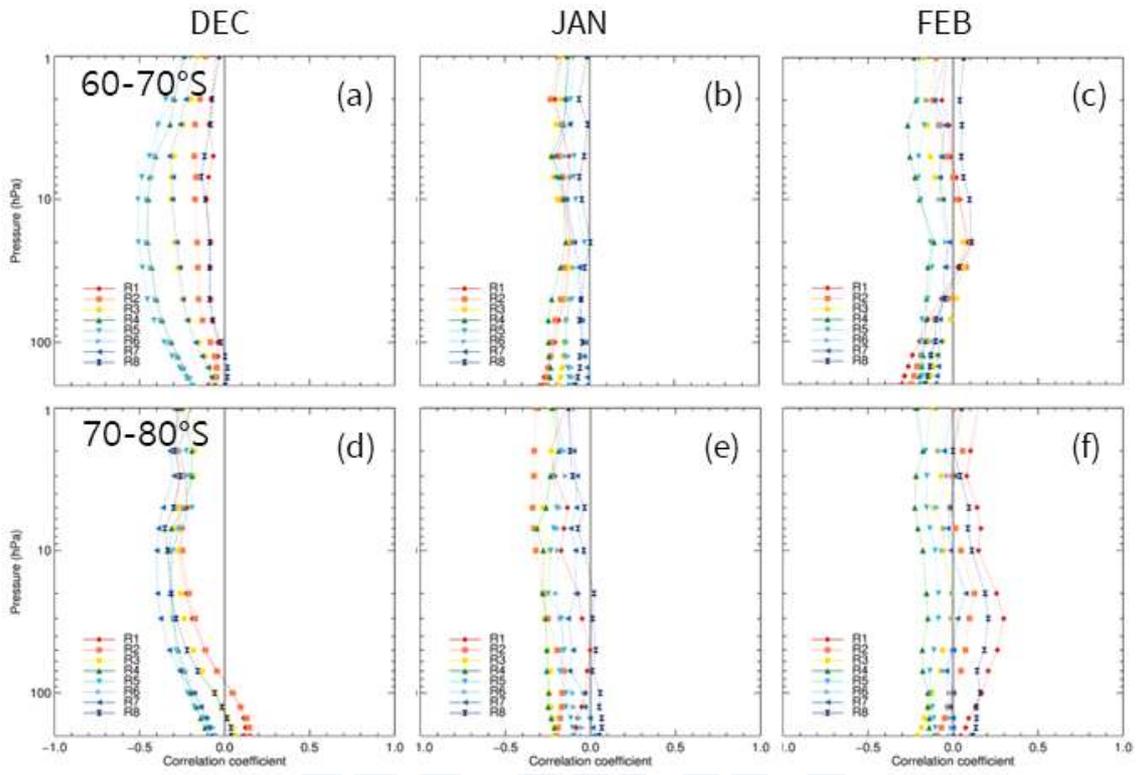


Fig. 3.2.46. 12-2월 오존 전량과 각 기압고도에 해당하는 경도 방향 바람의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

극지연구소

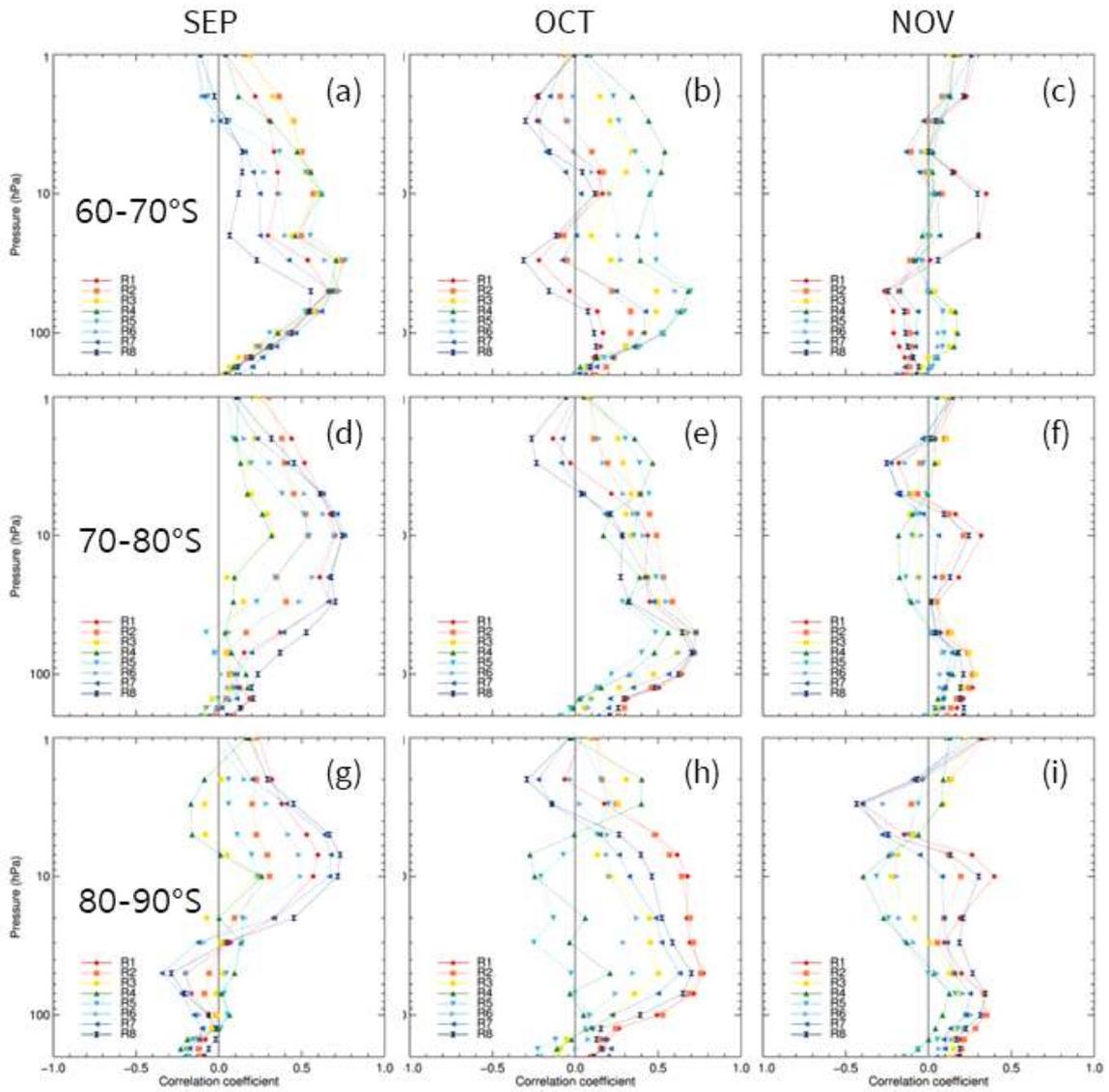


Fig. 3.2.47. 9-11월 각 기압고도에 해당하는 오존 혼합비와 경도 방향 바람의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

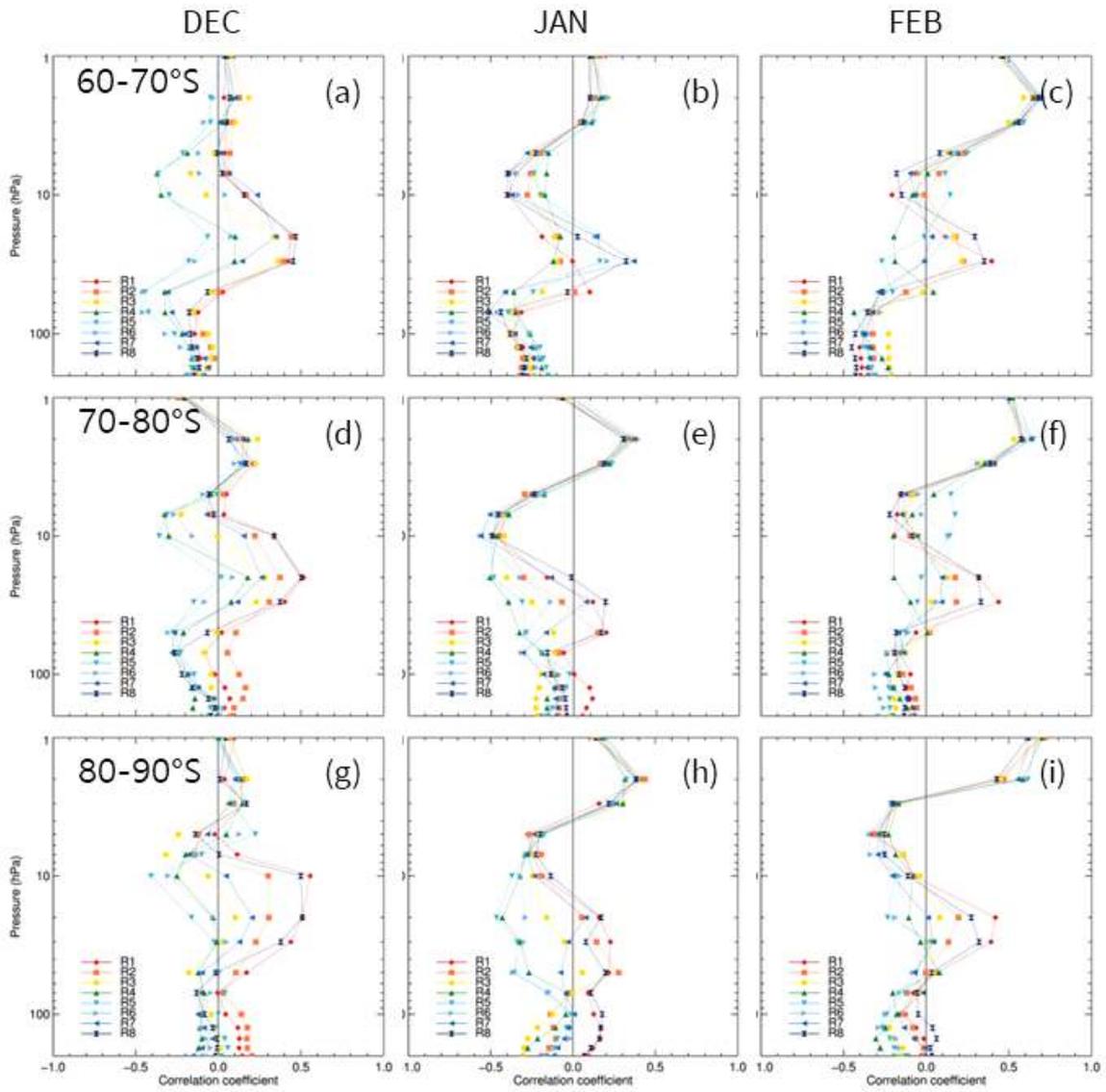


Fig. 3.2.48. 12-2월 각 기압고도에 해당하는 오존 혼합비와 경도 방향 바람의 Pearson 상관관계. 위에서부터 60-70°S, 70-80°S, 80-90°S 위도에 해당함

나) 하부 성층권과 상부 대류권 사이 오존 교환 현상 진단

- STE(Stratosphere Troposphere Exchange)는 대류권 상부를 지칭하는 UTLS(Upper Troposphere Lower Stratosphere) 지역에서 성층권과 대류권 사이의 물질 교환을 의미한다(Holton, 1995). STE 현상의 진단에는 대류권계면 고도의 설정이 필요하며, 대류권계면의 정의는 여러 선행연구에서 제안된 방법들을 이용한다. 대표적으로, 대기의 일반적인 기온 연직 분포를 이용한 Cold Point Tropopause(CPT)는 기온의 최솟값이 나타나는 고도를 의미한다(Tuck, 1985). 기온 감률을 기준으로 하는 Lapse Rate Tropopause(LRT)는 기온감률이 2K/km에 도달하는 가장 낮은 고도를 의미한다(Tuck, 1985). Ozone Tropopause(OT)는 오존 용적 혼합비(ppbv)의 변화율이 60ppbv/km 이상, 300ppbv/km 이하이며, 해당 고도의 오존 농도가 80ppbv 이상, 그리고 대류권계면 바로 위 오존 농도가 110ppbv를 넘는 가장 낮은 고도를 의미한다(Bethan, 1996). 기온과 오존 농도를 이용한 대류권계면 계산은 오존 존데 관측 결과를 이용하여 산출할 수 있으나, 2PVU(Potential Vorticity Unit) 값이 나타나는 고도를 대류권계면으로 설정하는 Dynamic Tropopause(DT)(s (Davis and Emanuel, 1991; Morgan and Nielsen Gammon, 1998.))의 산출은 3차원 정보가 필요해 재분석장을 이용해야 한다. 본 분석에서는 MERRA-2 재분석장을 이용해 DT를 계산하였다.
- 장보고기지에서의 오존존데 관측 중 2015년부터 2019년까지 기간에 대해 위와 같은 대류권계면 정의를 이용한 대류권계면 고도 산출을 수행하였다(Fig. 3.2.49). 동시에, 동일한 관측 기간에 대해 오존 존데 비양 자료를 제공하는 남극 기지들을 선정하고, 대류권계면을 산출했다. 선정된 기지는 Bharati(그림 없음, 2017, 2018, 2019), Davis(그림 없음, 2016, 2017, 2018), Marambio(그림 없음, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019), Syowa(그림 없음, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019), South Pole(Fig. 3.2.48. 2016, 2017, 2018, 2019) 이다. 그림에서 대류권계면의 종류는 색상으로 구분되며, 개별 사례로 존재하여 점으로 표시한 오존 존데 관측과 달리, 재분석장은 3시간 간격으로 자료를 제공하기 때문에 연속적인 선형 그래프로 나타내었다. 대류권계면 고도는 대체로 DT가 가장 낮은 고도에, CPT가 가장 높은 고도로 나타나는 경향을 보였다. CPT는 남극 대기가 전체적으로 냉각되는 겨울 시기에는 20km 고도를 넘어가는 모습을 보인다. CPT는 9월 이후로 들어서는 15km 인근의 고도로 하강한다. OT는 모든 기지에서 주로 DT의 변동 패턴에서 극대값에 해당하는 고도와 일치하는 모습을

보인다. 특이하게, 10월과 11월 경 간헐적으로 OT가 CPT와 비슷한 정도의 높은 고도에 위치하는 사례들이 확인되었다. 이는 평소보다 더 높은 고도에서 오존 농도 상승이 발생했음을 의미한다. LRT는 CPT보다 약간 낮은 고도에서 CPT와 비슷한 고도 변동을 보인다. 두 대류권계면의 정의가 기온을 이용했기 때문에 이와 같은 관계가 나타날 수 있다. 각 연도와 계절에 따라 존재 비양 횡수가 다르므로 경년 변동성에 대한 일반적인 특징은 5개 연도 이내의 관측에서는 다소 어려운 지점이 있었다. 따라서 장기간 존재 관측이 수행된 기지에 대해 동일한 분석이 추가 수행되었다.



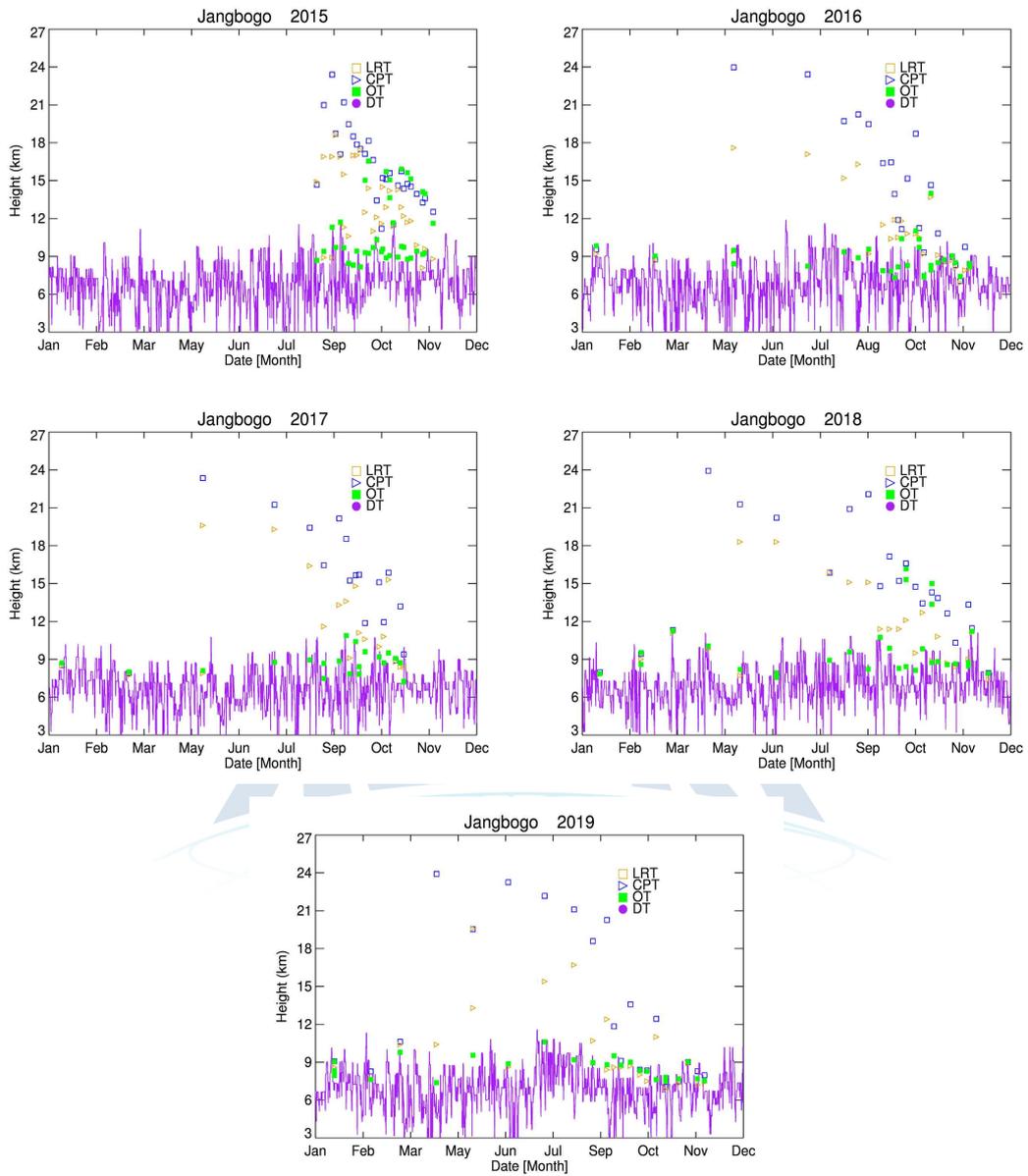


Fig. 3.2.49. 장보고기지의 2015-2019년 대류권계면 고도사각형(파랑): CPT, 삼각형(노랑): LRT, 사각형 (녹색): OT, 실선(보라색): DT

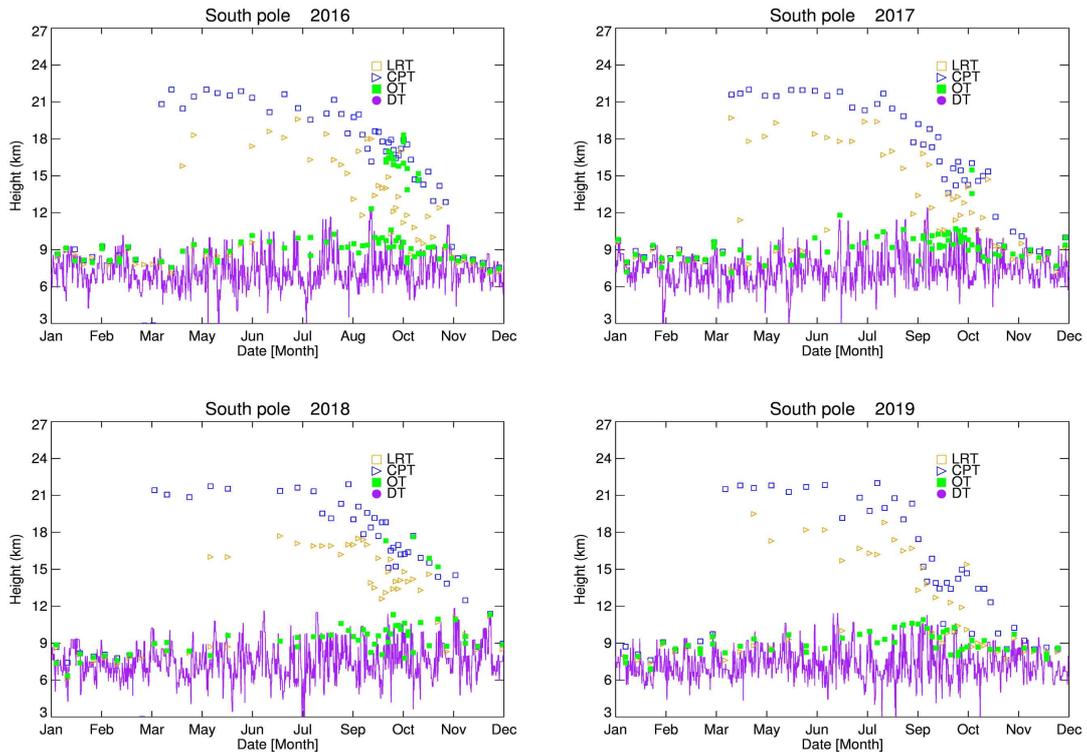


Fig. 3.250. 남극점에서의 2016-2019년 대류권계면 고도. 사각형(파랑): CPT, 삼각형(노랑): LRT, 사각형(녹색): OT, 실선(보라색): DT

○ Fig. 3.251와 Fig. 3.252은 3시간 간격으로 제공되는 재분석장 자료에서 산출된 DT의 고도와, 같은 날짜에 수행된 오존 존데 관측에서 산출된 OT의 상관성을 분석한 결과이다. DT의 일변화와 OT의 관계를 알아본 것으로, 상관계수가 0.2 정도로 낮게 나타나는 장보고, Syowa, South Pole 기지와 상관계수가 0.4부터 최대 0.65까지 나타나는 Bharati, Marambio, Davis 기지로 분류할 수 있었다. DT의 일 변화는 별도로 분석하지 않아 하루 내에 어떤 패턴을 가지는 지는 알 수 없지만, Bharati 기지에서는 상관성이 감소하고, Davis 기지에서는 상관성이 증가하는 모습이 뚜렷하게 나타났다. Marambio 기지는 6-12시 사이에 상관성이 상승했다가 서서히 감소했다. 상관계수가 낮은 경우에는 상관계수 일 변동의 크기가 작았다. 동일한 시각에 대한 DT와 OT의 상관관계는 Fig. 3.252에 나타났다. 상관성은 기지에 따라 다르게 나타나지만, 모든 기지에서 대체로 OT가 DT보다 높게 나타나는 경향을 보였다. 이는 앞서 대류권계면 고도를 분석했을 때와 일치한다. 산포도에서 우측으로 치우친 관측 사례들은 DT와 OT의 차이가 적어도 5km 이상인 결과이다. 이는 10월 경 나타난 CPT 고도와 가까운 OT 사례에도 해당하는 것으로 보인다.

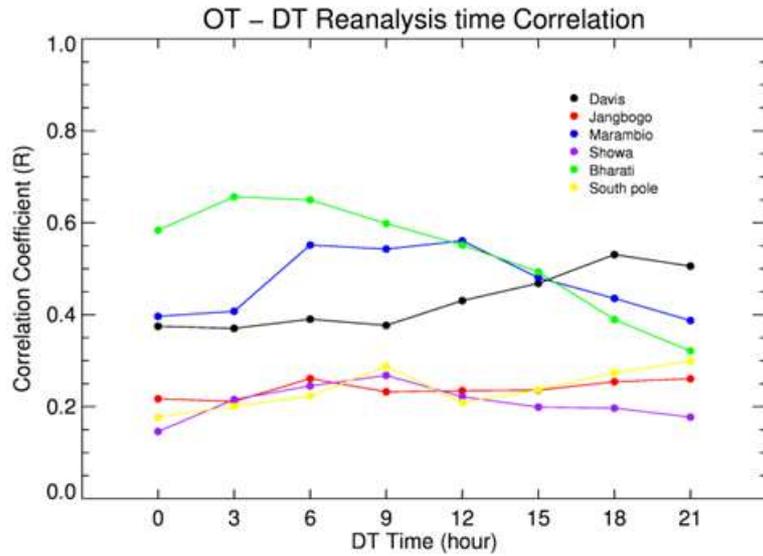


Fig. 3.251. 6개 기지에서 시간에 따른 Dynamic Tropopause와 Ozone Tropopause의 상관성

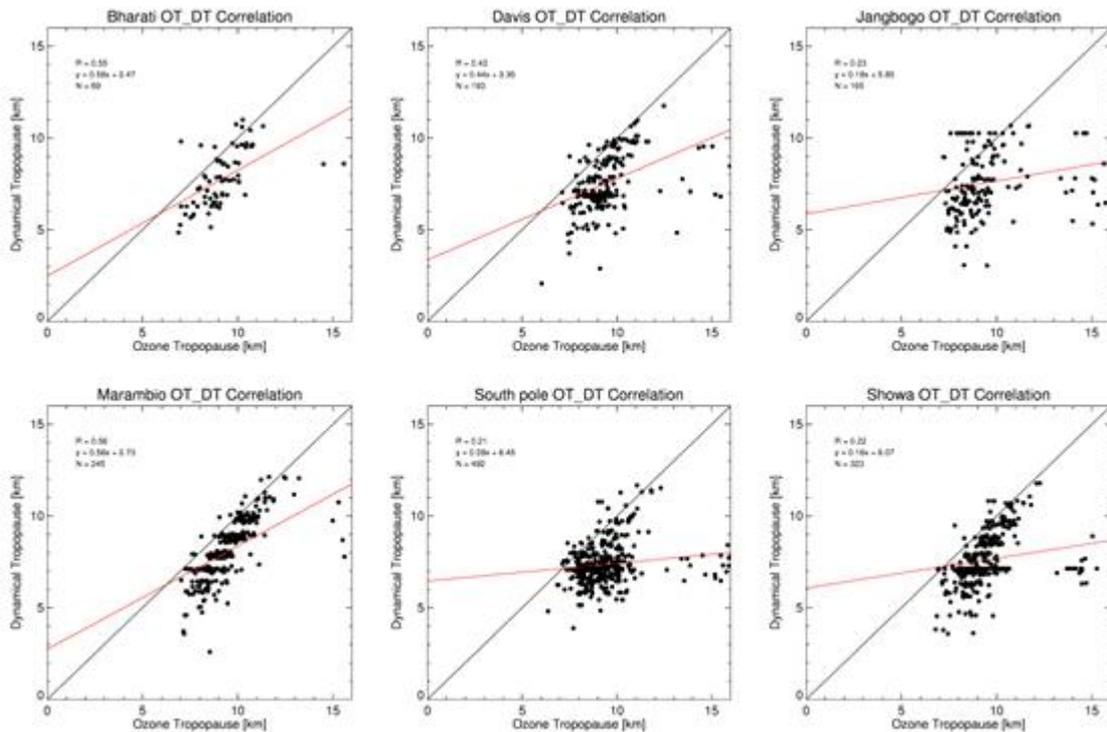


Fig. 3.252. 각 기지의 OT(x축)와 DT(y축) 산포도 및 상관성 분석. 상단 좌측부터, Bharati, Davis, Jangbogo, Marambio, South Pole, Syowa 기지의 결과를 의미

○ 대류권계면 계산 후, 실제 STE Flux를 정량적으로 알아내기 위해 연직 분포 자료를 이용한 계산 방법을 문헌을 통해 조사하였다. Greenslade et al., (2017)는 오존의

연직 프로파일을 여러 파형이 중첩된 모양으로 보고, 0과 1의 파수를 가지는 신호를 제거한 Perturbation 연직 분포에서 STE Event를 판별했다. 이를 통해 STE Flux량에 영향을 주는 기온과 기압 등의 다른 요인을 제거하고 수송에 의한 영향만을 평가할 수 있다. Press et al., (1992)는 이후 FFT(Fast Fourier Transform)을 기반으로 한 Bandpass-filter를 적용하고 내삽(Interpolation)하는 과정을 이용하였다. 예로, Fig. 3.2.53은 원래의 오존 연직 분포(왼쪽), 그리고 FFT를 적용한 연직 분포(오른쪽)를 보여준다. 오른쪽 그래프에서, perturbation 값이 95 percentile 이상을 나타내는 구간이 성층권에서 대류권으로 수송이 일어난 결과라고 볼 수 있다. 아래 방정식은 각각 Fast Fourier Transform 적용 과정(위), 그리고 Perturbation 값을 구하는 적분 과정(아래)를 나타낸 것이다.

$$X(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} x(z) e^{-2\pi i \xi z} dz = \sum_{n=0}^N x(z_n) e^{-2\pi i \xi z_n / L} dz = \sum_{n=0}^N x(z_n) \left[\cos\left(-\frac{2\pi \xi z_n}{L}\right) + i \sin\left(-\frac{2\pi \xi z_n}{L}\right) \right] dz$$

$$x(z) = \frac{1}{N/2} \int_{-\infty}^{\infty} X(\xi) e^{2\pi i \xi z} d\xi = \frac{1}{N/2} \sum_{n=0}^{N/2} X(\xi) e^{2\pi i z \xi_n / (n)} d\xi = \frac{1}{N/2} \sum_{n=0}^{N/2} X(\xi) \left[\cos\left(\frac{2\pi z \xi_n}{n}\right) + i \sin\left(\frac{2\pi z \xi_n}{n}\right) \right], \quad \xi \neq 0, 1$$

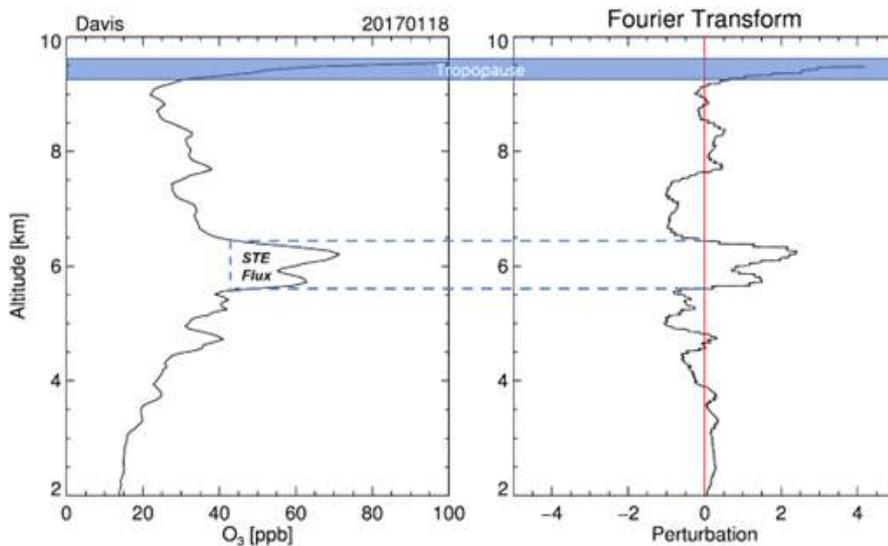


Fig. 3.2.53. 2017년 1월 18일 Davis 기지 오존 존데 관측 및 FFT가 적용된 연직 오존 프로파일

- 앞서 설명된 방법에 따라 Davis, 장보고, Marambio, Syowa 기지에서 2015년부터 2019년까지 STE가 발생한 사례를 찾고, 각 사례에서 STE Flux 양을 계산해 그

평균값을 Table 3.2.10에 나타냈다. STE Flux는 장보고기지에서 가장 작고, Syowa기지에서 가장 큰 값을 보였다. 장보고기지는 다른 기지에 비해 0.071로 작은 STE Flux 양을 보였는데, 이는 장보고 기지가 다른 기지들보다 남극대륙 내부에 더 가깝게 있기 때문으로 추측된다. 남극점에 가까운 고위도일수록, 극 순환의 범위 안에 있을 가능성이 높아 강한 극 순환이 외부 공기의 유입을 차단하기 때문에 고농도의 성층권 오존량이 대류권쪽으로 침투할 가능성이 낮다. 장보고기지는 STE Flux 양과 마찬가지로 STE 현상이 발생한 회수(N)도 다른 기지에 비해 10회로 작기 때문에, STE가 많이 발생하는 지역이 아님을 알 수 있다. Fig. 3.2.54는 2015년부터 2019년까지 각 기지에서 STE가 발생한 일시와 그 양을 표시한 그림으로, Syowa 기지와 Marambio 기지가 높은 STE Flux양을 기록한 것을 확인할 수 있다. 주로 5-7월에는 STE가 관측되지 않은 것으로 확인되나, 존재 관측은 계절에 따라 비양 횟수가 다르기 때문에 연간 STE 발생의 특징은 조금 더 장기간 자료를 확보하여 진행되어야 한다.

Table 3.2.10. 2015-2019년 각 기지에서 STE가 발생한 횟수와 STE Flux 평균값

Station	Mean STE Flux (10 ¹⁷ Molecules/cm ²)	N
Davis	0.247	26
Jang Bogo	0.071	10
Marambio	0.299	26
Syowa	0.327	25

- Fig. 3.2.55은 장보고기지에서 STE가 발생했을 때와 아닌 사례를 구분하여 각각 1, 5, 8km 고도에 대해 HYSPLIT 모델로 72시간 역궤적을 작성한 결과이다. 고도가 높을수록 공기궤의 궤적은 더 먼 수평거리를 이동한 것으로 나타나며, STE가 발생한 경우는 5km, 8km 고도의 결과를 확인하면 주로 저위도에서 고위도로 이동하고, 시계 방향의 이동 궤적을 보인다. 실제 공기궤가 연직으로 이동한 양, 그리고 72시간에 해당하는 수평 이동량이 STE 현상의 시공간 규모와 실제 연관을 가지는 지에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

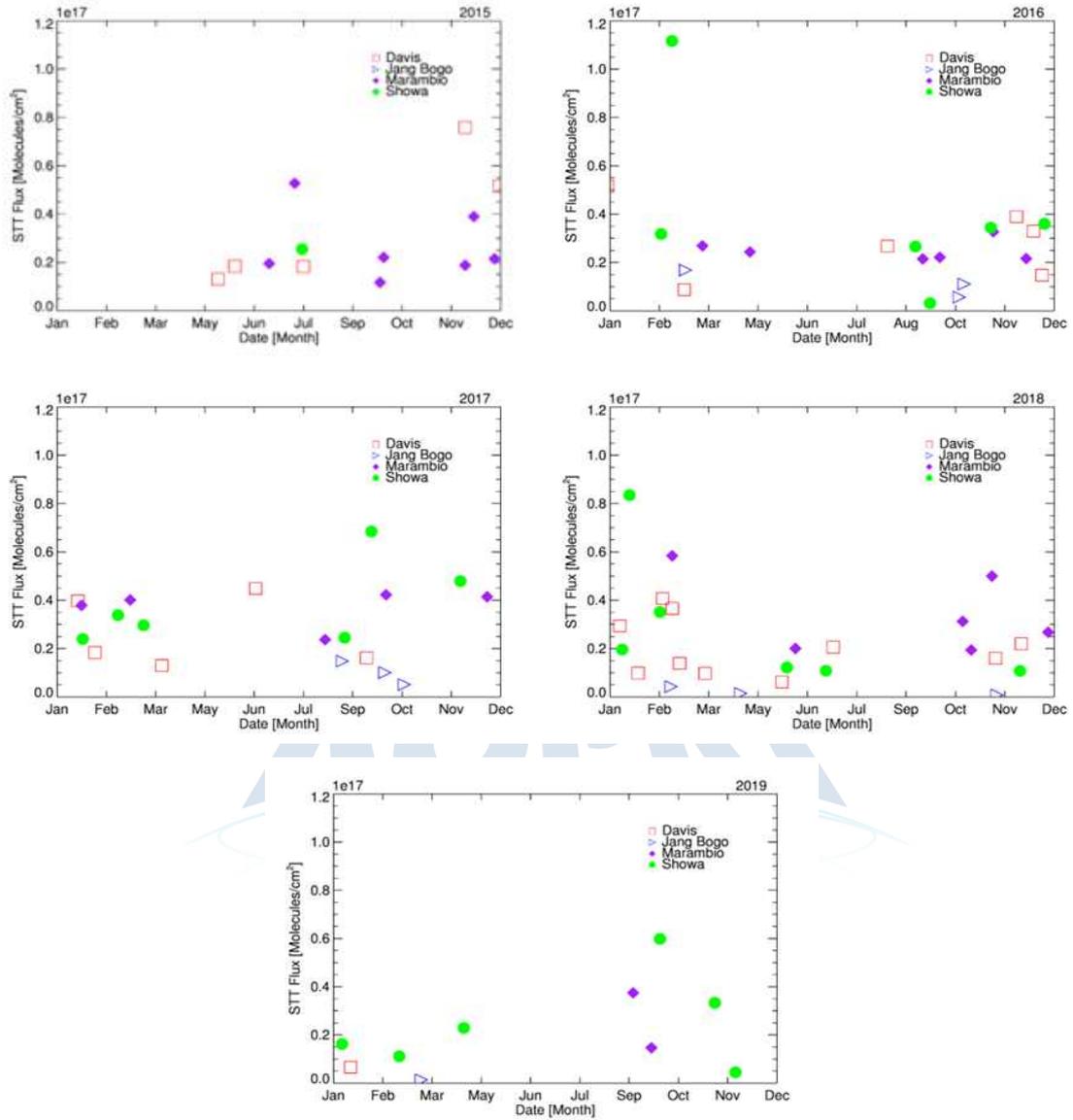


Fig. 3.2.54. 2015-2019년 월별 STT(Stratosphere-Troposphere Transport) Flux의 연변동. 상단 좌측부터, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019년. Davis(빨간색), 장보고(파란색), Marambio(보라색), Showa(초록색)

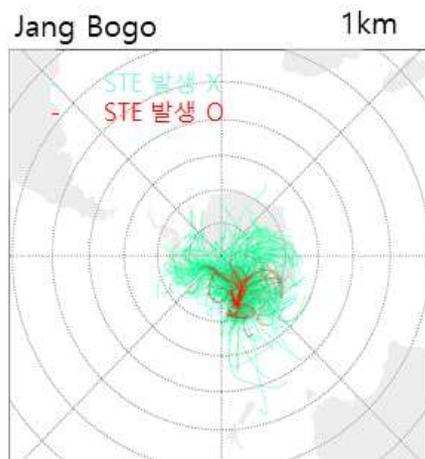
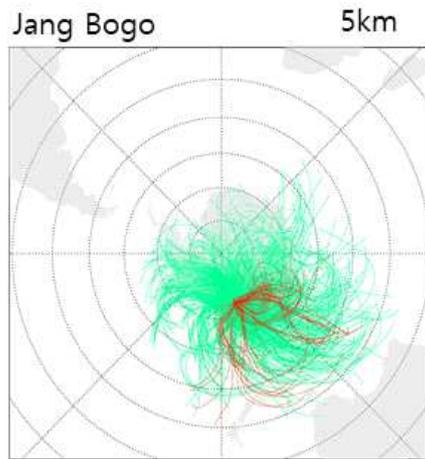
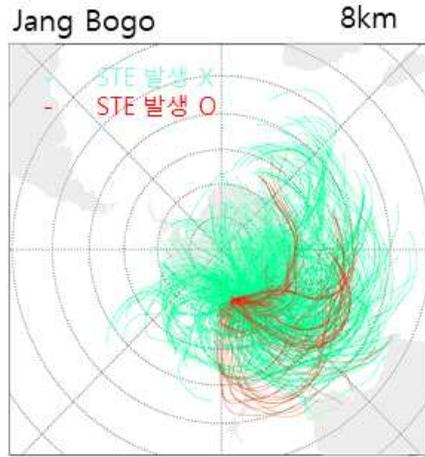


Fig. 3.2.55. 장보고기지를 기준으로 HYSPLIT 모델을 사용하여 성층권-대류권 물질교환 발생 유무에 따른 3개의 end point 고도(1km, 5km, 8km)의 72시간 역궤적

- 남극에서 10년 이상 장기간 오존 존데 관측을 수행한 기지는 South Pole, Syowa, Davis, Dumont d'Urville, Marmabio가 있다. WOUDC (World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre), NDACC (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change)에서 제공하는 자료 중 (1) ECC(ElectroChemical Concentration) 관측 방식, (2) 연속 관측 기간이 10년 이상인 경우를 선정 및 존데 기반 연직 관측 자료를 구축했다. 각 기지의 관측 기간은 Table 3.2.11 표시하였다. 가장 관측이 오래 이루어진 South Pole 기지는 1967년부터 자료가 존재하나, 1970년부터 1986년, 그리고 1990년의 결측으로 인해 1991년부터의 자료를 사용하였다. 남극점의 오존 연직 분포의 시계열은 Fig. 3.2.56와 같으며, 기압고도에 따라 오존의 부분압 값을 표시하였다.

Table 3.2.11. WOUDC와 NDACC로부터 구축한 오존 존데 자료 기지 및 기간

기지명	기간
South Pole	1991년 1월 - 2020년 3월
Syowa	2010년 4월 - 2020년 12월
Davis	2006년 4월 - 2019년 1월
Dumont d' Urville	1991년 1월 - 2019년 12월
Marambio	2004년 1월 - 2019년 4월

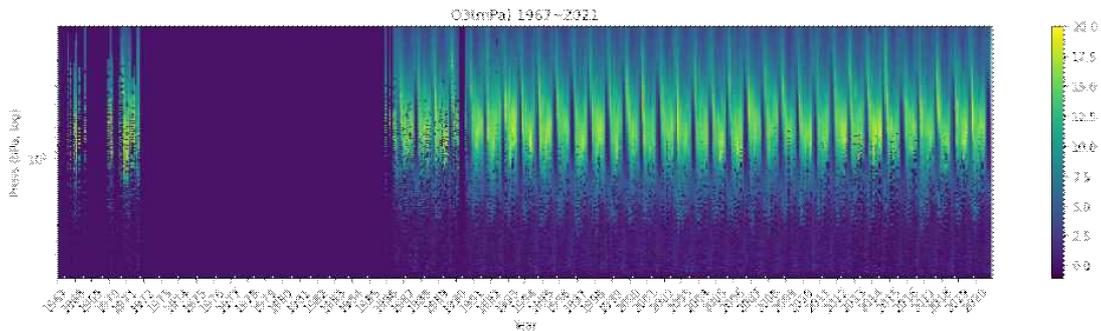


Fig. 3.2.56. 1967-2021년 South Pole기지 상공 오존 부분압의 기압에 따른 연직 분포 시계열

- 오존 존데 관측 자료는 0.1km 단위로 평균하고, 월별로 관측 횟수가 달라 동일한 고도에 대해 월 평균을 계산한 값을 해당 월의 대푯값으로 설정하여 시간 및 고도 차이에 따른 상관계수 Heatmap 그래프를 분석하였다(그림 없음). 이 그래프는 지표면 고도에서의 오존 농도를 다른 고도의 오존 농도와 비교했을 때, 어느 만큼의

시간 차이와 어떤 고도에서 높은 상관성을 보이는지 알아보기 위한 구조를 가진다. 전체 기간에 대해 지표에서의 관측값은 한 달 단위의 시차와 1km 단위의 고도 차이를 가지는 위치에 대해 시계열 상관계수를 계산했다. 그리고, 계절에 따라 남반구 여름 (DJF, 12-2월), 가을(MAM, 3-6월), 겨울(JJA, 6-8월), 봄(SON, 9-11월)으로 구분되었다. 다음은 각 계절에 대한 요약된 결과이다.

▷ 여름 (12-2월)

- 2달 전의 시기, 상층에서 음의 상관, 하층에서 양의 상관
- 이후의 시기, 상층에서 음의 상관
- 3달 후 12km 이내에서 고도별로 반대의 상관

▷ 가을 (3-5월)

- 사계절 중 가장 뚜렷한 상관성을 보임.
- 지표 근처에서 양의 상관이 나타남.
- 상층에서는 고도에 따라 양의 상관이 나타나는 시차가 달라짐.

▷ 겨울 (6-9월)

- 전체적으로 상관성이 약하게 나타남.

▷ 봄 (9-11월)

- 1달 전의 시기, 상층에서 양의 상관 이후의 시기, 상층에서 음의 상관
- 하층에서 양의 상관
- 지표에서의 오존 변화는 이전 시기의 상층으로부터 영향을 받음

- 남극 5개 기지의 오존존데 자료를 분석한 결과, 지표 오존은 지표 근처의 오존, 그리고 시간차가 있는 상층의 오존 농도에 대해 양의 상관성을 보이는 것으로 확인되었다. 상층과 지표 오존 사이에 나타나는 높은 양의 상관성은 자료의 양을 고려했을 때 유의미한 결과라고 판단된다. 계절별로 나누어 보면 MAM(가을) 시기에서 특히 높은 상관성이 나타났고, 계절별 상관계수 변화는 오존의 생성 및 소멸, 혹은 수송에 영향을 주는 원인과의 관계를 규명해야 함을 시사한다. 남극 관측 자료 외에, 재분석장 자료를 이용한 분석과 비교하여 결과에 통계적 오류가 없는지 검토가 필요하다. 이에 따라 MERRA-2 재분석장 자료를 1980년부터 2020년까지 확장하여 구축했다. MERRA-2 자료는 01:30UTC를 기준으로 일 8회, 공간규모는

경도방향 576개(0.625도), 위도 361개(0.5도), 연직방향 72개 Level로 구성되며, 오존 농도는 질량 혼합비로 표현되어있다. 해당 자료의 기호는 M2T3NVASM이다. MERRA-2 자료는 하루에 해당하는 자료의 크기가 2GB 이상인 고해상도 자료로, 40년도 분량의 데이터는 수십 TB(테라바이트)에 해당하는 규모이며, 데이터를 읽어내는 시간 또한 컴퓨터의 메모리에 따라 수 일 이상의 시간이 소요되었다. 이에 장기간 분석을 위한 재분석장 사용 및 그 결과는 연산 비용이 높게 드는 만큼 중요한 결과로써 작용할 것이다.

- 앞서 장보고 기지에서 2015-2019년 관측에 맞춘 대류권계면 분석에 이어, 5개 기지의 10년 이상의 장기간 존데 관측자료의 대류권계면을 계산하고, 월 평균 대류권계면 고도와 50%에 해당하는 범위를 데이터 수와 함께 나타냈다. 장보고 기지의 자료는 다른 기지에 비해 관측 기간이 짧고, 관측 횟수도 적다. 특히 12월부터 7월까지의 각 해에 대해 월 1회 혹은 관측 미수행된 경우가 대부분이므로 월 평균값을 대푯값이라고 보기는 어렵다. 그러나 장보고기지의 결과는 비슷한 위치에 있는 Dumont d'Urville 기지와 비교할 수 있다는 의미가 있다. Fig. 3.2.57에서는 전체 기지의 대류권계면 고도 평균을 월별로 나타냈다. CPT는 겨울 기간에 20km 가까이 높아졌다가 봄철이 되면 급격히 하강하며 여름에는 10km 정도의 고도를 보인다. 가을인 3월부터 5월까지, CPT는 20km 고도로 상승한다. 한편, CPT의 기준은 20km 이하의 고도에 대해 최저 기온인 지점을 의미하고, 이에 따라 계산값이 20km에 가깝게 산출되는 것은 실제 기온 분포를 살펴보면 더 높은 고도에서 최저 기온이 나타남을 의미한다. 이에, 겨울철에는 CPT를 대류권계면 고도로 이용하기 어렵다. CPT는 기온 연직 분포를 이용한 대류권계면으로, 기지에 상관없이 고도 변화의 특징과 변동 폭이 비슷한 모습을 보인다. 남극 지역은 여름엔 백야, 겨울엔 극야가 발생하는 등 태양 고도의 변화가 지표 가열에 큰 영향을 미치므로, 위도 -90도에 근접하는 남극점과 비교해도 월 평균에서는 변화 시기가 비슷하게 나타난 것으로 보인다.

LRT는 Neumayer, South Pole 기지를 제외한 나머지에서 9km 근처의 고도에 위치하고, 겨울 기간 동안 고도가 상승하여 8-9월경 10km 인근에서 가장 높은 고도를 나타냈다. Neumayer 기지의 경우 LRT가 14km 근처에서 나타났으며, 변동 경향과 그 폭은 다른 기지와 마찬가지로 겨울-봄 기간에 상승, 그리고 1km 이내 범위인 15km에서 최대 고도를 보인다. 더불어, Neumayer 기지의 LRT 고도는 50%

편차의 분포가 다른 기지보다 큰 것이 특징이다. South Pole의 결과는 다른 기지와 마찬가지로 9km 고도에 있지만 봄철에는 감소하는 결과를 보인다. CPT와 동일하게 연직 기온 분포자료를 근거로 이용하나 LRT의 경우는 기온 감률을 기준으로 하므로 남극의 극단적인 기온분포 변화에 영향을 적게 받는 것으로 파악된다.

- OT는 10km 고도 근처에서 연간 변화를 보이며, 주로 9-10월에 1km 이내의 범위에서 상승하는 경향을 보인다. 다른 대류권계면 변화에 비해 OT는 월 평균값이 큰 차이를 보이지는 않지만, 봄철 LRT에 비해 넓은 범위의 편차를 보이므로 개별 사례를 확인할 필요가 있다. 특히, 전체 기지에 대한 평균값을 나타낸 결과에서 10월의 OT는 약 14km 이상까지 많은 결과가 확인된다. 남반구 저위도 지역에 해당하는 Reunion Island(21°S, 55°E)에서 계산된 CPT, LRT, OT의 연간 분포 결과는 대류권계면이 14-18km 사이의 고도에 존재함을 나타냈고, STE Event가 발생했을 때는 대류권 상부에서 고농도 오존이 침투했다가 다시 낮아지는 구간이 있어 OT의 판단이 어려움이 알려진 바가 있다(Sivakumar, 2006). 남극 지역은 남반구 고위도 지역이지만, STE가 발생한 시기에 대해 대류권계면의 반응이 연구되지 않았기 때문에 향후 추가 분석이 필요하다.

극지연구소

Monthly Tropopause Height (Total)

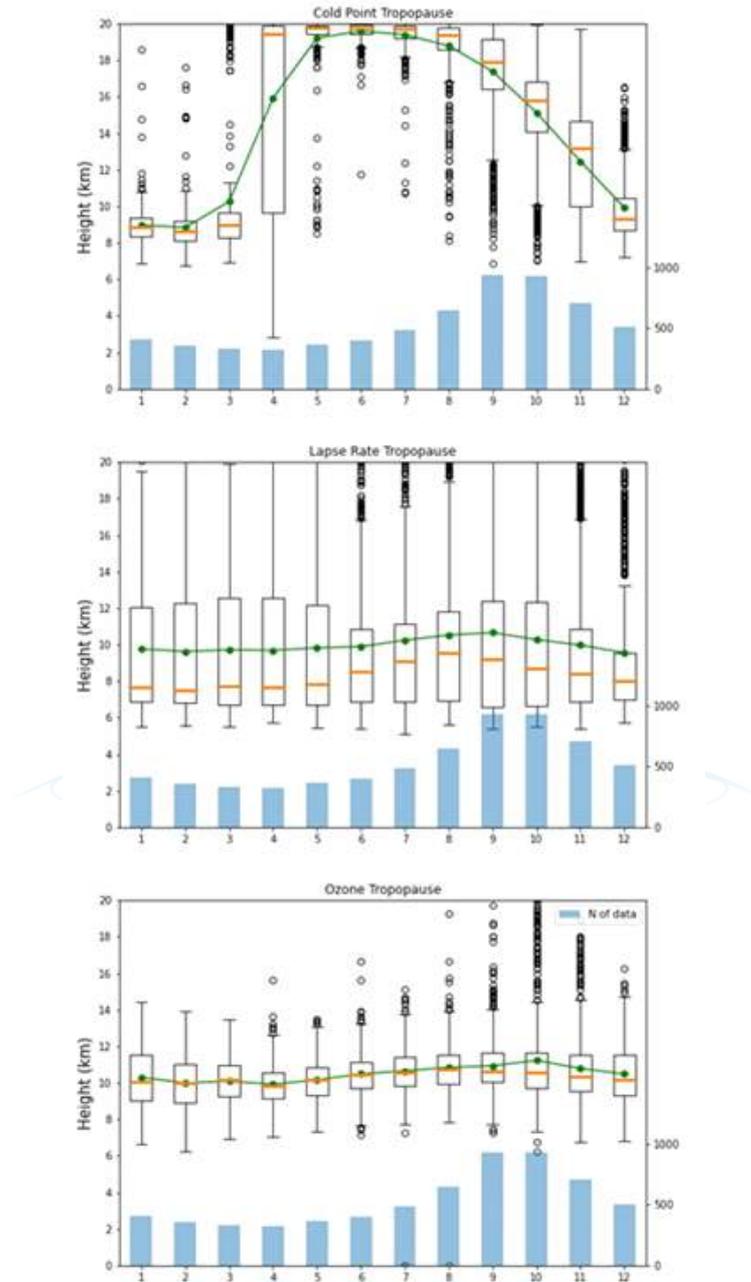


Fig. 3.2.57. 전체 기지의 대류권계면 월평균 및 50% 고도 분포. 월별 데이터 수는 막대그래프로 나타냄. 위에서부터 Cold Point Tropopause, Lapse Rate Tropopause, Ozone Tropopause

다) 극 소용돌이 및 남극 환상 진동(SAM) 패턴 변화에 따른 남극 성층권 오존 변동 특성 파악

- 고위도 지역의 오존 농도와 기후와의 상관성은 브루어-돕슨 순환(Brewer Dobson Circulation)(Brewer, 1949)에서 제안된 바가 있다. 해당 연구에서는 저위도에서 연직 상승한 공기괴가 수증기의 응결로 인해 건조해지고, 고위도 방향의 성층권쪽으로 침투하여 에너지와 물질 교환이 일어남을 언급한다. 이러한 순환은 종관규모 이상의 현상이며 전지구적인 영향을 미친다. 마찬가지로, 극 순환은 위도 60도 이상 고위도 지역의 상층에서 행성 규모로 발생하는 서풍의 흐름을 의미하고, 남극 지역에서 지배적인 영향을 미친다(Waugh, D.W. et al., 2016). 극지역 봄철에 항공기로 관측된 오존 농도와 잠재와도 값은 중위도에서 큰 기울기로 변화함을 보였고, 이로부터 극 순환의 내부와 외부에서 잠재 와도값의 변화에 대해 이해 가능하다(Schoeberl and Harmann, 1991). 대표적인 기후 변동에 대한 지수인 SAM Index는 위도 40°S-65°S 지역에 대해 위도 방향으로 나타나는 기압 차이를 의미한다. SAM Index가 양수일 경우 중, 고위도 지역에서 더 강한 서풍, 음수일 경우 약한 서풍이 나타난다. SAM Index에 따른 서풍의 세기 변화는 특히 남극 지역에 대해 기온, 해수의 순환을 포함한 다른 기후 요인들에도 영향을 주는 것으로 알려져있다(Marshall, G. J., 2006). 이에 기온과 오존의 영향을 받는 대류권계면 고도와 SAM Index, 그리고 해당 고도의 오존 농도와 SAM Index의 상관성을 각각 분석하였다.

(1) 대류권계면 고도와 남극 진동 지수(SAM Index)의 변동성 상관관계

- 앞서 대류권계면은 3개 정의를 이용해 계산되었으며, 각 정의에 따라 월별로 제공되는 SAM Index 값과 월평균 대류권계면 고도의 변화를 계절별로 상관성 분석을 진행하였다(Fig.3.2.58-Fig.3.2.60). CPT는 20km 고도까지 상승하는 남극 봄철을 제외한 나머지 기간에 대해, 장보고기지의 JJA(겨울) 기간에서 최대 상관계수인 0.39을 보였고, 이외에는 부호와 상관없이 0.3 이하의 낮은 상관성을 보였다. 전체 계절에 대해서는 Dumont d'Urville을 제외한 나머지 지역에서 약 -0.1의 음의 상관성이 나타났으나, 계절별 변동이 상이한 점을 고려하면 큰 의미가 없다고 판단된다. OT에 대해서도 일부 경우를 제외하고는 낮은 상관성이 나타나 중요한 분석 지점을 파악하기 어려웠다. 장보고 기지의 경우 계절별 상관계수가 서로 차이를 보이거나, 타 기지에 비해 적은 관측회수와 관측회수의 계절별 편향을 고려하면 일반화할 수 없다. LRT의 경우 Dumont d'Urville, South Pole, Syowa, Marambio 지역에서 JJA 기간에 대해 약 -0.4 혹은 그보다 큰 음의 상관성을 나타냈으며, 이는

SAM Index가 서풍의 세기와 관련이 있으므로 겨울 기간 남극의 강한 풍속이 전체적인 기상 요소들에 영향을 주어 반영된 결과로 생각할 수 있다. Neumayer 기지는 LRT가 다른 기지와 달리 높게 나타난 지역이었는데, SAM Index와의 상관성 경향이 타 기지와 다른 모습을 보여 해당 지역만의 특징이 있을 것으로 보인다.



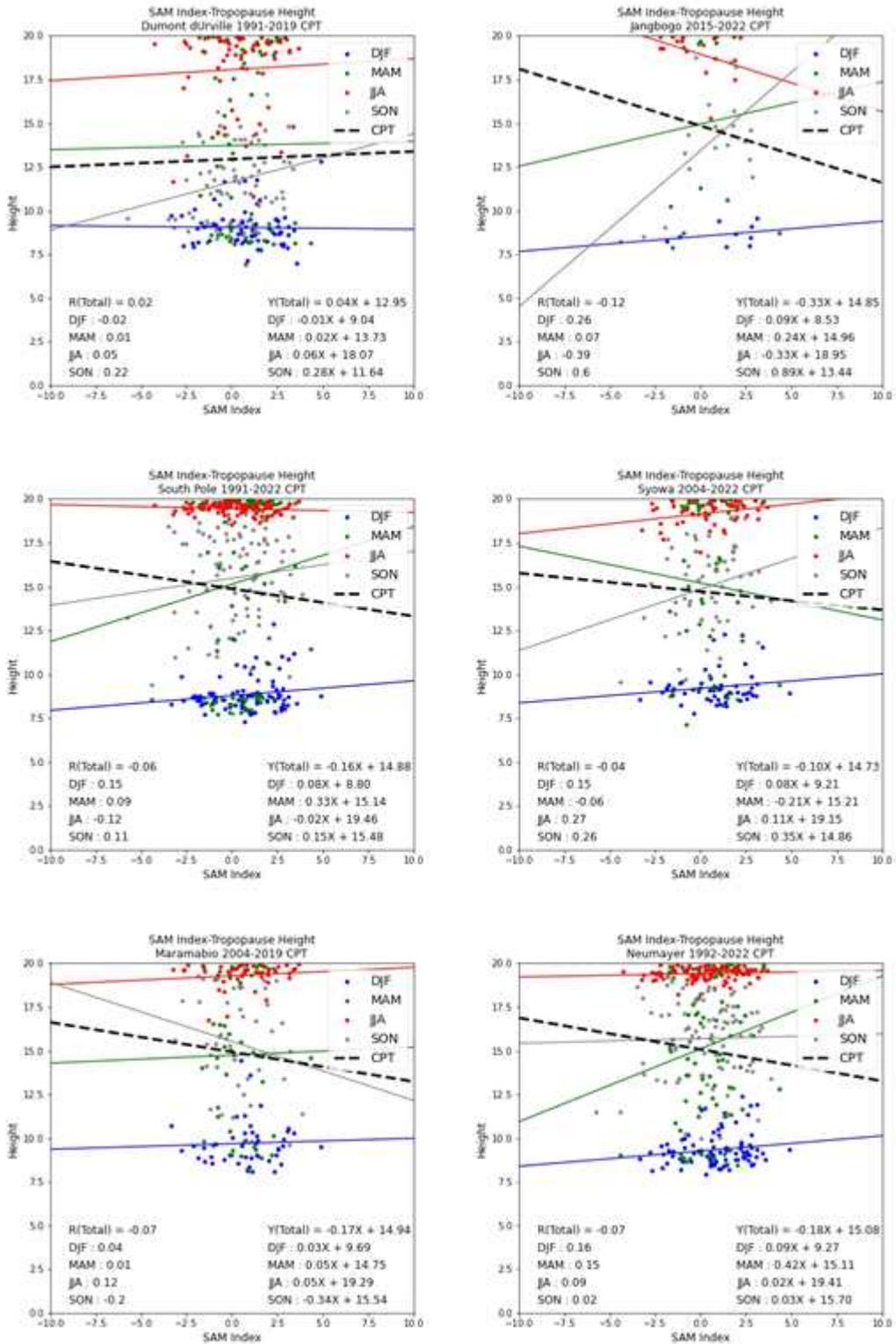


Fig. 3.258. SAM Index와 CPT 대류권계면 고도의 계절별 상관관계. 왼쪽에서 오른쪽, 위에서 아래 방향 차례대로 Dumont d'Urville, Jang Bogo, South Pole, Syowa, Marmabio, Neumayer 기지

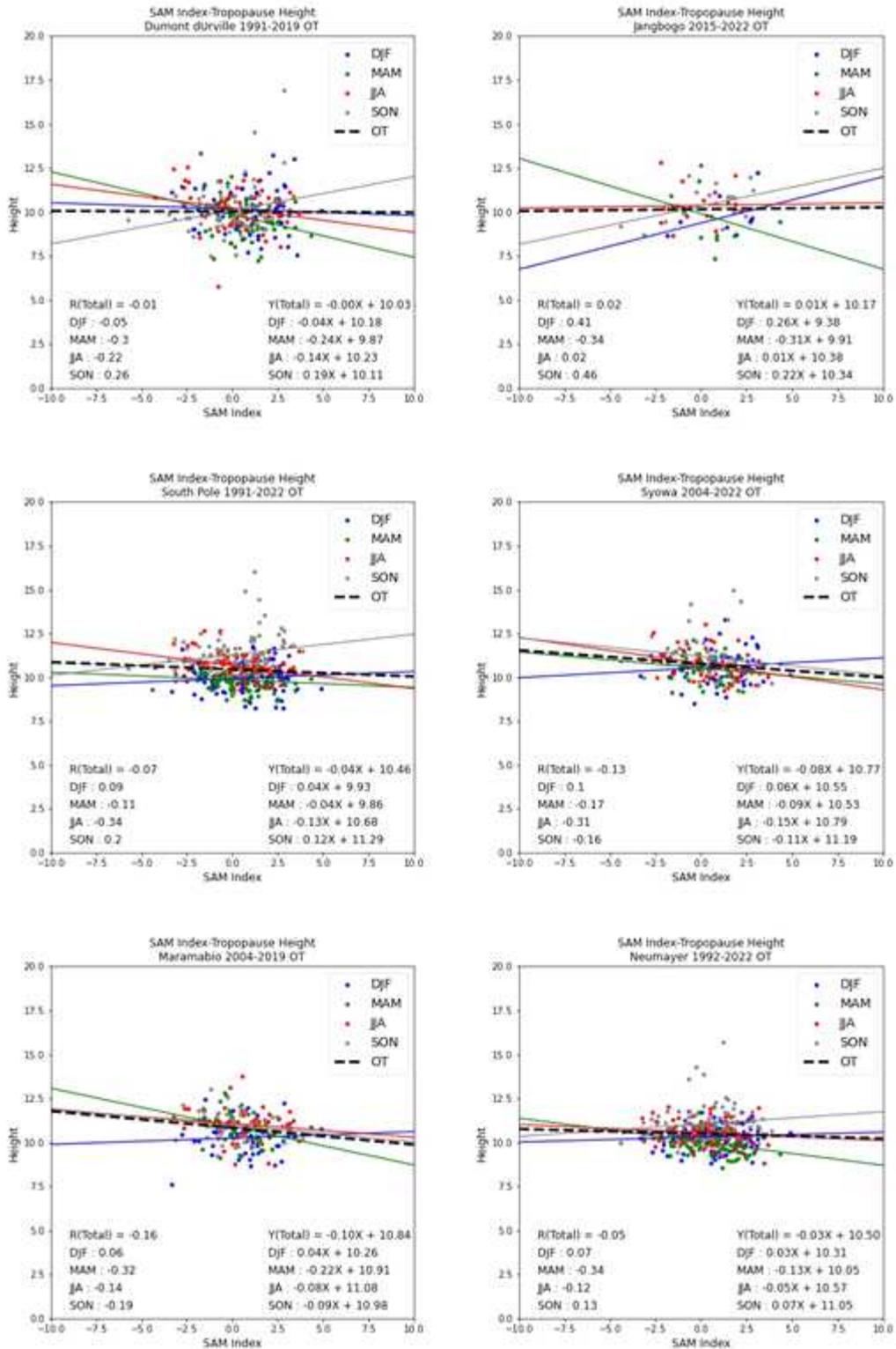


Fig. 3.259. SAM Index와 OT 대류권계면 고도의 계절별 상관관계. 왼쪽에서 오른쪽, 위에서 아래 방향 차례대로 Dumont d'Urville, Jang Bogo, South Pole, Syowa, Marmabio, Neumayer 기지

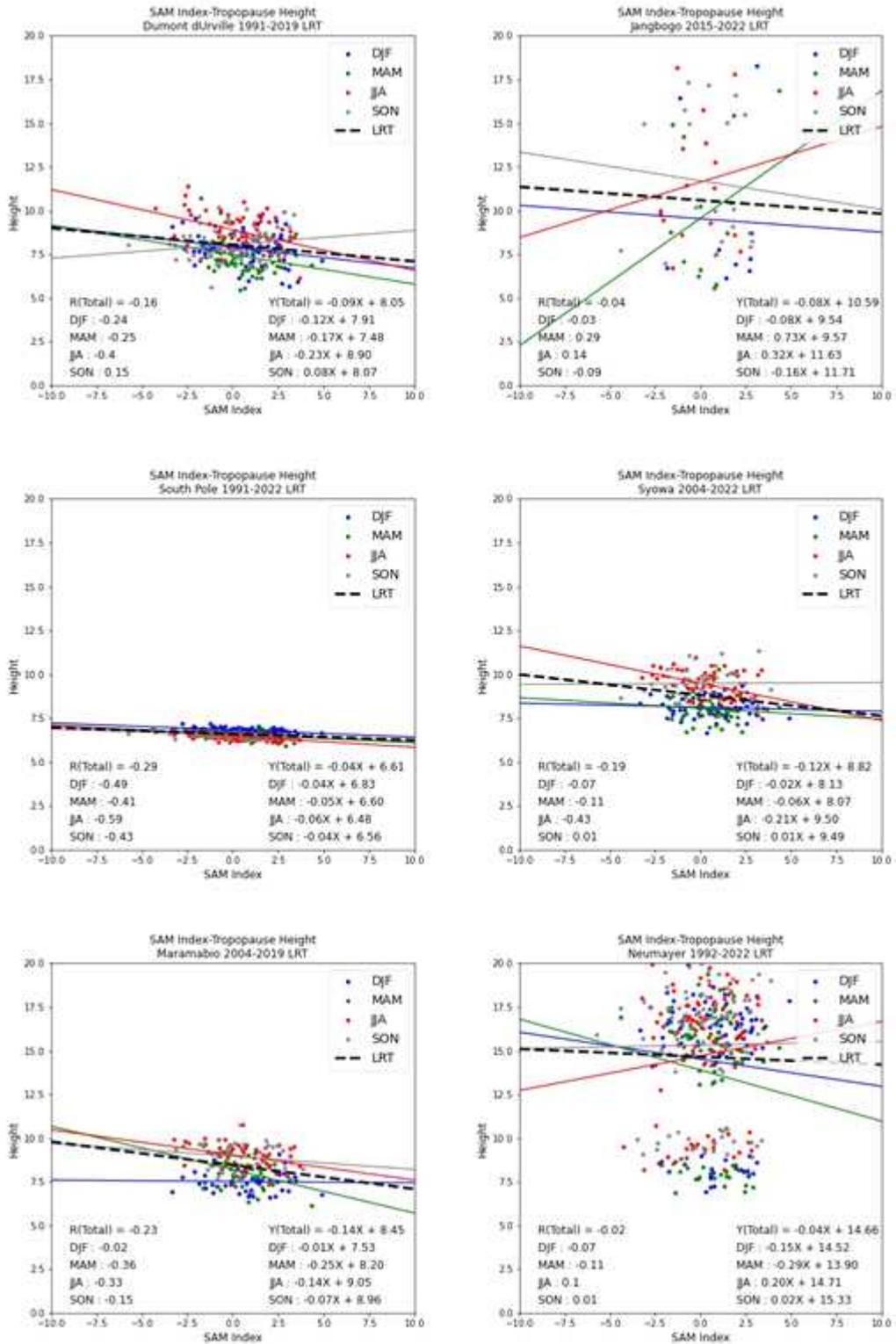


Fig. 3.2.60. SAM Index와 LRT 대류권계면 고도의 계절별 상관관계. 왼쪽에서 오른쪽, 위에서 아래 방향 차례대로 Dumont d'Urville, Jangbogo, South Pole, Syowa, Marambio, Neumayer 기지

(2) 대류권계면 고도의 오존 용적비와 SAM Index의 변동성 상관관계

- 다음으로, 대류권계면 고도에서의 오존 농도와 SAM Index의 상관성을 알아보았다(Fig.3.2.61-3.2.63). 분석에 앞서, CPT는 고도 변화가 다른 정의에 비해 큰 편이었는데, 오존 농도가 급격히 변화하는 성층권 하부 특성에 의해 정량적으로 의미있는 범위를 넘어간 오존 농도가 나타났다. 이에 CPT보다는 OT, LRT 대류권계면 고도 오존농도에 대한 분석을 집중적으로 분석하고자 했다. 한편, SAM Index와 오존농도의 상관관계는 대부분 -0.2에서 0.2 사이의 낮은 상관성을 보였고, 일관적인 특징을 찾기 어려웠다. 또한 장보고기지와 Neumayer 기지는 LRT 대류권계면의 분포가 큰 편으로, CPT 대류권계면의 경우와 마찬가지로 오존 혼합비의 범위가 지나치게 크게 나타나 신뢰도를 확보할 수 없었다. SAM Index는 여러 가지 기상 요소를 하나의 값으로 집약해서 나타낸 지수로, 실제로 발생하는 복잡한 경향을 단편적으로 판단하기는 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이에 따라, 앞서 언급된 연구 중 오존 전량 및 오존 농도와 기온, 풍속 등을 비교 분석한 방법과 동일하게, 대류권계면 고도와 개별의 기상요소를 분석하는 방법을 활용할 수도 있고, 기후 변동성이 더 세밀하게 반영될 수 있는 방법을 찾아 이용하는 방법도 있다. 오존 농도 역시 혼합비가 아닌 분압(mPa)이 사용되어야 한다.

극지연구소

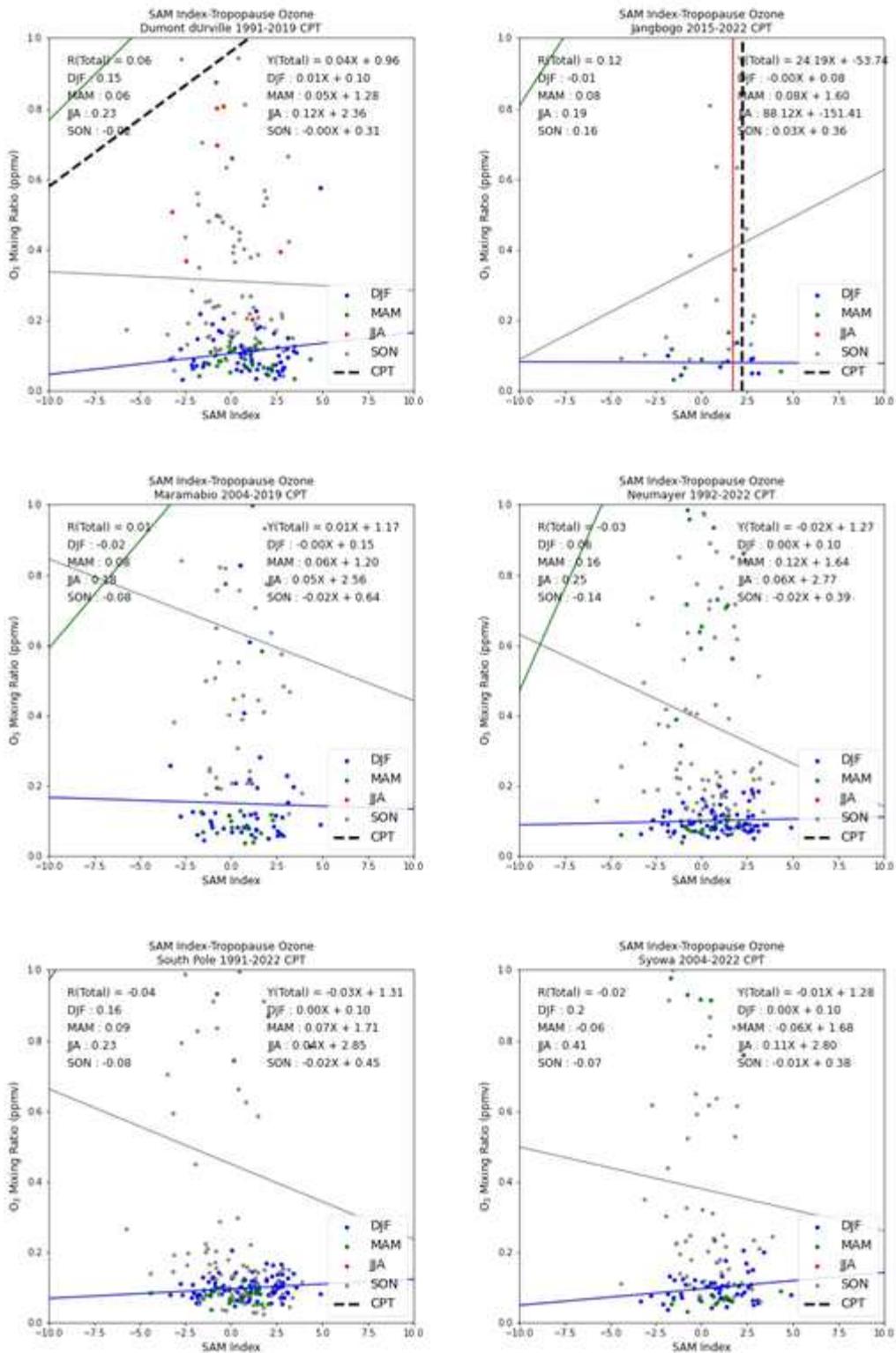


Fig. 3.2.61. SAM Index와 CPT 대류권계면 고도에 해당하는 오존 농도의 계절별 상관관계. 왼쪽에서 오른쪽, 위에서 아래 방향 차례대로 Dumont d'Urville, Jangbogo, South Pole, Syowa, Marmabio, Neumayer 기지

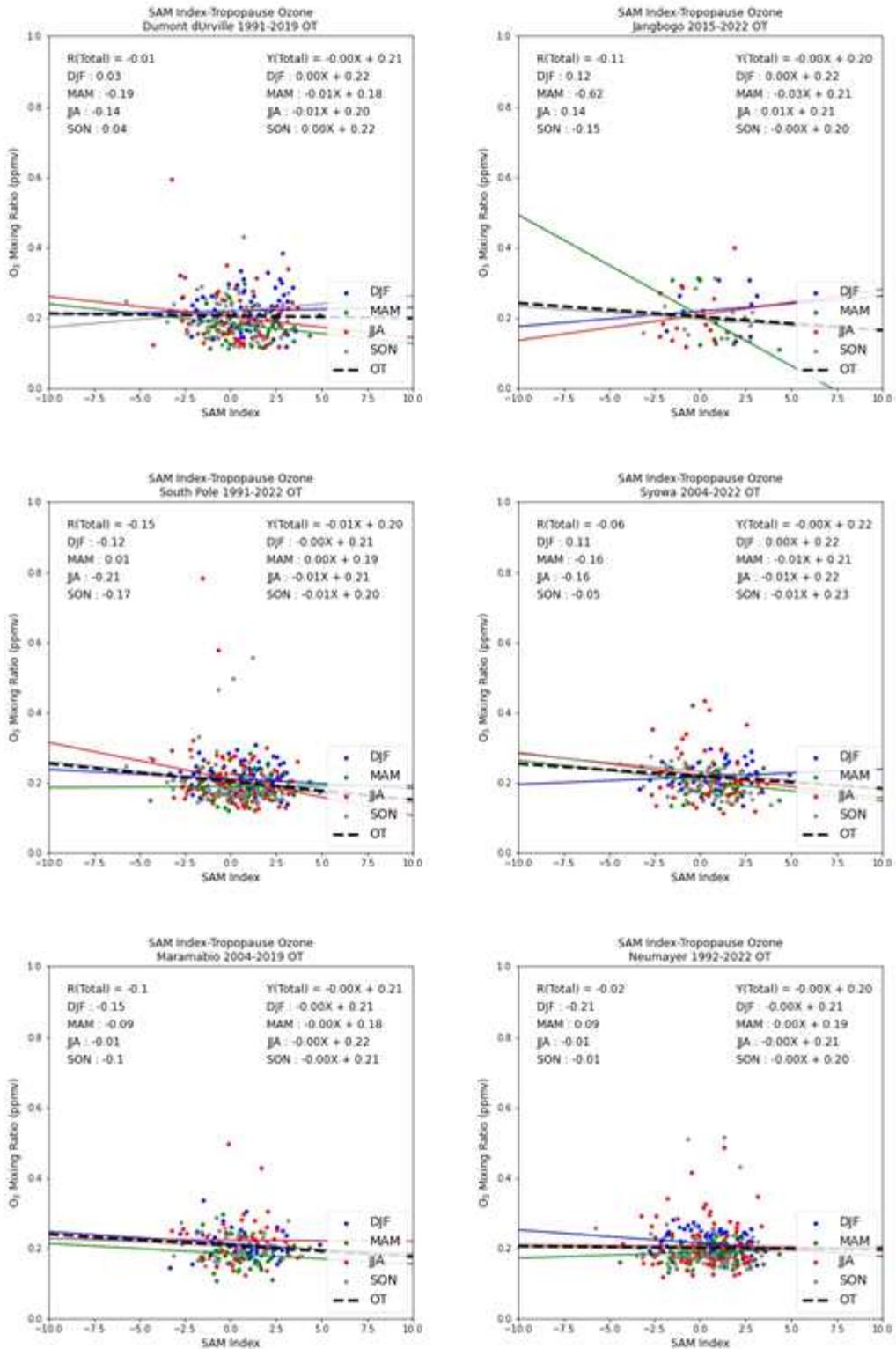


Fig. 3.2.62. SAM Index와 OT 대류권계면 고도에 해당하는 오존 농도의 계절별 상관관계. 왼쪽에서 오른쪽, 위에서 아래 방향 차례대로 Dumont d'Urville, Jangbogo, South Pole, Syowa, Marambio, Neumayer 기지

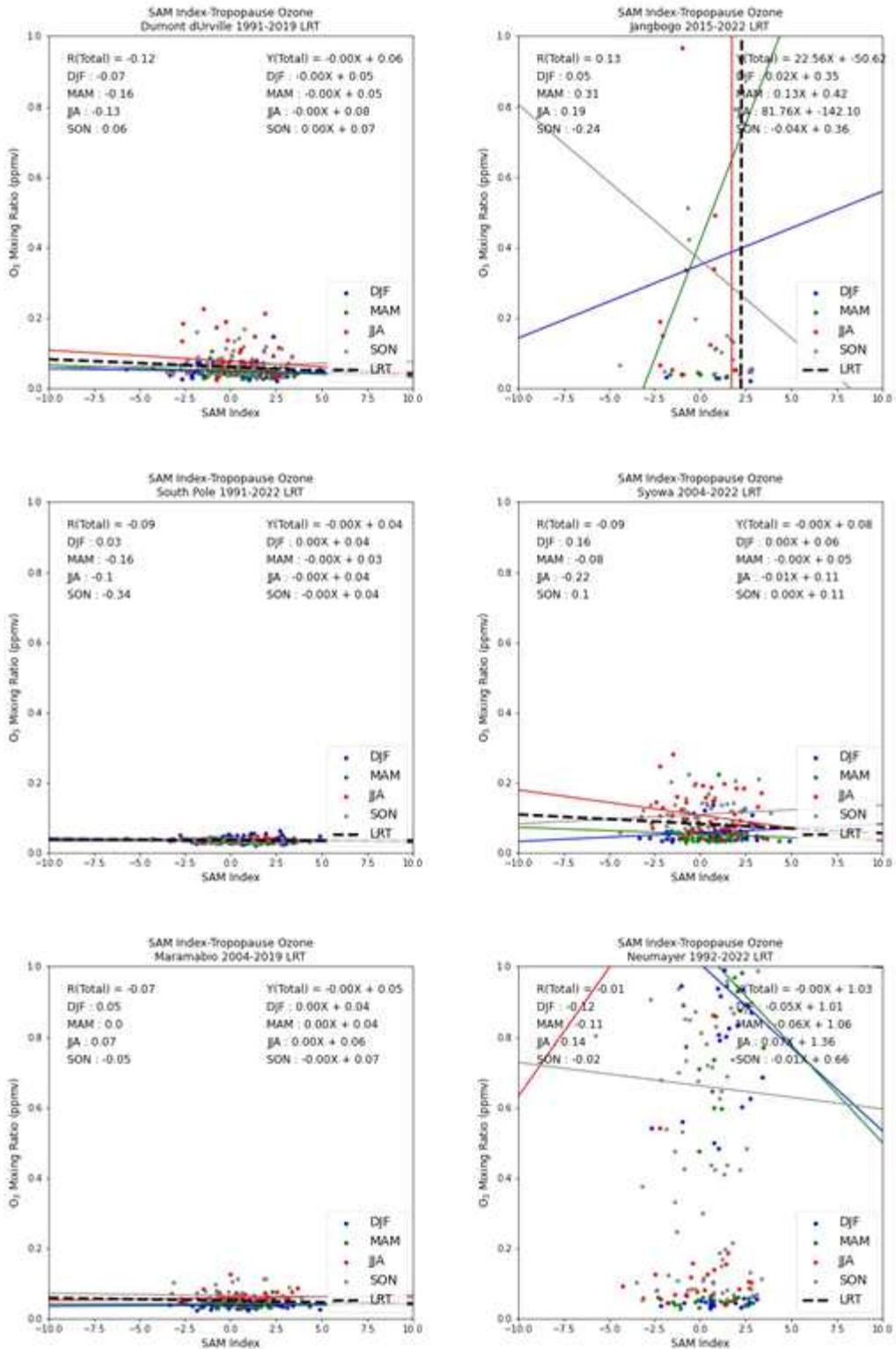


Fig. 3.2.63. SAM Index와 LRT 대류권계면 고도에 해당하는 오존 농도의 계절별 상관관계. 왼쪽에서 오른쪽, 위에서 아래 방향 차례대로 Dumont d'Urville, Jangbogo, South Pole, Syowa, Marambio, Neumayer 기지

3.2.2 인프라 기반 남극 대기 라돈 농도 시공간 변동성 비교 분석

가. 배경 및 목적

- 라돈 가스는 지각으로부터 발생하는 대표적인 자연 핵종으로 반감기가 약 3.4일이다. 이러한 라돈의 고유한 특성은 국지 규모에서의 대기경계층의 연직 혼합도의 변동 특성 조사나 지역 규모에서 기원지 추적 등의 연구에 널리 사용되어 오고 있다. 남빙양과 남극에서 관측되는 라돈 가스는 중위도 대륙지역에서 고위도 지역으로의 대기수송 과정을 이해하기 위한 대기추적자로 활용되고 있다. 또한 라돈은 대기 화학 모델의 성능을 평가하는 데 유용한 도구로 활용되어 왔다. 예로, 급격한 기후변화에 따른 대기순환장의 변화가 대기질 변화에 미치는 영향을 살펴보는 연구에 전지구 대기화학 모델이 널리 활용됨에 따라, 이러한 전구대기화학모델의 개발 및 개선 과정에서 라돈은 모델의 성능을 평가하기 위한 대기추적물질로 널리 사용되고 있다. 특히 남극 지역을 대상으로 대기대순환모델 결과 간의 큰 차이를 보임에 따라 남극지역에서 관측된 라돈자료는 모델 성능 평가에서의 활용도가 높아지고 있다. 하지만 여전히 여러 모델링 연구에서 모의된 남극 지역의 표층 라돈 농도는 관측된 라돈 농도와 계절적 특성에서 상당한 불일치가 존재한다. 현재까지 GCM 모델 재현 결과는 남위 50도 부근에서 관측되는 라돈가스 농도에 대해 과대평가하고 있는 반면, 계절 농도 변동 특성은 비교적 잘 재현하고 있다. 그러나 남극 해안지역과 내륙에서 관측된 라돈가스의 계절 변동 특성에 대한 GCM 모델 결과는 여전히 동계시즌에 높은 농도를 나타내고 있는 반면, 관측 결과는 하계시즌에 높은 경향이 있음을 보여준다. 이러한 연구들은 극지 기후변화에 대해 대기 순환장의 변화가 큰 역할을 한다는 점에서 기후변화 연구를 위해 모델 개선에 대한 시급성이 요구된다. 이 연구에서는 남극반도와 남극대륙 연안지역에 위치한 남극세종과학기지(2013년 2월부터)와 남극장보고과학기지(2015년 12월부터)에 설치된 대기 라돈가스 검출기의 관측 자료를 이용하여 라돈 농도의 시공간 변동을 평가하고, 특히 고동도 라돈가스 사례에 대한 원인 규명을 위해 역케미 모델과 CAM-Chem 전구대기화학모델을 이용하여 기원지를 분석하고자 한다.

나. 연구 수행 방법

- 본 연구에서는 남극반도 끝단(62°S)에 위치한 남극세종과학기지(이하, 세종기지)와 남극대륙 연안지역(74°S)의 남극장보고과학기지(이하, 장보고기지)에 호주핵과학연구소와 공동으로 대기 라돈 가스 검출기(Fig.3.2.64, Fig3.2.65)를 설치하여 1시간 간격으로 연속 관측하고 남극 대기 라돈가스의 농도 변동 특징을 조사하였다. 세종기지와 장보고기지에 설치된 대기 라돈가스 검출기는 검출한계가 $\sim 20\text{-}30 \text{ mBqm}^{-3}$ 으로 남극의 다른 관측지에서 운영 중인 검출기와 비교할 때 가장 감도가 뛰어나며 가장 짧은 간격 (30분-1시간)으로 연속 관측이 가능하다. 연속 관측을 위한 라돈 검출기의 교정은 월 1회 표준가스를 이용하여 수행되었다.



Fig. 3.2.64. 2013년 2월부터 세종기지에서 운영중인 라돈검출기



Fig. 3.2.65. 2016년 12월부터 장보고기지에서 운영중인 라돈검출기

- 본 연구 1단계 3년 연구기간(2020년-2022년) 동안 정량적 성과목표는 눈 폭풍 등의 악기상이 빈번히 발생하는 남극 대기환경 조건을 감안하여 라돈가스 검출기의 정상가동률 목표치를 50%(1년 기준)로 설정하였다. 연구기간 동안 정상관측 라돈가스의 수집율은 1차년도 (2020.1.1.- 2020.12.31.)와 2차년도 (2021.1.1.- 2021.12.31.)에 세종기지와 장보고기지에서 각각 $\sim 95\%$, $\sim 72\%$ 와 $\sim 88\%$, 97% 로 나타났다. 3차년도 (2022.1.1.- 2022.12.31.)의 경우 세종기지와 장보고기지에서 각각 $\sim 87\%$ 와 $\sim 97\%$ 자료가 수집되어 1단계 3년 동안 연간 정상가동률은 세종기지와 장보고기지에서 각각 평균 $90\pm 4\%$ 와 $89\pm 14\%$ 이었다.
- 남극과학기지 기반 대기 라돈 농도 시공간 변동성 분석은 다음과 같이 진행되었다.
(1) 두 남극기지에서 동일 기간(2020.1 ~ 2022.12) 관측된 대기 라돈가스 농도의 계절 변동 특징 분석 및 비교, 2) 하계 및 동계 기간 동일시기 남극과학기지 대기 라돈가스 농도 특징 비교, 특히, 고농도 라돈 가스에 대해 3) 세종기지의 경우

2013년부터 2016년까지 4년간 관측된 대기경계층 라돈 농도의 계절적 특성을 조사하고, CAM-Chem 전구대기화학모델을 이용한 전구 라돈 모의를 통해 세종기지 지역 대기경계층 라돈의 계절변화 특성에 대한 분석을 수행, 끝으로 4) 남극 기지 관측 고농도 라돈가스 유입경로 조사를 위해 대기 역궤적 모델을 사례별로 적용하여 대기 수송 경로를 조사하였다.

다. 결과

1) 남극 기지 기반 대기 라돈 농도 계절 변동 특징

- 정상관측 자료를 이용하여 연구 기간 동안 세종기지와 장보고기지에서 측정된 라돈가스의 농도 변동성 특징을 10, 50, 90 percentile 농도 순위별로 조사하였다. 장보고기지의 고농도 라돈가스 (90 percentile) 농도는 여름철에 다른 계절에 비해 뚜렷이 증가 ($> \sim 2000 \text{ mBq/m}^3$)하고 월별 농도 변동범위는 $\sim 500\text{--}1000 \text{ mBq/m}^3$ 으로 나타났다. 중간농도 (50 percentile)와 평균농도의 변동 특징 역시 하계시즌 (10-2월) 동안 동계시즌에 비해 농도가 증가하는 것으로 나타나 고농도 라돈가스 분포 특징과 비슷하게 나타났다. 그렇지만 월별 농도변동 범위는 500 mBq/m^3 미만으로 고농도 라돈가스의 농도변동 범위에 비해 뚜렷이 감소하였다. 세종기지에서 관측된 고농도 라돈가스 (90 percentile)의 경우는 하계시즌에 비해 동계시즌 (5-7월) 동안 농도가 증가하였다. 중간 농도 (50 percentile)와 저농도 (10 percentile)의 경우 역시 하계시즌에 비해 동계시즌 동안 농도가 증가하는 것으로 조사되었다. 그렇지만 고농도 라돈가스 농도변동 범위에 비해 농도 변화 특징이 뚜렷하지 않고 농도변동 범위 역시 작은 것으로 나타나 장보고기지 관측 결과와 비슷한 특징을 보였다 (Fig.3.2.66-68). 따라서 세종기지의 경우 동계시즌 동안 하계시즌에 비해 대기 라돈가스의 농도가 높고, 장보고기지의 경우는 하계시즌 동안 동계시즌에 비해 높은 것으로 조사되어 세종기지와 장보고기지에서 관측된 라돈가스의 계절 농도 변동성은 서로 반대되는 특징을 보였다. 이와 같은 세종기지와 장보고기지에서 관측된 대기 라돈가스 농도의 계절 변동성은 공통적으로 고농도 범위에서 뚜렷한 것을 알 수 있다. 중간 농도와 저농도 범위의 경우 고농도 범위에 비해 계절 농도 변동 특징이 뚜렷하지 않았지만 고농도 대기 라돈가스의 계절변동성과 대체로 일치하였다. 남극기지 평균 농도의 계절 변동성 역시 공통적으로 고농도 대기 라돈가스의 계절변동성과 일치하는 것으로 조사되었다. 그렇지만 1단계 3년 연구기간 동안

라돈가스의 계절 변동성은 연도별로 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 예를 들어, 장보고기지의 계절 변동성 특징은 1, 3차년도에 비슷한 것으로 나타났으나 2차년도(2021년)의 경우 1, 3차년도에 비해 동계시즌(5월과 8월)에도 비교적 고농도 사례가 증가하였다. 또한 세종기지 1차년도(2020년)의 경우 동계시즌 동안 대기 라돈가스 농도가 증가하는 계절 변동성은 유지되었으나 1-2월 동안에 $\sim 150\text{mBq/m}^3$ 으로 관측되어 2, 3차년도 1-2월 측정결과 ($<100\text{mBq/m}^3$)에 비해 뚜렷이 증가한 것을 알 수 있었다 (Fig. 3.2.66-67).

- 연구기간 동안 세종기지와 장보고기지에서 관측된 라돈가스 농도의 월별 중간농도 값 (median value)은 각각 $\sim 50-80$, $\sim 500-1000 \text{ mBq/m}^3$ 으로 장보고기지에서 측정된 중간농도 값이 세종기지 관측결과보다 ~ 10 배 정도 높은 것으로 나타났다. 세종기지 라돈가스의 중간농도 범위는 남빙양 (Southern Ocean)에서 관측되는 배경농도 값($\sim 60 \text{ mBq/m}^3$)과 비슷한 수준이다. 세종기지는 남극 극저압대 영향을 받는 킹조지섬(62°S)에 위치하고 있기 때문에 남빙양에서 발생하는 저기압 폭풍과 서풍에 의한 영향을 지속적으로 받기 때문에 남빙양 배경대기의 영향이 매우 크다. 또한 세종기지는 낮과 밤 시간동안 대기혼합고의 변화가 크지 않고 연중 강한 풍속에 의해 대기확산이 매우 효과적이다. 세종기지 대기 라돈가스의 농도변동성은 킹조지섬의 라돈가스 배출강도 ($\sim 0.077 \pm 0.048 \text{ atoms cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$, 하계시즌)에 비해 배출강도가 매우 높은 남미 대륙 ($\sim 1.0 \text{ atoms cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$)과 배출강도가 매우 낮은 남빙양 ($\sim 0.0025 \text{ atoms cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$)을 통과하는 대기 수송 빈도에 매우 민감하다 (Chambers et al., 2014; Jun et al., 2022). 세종기지는 남미대륙과 $\sim 1000 \text{ km}$ 정도 떨어져 있기 때문에 남미 대륙을 통과한 대기가 킹조지섬 지역으로 수송될 수 있다. 이 경우 짧은 시간 동안 고농도 대기 라돈가스가 측정되는 라돈폭풍 (Radonic storm event) 현상이 나타나고 특히 가을철부터 겨울철 기간 동안 빈도가 증가하는 것으로 조사되었다. 그리고 하계시즌 동안에는 표층 지각의 노출 면적이 증가하는 남극반도 ($\sim 0.07 \text{ atoms cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$) 해안 지역을 통과하여 세종기지로 유입되는 대기수송 빈도가 증가하고 세종기지에서 관측되는 라돈가스의 농도분포에 영향을 미칠 수 있다.
- 장보고기지 라돈가스 농도 값은 남극 종단산맥이 통과하는 남극 북빅토리아랜드의 테라노바 만에 위치한 장보고기지 위치($\sim 74^\circ\text{S}$)와 밀접한 관련이 있다. 장보고기지는 지리적인 환경 특성으로 동쪽 방향으로 로스해가, 나머지 방향으로 산악지대가 광범위하게 분포하고 있다. 장보고기지는 세종기지에 비해 남빙양에서 발생하는

저기압의 영향이 약하고 남빙양 배경대기가 직접 유입되는 대기수송 빈도가 매우 낮다. 그리고 남극내륙 고기압의 영향으로 대기가 정체되어 대기확산 효과가 작고, 하계시즌 동안은 낮과 밤 시간의 대기혼합도의 변화가 뚜렷하다. 따라서 장보고기지 대기 라돈가스의 농도변동성은 남극 북빅토리아랜드 산악지역 지각 표면의 라돈가스 배출 특성, 수송효과, 그리고 기상요인을 종합적으로 고려해야 한다. 남극대륙 라돈가스 배출량은 $\sim 0 \text{ atoms cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ 로 매우 낮은 값으로 가정되고 있으나 장보고기지 대기 라돈가스 관측결과를 이용하여 추정된 배출량은 하계시즌 동안 $\sim 0.09\text{-}0.11 \text{ atoms cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ 으로 나타났다 (Chamber et al., 2017). 이와 같은 배출량 세기는 세종기지가 위치한 킹조지섬과 남극반도 해안지역 배출량과 비슷한 것으로 하계시즌 동안 북빅토리아랜드 산악지역 지각으로부터 배출되는 라돈가스의 기여도가 예상보다 더욱 증가할 것으로 기대된다. 장보고기지의 경우 중위도 지역에 위치한 호주대륙과 뉴질랜드로부터 $\sim 3000 \text{ km}$ 이상 떨어져있기 때문에 태평양 지역에 위치한 중위도 배출지역으로부터 장보고기지까지 대기수송이 ~ 10 일 이상으로 길다. 따라서 대기 수송과정 동안 대기 확산과 라돈가스의 지속적인 방사성 붕괴 (반감기: $\sim 3.4 \text{ days}$)로 인해 중위도 지역에서 배출한 라돈가스의 대기수송에 의한 영향은 낮을 것으로 판단된다.

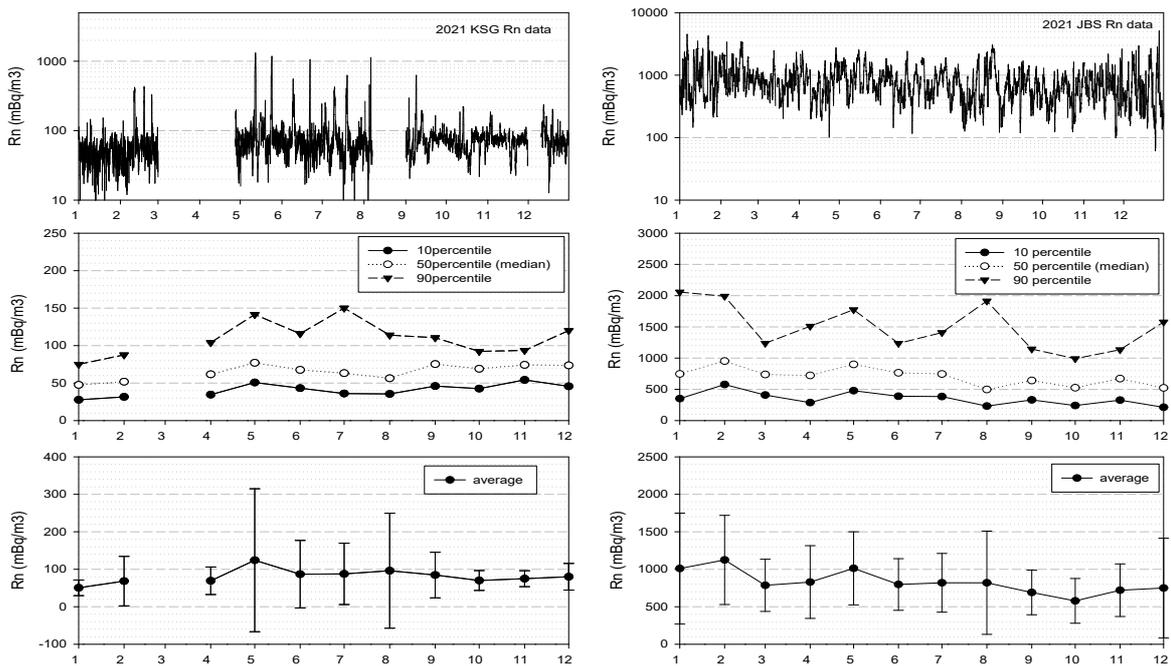


Fig. 3.2.66. 2020년 세종기지와 장보고기지에서 측정된 라돈가스의 농도변화

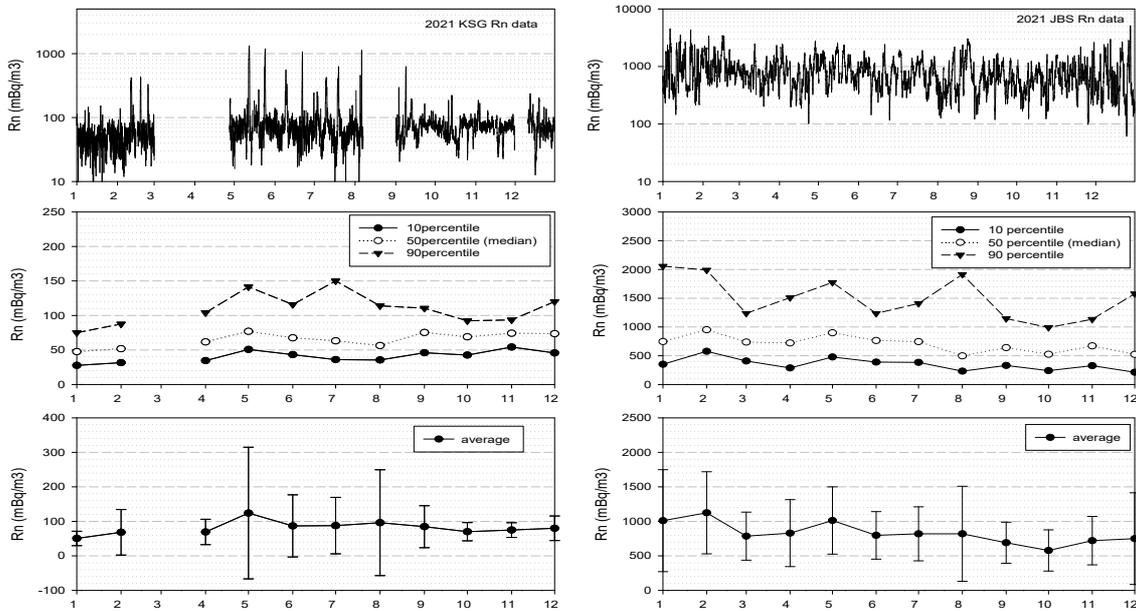


Fig. 3.2.67. 2021년 세종기지와 장보고기지에서 측정된 라돈 가스의 농도 변화

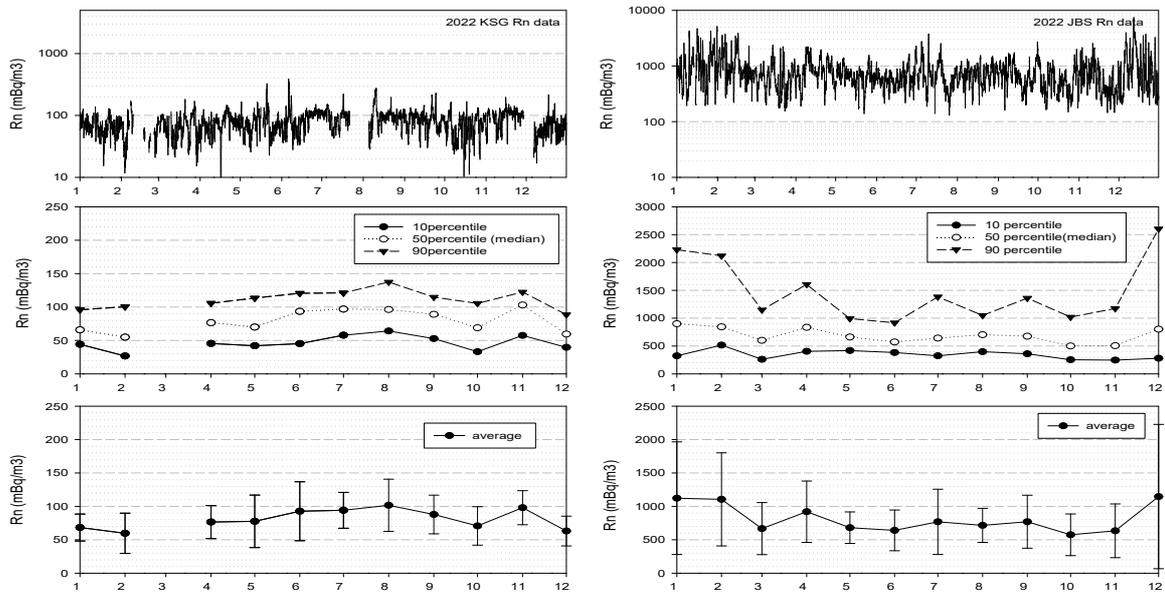


Fig. 3.2.68. 2022년 세종기지와 장보고기지에서 측정된 라돈 가스의 농도 변화

2) 하계 및 동계 시즌 남극 과학기지 라돈가스 농도 특성 비교

○ 본 연구에서는 남극 세종기지 (62°S)와 장보고기지 (74°S)에서 하계기간 (2019.12-2020.2)과 동계기간 (2020.6-8) 동안 동일 시기에 관측된 라돈가스 농도 분포 특성을 비교하였다. 남극의 하계시즌과 동계시즌은 남빙양의 해빙 면적과 남극대륙 지각의 노출 면적이 가장 대조적인 두 시즌으로 남빙양 해수면과 남극대륙 지각의

노출지면으로부터 라돈가스 배출 특성이 매우 다를 것으로 기대된다. 하계시즌 동안은 대기 기온이 최대로 증가함으로 남극대륙 지각 노출 면적이 최대로 증가하고 동시에 해빙 면적은 최소로 감소하기 때문에 남빙양 해수면의 노출 면적 또한 최대로 증가한다. 따라서 하계시즌 동안은 남극대륙과 남빙양으로부터 방출되는 라돈 가스의 배출 세기가 최대로 증가하고 동계시즌 동안은 최소로 감소한다.

- 세종기지 라돈가스의 월별 평균값 (average value)은 하계시즌과 동계시즌 동안 각각 $\sim 60\text{--}90 \text{ mBq/m}^3$, $\sim 70\text{--}100 \text{ mBq/m}^3$, 장보고기지의 경우 각각 $\sim 670\text{--}1300 \text{ mBq/m}^3$, $\sim 650\text{--}710 \text{ mBq/m}^3$ 로 나타났다(Table. 3.2.12, Fig.3.2.69). 따라서 세종기지의 경우 동계시즌에 다소 높은 농도를 보여주고 있으나 농도 차가 매우 작다. 장보고기지의 경우 하계시즌에 농도가 증가한 것을 알 수 있고 특히 12월에 비해 1, 2월에 뚜렷이 증가하였다. 장보고기지 라돈가스 농도는 세종기지 관측결과에 비해 하계시즌과 동계시즌에 각각 ~ 13 배, ~ 9 배 높은 것으로 나타났다. 라돈 가스의 농도 빈도분포 (frequency distribution)를 조사한 결과 최빈값 (mode value)은 세종기지의 경우 하계시즌과 동계시즌동안 $\sim 60 \text{ mBq/m}^3$, 장보고기지의 경우 하계시즌 동안 ~ 400 , 동계시즌 동안 $\sim 600 \text{ mBq/m}^3$ 로 각각 조사되었다. 남극기지에서 관측된 라돈가스 농도분포는 하계시즌과 동계시즌 모두 좌편향 (positive skewness) 분포 특징으로 나타나 상대적으로 빈도는 낮지만 고농도 사례가 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 장보고기지의 경우는 동계시즌과 비교할 때 하계시즌 동안 $\sim 1800 \text{ mBq/m}^3$ 이상의 농도범위에 대한 측정 빈도가 뚜렷이 증가하는 것으로 조사되었다 (Fig.3.2.70).
- 낮과 밤 시간 동안 라돈가스의 농도 변동 특성을 조사한 결과, 하계시즌 동안 세종기지는 03-09h, 장보고기지는 10-12h에 최고 농도를 보였고, 최저농도는 각각 13-18h, 21-02h에 측정되었다. 하계시즌 동안 최고농도와 최저농도 차이는 세종기지의 경우 $\sim 30 \text{ mBq/m}^3$, 장보고기지의 경우 $\sim 400 \text{ mBq/m}^3$ 로 나타났다. 동계시즌은 하계시즌의 낮과 밤 시간 농도 변화 특징과 매우 다른 것으로 나타났는데 세종기지와 장보고기지 모두 낮 시간과 밤 시간 동안 농도차가 뚜렷하지 않았다. 공통적으로 00-03h 동안 농도가 증가하는 것으로 나타났고, 이후 감소한 후 낮 시간 동안은 농도 변화가 거의 없었다. 동계시즌 동안 최고농도와 최저농도 차이는 세종기지에서 $\sim 15 \text{ mBq/m}^3$, 장보고과학기지에서 $\sim 70 \text{ mBq/m}^3$ 로 조사되었다. 따라서 하계시즌과 동계시즌 동안 최고, 최저 농도 차이를 비교할 때 동계시즌 동안 하계시즌에 비해 세종기지와 장보고기지에서 각각 50%, 83%가 감소한 것으로

나타났다 (Fig.3.2.71).

- 측정지점의 대기온도의 낮 시간과 밤 시간 동안 변화 특징은 세종기지와 장보고기지 모두 동계시즌에 비해 하계시즌 동안 매우 뚜렷한 것으로 나타났다. 이와 같은 낮, 밤 시간 동안의 대기온도 변화는 대기혼합고에 영향을 미칠 수 있는데 동계시즌에 비해 하계시즌 동안 낮과 밤 시간 동안 대기혼합고의 차가 더욱 클 것으로 기대된다. 하계시즌 동안 세종기지 경우 낮 시간 동안 혼합고의 높이가 증가하고, 풍속 또한 증가함으로 낮 시간 동안 밤 시간에 비해 대기 확산이 유리하다. 그렇지만 장보고기지의 경우 혼합고가 가장 낮은 밤 시간에 최고 풍속 (~03-06h)을 나타낸 후 낮 시간 동안은 오히려 풍속이 지속적으로 감소하여 세종기지와 다른 특징을 보였다. 동계시즌은 공통적으로 하계시즌에 비해 낮과 밤 시간 동안 대기혼합고의 변화가 뚜렷하지 않고 밤 시간에 비해 낮 시간에 풍속이 증가하였다.
- 대기 라돈가스는 지각을 구성하고 있는 우라늄 및 토륨 계열의 방사성 원소들의 지속적인 방사능 붕괴과정을 거친 후 지면에서 배출되는 자연 핵종으로 측정소 주변 지면에서도 지속적으로 배출된다. 따라서 대기 확산 효과가 약한 기상조건에서는 관측소 주변 대기 라돈가스의 영향이 증가할 수 있다. 풍속 변화에 따른 라돈가스의 농도변화를 농도 순위별로 조사한 결과 풍속이 감소함에 따라 대기 라돈가스의 농도가 서서히 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 최빈값에 가까운 중간 농도 값의 라돈가스 농도 변화를 조사한 결과 하계시즌 동안 세종기지와 장보고기지에서 각각 ~2-3 m/s, ~3-4 m/s 미만, 동계시즌에 각각 ~1-2 m/s, 2-3 m/s 미만의 풍속에서 대기 라돈가스의 농도가 서서히 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 특징은 남극기지 모두 지각 노출 면적이 증가하는 하계시즌 동안 동계시즌에 비해 더욱 뚜렷한 것으로 나타났다 (Fig.3.2.72).

Table. 3.2.12. 여름철(2019년 12월 ~ 2020년 2월) 과 겨울철(2020년 06월 ~ 08월) 세종기지와 장보고기지에서 측정된 라돈 가스의 농도, unit: mBq/m³

Month	Site	Ave.	S.D.	10th	25th	50th	75th	90th	max	N
2019.12	KSS	60.3	38.3	27.5	38.8	51.3	70.3	95.8	316.6	704
	JBG	667.5	662.8	135.1	221.7	375.0	854.6	1725.6	3535.8	709
2020.1	KSS	77.5	52.2	35.2	47.0	62.6	88.9	139.0	377.5	731
	JBG	1086.4	1009.5	295.3	377.5	786.9	1471.3	2193.8	6315.3	733
2020.2	KSS	89.0	61.7	40.5	51.7	69.7	97.7	170.6	478.1	661
	JBG	1303.5	950.7	397.5	508.2	1057.7	1852.4	2619.0	6093.6	651
2020.6	KSS	102.2	76.3	42.6	52.5	69.7	133.7	212.3	764.3	686
	JBG	708.1	367.0	351.2	441.2	605.5	878.9	1204.9	2437.8	684
2020.7	KSS	71.6	33.5	44.2	52.5	64.8	80.4	102.5	378.0	734
	JBG	702.6	522.8	237.3	362.8	536.3	850.0	1429.7	2925.0	734
2020.8	KSS	96.3	166.7	33.6	40.2	50.8	64.0	122.2	1009.5	734
	JBG	654.5	382.5	252.0	382.1	550.7	877.1	1223.6	2217.0	734

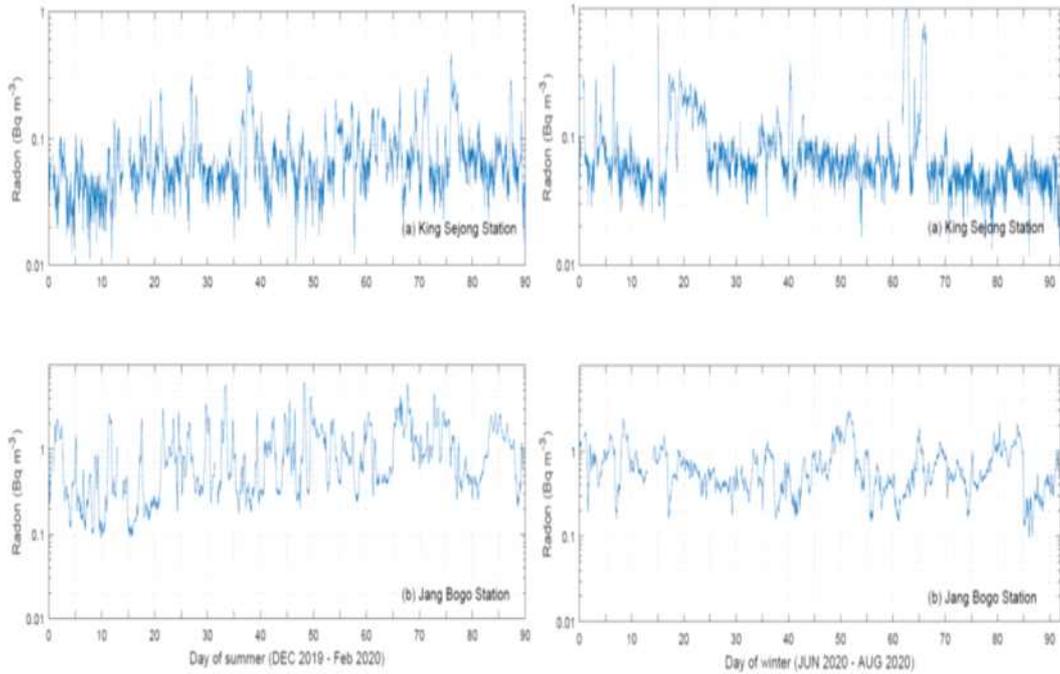


Fig. 3.2.69. 여름철(2019년 12월 ~ 2020년 2월)과 겨울철(2020년 06월 ~ 08월) 세종기지과 장보고기지에서 측정된 대기 라돈 가스의 농도변화

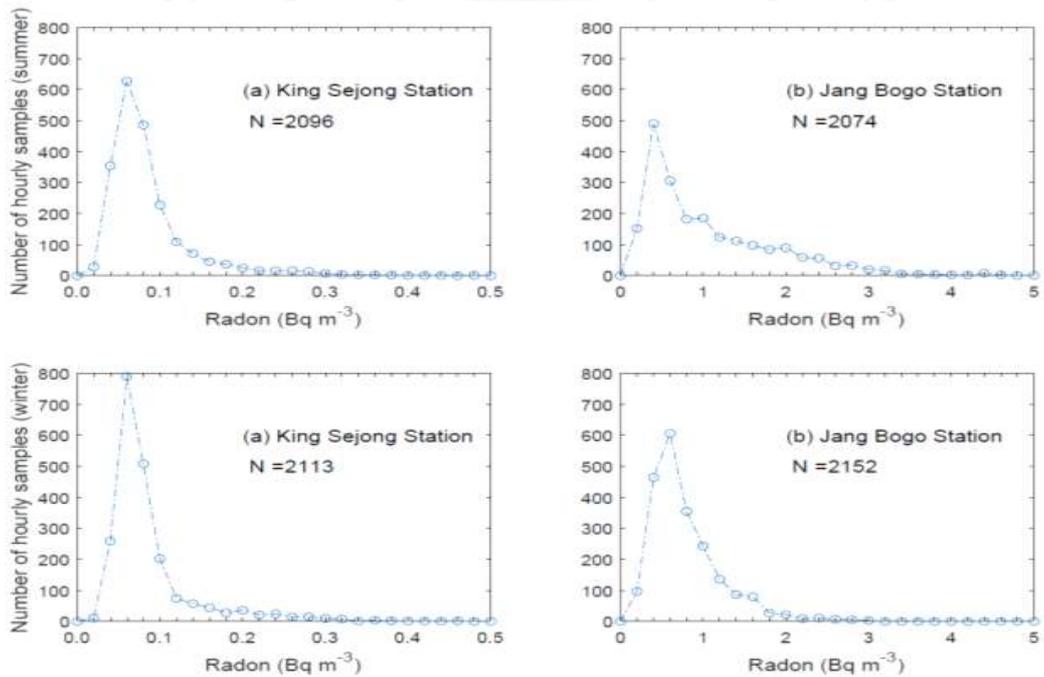


Fig. 3.2.70. 세종기지과 장보고기지에서 측정된 라돈 가스의 여름철(위)과 겨울철(아래)의 빈도 분포

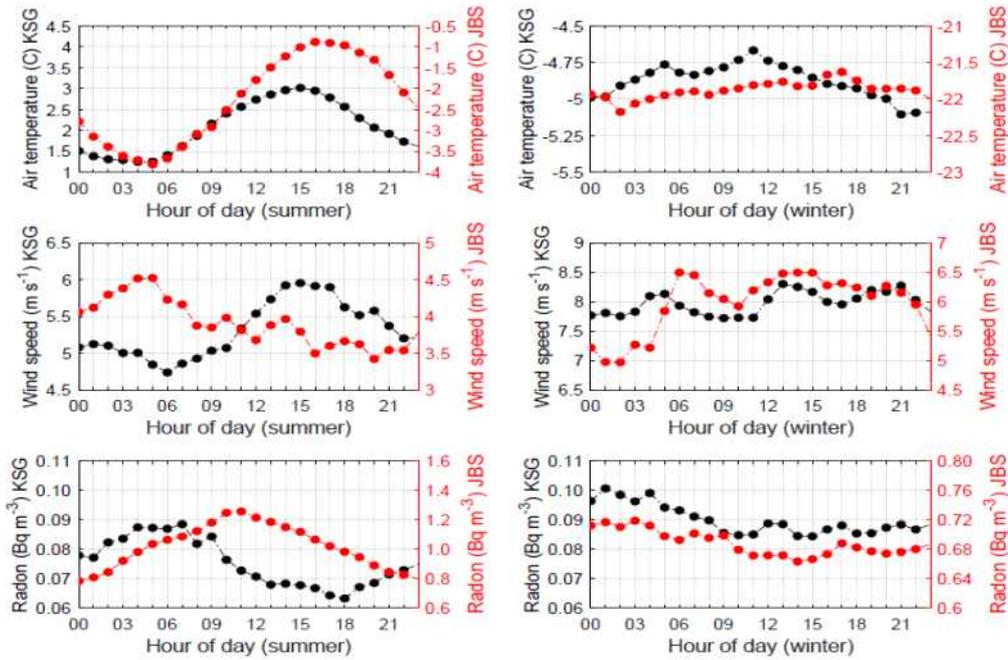


Fig. 3.2.71. 세종기지와 장보고기지의 여름철(좌)과 겨울철(우) 평균 대기온도, 풍속, 라돈 가스의 일변동

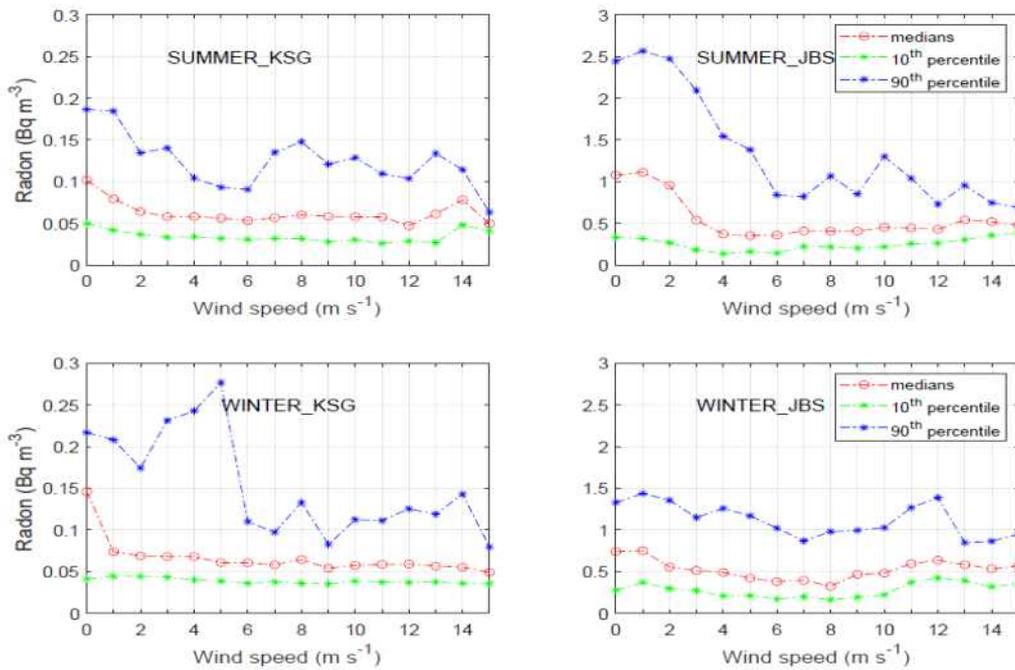


Fig. 3.2.72. 세종기지(좌)와 장보고기지(우)의 풍속에 따른 라돈 가스 농도의 변화. 여름철(위) 겨울철(아래)

3) 세종기지 관측 라돈가스 유입경로 조사 및 분석

가) 역궤적 분석

- 세종기지에서 관측된 대기 라돈가스 농도의 계절변동성은 동계시즌 동안 대기 라돈가스 농도가 하계시즌에 비해 높은 특성을 보여주고 있다. 그리고 이와 같은 계절변동성의 연간 차이는 거의 없는 것으로 조사되고 있다. 그렇지만 동계시즌 동안 월별 농도 변동성은 측정시기에 따라 다소 변화될 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 2013.2-2016.12월과 2018.5-2021.4월 측정기간 동안 동계시즌에 나타난 대기 라돈가스 월 농도변동성의 변화 특징을 조사하였다 (Fig.3.2.73). 2013.2-2016.12월 측정기간 동안 1월부터 서서히 라돈가스 농도가 증가하여 5월에 가장 높은 농도가 관측되고 6월에 감소한 후 7-10월 동안 6월 농도에 비해 높은 농도가 유지되는 것을 알 수 있다. 11-2월 기간 동안은 연중 다른 월에 비해 낮은 농도가 관측되고 고농도 라돈 관측 현상은 3-10월까지 집중되어 나타났다. 중간농도 값 (median value)의 월 변동성은 연중 2-5월에 농도가 증가하였다. 2018.5-2021.4월 측정기간 동안 1월부터 6월까지 지속적으로 농도가 증가한 후 6-8월 동안 비슷한 농도 값을 유지하였고 이후 지속적으로 감소하였다. 고농도 라돈 관측 현상은 4-9월 기간 동안 집중되었고 중간농도 값의 월 변동성은 2-7월 동안 농도가 증가한 것으로 나타났다. 측정기간 동안 공통적으로 고농도 라돈 관측 현상이 집중되는 기간에는 양으로 치우치는 분포 (positively skewed distribution) 특성이 매우 뚜렷하고, 하계 기간을 중심으로 평균농도 값과 중간농도 값이 비슷하고, 양으로 치우치는 분포 특성은 매우 약화되는 것을 알 수 있다.
- 대기 라돈가스의 계절변동성은 라돈가스 배출강도 (emission flux rate)의 변동성, 수직혼합과정, 그리고 대기수송 과정 요인들에 의해 영향을 받는다. 이러한 요인들 가운데 가을철부터 겨울철 기간 동안 세종기지에서 관측되는 고농도 대기 라돈가스 현상은 특히 남미대륙을 경유하는 대기수송에 매우 민감하다(Jun et al., 2022). 본 연구에서는 고농도 (90 percentile) 라돈가스 관측일에 대해 HYSPLIT 모델링 (출발고도: 300m, 계산 시간: 5일)을 수행하여 대기 기단의 역궤적 경로를 계산하고 계산된 역궤적을 군집분석하여 측정기간 동안 월별, 계절별 대표적인 대기수송 경로를 조사하였다 (Fig.3.2.74-76). 조사기간 동안 대기수송 경로를 비교한 결과 다른 계절에 비해 가을철과 겨울철 동안 대기수송 경로가 다소 변화되었음을 확인할 수 있었다. 특히 2013.2-2016.12 기간 동안 5월의 대기수송 경로 특징은 2018.5-2021.4

기간 동안 나타나지 않았다. 2013.2-2016.12월 기간 동안 가을철 대기수송 경로 가운데 (2)번과 (3)번 궤적은 각각 24%와 30%의 빈도로 남미대륙을 직접 통과하는 것을 확인하였다. 특히 월별 조사 결과 가운데 5월 (1)번 경로는 71%의 빈도로 남미대륙을 경유하여 ~2.5일 동안 통과함으로써 5월 고농도 대기라돈 현상과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 2018.5-2021.4월 기간 동안 겨울철 대기수송 경로 가운데 (2)번 궤적은 20% 빈도로 남미대륙을 통과하는 것으로 나타났다. 비록 빈도는 다소 낮지만 겨울철 남미 대륙을 직접 통과하는 대기수송 경로는 2013.2-2016.12 기간에는 나타나지 않았다. 그리고 월별 조사 결과 가운데 특히 7월 (2)번과 (3) 경로는 각각 32%, 24%의 빈도로 남미대륙을 ~1.5-2.5일 동안 경유하여 통과하는

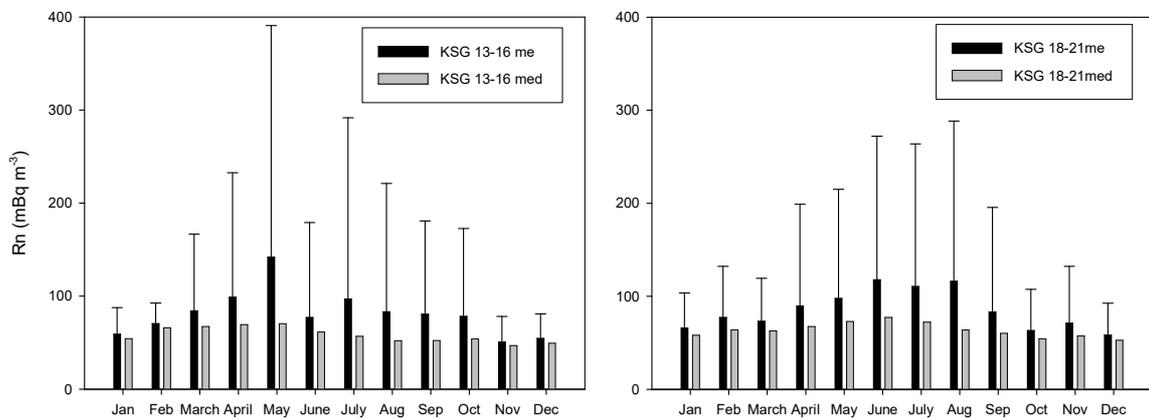
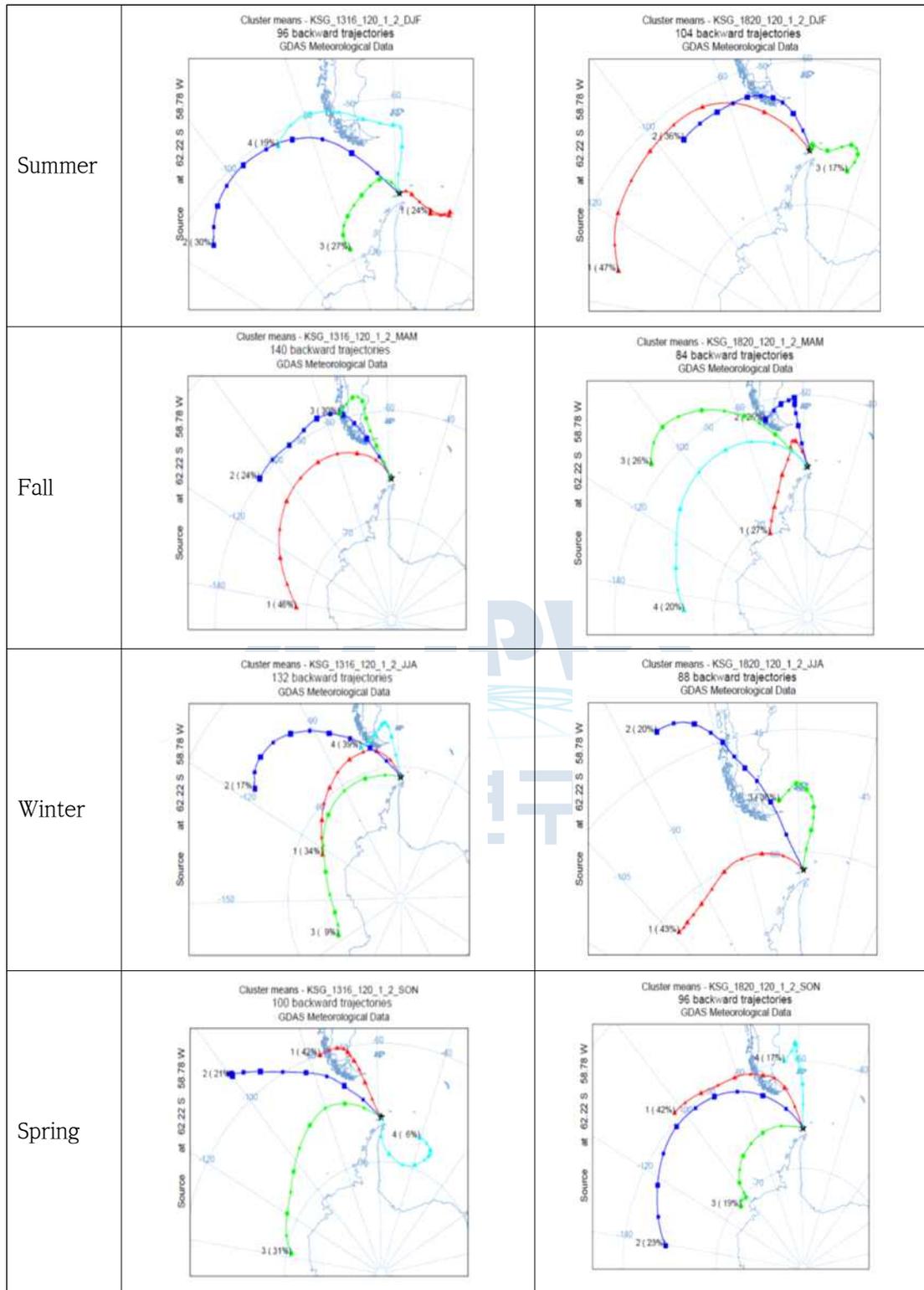


Fig. 3.2.73. 세종기지 라돈 가스 농도의 계절적 변화,(좌) 2013년 2월 ~ 2016년 12월, (우) 2018년 5월 ~ 2021년 4월, me: 평균값, med: 중앙값



(a)

(b)

Fig. 3.2.74. 계절별 역계적 군집분석, (a)2013년 2월 ~ 2016년 12월, (b)2018년 5월 ~ 2021년 4월

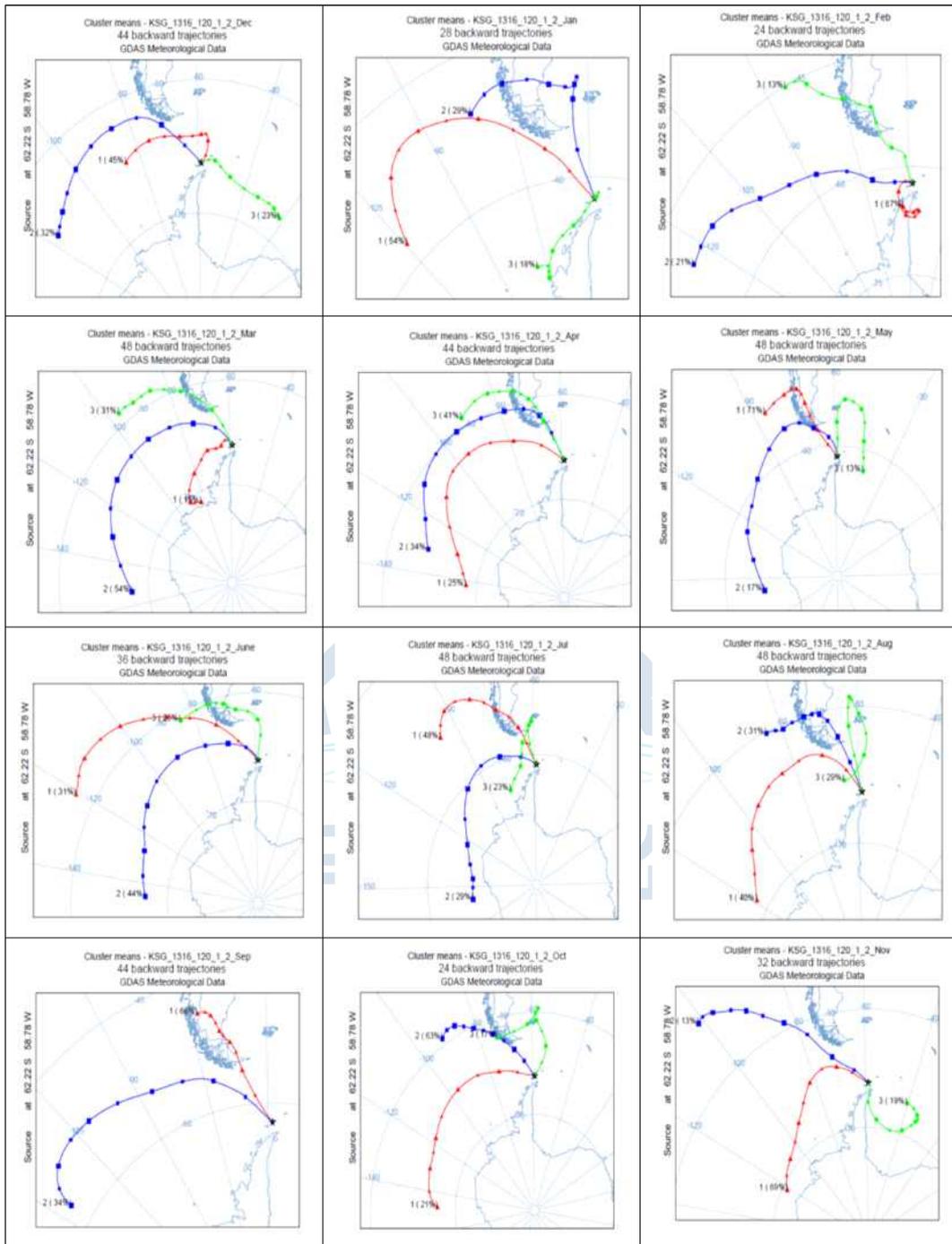


Fig. 3.2.75. 월별 역궤적 군집분석(2013년 2월 ~ 2016년 12월)

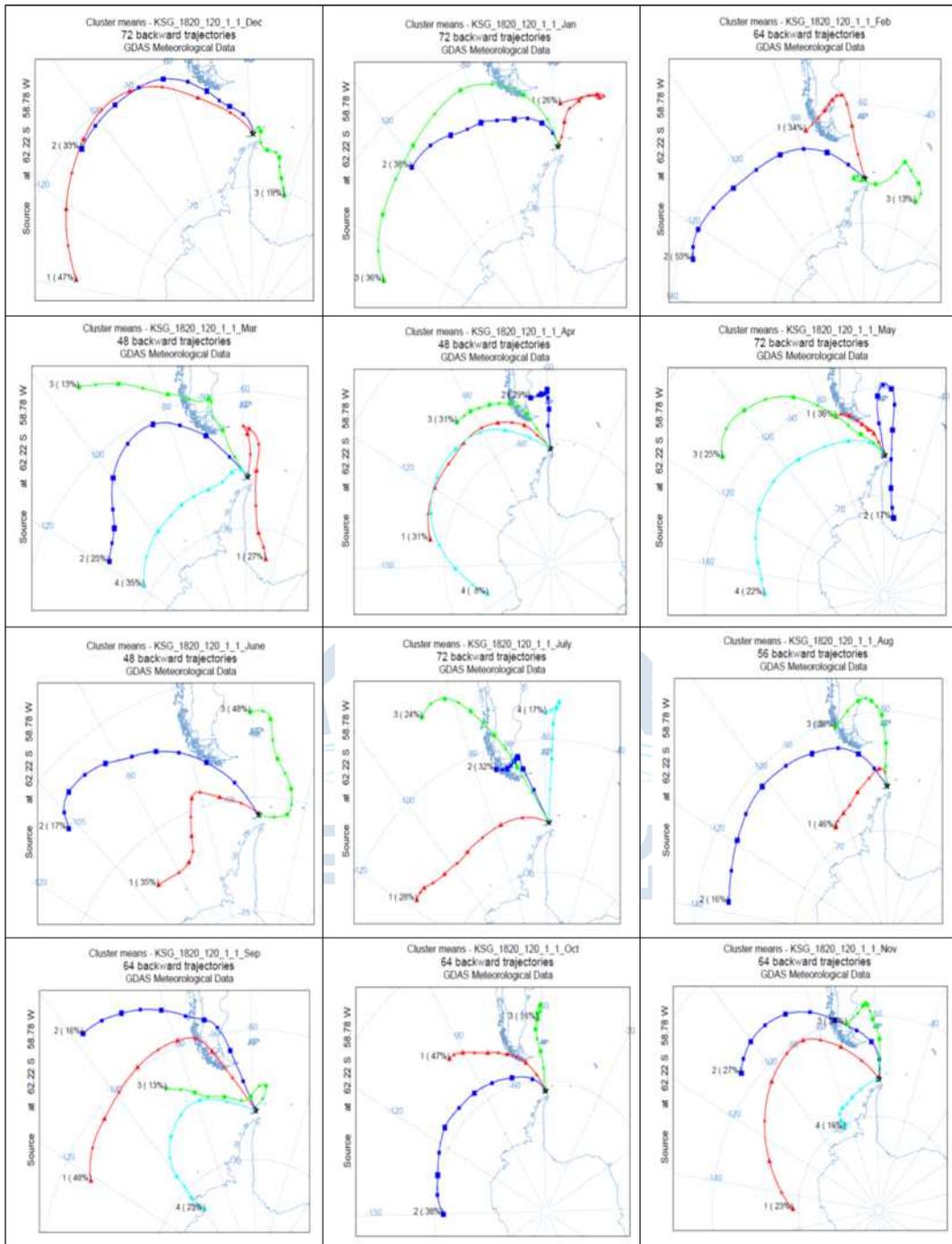


Fig. 3.2.76. 월별 역궤적 군집분석(2018년 5월 ~ 2021년 4월)

나) 라돈 농도 계절변동성 재현 모델 민감도 파악

- 라돈의 고유한 물리적 및 화학적 특성은 대기 화학 모델의 성능을 평가하는 데 유용한 도구로 활용되어 왔다. 예로, 국지 규모에서의 대기경계층의 연직 혼합고의 변동 특성 조사나 지역 규모에서 기원지 추적 등의 연구에 널리 사용되어 오고 있다.

급격한 기후변화에 따른 대기순환장의 변화가 대기질 변화에 미치는 영향을 살펴보는 연구에 전지구 대기화학 모델이 널리 활용됨에 따라, 이러한 전구대기화학모델의 개발 및 개선 과정에서 라돈은 모델의 성능을 평가하기 위한 대기추적물질로 널리 사용되고 있다. 특히 남극 지역에서 크게 나타나는 대기대순환모델의 모델간 불확실성에 따라 남극지역에서 관측된 라돈자료의 모델 성능 평가에서의 활용도가 높아지고 있다. 하지만 기존 여러 모델링 연구에서 모의된 남극 지역의 표층 라돈 농도는 관측된 라돈 농도와 계절적 특성에서 상당한 불일치가 존재함이 보고된 바 있다. 이에 세종기지에서 2013년부터 2016년까지 4년간 관측된 대기경계층 라돈 농도의 계절적 특성을 조사하고, CAM-Chem 전구대기화학모델을 이용한 전구 라돈 모의를 통해 세종기지 지역 대기경계층 라돈의 계절변화 특성에 대한 분석을 수행하였다. 라돈농도의 계절성과 관련된 대기순환 패턴은 유럽중기예측센터 (European Center for Medium-Range Weather Forecasts; ECMWF) ERA-5 재분석자료에서 일별 해면기압과 대기경계층고도를 이용하였다. 재분석자료의 대기경계층고도는 관측이 아닌 모델 예측 변수로 변수내에 불확실성이 존재하지만, 다양한 재분석 자료 중에서 ERA-5가 관측과 유사한 특성을 보인다는 Guo et al. (2021)의 보고에 따라 ERA-5 자료를 사용하였다.

- 2013년부터 2016년까지의 세종기지에서 관측된 대기경계층 라돈의 월평균 변화 특성을 살펴본 결과, 11월부터 2월까지의 낮은 일평균 라돈 농도가 일관되게 관찰된다(Fig.3.2.76) 이와 대조적으로 3월부터 10월까지는 일평균 라돈 농도가 높은 사례가 많이 발생한다. 대부분의 고농도 사례는 짧은 시간동안 발생하여 하루 이상 지속되지 않았다. 이러한 라돈 고농도 사례들은 세종기지의 지역에서 배출된 라돈에 의해 발생하는 것이 아니라 타지역에서 배출된 라돈이 세종기지로 수송됨에 따라 발생된다는 것이 기존 연구에서 제시된 바 있다 (Chambers et al., 2017). 4년 기간 평균의 매달 통계적 특성은 Fig.3.2.76 (b)에서 확인할 수 있다. 세종기지에서 관측된 라돈의 연평균 라돈 농도, 중간값 농도는 각각 80.5와 59.7 mBq m^{-3} 이다. 중간값보다 크게 나타나는 평균값은 라돈 농도 분포가 양으로 편향되어 있음을 나타내며, 이러한 특성은 3월에서 10월까지 일관되게 나타난다. 중간값은 가을철에 높게 나타나지만 약한 계절적 변동을 보이며, 이에 반해 평균값은 큰 월별 변동성을 보이며 특히 3월에서 10월까지 높게 나타나는 강한 계절성을 보인다. 이러한 평균값의 계절변화는 90번째 백분위수와 유사하며, 이는

고농도 라돈 현상의 발생 빈도가 이러한 평균라돈 농도의 큰 계절변동성의 주요 원인을 시사한다. 이러한 고농도 라돈 사례의 기여 특성을 파악하기 위해 전체 기간에서 일일 라돈 농도의 90백분위수 이상인 사례를 분석하였다. 이에 따라 일일 평균 라돈 농도가 109.0 mBq m^{-3} 보다 높은 경우는 고농도 사례로 분류하였다. Fig.3.2.76 (c)는 이러한 고농도 사례의 월별 발생 빈도로, 3월부터 10월까지 월 평균 발생 빈도는 5월과 6월을 제외하고 3~4회로 나타나며, 5월에는 약 6.5일 고농도 사례가 발생하였다. 이는 5월에 약 5일에 한 번씩 고농도 사례가 발생함을 의미한다.

- 대기화학모델이 접합된 전지구대기모형 CAM4 (Community Atmosphere Model version 4) (이후 CAM-Chem)을 활용하여 남극 반도에서 라돈의 계절성을 모의하였다. 특히 원격지 라돈 배출량의 세종기지 라돈 계절변화에의 기여민감도를 파악하기 위하여 CAM-Chem의 온라인 및 오프라인 설정을 모두 활용하여 라돈의 전구 분포를 모의하였다. CAM-Chem의 온라인 실험은 대기중 화학물질의 반응들과 대기장이 상호 작용한다. 이러한 온라인 실험은 1982년부터 2001년간의 평년조건에서 산출된 해수면온도, 해빙 등의 조건을 사용하여 50년간 수행되었다. 오프라인 시뮬레이션은 미국 NASA에서 생산된 Goddard Earth Observing System Model Version 5 (GEOS-5) 분석장에서 산출된 2013~2016년 6시간 간격 대기장을 활용하여 수행되었다. 온라인, 오프라인 실험 모두 $1.9^\circ \times 2.5^\circ$ 의 수평 해상도와 약 3 hPa까지의 26 hybrid-Sigam 연직층을 갖는 유한 체적 코어로 수행되었다. CAM-Chem의 대기 중 라돈은 반감기 3.82일로 남으로 분해된다. 온라인 및 오프라인 시뮬레이션의 규준실험에서 사용된 라돈의 전지구 배출자료는 Locatelli et al. (2015)에서 사용된 자료를 사용하였다. 이 자료에서 라돈은 60°S 와 60°N 사이에서 $1 \text{ atom cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 60°N 와 70°N 사이에서 $0.5 \text{ atom cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 비율로 그린랜드를 제외한 대륙 지역에서만 배출된다. 바다와 남극 지역에서 라돈이 배출되지 않기 때문에 남극 반도 지역의 라돈의 계절성은 파타고니아 대륙의 라돈 배출량에만 영향을 받을 것이다.
- 파타고니아 지역 배출량의 민감도를 평가하기 위하여, 남빙양 오프라인 실험 (SO 실험)에서는 기본 조건 외에 40°S 이남의 남극해 지역 해수면에서 라돈이 배출되도록 수정하였다. 해양에서 배출되는 라돈방출률은 Zahorowski et al. (2013)에서 제안한 $0.0036 \text{ atom cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 이며, 해빙이 존재하는 지역은 1982년 ~ 2001년간의 평년 격자내 해빙분포 비율을 이용하여 배출량이 보정된다. 두 번째 오프라인 실험 (SA)의 배출량은 남미 지역의 배출량을 $0.9 \text{ atom cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 로

줄여 남미 전역의 방출량의 민감도를 조사하였다.

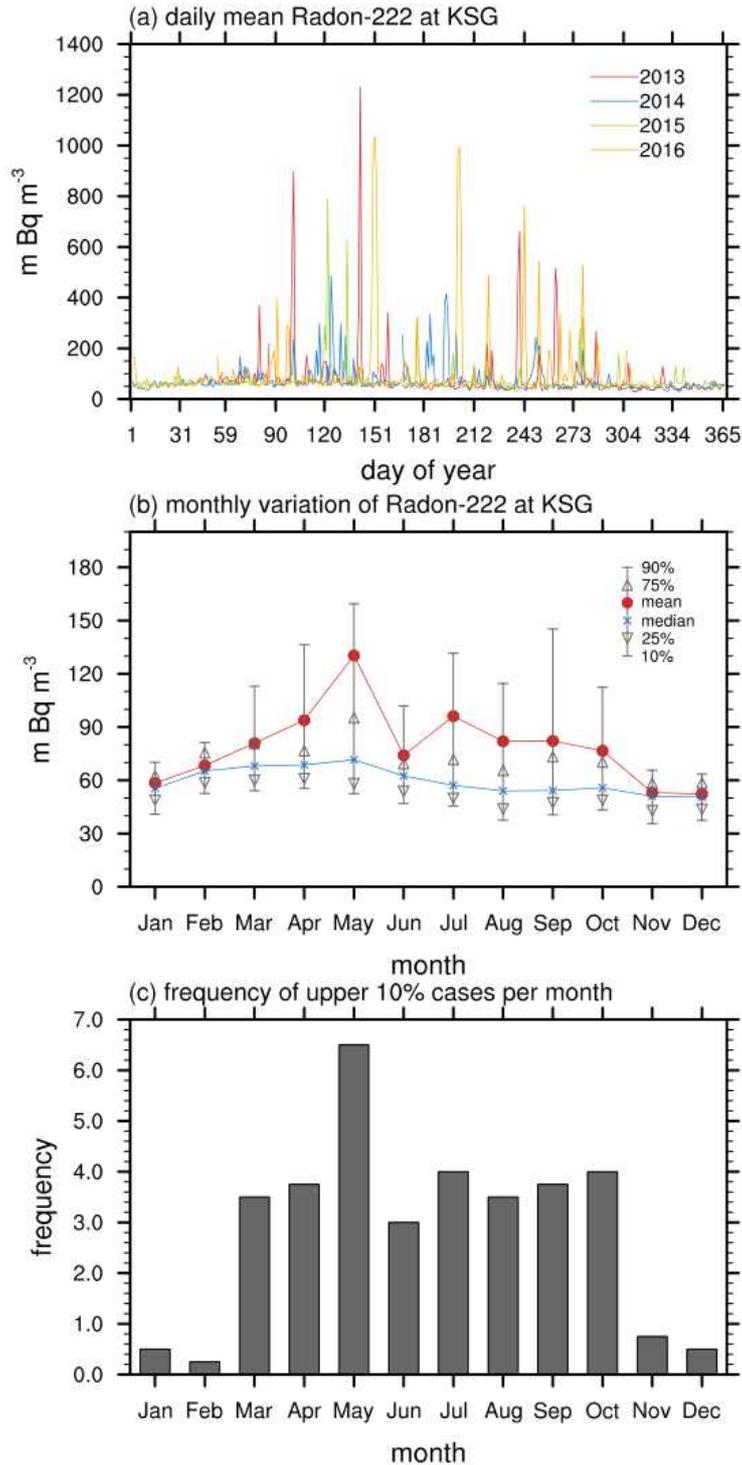


Fig.3.2.77. (a) 세종기지에서 2013년부터 2016년까지 관측된 일평균 라돈 농도, (b) 일평균 농도의 월별 백분위 분산 분포, (c) 일평균 라돈의 10% 고농도 라돈사례의 월별 빈도

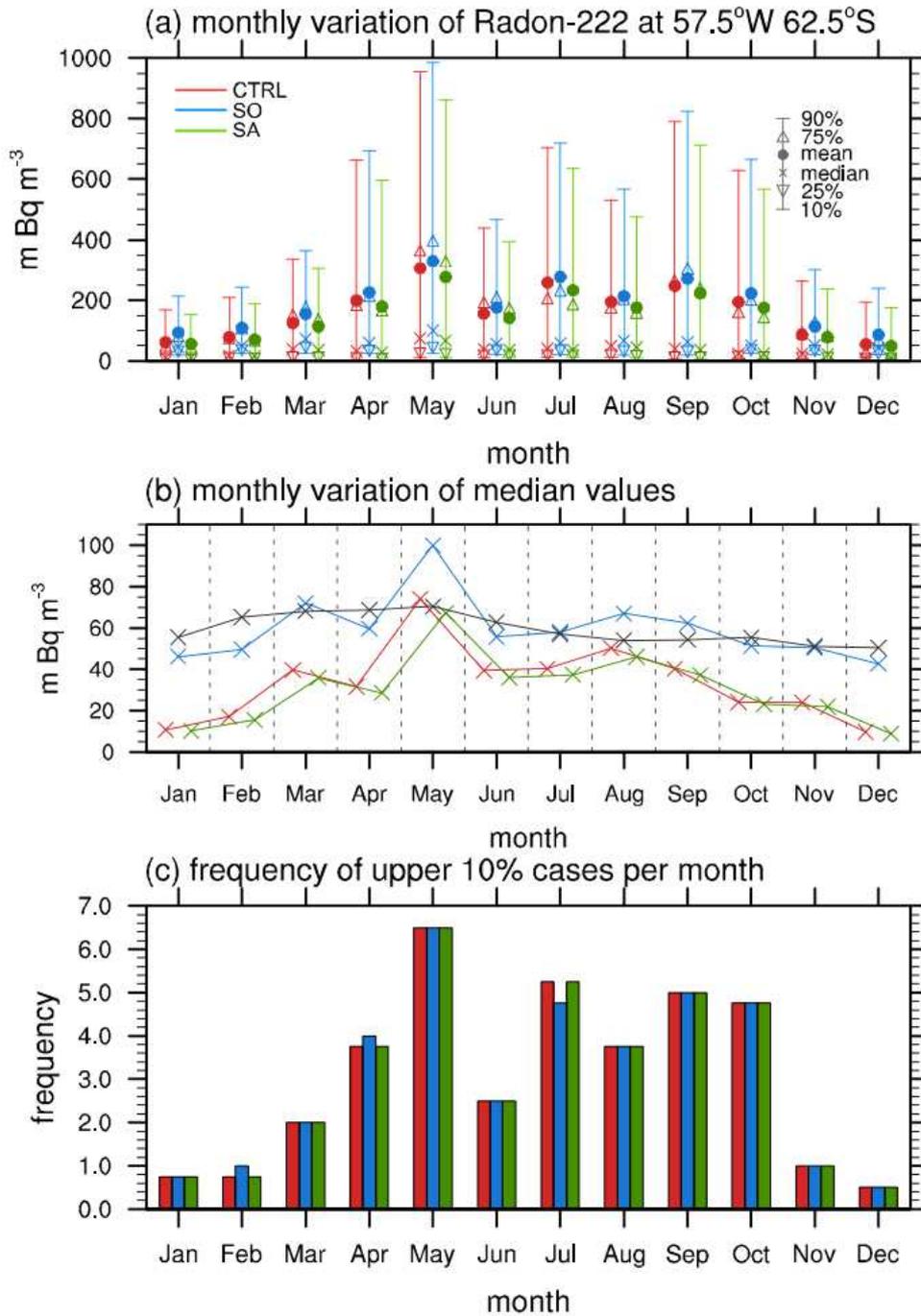


Fig.3.278. (a) CAM-Chem 오프라인 실험으로 모의된 세종기지 격자점 일평균 라돈 농도의 월별 백분위 분산 특성, (b) 중간값의 월별 변화, (c) 월별 상위 10% 고농도 라돈사례의 빈도

- 오프라인 실험의 세종기지에서 가장 가까운 모델 격자점(57.5°W, 62.5°S)의 표층 라돈은 세종기지에서 관찰된 라돈의 계절성을 잘 재현한다 (Fig.3.277). SA 실험의 경우 세종기지의 표층 라돈 농도가 CTRL 실험에 비해 약 10% 감소하여 남미

지역의 배출 조건 감소비율과 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 세종기지의 라돈 농도에 영향을 미치는 남미지역의 기존 배출량이 과대평가되었을 수 있음을 시사한다. 한편 모든 오프라인 실험에서 평균값, 75번째 및 90번째 백분위수 값은 관측보다 크게 나타난다. 이렇듯 높게 나타나는 상위 백분위 값들은 모델이 세종기지 격자점에서의 라돈 농도를 기본적으로 과대 모의하는 경향이 있음을 시사한다. 상위 백분위수와 대조적으로 중앙값 및 하위 백분위수의 모의 결과는 SO 실험을 제외하고 관측치보다 적게 나타난다. 남극해 배출 실험에서만 월별 중앙값이 관측과 유사하게 나타나며 이러한 결과는 세종기지 주변의 해양 배출이 세종기지의 라돈농도의 하한 및 중간값 변화에 핵심적인 기여요소임을 시사한다.

- 오프라인 실험의 고농도 사례 발생 빈도는 관측과 마찬가지로 3월부터 10월까지 높게 나타난다. 하지만 6월부터 10월까지의 빈도는 관찰된 것과 약간 다르다. 오프라인 실험의 상위 백분위 값들은 관측값보다 높는데, 이러한 분산특성의 차이가 발생빈도의 계절성의 모의 오차에 기여하는 것으로 추정된다. 즉, 재분석 배경장을 활용한 오프라인 실험 결과는 남미 지역의 배출량 이외에도 CAM-Chem의 라돈 모의 불확실성에 기여하는 다른 요소가 있음을 시사한다.

극지연구소

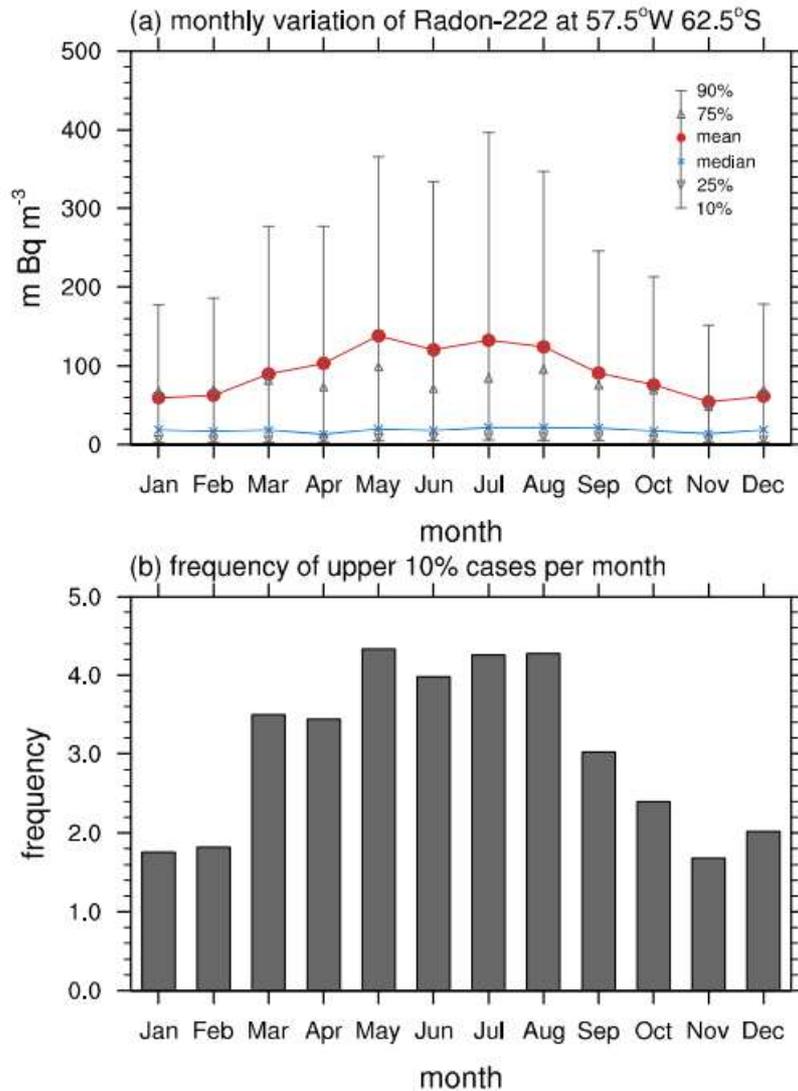


Fig.3.2.79. (a) CAM-Chem 온라인 실험으로 모의된 세종기지 격자점 일평균 라돈 농도의 월별 백분위 분산 특성, (b) 월별 상위 10% 고농도 라돈사례의 빈도

- 온라인 실험의 50년 모의 결과의 세종기지 격자점에서 라돈 농도 역시 관측된 계절성이 잘 재현된다 (Fig.3.2.78). 이 온라인 실험에서 세종기지 격자점의 일평균 표층 라돈의 평균과 중간값은 각각 93.3과 18.2 m Bq m⁻³으로, 관측에 비하여 중간값보다 상당히 큰 평균값이 나타나지만 평균값과 90번째 백분위값의 계절적 변화는 관측과 잘 일치한다. 라돈 농도의 90번째 백분위값은 245.0 mBq m⁻³이며, 관측보다 높게 나타난다. 그러나 이 기준으로 정의된 고농도 라돈 사례의 발생 빈도는 관측과 유사한 계절성이 나타난다. 고농도 사례는 3월에서 10월 사이에 자주 발생하며, 모델과 관측 모두 5월에 가장 높은 빈도로 발생한다. 하지만 남반구 여름철

상위 10% 고농도 사례의 월별 발생 빈도는 1.6에서 2.0으로 관측보다 크게 나타나며, 이는 세종기지의 라돈 수송에 기여하는 모델과 관측 간의 대기순환장의 차이에 따른 결과로 추정된다. 관측과 모델 결과에서 나타나는 계절성의 일관성은 세종기지 고농도 사례의 특성을 살펴보는데 모델 실험 결과를 활용할 수 있음을 시사한다.

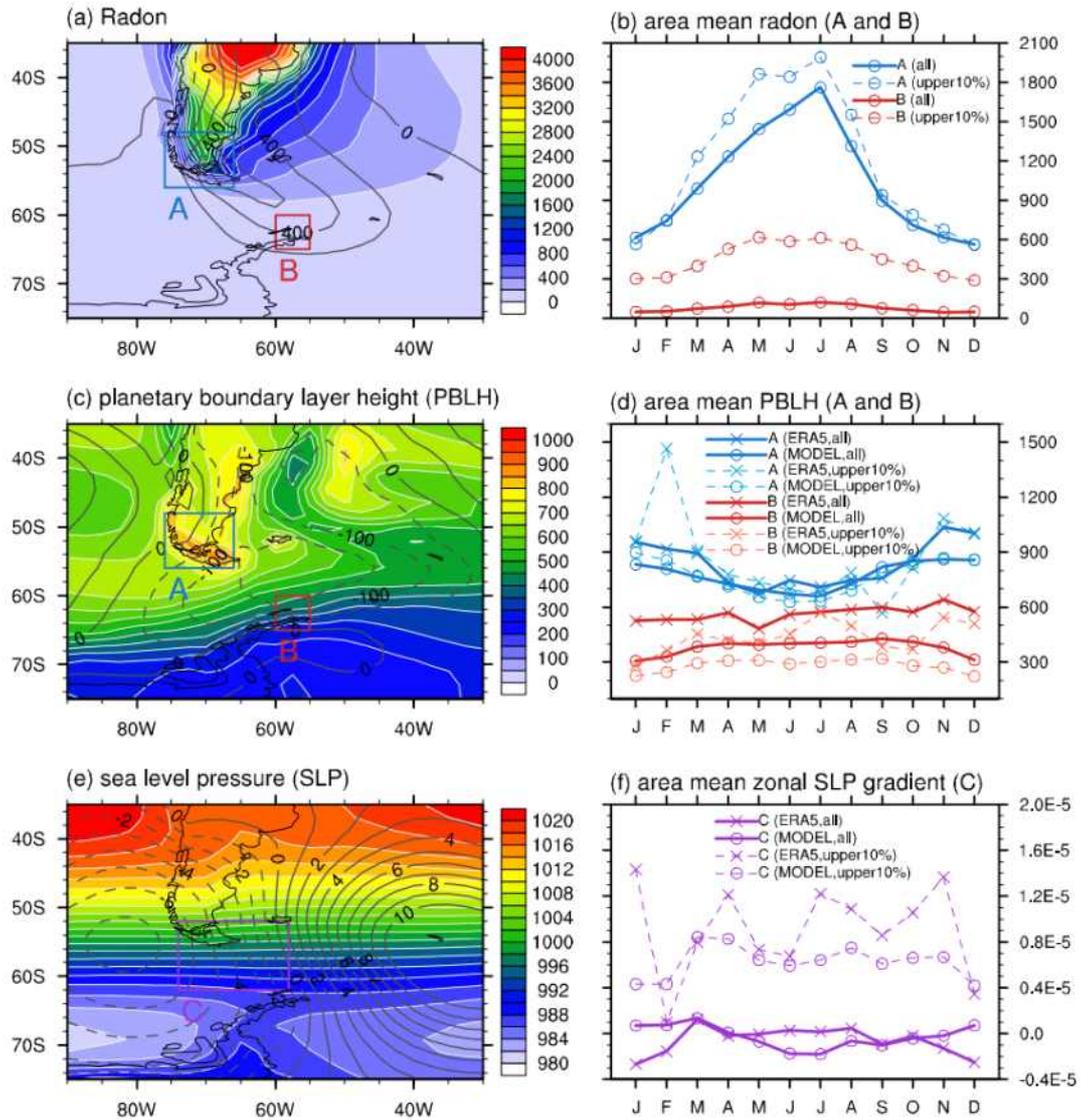


Fig.3.2.80. (a)CAM-Chem에 의해 모의된 남미대륙의 대기라돈 농도, (b)A(76°-66°W, 48°-56°S), B(60°-55°W, 60°-65°S) 지역 라돈가스 평균농도, (c)대기경계층 높이, (d)대기 경계층 높이 A, B 지역 평균, (e) 해면기압, (f)지역 (74°-58°W, 52°-62°S) 평균 동서 해면기압차

- 세종기지의 라돈의 계절별 변동 기작을 이해하기 위하여 라돈 농도 변화와 관련한 대기장 특성을 살펴보았다. 모델 실험에서는 남극 대륙에서의 라돈 배출이 없기 때문에 분석 지역을 남미 지역에서 대서양 지역으로 국한시켰다. 남아메리카의 남쪽

가장자리(76°-66°W, 48°-56°S) 지역의 평균 라돈의 월별 변화를 살펴보면 7월에 최대, 12월에서 1월까지 최소를 보인다(Fig.3.2.79). 일반적으로 대기중 라돈의 소멸은 방사성 붕괴로만 진행되기 때문에 표층 라돈 농도는 연직 혼합의 강도에 반비례하며, 따라서 해당 지역의 대기경계층 고도와 반비례한다. 또한 대기경계층 고도가 높은 경우 표층에서 대류권 하부로 라돈이 배출될 가능성도 더 커진다. 모델의 남미 지역의 라돈과 경계층고도의 월변화에서는 이러한 상관성이 잘 나타난다. 또한 모델 실험 결과의 대기경계층 고도의 계절적 변화는 재분석자료와 일관적으로 나타난다. 라돈의 연평균 공간 분포에서 확인할 수 있듯이 남미 지역의 평균 라돈 농도의 변화는 대기 수송을 통해 세종기지 라돈 농도의 영향을 미친다.

- 세종기지의 라돈의 계절 변화 특성은 단순히 배출원 지역의 대기 라돈 농도 변화에만 영향받지 않는다. 이는 세종기지의 대기경계층 고도의 변화가 발원지역과 달리 관측과 모델에서 나타나는 라돈 농도의 계절성과 반비례하지 않는 것에서 추정이 가능하다. 또한 라돈 고농도 사례 발생시 배출원 지역의 대기경계층 고도는 재분석 및 모델 모두에서 평년과 큰 차이가 보이지 않는다. 이러한 결과는 세종기지에서 발생하는 고농도 사례는 남미 배출원 지역의 라돈 농도의 변화에도 영향을 받지만, 고농도 사례 발생에는 배출원 지역의 라돈 배출량 이외의 다른 과정이 기여함을 암시한다. 세종기지의 고농도 사례 기간의 주변 지역의 라돈 분포를 살펴보면 발생원 지역부터 남극반도 끝단을 향하여 북서쪽에서 남동쪽으로 연결된 형태로 분포한다. 이러한 공간 분포는 Chambers et al. (2014)의 고농도 및 중간농도 사례의 역궤적 모델 결과와 유사하다. 먼저 기후적인 대기장 분포를 살펴보면 관측과 모델 모의결과 모두 일관적으로 40°S에서 65°S 사이에서 해면기압의 남북방향으로 급격한 변화가 나타난다. 또한 65°S 이남의 남극 지방에서는 남극 반도 양쪽에 동서로 긴 기압골이 형성된다. 이 기후학적 해면기압 분포는 거의 일년 내내 유지되며, 세종기지 근처의 해면기압의 동서방향 기울기는 모델과 관측 모두에서 거의 0으로 유지된다. 하지만 고농도 사례 기간, 세종기지를 중심으로 서쪽의 저기압, 동쪽에 고기압의 쌍극자 형태의 해면기압 어노말리가 관찰된다. 이러한 동서방향으로 형성되는 기압골에 따라 북서풍의 강화되며, 이러한 기압골에 의해 남미에서 세종기지로의 라돈 수송량이 증가될 것이다.

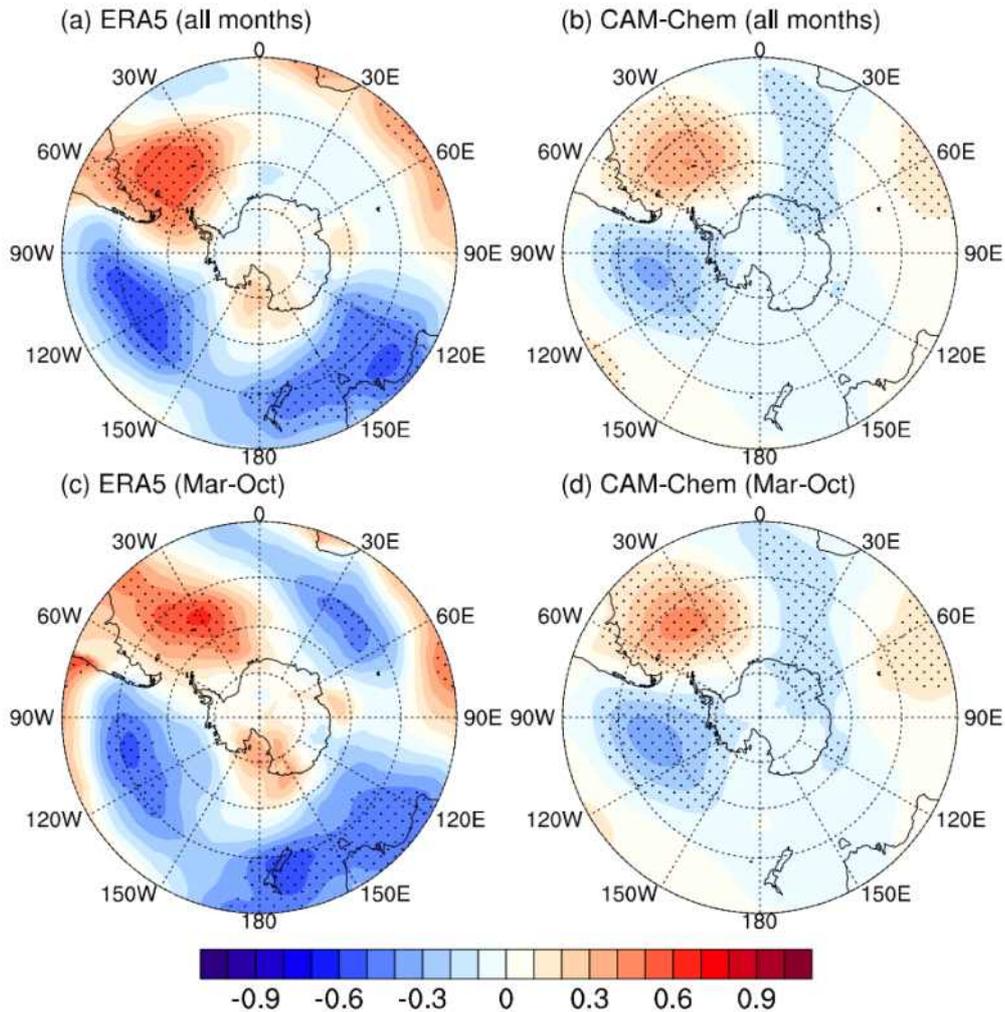


Fig.3.2.81. 세종기지 월평균 표층 라돈 농도에 대한 월별 해면기압의 상관계수 지수 (a) ERA5 전 기간, (b) CAM-Chem 전기간, (c) ERA5 3월-10월, (d) CAM-Chem 3월-10월

- 이러한 고농도 사례에 기여하는 기압 패턴이 기후학적 특성에 기여하는 지를 살펴보기 위하여 세종기지의 월 평균 라돈 농도에 대한 해면기압의 월평균 어노말리간의 상관계수 분포도를 살펴보았다. 모델과 관측에서 계산된 상관계수 분포도에서 모두 고농도사례에서 나타났던 45°와 65°S 사이에서 세종기지 주변으로 동서방향으로 비대칭적인 해면기압의 분포가 일관적으로 나타난다. 즉 저기압과 고기압이 벨링스하우젠해와 웨델해 지역에 각각 위치할 때 남극 반도에 더 많은 라돈이 유입되며 세종기지의 월평균 라돈 농도가 증가한다. 또한 이러한 상관 계수의 공간적 분포에서 모델과 관측간의 일관성은 남반구 겨울철만 고려할 때 더더욱 동일하게 나타난다. 이러한 대기순환구조는 남빙양에서 wavenumber 3 구조를 특징으로 하는 PSA (Pacific-South America) 패턴과 유사하다. 열대의 깊은 대류에 따른 로스비

파동과 연관되어 있음이 제시된바 있는 PSA 패턴은 첫 번째와 두 번째 PSA 모드(PSA-1 및 PSA-2)로 구분되는데, 이 두 모드 모두 서남극 반도 근처에서 쌍극자 모양의 대기 순환이 나타난다. 이중 세종기지의 라돈농도 변화는 관측 및 모델 모두에서 PSA-2 모드와 양의 상관관계가 나타나는데, 관측에서 남반구 봄철(9-11월) 0.63, 모델에서는 남반구 겨울철 (6-8월) 동안 0.40으로 나타나며 95% 신뢰 수준에서 통계적으로 유의하다. 이는 PSA-2의 남극반도를 중심으로 한 쌍극자형 패턴이 남미 끝과 남극반도를 연결하는 지역에서 라돈 농도 증가에 기여하는 것으로 해석된다.

4) 장보고기지 대기 라돈 가스 농도의 변동성 상세 분석

- 본 연구에서는 장보고기지 (74°S, 164°E)에서 관측된 대기 라돈가스 (측정기간: 2016.1.1. - 2020.2.28.)의 농도 변동을 상세히 분석하고 농도 변동성에 영향을 미치는 주요 요인들을 파악하고자 하였다. 또한 라돈가스 농도 순위별로 장보고기지로 유입되는 대기수송 경로를 파악함으로써 주요 배출원 지역과 수송경로 특성을 조사하였다. 장보고기지 대기 라돈가스 농도 변동성을 조사하기 위해 2016.1.1. - 2020.2.28.까지 4년 동안 관측 자료를 분석하였다. 계절 변동특징은 고농도 라돈가스 (90 percentile)의 농도 변동성에서 가장 뚜렷이 나타났는데 주기적으로 11-2월, 5-8월에 농도가 증가하고, 3-4월, 10월에 감소하는 것으로 나타났다. 특히 하계시즌 1, 2월에 라돈가스 농도가 가장 증가하였고 5-8월 동안 관측된 농도는 가을철과 봄철에 비해 다소 높은 것으로 나타났다 (Fig.3.2.81-82). 다른 계절에 비해 하계시즌 동안 라돈가스의 농도 증가는 하계시즌 동안 대기 기온의 상승에 의한 지각 노출 면적의 증가로 인한 라돈가스 배출량의 증가와 관련이 있다. 그렇지만 온도가 가장 낮은 동계시즌 동안 가을철과 봄철시기 보다 농도가 증가하는 이유는 지각 노출 면적 증가와는 다른 요인들이 영향을 미치는 것으로 판단된다. 라돈가스 농도의 빈도분포는 모든 계절에서 좌편향 분포를 보였으며 여름철의 경우 다른 계절에 비해 고농도 라돈가스 분포 특징이 뚜렷이 증가하였다. 모든 계절에서 풍속이 강한 조건에서 저농도 라돈가스 분포가 증가하고, 풍속이 약한 경우 고농도 라돈가스 분포가 증가하는 것을 확인하였다 (Fig.3.2.83).
- 장보고기지는 대기 라돈가스의 배출과 관련 있는 지리적인 환경 (폴리냐, 해빙, 해양, 빙하, 산악지대등)이 방위에 따라 매우 특징적이기 때문에 대기 라돈가스의 농도

분포 특징은 풍향풍속 조건과 밀접한 관계를 보여주고 있다. 저농도 라돈가스 (10 percentile)는 주로 남극 내륙 빙하가 분포하고 있는 225-270도 풍향과 밀접한 관계가 있다. 1-5월 동안 ~ 200 mBq/m³, 6-11월 동안 ~ 180 mBq/m³, 12월에 ~ 150 mBq/m³으로 1-5월에 다소 높은 농도를 보였고 12월에 가장 낮은 농도를 나타냈다. 중간농도 값 (median)의 경우 ~ 270 -290도 풍향과 관련 있었고, 연중 ~ 630 -640 mBq/m³으로 농도 범위가 연중 매우 비슷한 특징을 보였다. 그렇지만 고농도 라돈가스 (90 percentile)는 대부분 북서풍 (315-360도)과 북풍조건에서 측정되는 것으로 나타났다. 1월에 가장 높은 농도인 ~ 2400 mBq/m³, 3-4월에 가장 낮은 농도인 ~ 1600 mBq/m³으로 측정되었고 저농도와 중간 농도 값의 분포에 비해 월별 농도차가 큰 것을 알 수 있다(Fig.3.2.84). 장보고기지 북쪽 방향은 북빅토리아랜드 산악지역이 넓게 분포하고 있기 때문에 북풍 조건에서 지각 노출지역을 통과하는 경우 지표면에서 배출된 라돈가스의 수송이 용이할 것으로 판단된다. 농도 분포는 라돈가스의 농도 순위에 따라 분포 특징이 다른 것으로 조사되었다. 저농도 범위의 경우 우편향 분포 특징을, 중간농도 범위에서는 정규분포에 가깝고, 고농도 범위에서는 좌편향 분포 특징을 보이는 것으로 나타났다. 저농도 대기 라돈가스가 관측된 3월과 5월의 경우 다른 월에 비해 풍속이 증가하는 것으로 나타나 대기확산이 유리한 대기환경 조건으로 판단된다 (Fig.3.2.84). 계절별로 바람장미와 풍향 빈도를 조사한 결과 연중 풍향의 주풍은 350-50도, 250-300도로 나타났고, 풍향에 따라 풍속은 특징적인 차이를 보여주고 있다. 350-50도와 250-300도 풍향 조건에서 풍속은 각각 ~ 2 -3m/s, ~ 5 -10m/s로 조사되어 350-50도 풍향 조건에서 250-300도 풍향 조건에 비해 풍속이 2-3배 정도 약한 것으로 나타났다. 하계시즌의 경우 풍향이 200-350도 조건에서 풍속과 라돈가스의 농도는 뚜렷이 역상관 관계를 보여주고 있는데, 풍속이 증가 (감소)함에 따라 라돈가스의 농도는 감소 (증가)하였다. 특히 풍속이 강한 250-300도 풍향 범위에서 비교적 낮은 농도의 라돈가스가 측정되었다. 이와 같은 하계시즌 특징은 봄철에도 관찰되고 있었으나 하계시즌에 가장 뚜렷하고 다른 계절에서는 나타나지 않았다. 풍향이 350-50도 범위에서 측정된 라돈가스의 농도는 250-300도 풍향 범위에서 측정한 농도 값에 비해 높은 것으로 조사되었고 350-50도와 250-300도 풍향 범위에 따른 라돈가스 농도 차는 여름철 동안 가장 큰 것으로 나타났다(Fig.3.2.85-88). 풍속 변화에 따른 라돈가스의 농도변화 특징을 조사한 결과 풍속이 ~ 2.5 -3.5 m/s보다 강한 조건에서 라돈가스 농도가 서서히

감소하기 시작하여 ~4.5-5.5 m/s까지 지속적으로 감소하였다. 그리고 풍속이 ~4.5-5.5 m/s보다 강한 조건에서는 농도 감소 추세가 매우 약화되는 것으로 나타났다. 풍속이 약한 기상조건에서는 확산이 원활하지 못함으로 측정소 주변에서 배출된 라돈가스의 영향이 증가할 수 있다. 따라서 농도가 서서히 증가하는 ~4.5-5.5 m/s 미만에서 측정소 주변 영향이 나타나기 시작하고 이와 같은 특징은 여름철 동안 다른 계절에 비해 가장 뚜렷이 나타났다(Fig.3.2.89). 풍속에 따른 라돈가스의 빈도분포 특성은 장보고기지에서 관측되고 있는 대부분의 라돈가스가 측정소 주변에서 배출되는 라돈가스의 영향을 받고 있다는 것을 보여주고 있다 (Fig.3.2.90).

- 대기 라돈가스의 농도변동성에 영향을 미칠 수 있는 대기혼합고 높이 변화와 라돈가스 평균 농도의 월별 변동 특징을 서로 비교하였다. 전체 기간에 대해 월별 변동성은 대체로 역상관 관계를 보여주고 있으나 계절에 따라 상관분석 결과는 다른 것으로 나타났다. 여름철, 가을철, 그리고 봄철 모두 역상관 관계를 나타냈고 겨울철은 상관성이 없는 것으로 나타났다. 여름철, 가을철, 그리고 봄철 기간 동안 r^2 은 각각 0.35, 0.17, 그리고 0.18로 나타나 대기혼합고 높이변화에 의한 대기 라돈가스의 농도 변동성에 미치는 영향은 여름철시기에 가을철과 봄철 기간 동안 보다 더욱 증가하는 것을 알 수 있다 (Fig.3.2.91-92).
- 낮과 밤 시간 동안 대기 라돈가스의 농도변동성은 여름철과 봄철 기간 동안 가을철과 겨울철에 비해 더욱 뚜렷한 것으로 나타났다. 여름철과 봄철 기간 동안 낮과 밤 시간 동안의 최소, 최고 농도변동 범위는 각각 350, 200 mBq/m³으로 나타났고, 가을철과 겨울철은 ~50 mBq/m³으로 나타났다. 낮과 밤시간 동안 온도와 풍속, 혼합고의 변화를 조사한 결과 낮과 밤 시간 동안 라돈 농도 변동성은 계절별 대기확산 효과에 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 여름철과 봄철 시기에 낮과 밤 시간 동안 각각 -5°C~-2°C, -17°C~-14°C 변동 범위를, 가을철과 겨울철 시기에는 각각 -19.5°C~-18°C, ~-22°C 변동 범위로 나타나 계절별 낮과 밤 시간 동안 라돈가스 농도변동 범위 순서와 일치하는 것을 알 수 있다 (Fig.3.2.93-94).
- Hysplit modelling을 이용하여 계절별로 저농도 (10 percentile)와 고농도 (90 percentile) 라돈가스 측정일에 대해 대기 역제적 경로를 계산하여 배출지역과 대기수송 경로를 조사하였다. 고농도 라돈가스 측정일에 계산된 대기수송 경로의 빈도분포는 가을철을 제외한 여름철, 겨울철, 봄철 시기 동안 10% 이상의 대기수송 빈도로 남극 종단산맥 일부 지역을 통과하는 특징을 보여주고 있다. 따라서 가을철을

제외한 나머지 계절 동안 남극 종단산맥 노출지면의 영향이 더욱 증가할 수 있다. 반면 가을철 동안은 다른 계절에 비해 남극내륙 빙하지역과 해양지역을 통과하는 경로가 증가하는 것으로 나타났다. 고농도 라돈가스 측정일의 대기수송 과정은 저농도 라돈가스 측정일의 대기수송 과정에 비해 대기수송 속도가 느린 것으로 확인되었다. 저농도 라돈가스 측정일의 대기수송은 고농도 라돈가스 측정일에 비해 이동속도가 증가하여 남빙양 해양지역까지 확장된 것을 알 수 있다. 고농도 라돈가스 측정일에 북서-북쪽방향 북빅토리아랜드 지역을 통과하는 대기수송 경로에서 여름, 가을, 겨울, 그리고 봄철 기간 동안 대기 라돈가스의 농도는 각각 ~ 3000 , ~ 1600 , ~ 1700 , ~ 1800 mBq/m^3 으로 나타났다. 동남극 내륙 빙하지역을 통과하는 대기수송 경로에서 저농도 라돈가스의 농도는 가을철에 ~ 250 mBq/m^3 , 나머지 계절은 ~ 150 mBq/m^3 으로 측정되어 거의 일정한 농도 값으로 나타났다. 한편 고농도 라돈가스의 농도는 여름, 가을, 겨울, 그리고 봄철에 각각 ~ 2300 , ~ 1700 , ~ 1700 , ~ 1700 mBq/m^3 으로 조사되었다 (Fig.3.2.95-96).

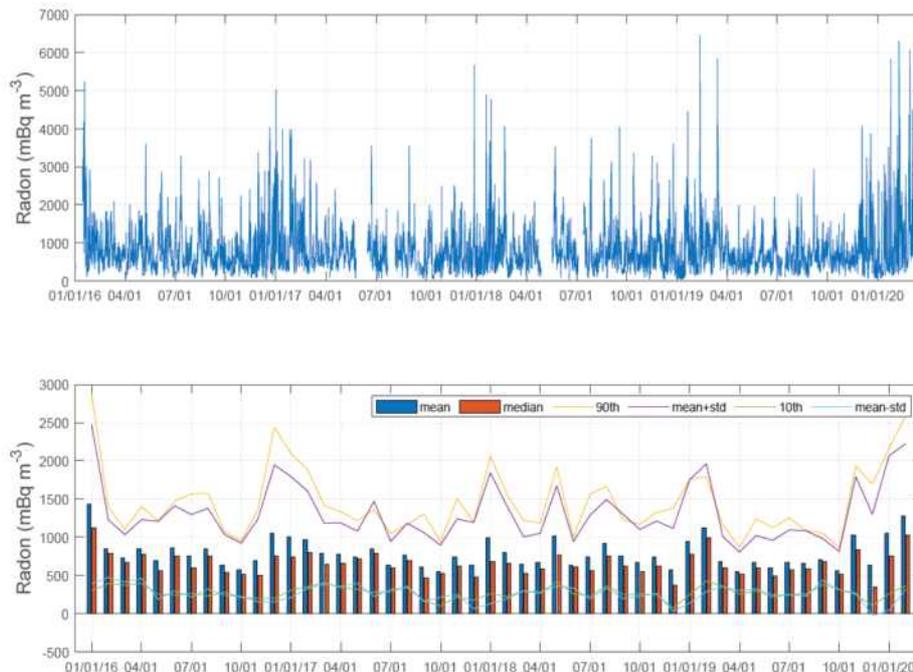


Fig. 3.2.82. 장보고기지에서 측정된 라돈 가스의 농도 변화 (2016년 1월 ~ 2020년 2월)

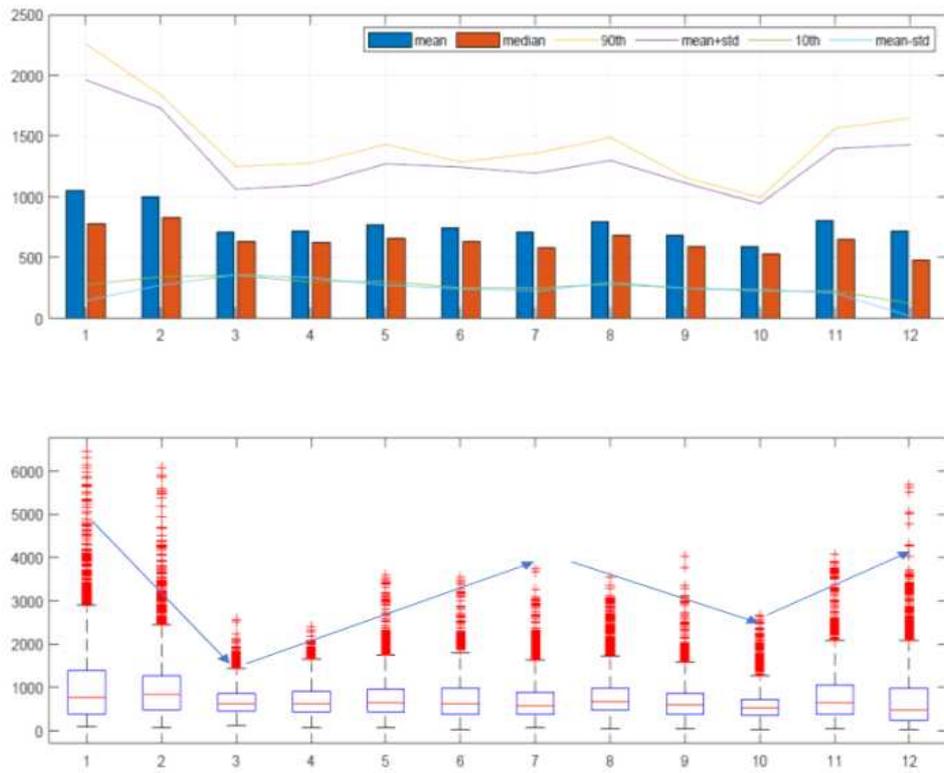


Fig. 3.2.83. 장보고기지에서 측정한 라돈 가스농도의 월별 변동 (2016년 1월 ~ 2020년 2월)

극지연구소

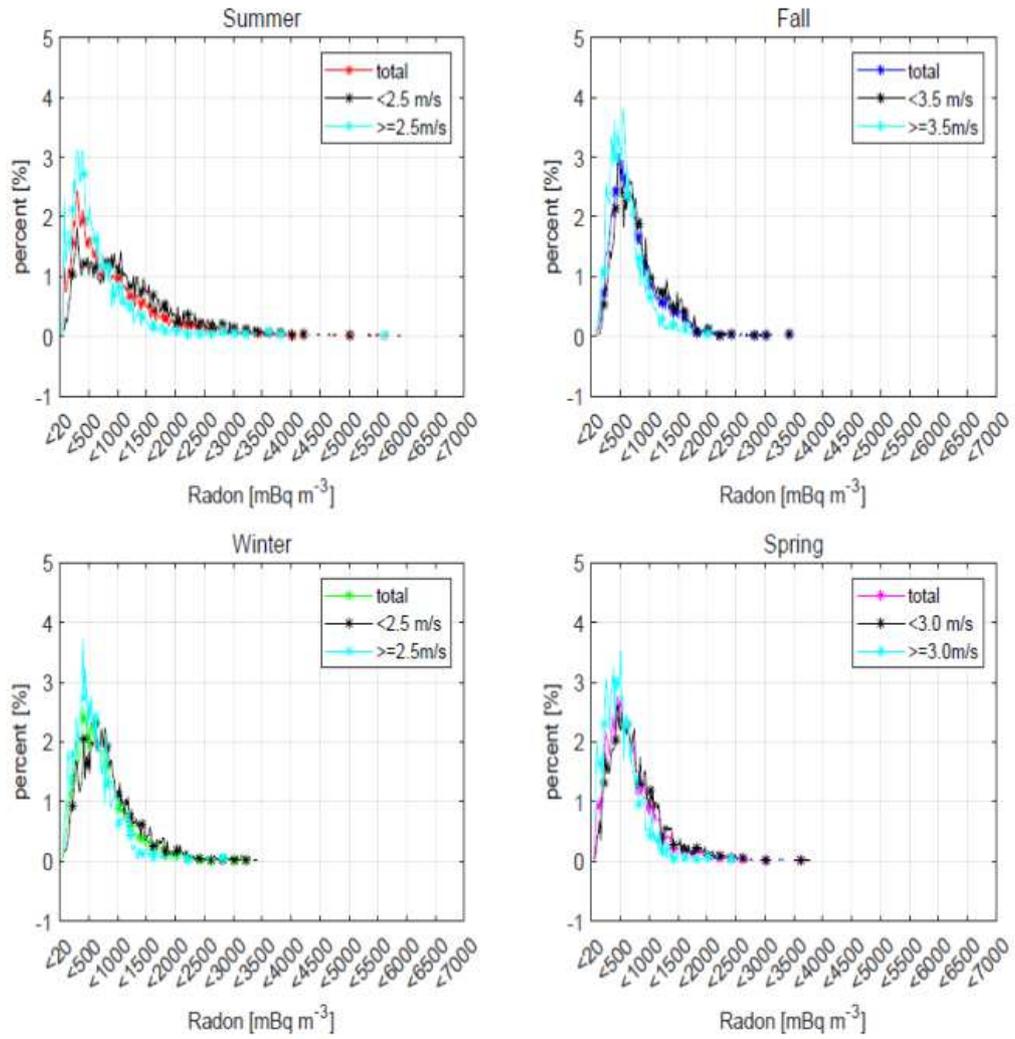


Fig. 3.2.84. 장보고기지에서 측정한 라돈 가스의 빈도분포 (2016년 1월 ~ 2020년 2월)

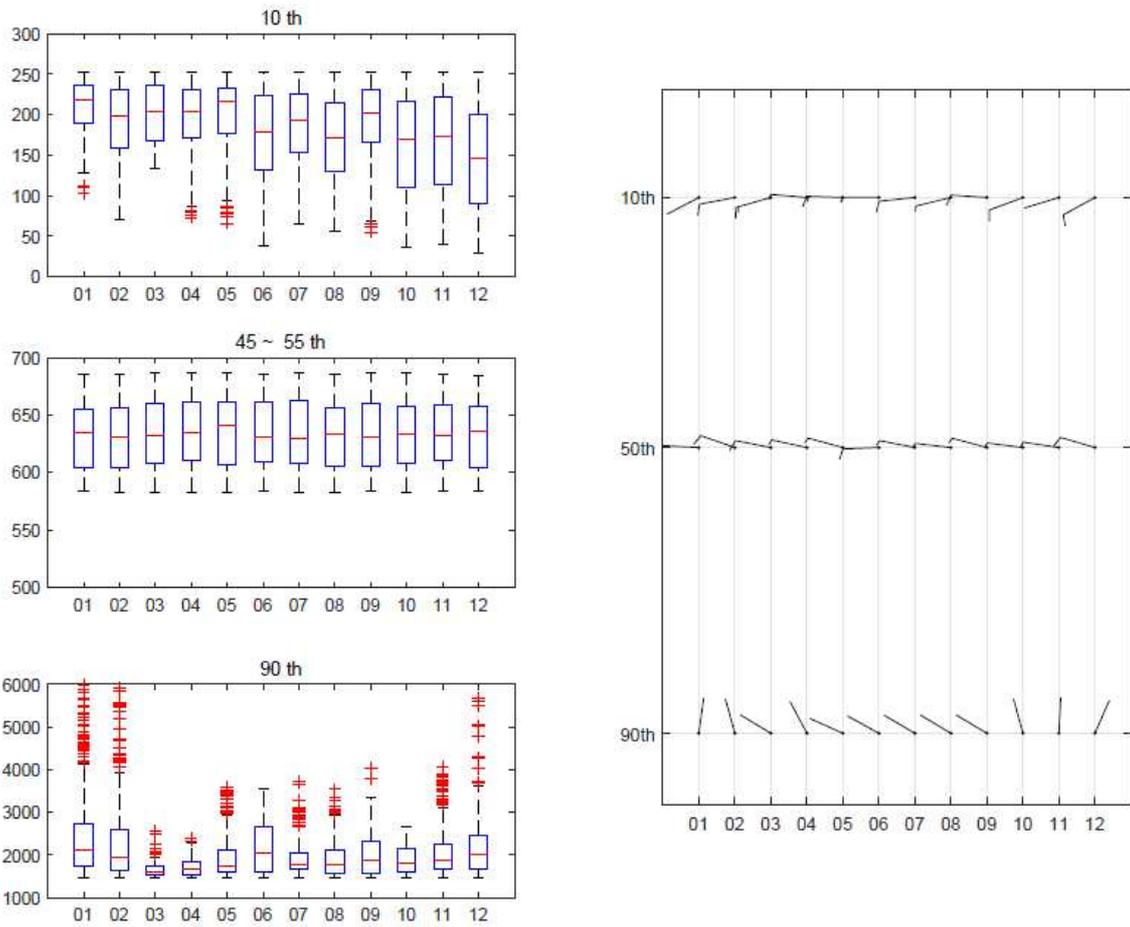


Fig. 3.2.85. 라돈 가스농도 분포(<10%, 45~55%, >90%)에 따른 월별 풍향과 풍속 (2016년 1월 ~ 2020년 2월)

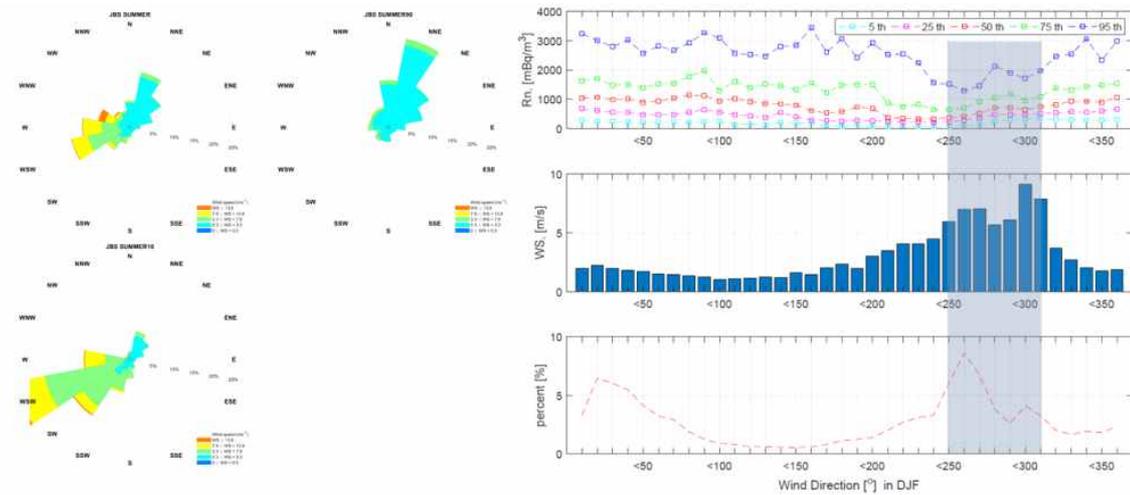


Fig. 3.2.86. 여름철 바람장미 및 풍향에 따른 라돈농도(2016년 1월 ~ 2020년 2월)

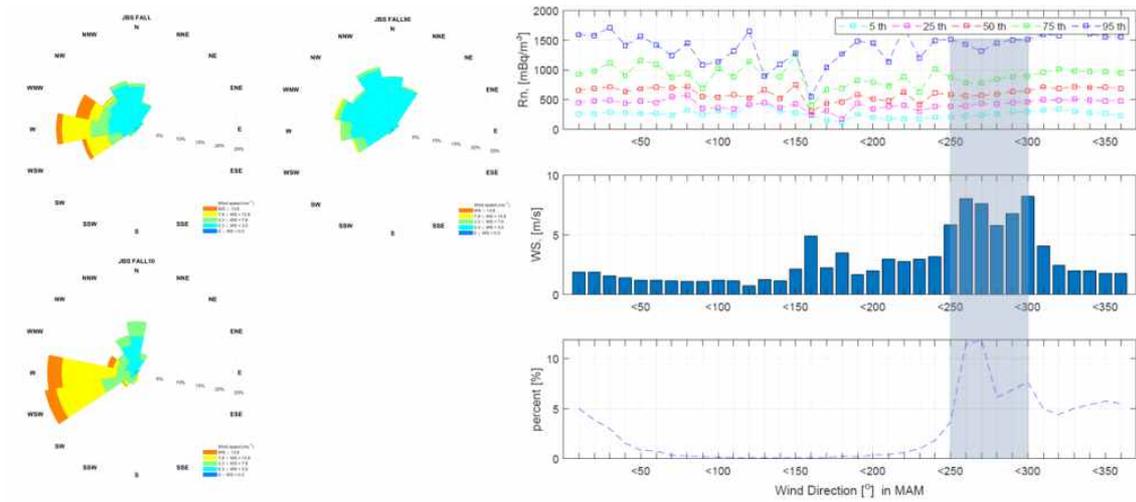


Fig. 3.2.87. 가을철 바람장미 및 풍향에 따른 라돈농도(2016년 1월 ~ 2020년 2월)

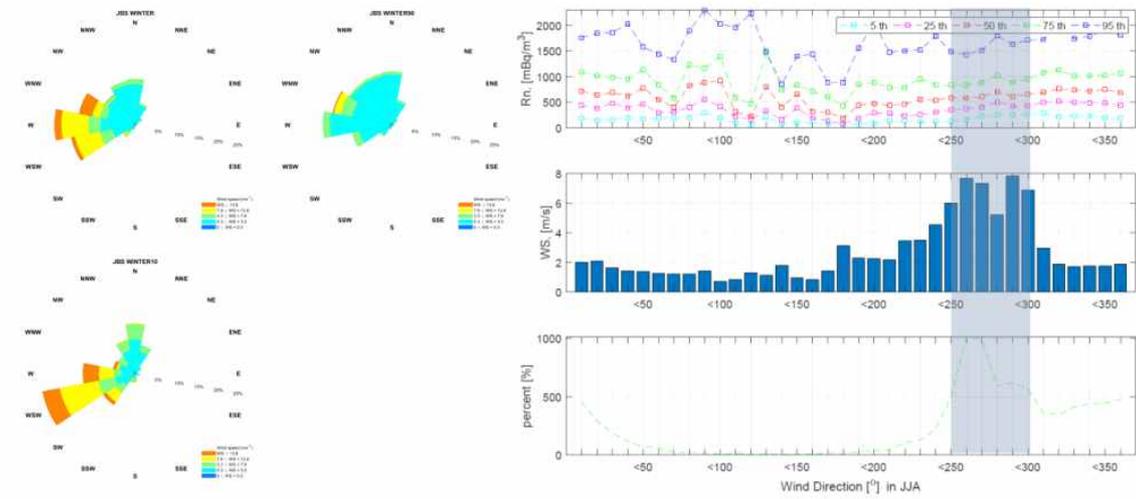


Fig. 3.2.88. 겨울철 바람장미 및 풍향에 따른 라돈농도(2016년 1월 ~ 2020년 2월)

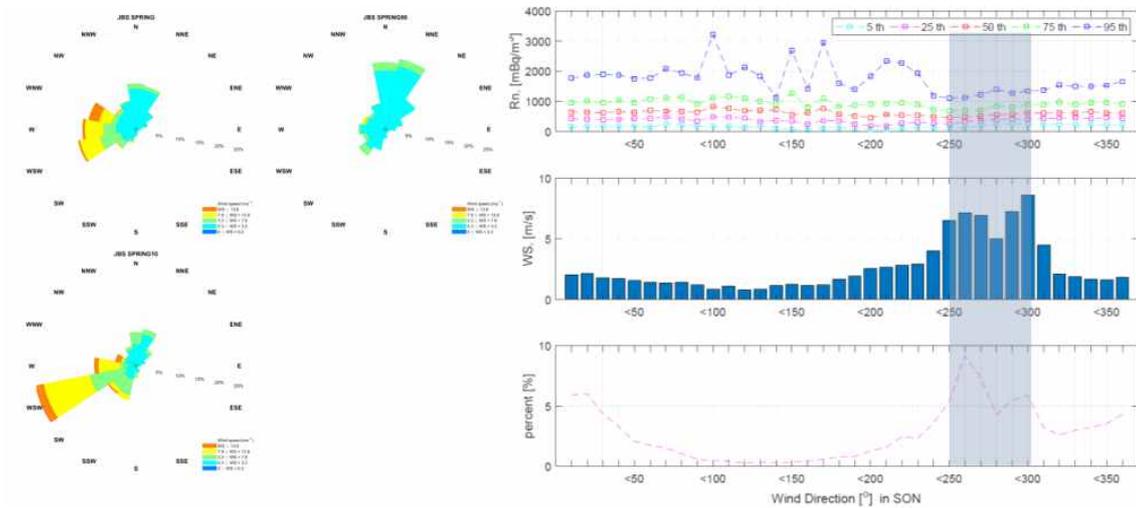


Fig. 3.2.89. 봄철 바람장미 및 풍향에 따른 라돈농도(2016년 1월 ~ 2020년 2월)

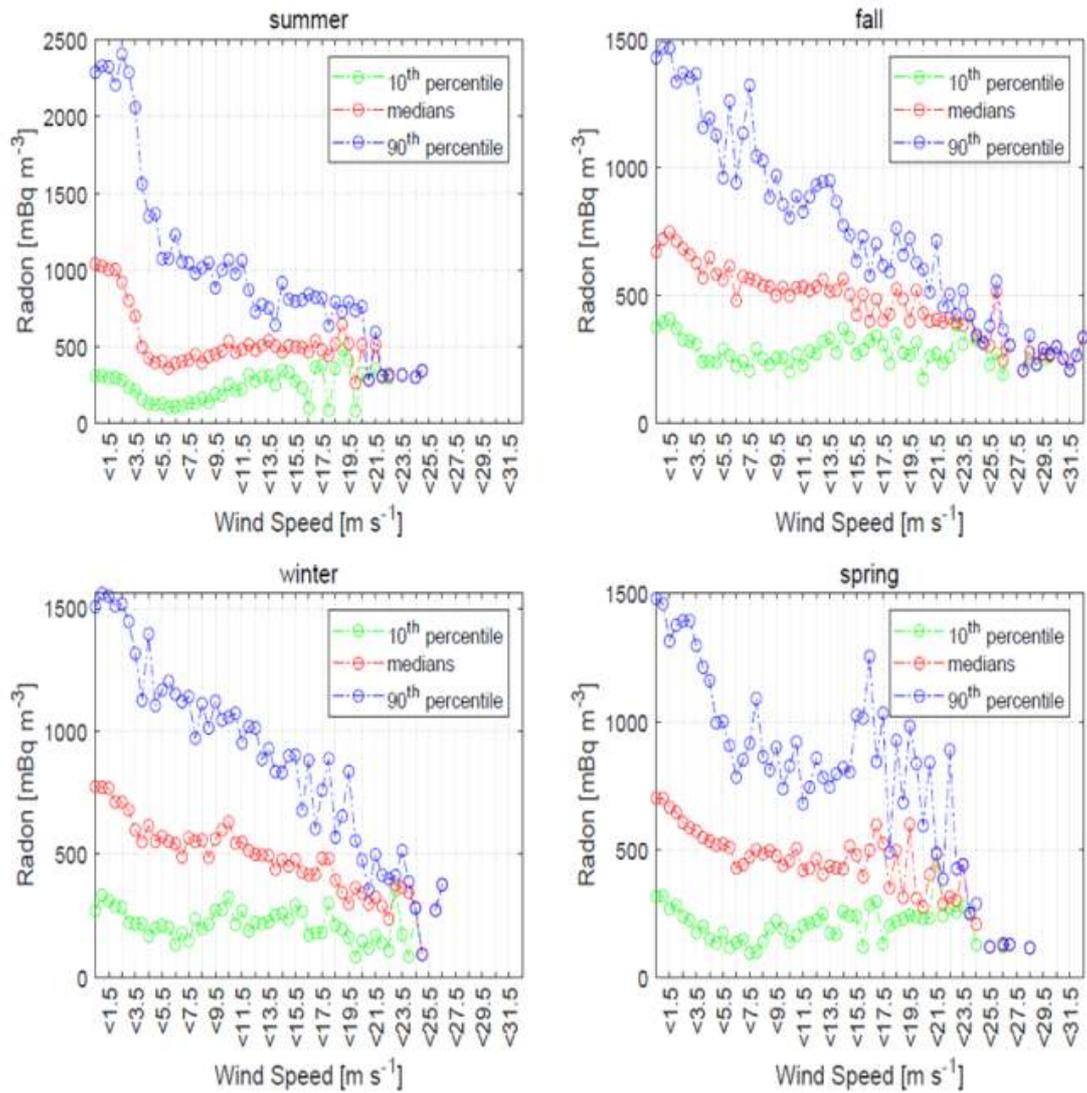


Fig. 3.2.90. 계절별 풍속에 따른 라돈 가스의 농도(2016년 1월 ~ 2020년 2월)

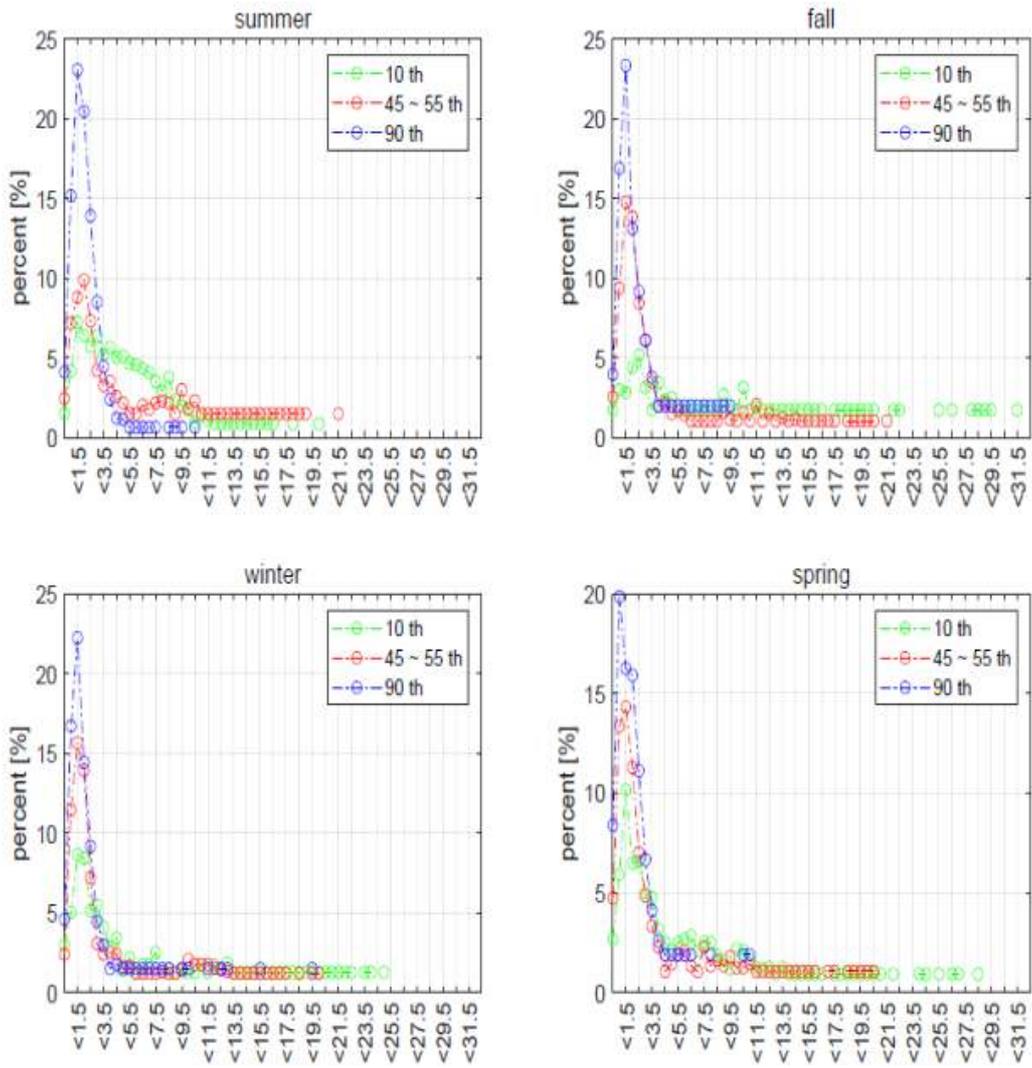


Fig. 3.2.91. 계절별 풍속에 따른 라돈 가스농도 빈도분포 (2016년 1월 ~ 2020년 2월)

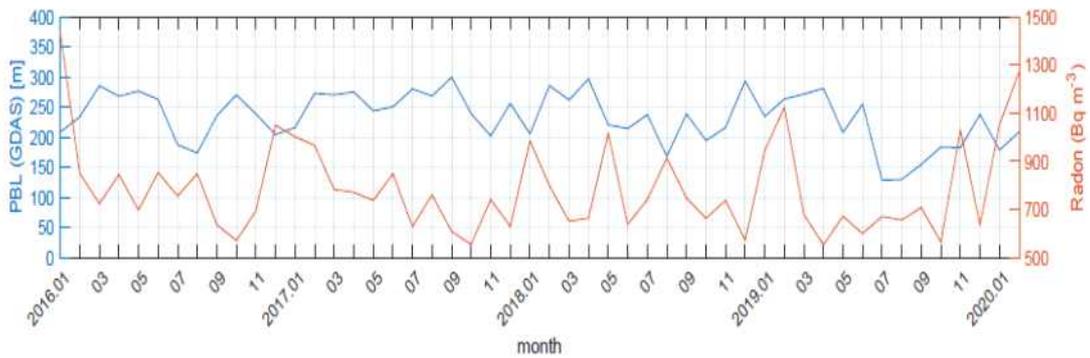


Fig. 3.2.92. 대기경계층 고도 및 라돈 농도의 월변동(2016년 1월 ~ 2020년 2월)

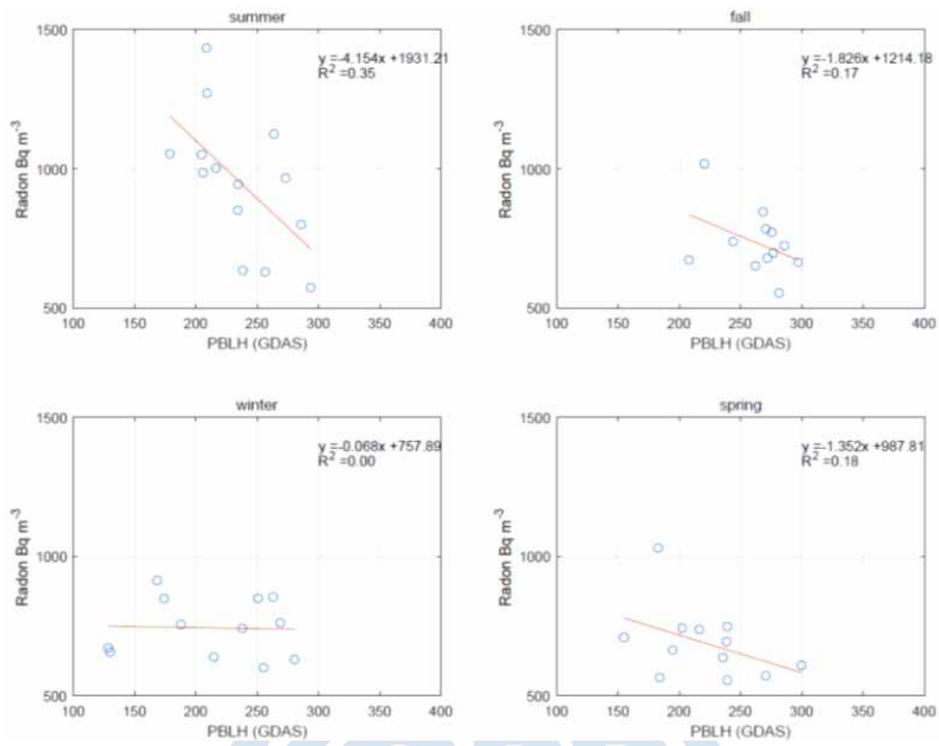


Fig. 3.2.93. 대기경계층고도와 라돈 가스 농도의 상관성 분석(2016년 1월 ~ 2020년 2월)



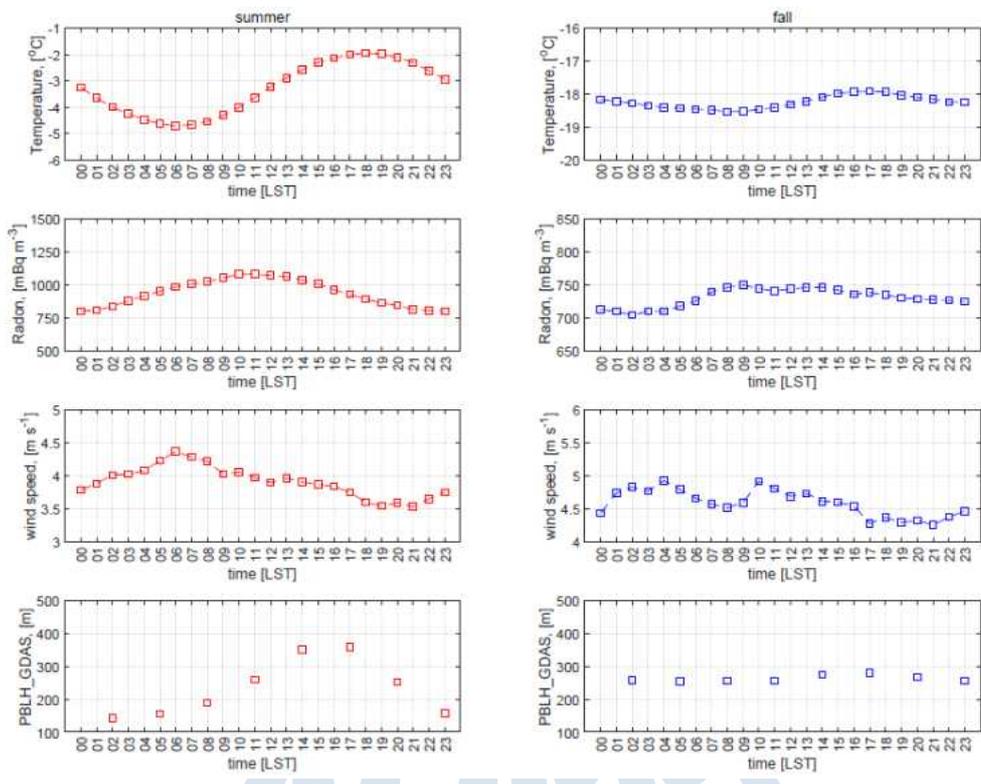


Fig. 3.2.94. 여름철(좌) 및 가을철(우) 라돈 가스 농도, 대기온도, 풍속, 대기경계층고도의 일변화 (2016년 1월 ~ 2020년 2월)

극지연구소

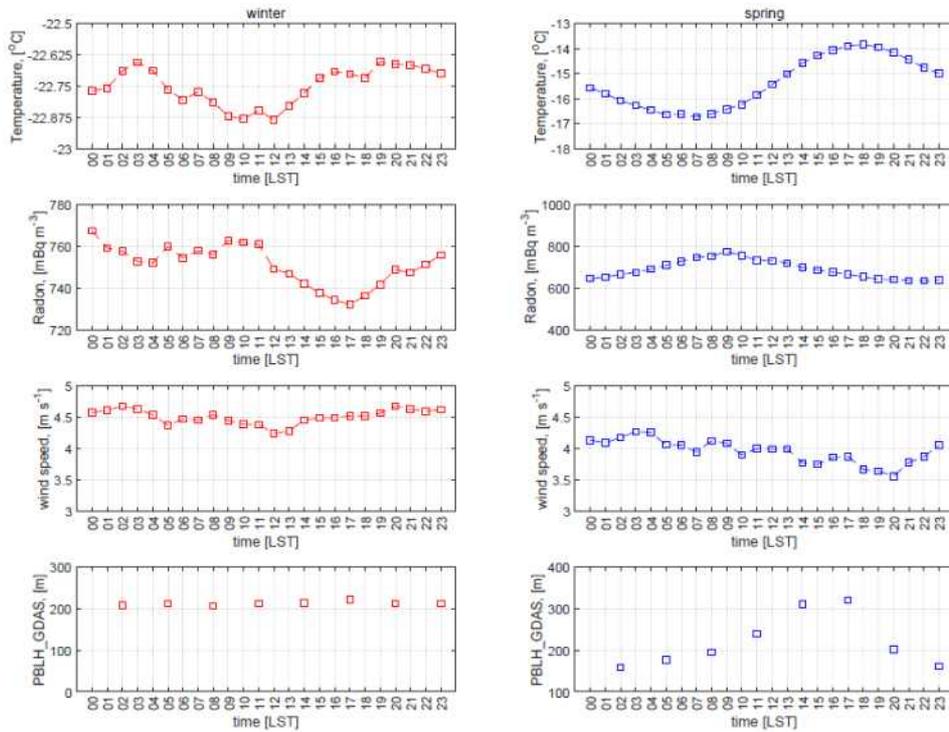
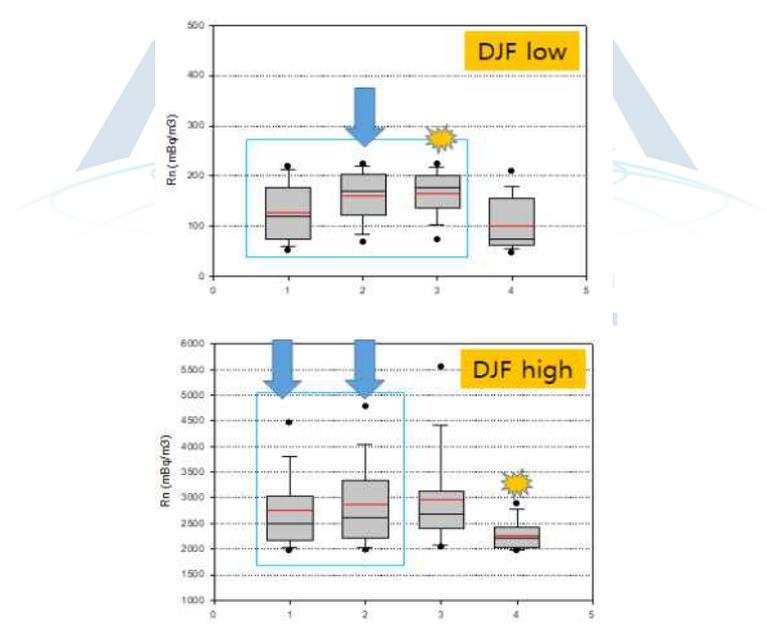
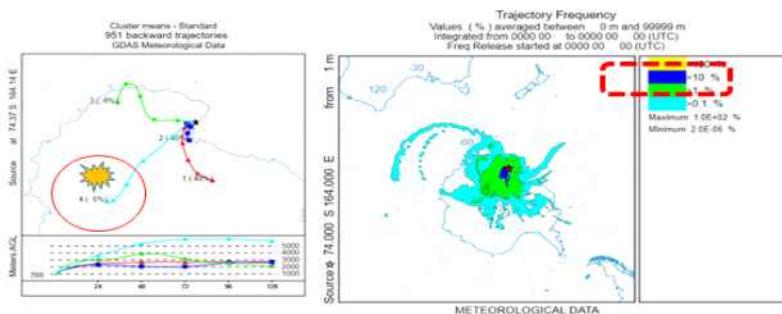
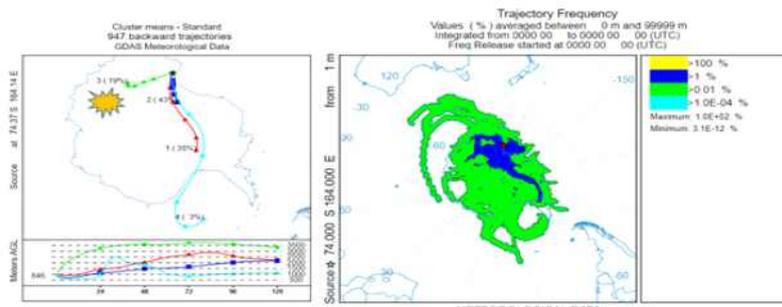


Fig. 3.2.95. 겨울철(좌) 및 봄철(우) 라돈 가스 농도, 대기온도, 풍속, 대기경계층고도의 일변화(2016년 1월 ~ 2020년 2월)





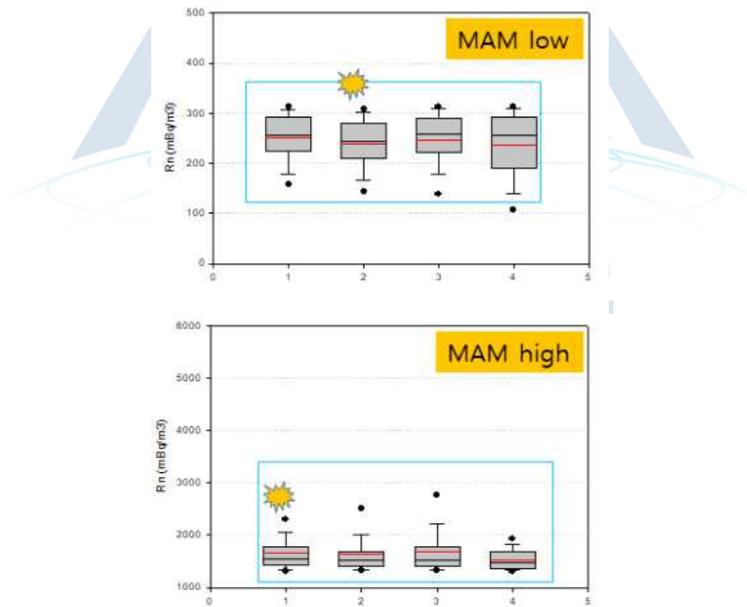
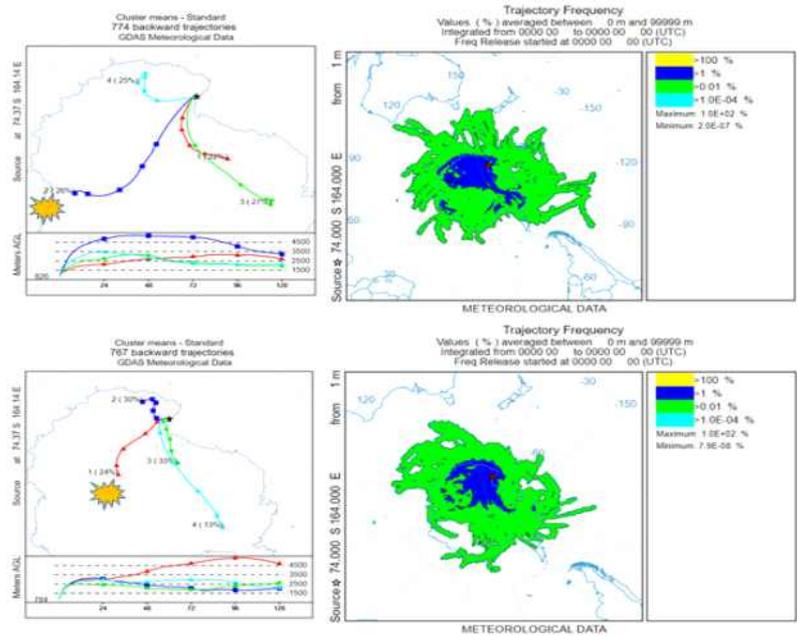
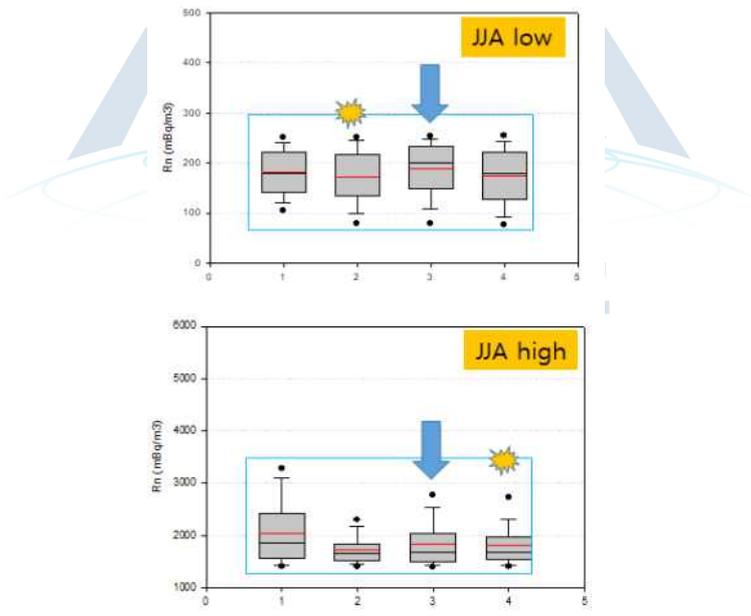
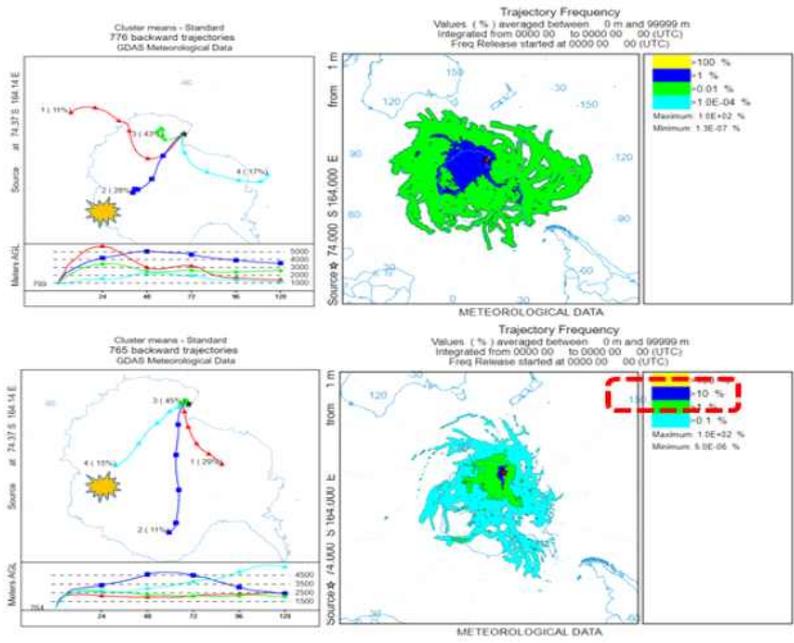


Fig. 3.2.96. 역궤적 분석 과 라돈농도 분석에 따른 군집분석 및 빈도 분포,((위)DJF: December, January, and February, (아래) MAM: March, April, and May, low: <10 percentile, high: >90 percentile, 2016년 1월 ~ 2020년 2월)



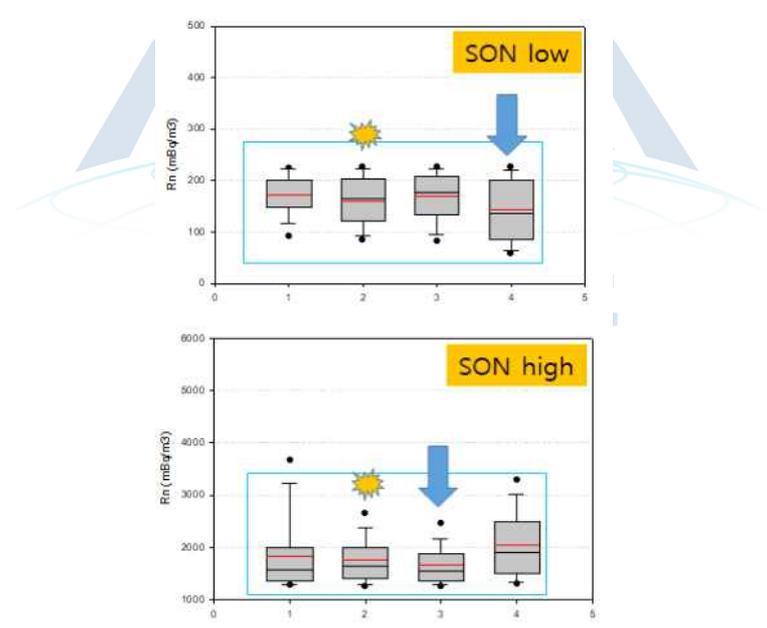
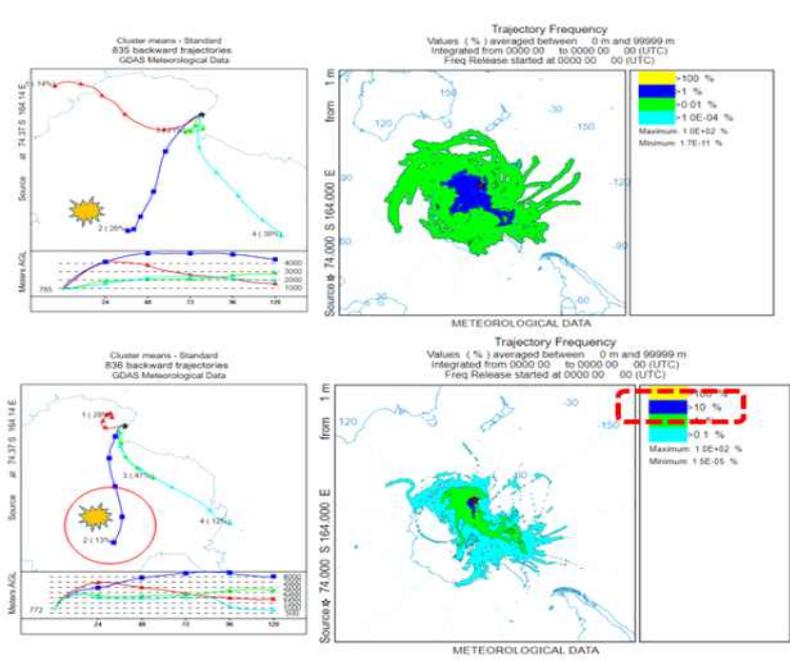


Fig. 3.2.97. 역궤적 분석 과 라돈농도 분석에 따른 군집분석 및 빈도 분포,((위) JJA: June, July, and August, (아래) SON: September, October, and November, J low: <10 percentile, high: >90 percentile, 2016년 1월 ~ 2020년 2월)

3.3 남극 및 남반구 고위도 기후변동성 진단

3.3.1 남극 지역 기후 변동성 탐지 및 변동성 지수 개발

가. 남극 현재 기후변화 메커니즘 진단

- 최근 수십년간의 남극대륙의 기후변화는 남극빙단산맥을 중심으로 비대칭적인 양상으로 발현되어 왔으며, 최근의 연구 결과는 인위적인 강제력 및 자연변동성을 포함한 여러 메커니즘이 이러한 남극대륙의 기후 변화의 동서간 비대칭에 복잡한 방식으로 기여한 것으로 보고하고 있다. 특히 이러한 비대칭적 기후변화 양상에는 주로 남극 대륙의 내부 요인의 큰 기여도를 통해 발현되어야 할 것으로 추정된다. 이에 우리는 남반구 지역의 여러 기후요소들과 남극 주변의 자연적 조건들이 남극 기후 변화의 동서간 비대칭에 기여하는 메커니즘을 살펴보았다.

1) 남극 대륙 표층대기온도의 변동 특성

- 남극대륙 지면온도의 주요 변동 특성을 살펴보기 위하여 1958년부터 2012년까지 Nicolas and Bromwich (2014)의 지면온도 복원자료 (이하 NB2014)의 월평균 남극지면온도에 대한 경험적직교함수 분석을 수행하였다.

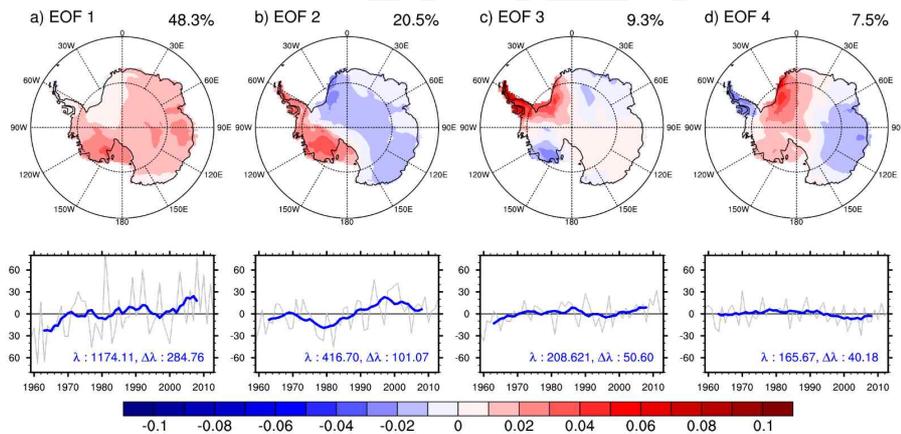


Fig. 3.3.1. 남극대륙 월평균 표층대기온도의 경험적직교함수 분석 결과

- 첫 번째 모드는 남극 전지역의 온도가 증가하는 모드로 약 48.3%의 남극지면온도 변화를 설명하며, 주성분 (Principal Component)은 1958년부터 지속적으로 증가하고 있다 (Fig. 3.3.1). 이 모드는 Jun et al. (2020)에서 전구 규모의 복사강제력 변화에 따른 전지구 온도변화와 밀접하게 연관되어 있음이 보고된 바 있다. 다음으로 두

번째 모드는 서남극과 동남극의 온도가 반대로 변동하는 모드로 약 20.5%의 남극지면온도 변화를 설명하며 주성분 모드는 강한 경년변동성과 함께 수십년 주기의 변동성이 관찰된다. Jun et al. (2020)에서는 이 두 번째 모드가 CMIP5에 참여한 다양한 모델의 현재 기후 재현자료, LOVECLIM, CCSM3 등의 장기 과거재현 자료에서 일관적으로 관찰되며 일부 자료에서 수십년의 주기성이 관찰되는 장주기 특성이 나타남을 보고한 바 있으며, 이 모드가 남극의 지형 분포와 밀접한 연관이 있음을 수치 실험을 통해 확인하였다.

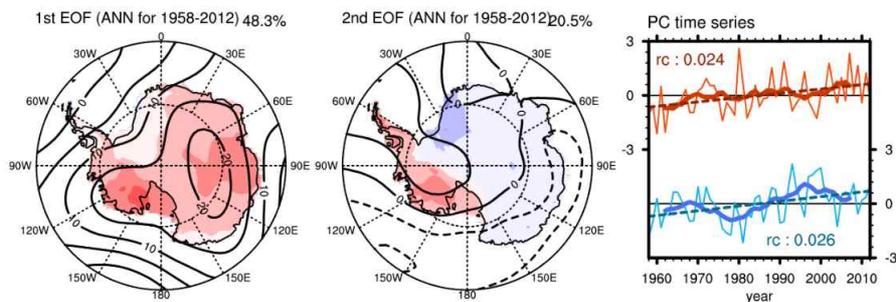


Fig. 3.3.2. 남극지면온도 두 주요모드의 500 hPa 지위고도에 대한 회귀상관 분석 결과

- 즉, 남극 지면온도의 첫 번째와 두 번째 경험적직교함수는 전체 남극지면온도 변화의 약 70%를 설명하는 주요 변동모드로, 첫 번째 모드와 두 번째 모드의 주성분에 대한 남반구 지역 지위고도의 회귀분석을 수행한 결과 첫 번째 모드의 경우 서남극 지역과 동남극 지역이 기압능을 갖는 고기압성 순환과 연관되어 있으며, 두 번째 모드의 경우 서남극 지역에 형성되는 고기압성 순환과 연관되어 있다 (Fig. 3.3.2).

2) 남극지면온도 변동 지수의 스펙트럼 분석을 통한 주요 변동주기 분석

- 앞서 분석된 NB2014 지면온도 복원자료의 1958 - 2012년 연평균 온도에서 추출된 첫 번째와 두 번째 EOF를 남극 지면온도의 두 주요 변동 모드로 정의하고 이 모드를 이용하여 남반구 지면온도의 변동 지수를 개발하였다. 이러한 변동 지수의 일관성을 확인하기 위하여 ECMWF의 최신 재분석자료인 ERA5의 표층대기온도의 연평균 어노말리에 Common Basis Function (CBF) 분석 방법을 수행하여 NB2014에서 생산된 지수를 비교하였다.

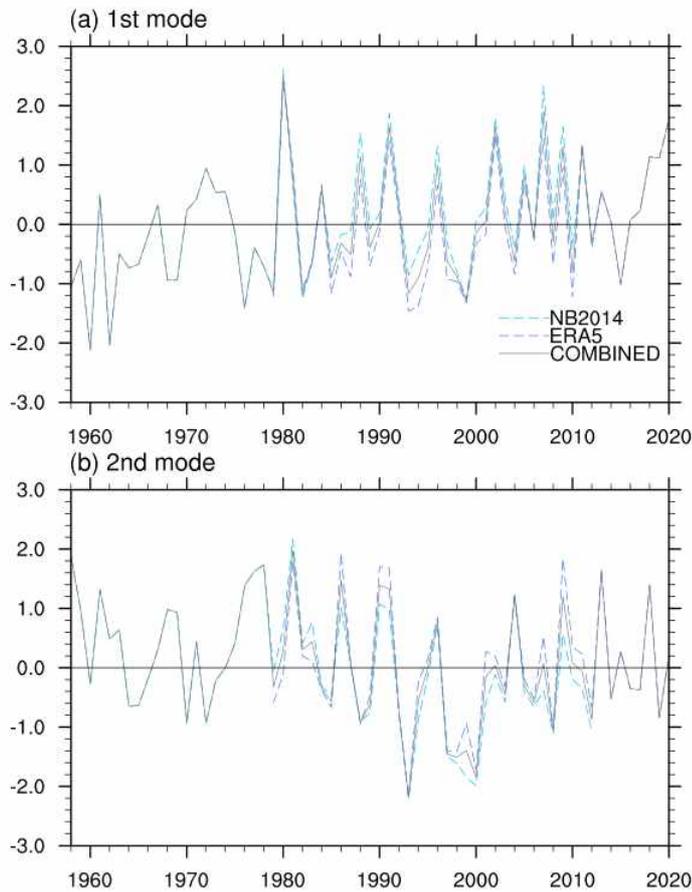


Fig. 3.3.3. NB2014에서 추출한 첫 번째, 두 번째 EOF PC와 CBF 방법을 이용하여 생성된 ERA5 PC의 비교

- ERA5 자료의 월평균 남극 지면온도 어노말리에 투영하여 생산된 월별 주요 변동 지수들은 두 시기가 겹치는 1979년부터 2012년까지는 지수간의 작은 차이가 관찰되나 경년변동성은 거의 동일하게 나타난다. 이러한 자료간의 일관적 변동성은 CBF 방법을 이용하여 생산된 변동지수의 신뢰도를 향상시킨다 (Fig. 3.3.3).
- 이렇게 생성된 남극대륙의 온도 변화의 두 주요 변동 지수를 power spectrum 분석을 통해 주기성을 살펴보았다 (Fig. 3.3.4). 첫 번째 모드는 10년 이내에서 다양한 강한 주기성이 관찰되나 통계적으로 95% 이상 유의한 주기성이 관찰되지 않는다. 한편 두 번째 모드는 약 4.5년의 변동주기가 95% 이상 유의한 주기성으로 나타난다. 분석한 1958년부터 2020년까지 총 63년 기간에서는 두 모드 공통적으로 통계적으로 유의한 10년 이상의 장주기의 변동성이 나타나지 않는데, Jun et al. (2020)의 결과에서 시사한 것처럼 남극지역에 수십년 규모의 장주기 변동성이 존재하는 경우, 63년은 통계적으로 유의한 장주기 변동성을 관찰하기에는 부족할 것으로 판단된다.

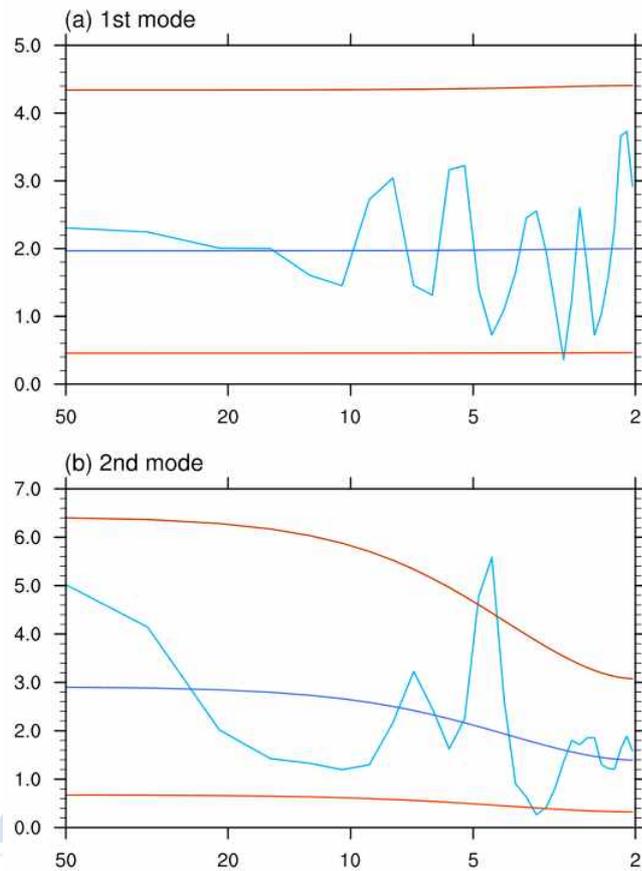


Fig. 3.3.4. 남극 지면온도 두 변동모드의 1958 - 2020년간 연평균 변화에 대한 power spectrum 결과

3) 남극지면온도 변동 지수와 연관된 남극 및 남반구 지역 대기변동성 분석

- 이러한 월별 변동 지수를 연평균, 계절별 평균을 수행하여 연평균, 계절별 변동 지수를 생산하고 이를 이용한 대류권 및 성층권 대기 온도에 대한 회귀분석을 수행하여 남극대륙의 온도변화와 연관된 변동 특성을 살펴보았다.

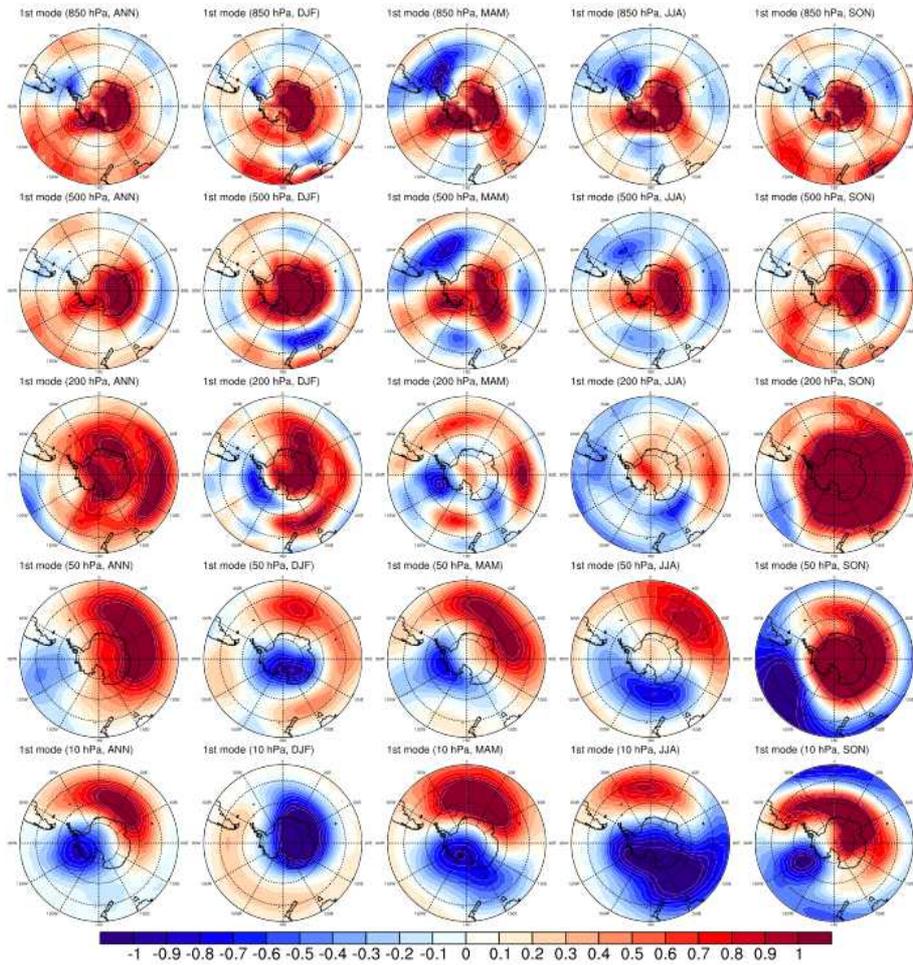


Fig. 3.3.5. 지면온도 변동의 첫 번째 모드의 대기 온도에 대한 회귀 계수

- 먼저 첫 번째 모드에 대한 대류권부터 성층권까지의 지면온도의 회귀상관분포를 살펴보면 지면온도에서 나타난 특성과 유사하게 대류권 하층과 대류권 중층에서 남극 전 지역의 지면온도 변동과 밀접한 상관 특성이 관찰된다 (Fig. 3.3.5). 한편 200 hPa의 성층권 계면 부근부터는 대류권의 분포와는 다른 상관분포 양상이 나타나며, 50 hPa 부터는 동서방향 파수 1의 강한 대기과동 형태의 상관 특성이 나타난다. 이러한 성층권의 온도 변화는 남극 대륙 주변의 지위고도의 변화 양상과 연관되어 있다.

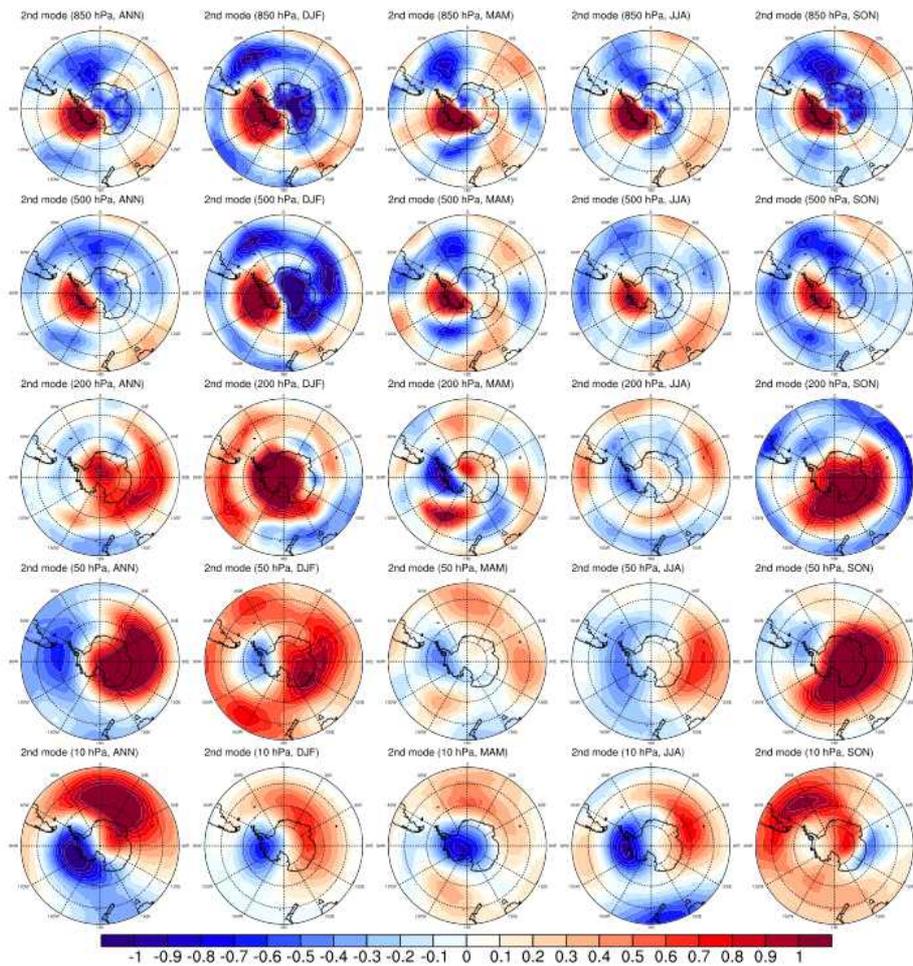


Fig. 3.3.6. 지면온도 변동의 두 번째 모드의 대기 온도에 대한 회귀 계수

- 두 번째 모드의 대류권 및 성층권 온도에 대한 회귀상관 분포 특성 역시 대류권 중층과 하층에서는 지면온도 EOF 분포 특성에서 나타난 동남극과 서남극 지역에서 반대의 상관관계가 분포하는 특성이 잘 나타난다 (Fig. 3.3.6). 첫 번째 모드와 마찬가지로 200 hPa 대류권 계면 부근부터에서는 지면과 동일한 동남극과 서남극의 비대칭적 상관관계가 나타나지 않으며, 특히 50 hPa 이상의 성층권에서는 동남극과 서남극의 상관관계가 지면과 반대의 부호의 동서방향 파수 1의 형태가 주로 나타난다.

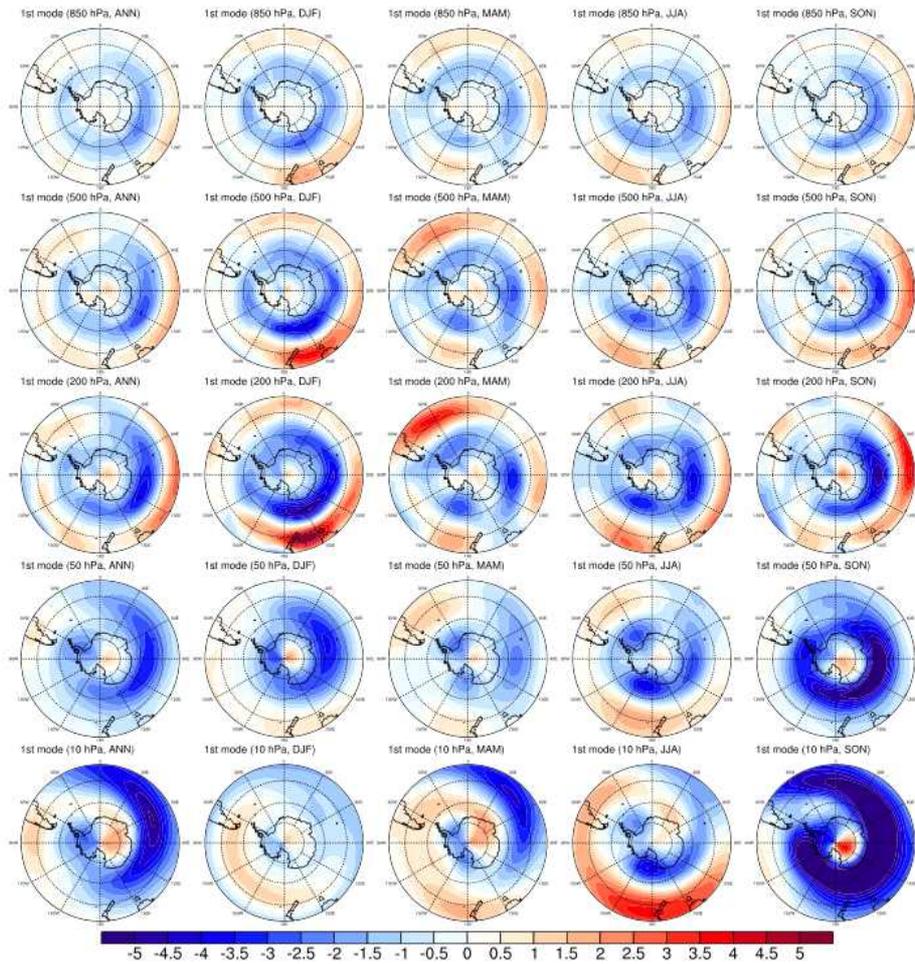


Fig. 3.3.7. 지면온도 변동의 첫 번째 모드의 동서방향 바람에 대한 회귀 계수

- 생산된 월별 변동 지수를 연평균, 계절별 동서방향 바람에 대하여 동일한 회귀분석을 수행하였다 (Fig. 3.3.7). 첫 번째 모드와 연관된 하부대류권의 동서방향 바람은 남극대륙 주변에서 동풍이 강해지는 특징을 보이며, 이러한 남극대륙을 따라 순환하는 동풍 순환은 약 50 hPa까지 동일한 공간 분포가 유지되는 순압 형태를 보인다. 이는 첫 번째 모드가 남극진동과 유의한 상관관계를 보이는 것과 연관되어 있으며 SAM의 음의 위상시에 남극 주변에 동풍이 대류권에서 성층권까지 순압구조로 강화되는 것에 영향을 받는 것으로 추정된다.

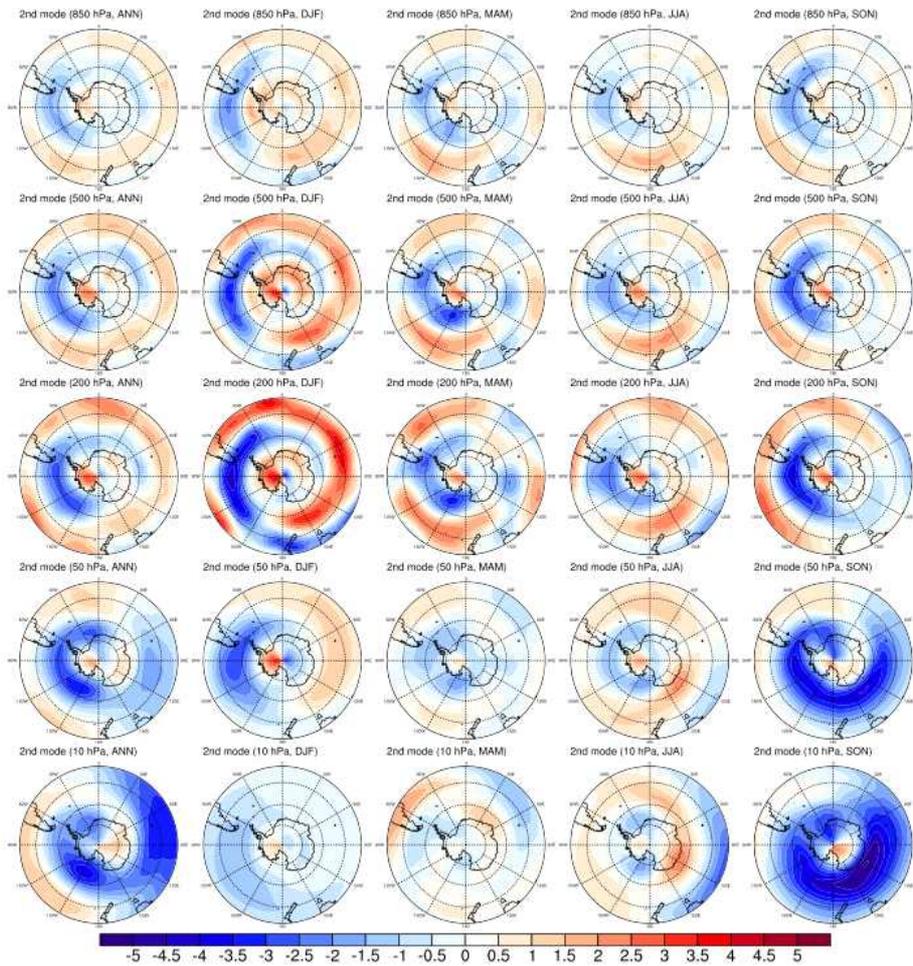


Fig. 3.3.8. 지면온도 변동의 두 번째 모드의 동서방향 바람에 대한 회귀 계수

- 두 번째 모드와 연관된 하부대류권의 동서방향 바람은 서남극 주변에서 변화가 크게 나타나며, 서남극 해안에서 동풍이 강화되고 서남극 지역에서 서풍이 강화되는 서남극 지역에서 고기압성 순환이 나타난다 (Fig. 3.3.8). 또한 이러한 분포 특성 역시 하층부터 약 50 hPa까지 남극 주변의 공간분포가 유지되는 순압형태를 보인다. 이러한 특성을 미루어 볼 때 남극 지면온도의 주요 변동성은 대류권에서 성층권 하부까지 강한 순압 구조의 순환장의 발달과 밀접하게 연관되어 있으며, 이에 따라 SAM, PSA1, PSA2 등의 대기변동성과의 상관성이 존재하는 것으로 추정된다.

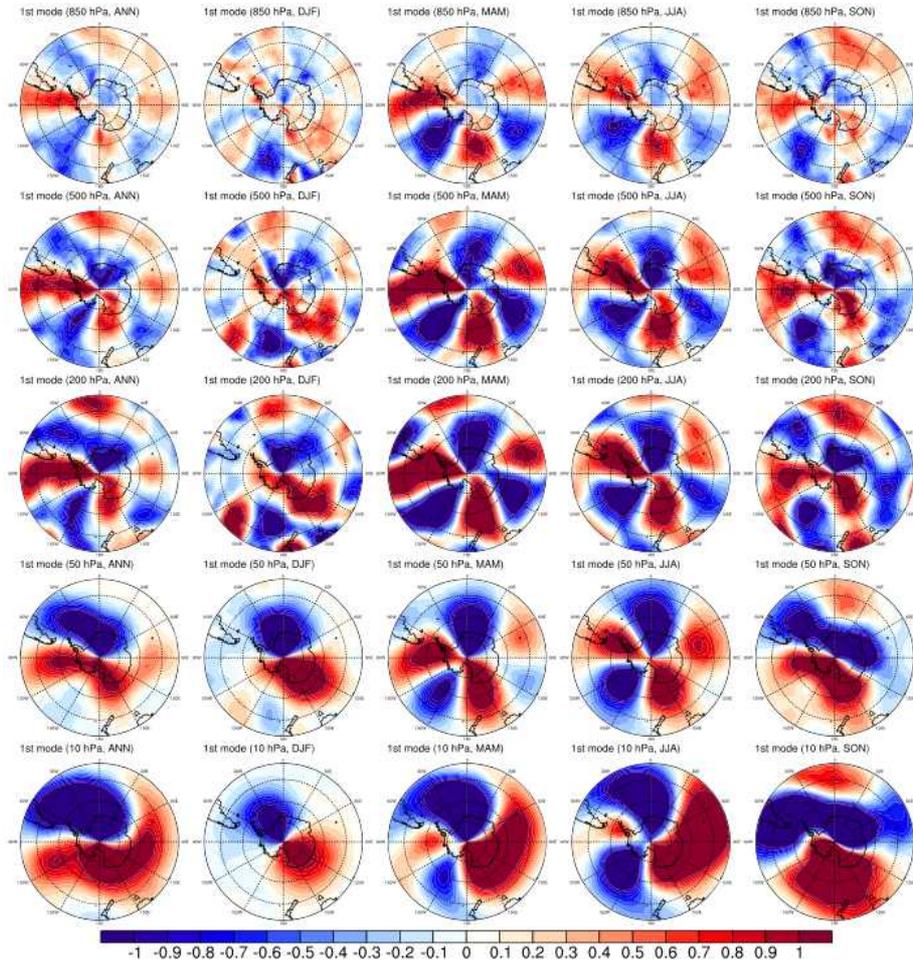


Fig. 3.3.9. 지면온도 변동의 첫 번째 모드의 남북방향 바람에 대한 회귀 계수

- 다음으로 연평균, 계절별 남북방향 바람에 대한 생산된 월별 변동 지수의 회귀상관 분석을 수행하였다 (Fig. 3.3.9). 첫 번째 모드와 연관된 남북방향 바람은 대류권에서 전계절에 걸쳐 남극 주변에 동서방향 파수 3 진동 형태로 나타나며, 성층권에서는 계절에 따라 동서방향 파수 1에서 2의 진동 형태로 나타난다. 한편 두 번째 모드와 연관된 남북방향 바람은 첫 번째 모드와 동일하게 대류권에서는 전계절에 걸쳐 남극 주변에 동서방향 파수 3 진동 형태로 나타나며, 성층권에서는 계절에 따라 동서방향 파수 1에서 3의 진동 형태를 보인다 (Fig. 3.3.10). 이는 남극 주변 남빙양 지역의 대류권의 SAM, PSA1, PSA2 등의 주요 대기변동성이 동서방향 파수 3 형태를 띄는 것과 무관하지 않으며, 남극 대륙의 온도변화가 이러한 주요 대기변동성과 밀접하게 연관되어 있음을 시사한다.

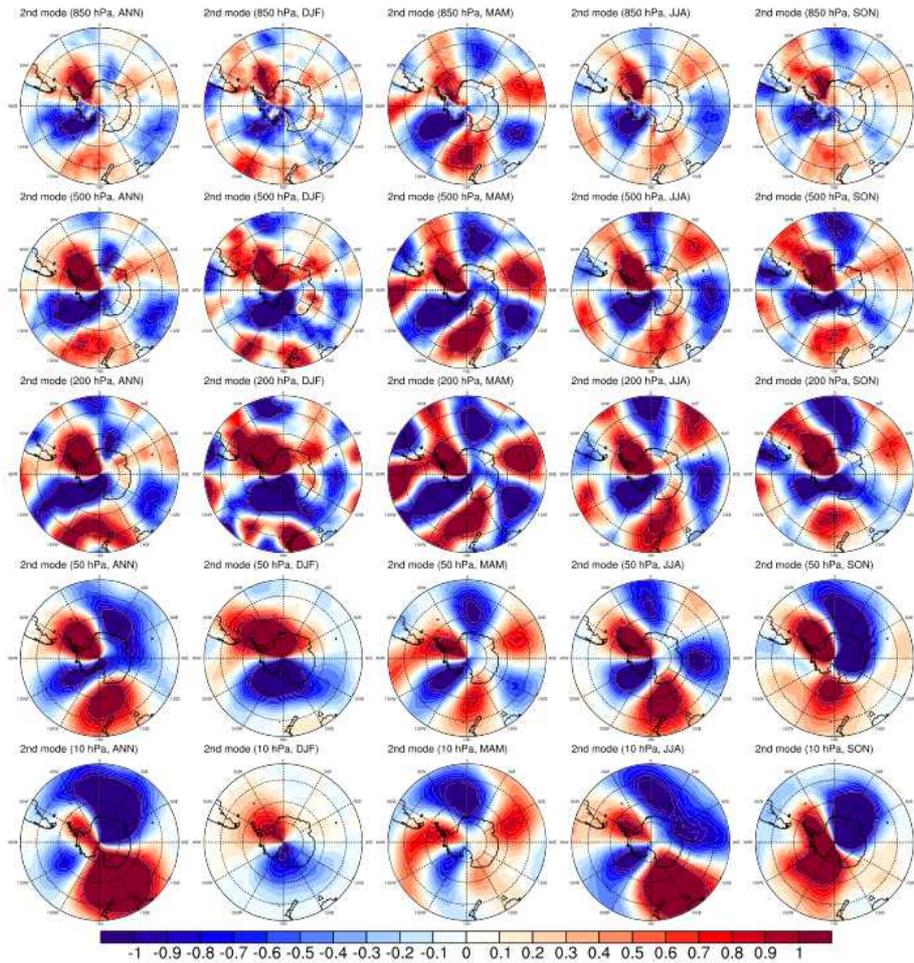


Fig. 3.3.10. 지면온도 변동의 두 번째 모드의 남북방향 바람에 대한 회귀 계수

- 다음으로 연평균, 계절별 지위고도의 생산된 월별 변동 지수에 대한 회귀상관분석을 수행한 결과, 첫 번째 모드의 변화에 따른 지위고도의 변화는 Jun et al. (2020)에서 나타난 남극 전지역에 걸친 고기압성 순환으로 나타나며 이러한 특성은 전계절에 공통적으로 나타난다 (Fig. 3.3.11). 또한 이러한 고기압성 순환은 대류권에서 성층권 중층까지 유지되는 순압구조로 나타난다. 이러한 지위고도의 상관 특성은 첫 번째 모드의 대류권부터 성층권까지의 온도, 바람장과의 회귀상관 분포에서 나타나는 순압구조와 일관된 특징이다.

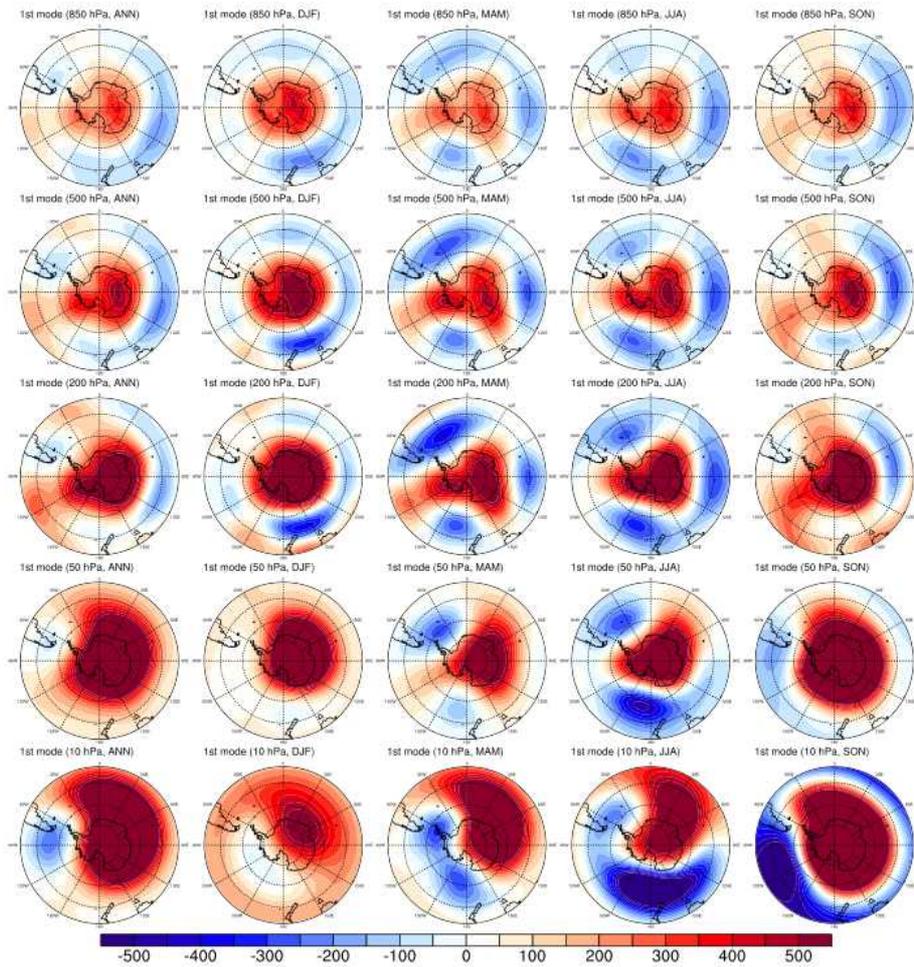


Fig. 3.3.11. 지면온도 변동의 첫 번째 모드의 지위고도에 대한 회귀 계수

- 두 번째 모드의 회귀상관 분석 결과 지위고도 역시 첫 번째 모드와 동일한 대류권의 순압 특성이 나타난다 (Fig. 3.3.11). Jun et al. (2020)에서 보고된 것처럼 남극횡단산맥을 경계로 서남극 지역의 강한 지위고도의 증가와 동남극 지역의 지위고도의 감소가 대류권 전체에 걸쳐서 발생하며, 특히 서남극 지역의 지위고도 증가는 약 50 hPa 고도까지 전계절에 공통적으로 나타난다.

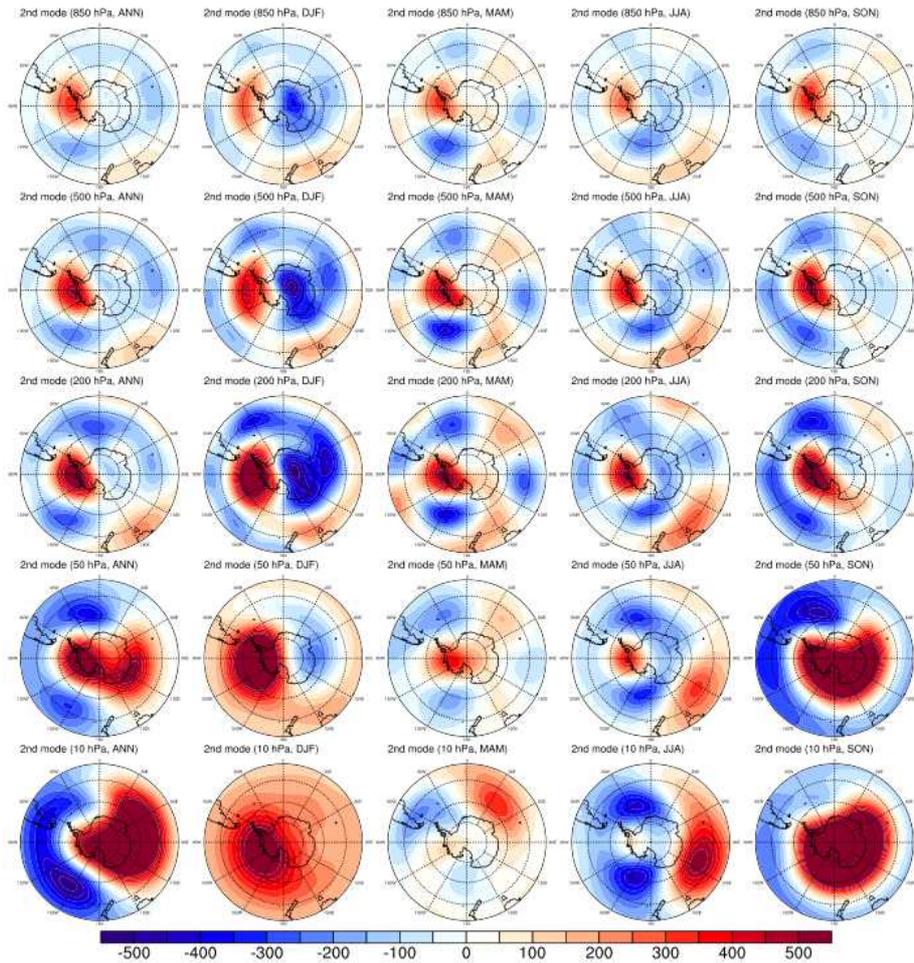


Fig. 3.3.11. 지면온도 변동의 두 번째 모드의 지위고도에 대한 회귀 계수

나. 남극 및 남반구 고위도 지역 기후요소의 변화 및 상관성 진단

○ 남극대륙의 표층대기온도, 남극대륙 주변의 해빙 등 남극 지역의 기후요소는 열대 해양지역의 장주기변동과 남반구 지역의 대기순환장의 변화와 밀접한 상관관계가 있음이 여러 연구에서 밝혀지고 있다. 이에 남극대륙 및 남반구 지역의 기후변화의 양상을 이해하기 위하여 주요 기후요소 및 기후변동성간의 상관성을 분석하였다.

1) 주요모드 추출을 통한 남극 지면온도, 남반구 대류권 및 성층권 대기순환의 경년변동성 분석

○ 남극대륙의 지면온도 변동은 남반구 지역 대류권과 성층권의 대기순환장의 변동성에 큰 영향을 받음이 여러 연구에 의해 제시되어 왔다. 특히 Marshall and Thompson (2016)에서는 남반구 대류권-성층권의 잘 알려진 주요 대기순환모드인 BAM,

남극진동 (Southern Annula Mode; SAM), Pacific-South America 1모드 (PSA1), Pacific-South America 2 모드 (PSA2)의 남극대륙 지면온도 및 순환장의 영향을 살펴본 바 있다. 이러한 남반구 대기의 주요 변동모드들은 주로 강한 경년의 주기성을 보이며, 이에 따라 남극 지면온도 변화에도 경년 주기의 영향을 미친다 (Fig. 3.3.12).

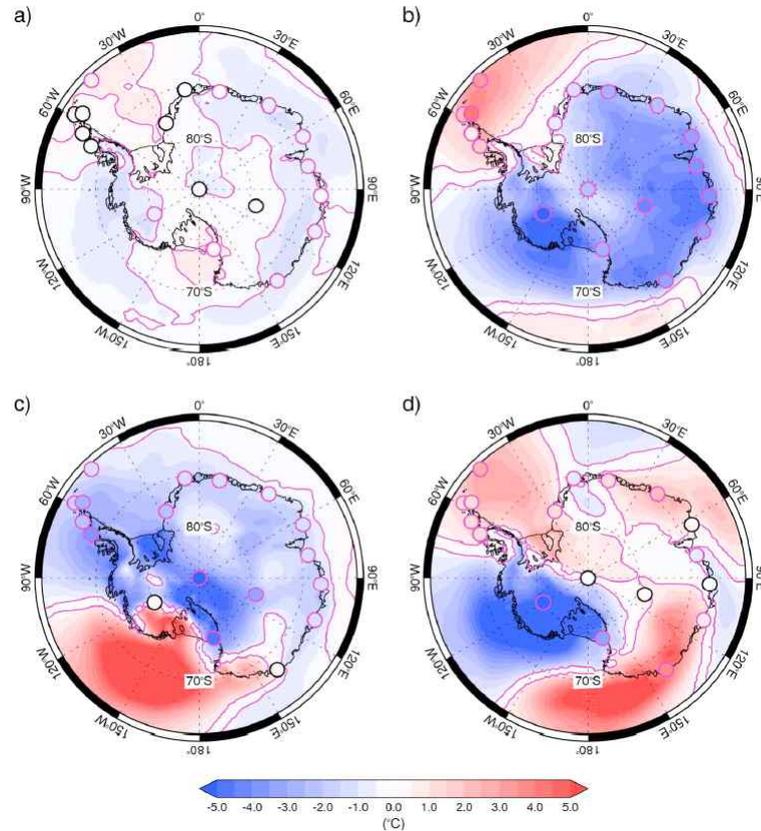


Fig. 3.3.12. BAM, SAM, PSA1, PSA2와 연관된 지면대기온도의 회귀상관분포. Marshall and Thompson (2016)에서 가져옴

- 먼저 남반구 성층권의 주요 모드 추출을 위하여 ERA-Interim의 1979년부터 2014년까지의 50 hPa 월평균 지위고도의 경년변화에 대한 경험적직교함수 분석을 수행하였다. 첫 번째 직교함수는 SAM과 유사한 공간 분포 특성을 보이며, 약 41.0%의 월평균 지위고도의 변동성을 설명하며, 주성분의 년평균 변화에서는 강한 경년변동성이 관찰된다. 두 번째, 세 번째 직교함수는 남극 주변의 파수 1의 파동이며, 두 모드가 90도의 위상 차이를 보인다. 두 모드는 동일한 아남극 지역의 파수 1의 대기파동으로 판단되며, 직교함수분석의 특성에 따라 동일한 물리적 특성이 두 위상으로 분리되어 추출된 것으로 추정된다 (Fig. 3.3.13).

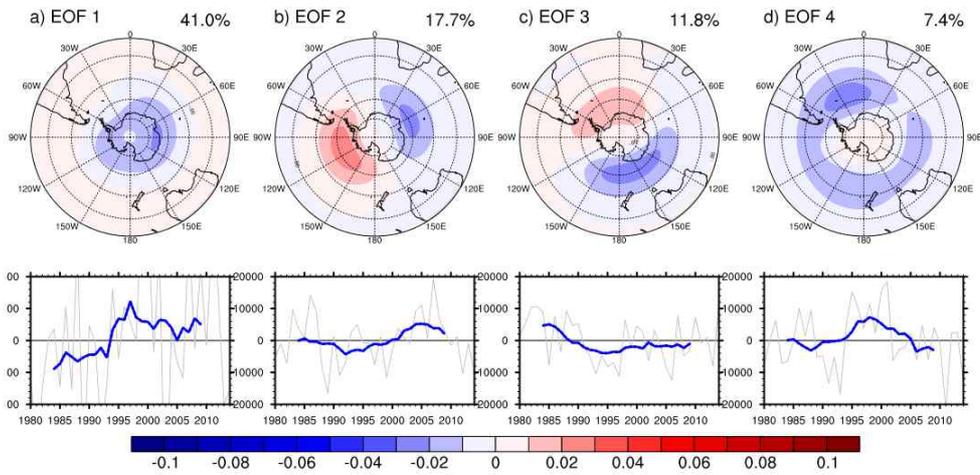


Fig. 3.3.13. ERA-Interim의 50 hPa 월평균 지위고도의 경험적직교함수 분석 결과

○ 50 hPa와 마찬가지로 대류권의 주요 순환장 특성을 살펴보기 위하여 ERA-Interim의 1979년부터 2014년까지의 500 hPa 월평균 지위고도에 대한 경험적직교함수 분석을 수행하여 주요 변동모드를 추출하였다 (Fig. 3.3.14). 첫 번째 직교함수는 50 hPa와 마찬가지로 SAM 형태의 변동을 나타내며 약 23.0%의 변동성을 설명한다. 이러한 SAM과의 상관특성은 주성분의 년평균 변화에서 나타나는 강한 경년변동성으로 추정이 가능하다. 500 hPa의 두 번째와 세 번째 직교함수는 Mo (2001)에서 제안된 PSA1, PSA2의 공간 분포 특성을 보이며 각각 10.8%, 10.1%의 변동성을 설명한다. Mo (2001)에서는 PSA1, PSA2는 적도 태평양과 밀접한 상관을 보이는 대기 파동 형태의 대기변동성임을 제시한 바 있으며, Marshall and Thompson (2016)에서는 남극 지면온도 변동에 미치는 영향 특성을 정리한 바 있다.

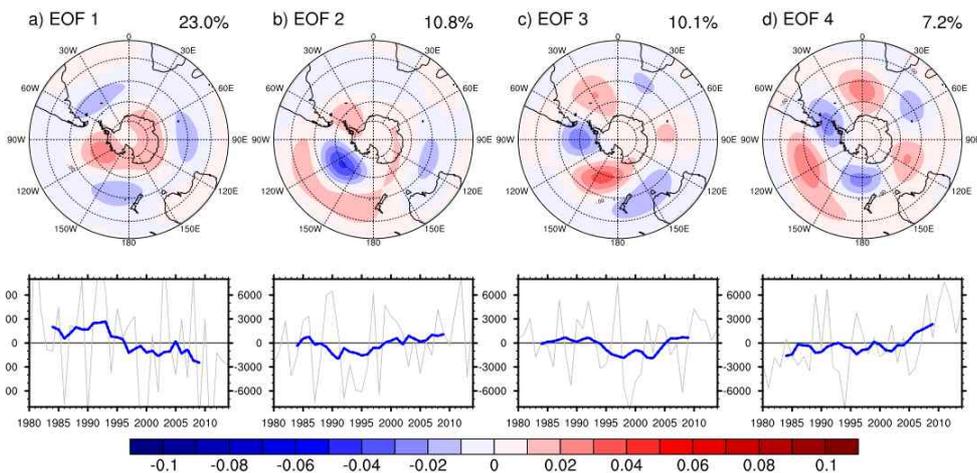


Fig. 3.3.14. ERA-Interim의 500 hPa 월평균 지위고도의 경험적직교함수 분석 결과

- 앞서 정의된 남극대륙의 첫 번째와 두 번째 변동 모드를 모드의 주요 성분을 전체 남극지면온도의 변화를 나타는 지수, 서남극-동남극간 비대칭 변동을 나타내는 지수로 정의하고 주 성분을 Mashall and Thompson (2016)에서 제시된 SAM, PSA1, PSA2과 열대태평양 지역의 NINO3, NINO3.4, NINO4 지수와의 상관분석을 수행하여 상관 특성을 살펴보았다.

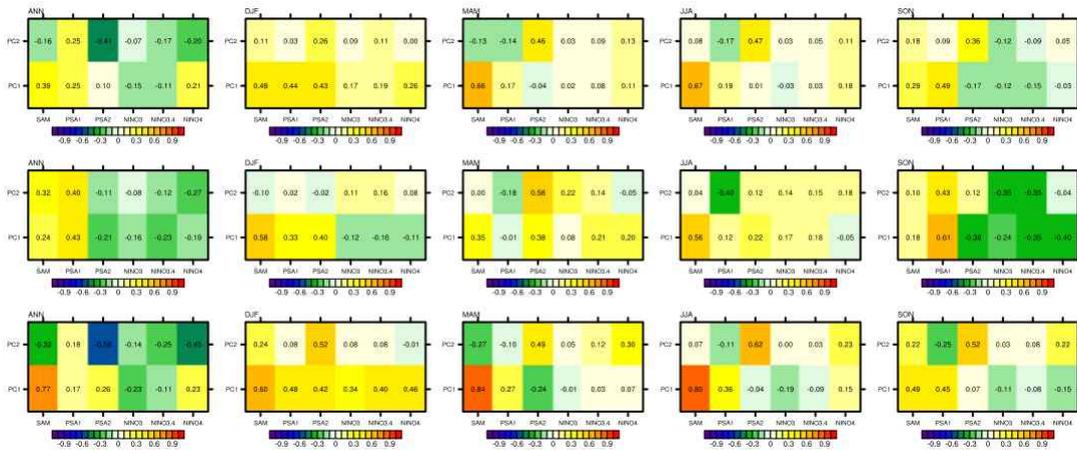


Fig. 3.3.15. ERA-Interim의 500 hPa 월평균 지위고도의 경험적직교함수 분석 결과

- 남극대륙 지면온도 변동의 첫 번째 모드의 경년 변화는 1958년부터 2012년까지 SAM과 0.39, PSA1과 0.25의 상관계수를 보인다 (Fig. 3.3.15). 특히 1979년부터 2012년까지 SAM과의 상관계수가 0.77로 급격하게 높아지며, 따라서 이 시기 남극 대륙 지면온도 변화에 SAM이 크게 기여하였음을 추정할 수 있다. 이러한 첫 번째 모드와 SAM의 상관성은 남반구 가을철과 겨울철에 높게 나타나며, 이는 기존 Fogt et al. (2009) 등에서 제시된 결과와 일관된 결과이다. 두 번째 모드의 연평균 변화는 1958년부터 2012년까지 PSA2와 -0.41의 상관계수를 보이며, 이러한 음의 상관특성은 전계절에 걸쳐 나타난다. 한편 1979년부터 2012년까지는 SAM과의 상관계수가 0.58로 급격하게 높아지는데, 이러한 PSA2와의 상관관계는 전계절에 걸쳐 유지된다. 이는 최근 1979년부터 2012년까지의 남반구의 지배적인 순환 특성에 변화가 있을 수 있음을 암시한다.

2) 마지막최대빙하기 시기의 남반구 지역 기후특성 변화

- 적도 및 남반구의 해수면온도, 대기변동성 등의 주요 기후 요소가 남극 대륙의 지면온도에 큰 영향을 미치며 (Schneider et al., 2016) 남극 대륙의 지면온도의 변동

특성은 남극 지형의 특성에 의해 큰 영향을 받는다 (Jun et al., 2020). 따라서 남극 대륙에 영향을 미치는 여러 기후 요소들에 급격한 특성 변화가 존재하는 마지막 최대빙하기 시기의 남반구 및 남극 지역의 기후 특성과 상관메커니즘을 살펴보았다.

- 마지막최대빙하기 시기의 수치재현 자료의 특성의 신뢰도를 평가하기 위하여 남반구 대기순환과 관련한 마지막 최대빙하기 시기의 프록시 자료 특성을 살펴보았다. Sime et al. (2013)에서는 남극 주변의 프록시 자료 분석을 통해 마지막최대빙하기 시기에 남극 지역은 현재보다 건조했으며 남아메리카 서안은 습해지고 호주 남부 지역은 건조했음을 밝혔다 (Fig. 3.3.16). 또한 이 연구에서 수행한 HadGEM 마지막최대빙하기 실험 결과에서도 이러한 프록시에서 나타난 남극지역의 건조화, 남아메리카 서안의 습윤화, 호주 지역의 건조화가 일관적으로 모의되었다.

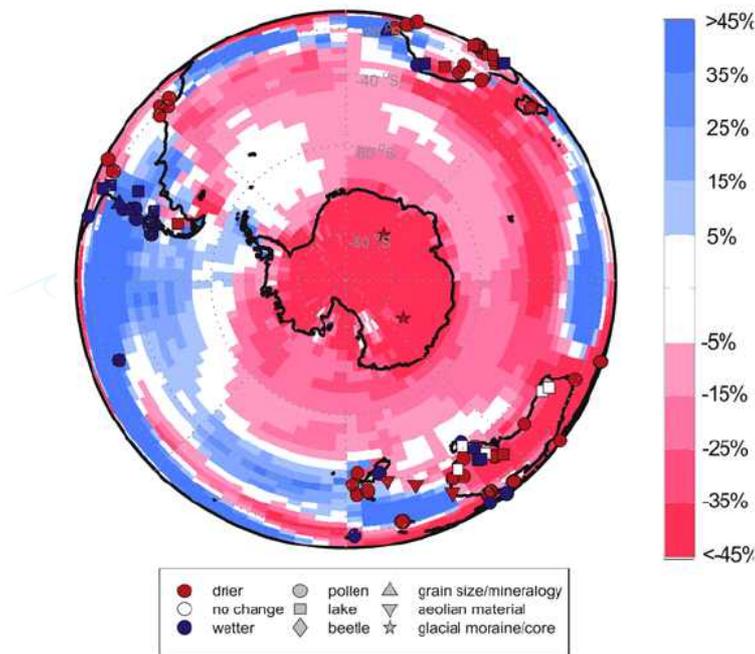


Fig. 3.3.16. 프록시에서 나타난 현시기 대비 마지막최대빙하기 시기의 습윤도. Sime et al. (2013)에서 가져옴

- 특히 마지막최대빙하기 실험과 산업혁명기이전 시기 실험의 강수량의 차이를 산업혁명기이전시기 실험의 강수량으로 나누어 과거에 강수량이 현재에 비하여 얼마나 변했는지를 살펴본 결과, 남극과 남빙양 지역은 강수량이 감소하며 남아메리카 서안의 태평양 고위도 지역은 강수량이 증가하였다. 이러한 모델과 프록시의 공통된 결과에 비하여 뉴질랜드 지역에서는 차이가 나타났는데, 프록시 자료에서는 건조화 경향이 나타났으나 실험 결과에서는 오히려 강수량의 증가가

나타났다. 모의 결과의 계절별 특성을 살펴보면 호주와 남극지역은 전계절에 걸쳐 강수량이 감소하며, 남아메리카 지역은 겨울철을 제외한 모든 계절에서 강수량이 증가하는 것으로 나타난다 (Fig. 3.3.17).

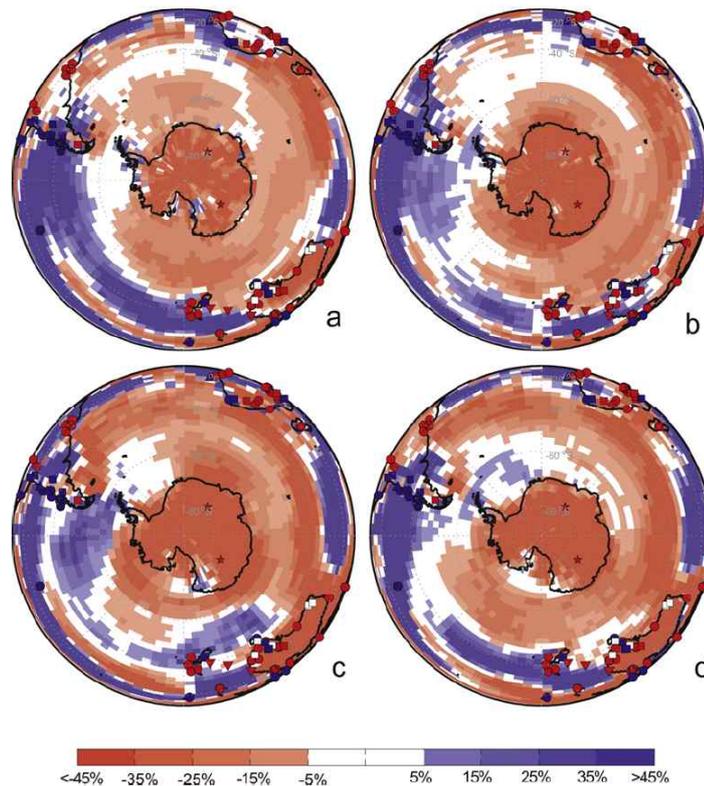


Fig. 3.3.17. 프록시에서 나타난 현시기 대비 마지막최대빙하기 시기의 계절별 습윤도. Sime et al. (2013)에서 가져옴

- 마지막최대빙하기 시기의 상세한 수문특성의 변화를 살펴보기 위하여, NCAR CESM1.2 지구시스템모형을 이용하여 마지막최대빙하기 시기 기후를 재현하고, 모의된 남반구 대기순환의 수문특성을 살펴보았다. 실험의 경계조건은 3차 고기후모델링간 상호비교연구 (Paleomodeling Intercomparison Project phase 3)에서 제공하는 마지막최대빙하기 (Last Glacial Maximum; LGM) 조건을 사용하였고, 비교를 위한 대조군 실험으로 5차 접합모델링간 상호비교연구 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5; CMIP5)의 Pre-Industrial (PI) 조건을 사용한 실험을 수행하였다. 두 실험 모두 250년간 수행하여 마지막 50년의 변화를 비교하였다.
- Sime et al. (2013)에서 살펴본 방식과 마찬가지로, 지면대기비습량과 강수량의 현세

실험에 대비한 마지막최대빙하기 시기의 변화의 분석을 통해 수문특성의 변화를 분석하였다 (Fig. 3.3.18). 지표층의 대기중 비습량의 경우 마지막최대빙하기시기에 현세에 대비하여 남반구 지역 전체에서 감소하는데, 특히 남극지역에서 약 50% 감소한다. 마지막최대빙하기시기의 강수량의 경우 현세에 비하여 남극지역에서는 비습량과 마찬가지로 약 50% 감소한다. 남극대륙의 강수량, 비습량의 감소량을 볼 때 전체적인 수문순환이 모두 감소하였을 것으로 추정된다. 한편 강수량의 경우 남빙양지역에서는 감소하나 호주, 뉴질랜드, 남아메리카 최남단 서안, 아프리카 남부지역은 오히려 증가하는 것으로 나타난다.

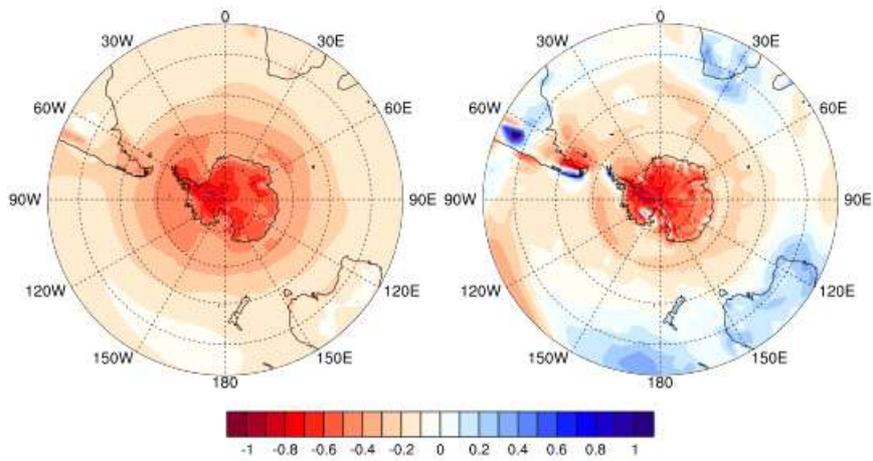


Fig. 3.3.18. CESM1.2로 수행한 마지막최대빙하기와 산업혁명기이전 시기 실험에서 나타난 마지막최대빙하기시기의 지면대기비습량과 강수량의 변화율

- 이러한 표층 비습량과 강수량의 계절별 변화를 살펴보면 남반구 지역은 전계절에 걸쳐 감소하며, 남극과 남빙양 지역은 겨울철의 감소가 가장 크게 나타난다. 한편 강수량의 경우 여름철의 경우 드레이크해협에서 표층 비습량의 감소가 상대적으로 크게 나타난다 (Fig. 3.3.19). 이 지역의 강수량의 감소가 크지 않은 것을 고려할 때, 해양 특성의 변화에 따른 대기해양 상호작용 특성의 변화가 원인인 것으로 추정된다. 강수량의 계절별 변화를 살펴보면 남극과 남빙양의 전지역에 전계절에 걸쳐 강수량이 감소한다. 이에 반해 대륙 지역의 강수량은 증가했던 것으로 모의되며, 이러한 강수량의 증가는 전계절에 동일하게 나타나며, 특히 겨울철에 크게 증가하는 것으로 나타난다.

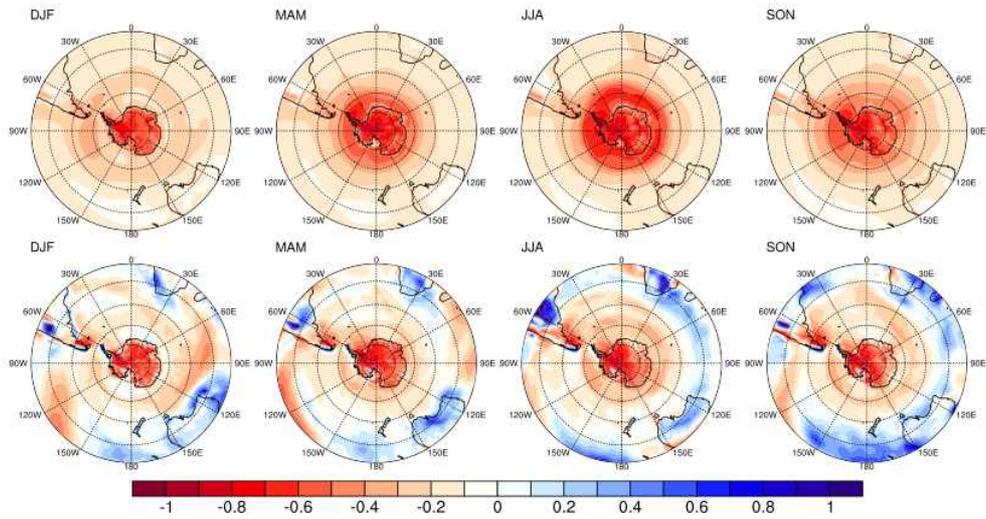


Fig. 3.3.19. CESM1.2로 수행한 마지막최대빙하기와 산업혁명기이전 시기 실험에서 나타난 마지막최대빙하기시기의 지면대기비습량과 강수량의 계절별 변화율

- 마지막최대빙하기시기 표층 수문순환 특성 변화를 살펴보기 위하여 남반구 대기의 주요 변동성의 현재 및 마지막최대빙하기 특성의 차이를 분석하였다. 두 시기 대류권의 주요 순환장을 추출하기 위하여 산업혁명기이전 (PI) 실험과 마지막최대빙하기 실험 (LGM)의 50년간의 500 hPa 월평균 지위고도의 경험적직교함수 분석을 수행하여 해당 시기의 주요 변동모드를 추출하였다.

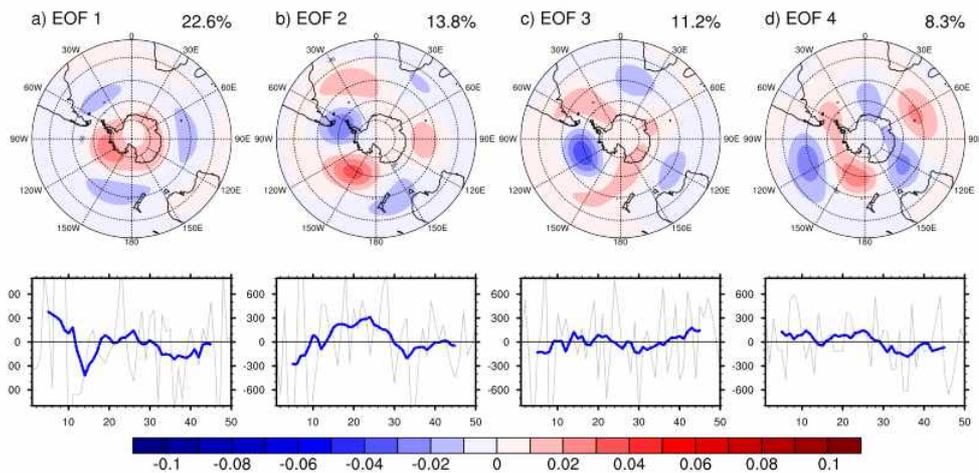


Fig. 3.3.20. 산업혁명기 이전 실험의 500 hPa 월평균 지위고도의 경험적직교함수 분석 결과

- 산업혁명기 이전 시기의 경험적직교함수 분석 결과의 세 주요 모드들은, ERA-Interim에서 나타난 경험적직교함수들과 유사한 공간특성과 변동성을 보인다 (Fig. 3.3.20). Marshall and Thompson (2016)에서 제시된 바와 같이 여러 연구에서

재분석 지위고도의 첫 번째, 두 번째, 세 번째 EOF는 각각 SAM, PSA1, PSA2로 정의하는데, 모델 재현 결과에서도 이러한 세 주요 변동성들이 잘 재현된 것으로 평가된다. 한편 관측과의 모델과의 차이는 두 번째, 세 번째 모드에서 나타나는데, 두 번째 모드는 관측의 PSA2, 세 번째 모드는 PSA1과 공간형태가 유사하게 나타난다. 이러한 두 PSA 모드가 잘 분리되지 않는 특성은 관측자료에서도 나타나며, 이에 대한 여러 연구가 진행된 바 있다.

- 마지막최대빙하기 시기의 첫 번째, 두 번째, 세 번째 경험적직교함수 역시 ERA-Interim에서 나타난 경험적직교함수들과 유사한 공간특성과 변동성을 보인다. 첫 번째 모드는 ERA-Interim의 첫 번째 모드 (SAM), 두 번째 모드는 ERA-Interim의 두 번째 모드 (PSA1), 세 번째 모드는 ERA-Interim의 세 번째 모드 (PSA2)와 공간형태가 유사하게 나타난다 (Fig. 3.3.21). 한편 두 번째 모드와 세 번째 모드는 모두 동일한 동서방향 파수 3의 대기파동의 형태로, ERA-Interim과 PI 실험에 비하여 동서방향 파수 3의 형태와 두 모드의 90도의 위상차가 더욱 뚜렷하게 관측된다.

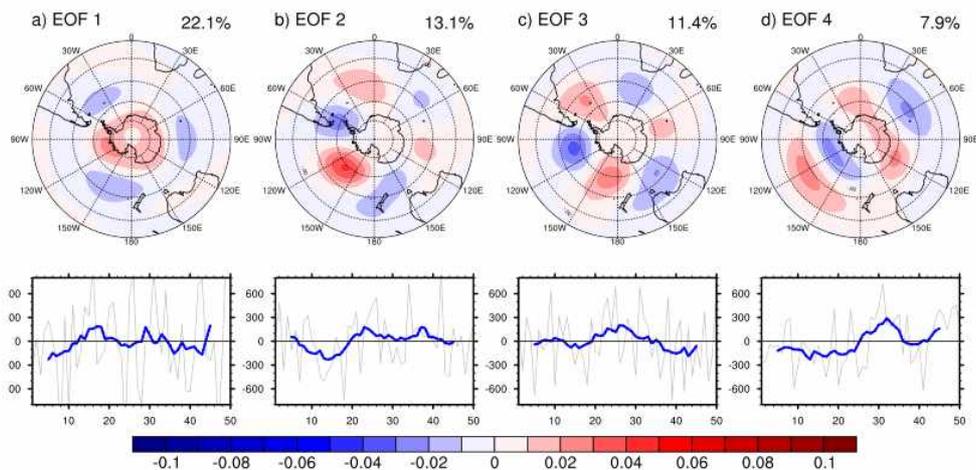


Fig. 3.3.21. 마지막최대빙하기 실험의 500 hPa 월평균 지위고도의 경험적직교함수 분석 결과

- 마지막최대빙하기 수치재현 실험 결과에서는 산업혁명기이전과 마지막최대빙하기 시기 남반구 지역의 대류권의 대기변동성에는 뚜렷한 차이가 나타나지 않으며, 따라서 두 시기의 대류권의 변동성과 남극대륙에의 영향이 크게 차이가 없었을 것으로 추정된다.

3) 남극지면온도 변동 지수의 주기성에 따른 남극 주변 기후요소와의 상관특성

- Jun et al. (2020)의 연구 결과에서는 남극대륙 지면온도의 장기재현 결과에서 두 주요 모드들의 강한 경년과 장주기 변동성이 관찰되는 것을 밝힌 바 있다. 이에 이러한 남극지면온도 변화의 단기 및 장주기 주기성을 살펴보기 위하여, 앞서 분석된 1958년부터 2020년까지 확장된 남극대륙의 주요 변동 지수에 10년 이하 주기의 고주파 필터와 10년 이상 주기의 저주파 필터를 적용하여 필터된 변동 지수를 생성하고 영국 해들리센터의 1958년부터 2020년간의 해수면온도, 해빙 면적 자료에 대한 회귀 상관 분석을 진행하였다.

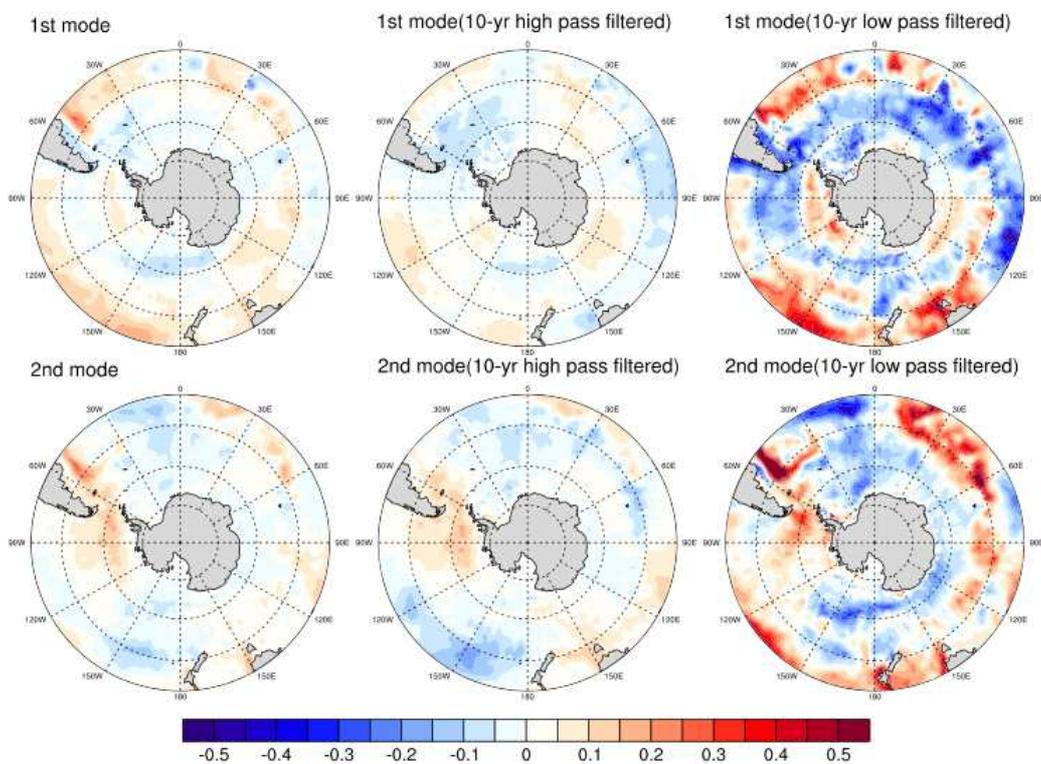


Fig. 3.3.22. 지면온도 변동 지수, 10년 이상 주기가 제거된 단주기 변동, 10년 이하 주기가 제거된 장주기 변동지수의 해수면온도에 대한 회귀상관계수 분포

- 해수면온도의 회귀상관 분석 결과, 첫 번째 모드는 Jun et al. (2020)에서 나타났던 동서방향 파수 3 형태로 고온과 저온이 반복되어 남극 대륙 주변을 순환하는 상관 분포 특성이 나타난다 (Fig. 3.3.22). 첫 번째 모드의 해수면온도와의 상관성 분포는 10년이하의 단주기와 10년 이상의 장주기 모두 대체적으로 유사한 공간 분포 특성을 보이나, 서남극 벨링스하우젠해의 동쪽 남극반도 주변 지역의 변동 경향은 10년 이상의 장주기 변동성에 의한 기여가 더 큰 것으로 나타난다. 두 번째 모드는 Jun et

al. (2020)에서 제시된 것처럼 서남극 지역 벨링스하우젠 해역과 아문젠 해역의 고수온과 연관되어 있고, 동남극 지역은 저수온과 연관되어 있는 비대칭 특성이 일관적으로 관찰된다. 특히 기존 연구에서 남극대륙의 표층온도 변화에 중요한 역할을 수행하는 서남극 해안 지역 온난화 경향은 10년 이하의 단주기 변동성에서의 더 뚜렷한 공간 분포의 유사성이 관찰된다. 한편 10년 이상의 장주기 변동은 드레이크 해협과 중고위도 지역의 수온과 상관성이 더 크게 나타나며, 이는 열대의 장주기변동성과의 상관기작의 가능성을 시사한다.

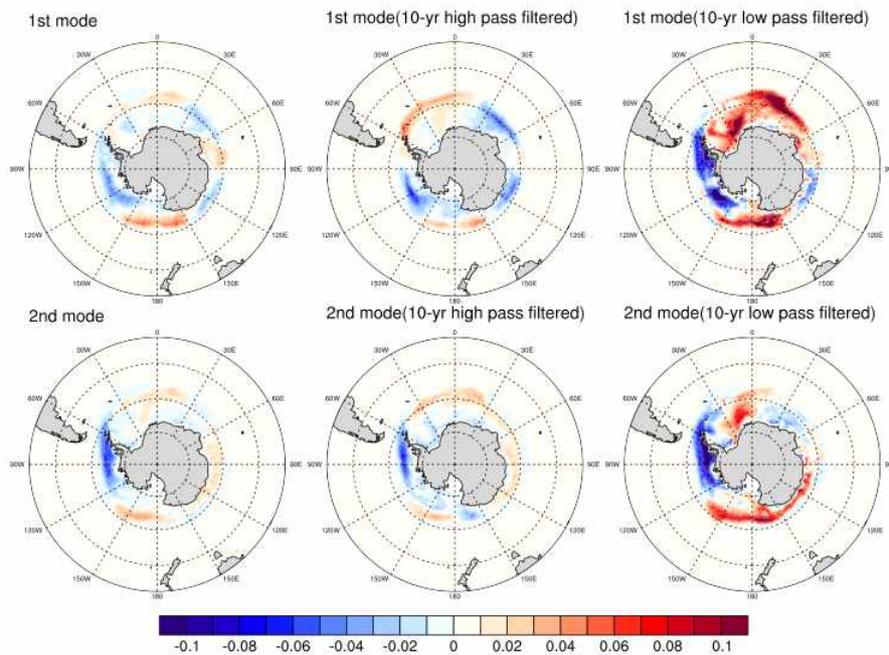


Fig. 3.3.23. 지면온도 변동 지수, 10년 이상 주기가 제거된 단주기 변동, 10년 이하 주기가 제거된 장주기 변동지수의 해빙면적에 대한 회귀상관계수 분포

- 남반구 해빙분포에 대한 회귀상관 분석 결과, 남극 주변 지역의 회귀 상관의 분포특성은 해수면온도의 변화와 일관된 특성이 나타난다. 첫 번째 모드는 해수면온도와 마찬가지로 남극 주변으로 동서방향 파수 3 형태의 해빙면적의 증가와 감소가 반복이 순환되는 특성을 보이며, 두 번째 모드도 해수면온도 상관 분포와 유사하게 서남극 지역의 해빙 감소를 중심으로 남극 대륙 주변으로 동서방향 파수 3 형태의 해빙면적의 증가와 감소가 반복되는 양상을 보인다 (Fig. 3.3.23). 한편 첫 번째 모드의 동남극 지역 동경 30도 지역의 해빙면적 회귀상관 특성은 10년 이하의 단주기와 10년 이상의 장주기에서 상관성이 서로 반대로 나타난다. 이러한 특성은 해수면온도에서도 나타났으나 해빙의 상관특성에서 더욱 뚜렷하게 관찰된다. 두 번째

모드에서도 이러한 단주기와 장주기간의 뚜렷한 차이가 관찰되는데, 동경 170도 로스해 동쪽 지역에서 이러한 단주기와 장주기 상관관계의 역전이 관찰된다. 두 번째 모드의 장주기 변동에 따라 해빙 면적은 증가하나 단주기 변동에 따른 해빙 면적은 감소하는 것으로 나타난다.

4) 남반구 대류권 및 성층권 오존의 변동 특성

- 남반구 오존의 최근 남극대륙 지면온도의 변동 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 대류권부터 성층권까지의 오존과 수증기 위성 관측자료를 가공한 전구격자자료인 Stratospheric Water and Ozone Satellite Homogenized (SWOOSH) 자료 (Davis et al., 2016)를 수집하였다.

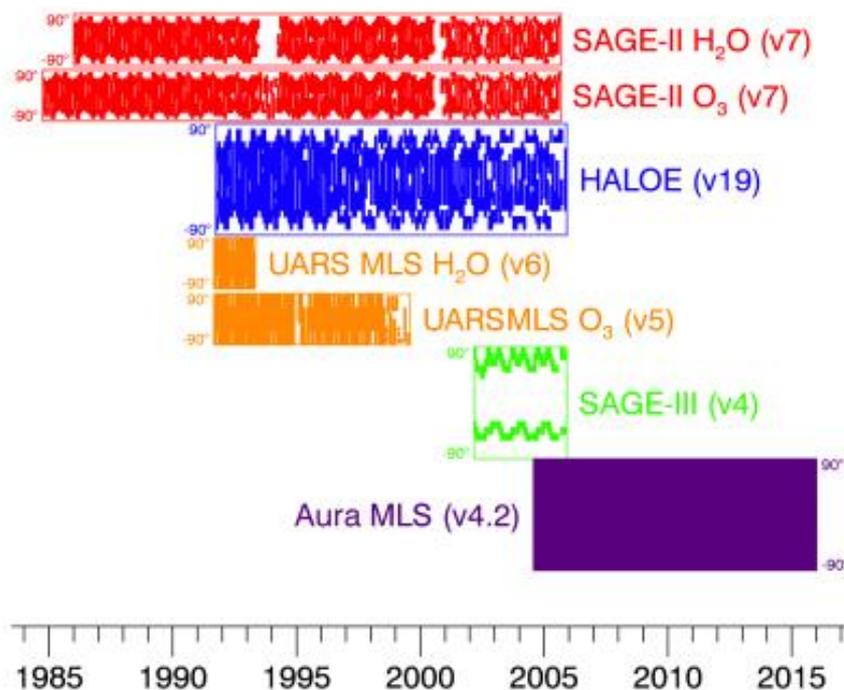


Fig. 3.3.24. SWOOSH에 포함된 위성 자료와 기간. Davis et al. 2016에서 가져옴

- SWOOSH 오존 자료는 1984년 1월부터 현재까지 SAGE-II, HALOE, UARS MLS, SAGE-III, Aura MLS 위성자료를 가공하여 생산되었으며, 이 기간 위성의 결측에 따라 자료가 제공되지 않는 지역과 시기가 존재한다 (Fig. 3.3.24). 먼저 SWOOSH 자료의 특성을 살펴보기 위하여, 결측이 존재하지 않는 ERA5에서 제공하는 오존 분석장과의 비교 분석을 수행하였다.

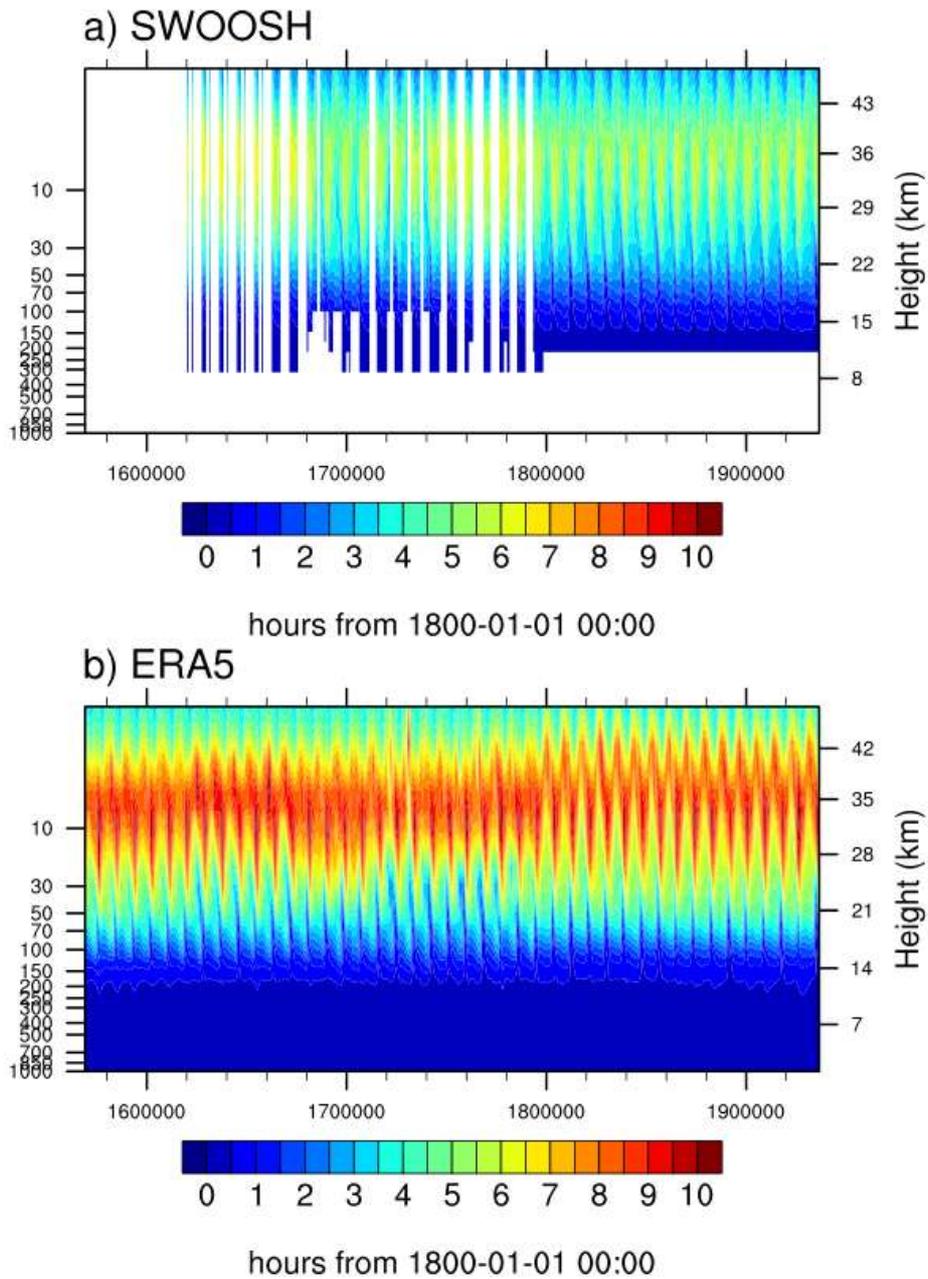


Fig. 3.3.25. SWOOSH와 ERA5의 남극 지역(60S-90S) 평균 오존 농도의 1979년 1월부터 2020년 12월까지의 변화

- SWOOSH 자료의 경우 1984년 이전의 시기는 관측 자료가 존재하지 않으며 2004년 발사된 NASA Aura MLS 위성 관측이 시작된 2005년 이후는 남극 지역의 월평균 자료에서 결측이 존재하지 않으나 2005년 이전에서는 여러 결측 기간이 존재한다 (Fig. 3.3.25). 두 자료 비교 결과 두 자료 모두 남극지역의 오존농도는 10 hPa 보다 약간 높은 성층권 주변에서 가장 높게 나타나며, 이러한 오존이 많이 분포하는 고도는 계절에 따라 변동하는 특성을 보인다. 또한 이러한 고농도 지역의 농도는

ERA5에서 SWOOSH에 비하여 약 4-5 ppmv 정도 높게 나타난다.

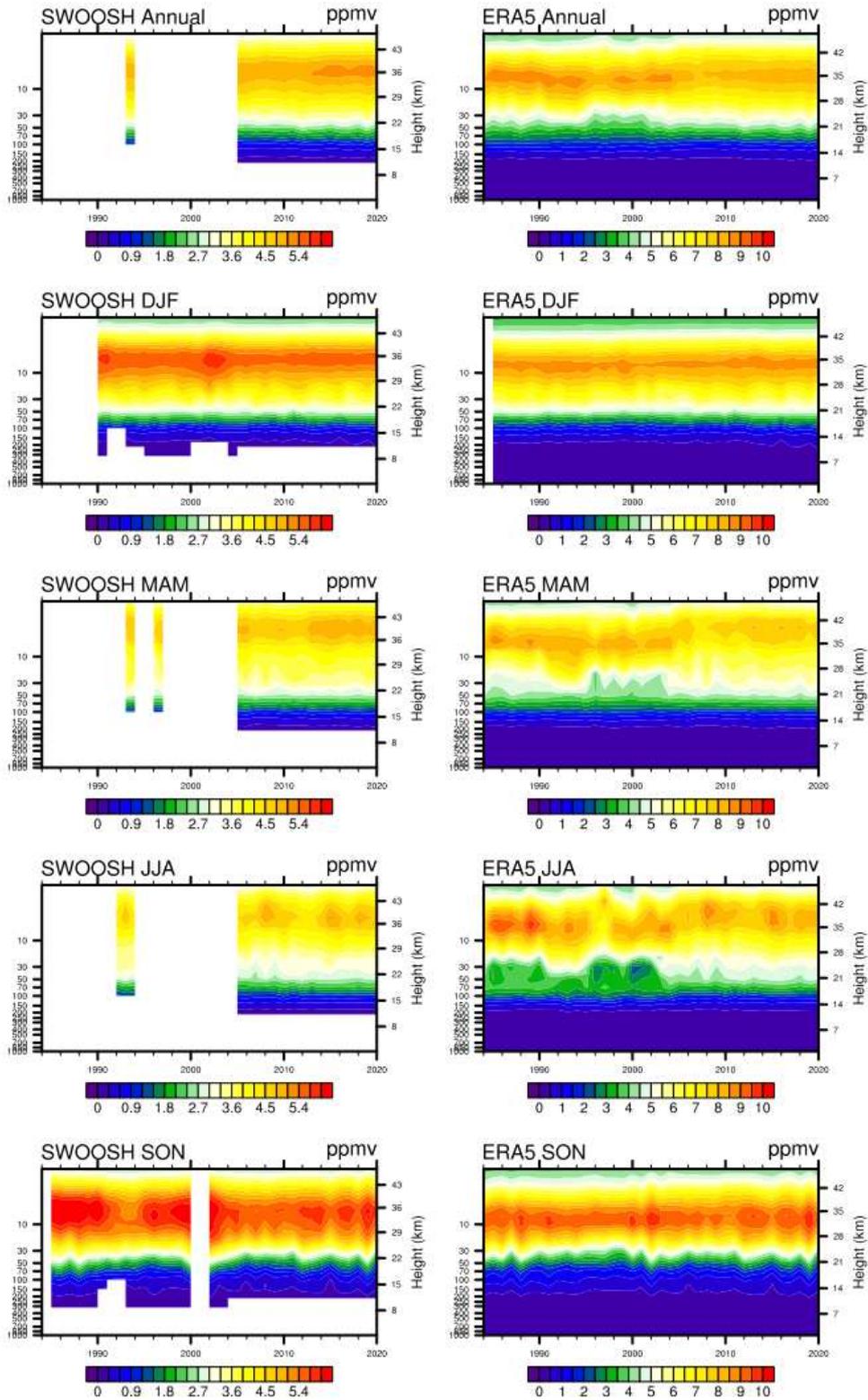


Fig. 3.3.26. SWOOSH와 ERA5의 남극 지역 (60S-90S) 평균 연평균, 계절별 오존 농도의 1984년부터 2020년까지의 연변화

- 두 자료의 계절별 평균 농도의 분포를 살펴보면, 두 자료 모두 봄철에 오존 고농도 지역의 고도가 낮아지나 평균 농도는 높으며 가을철에 오존 고농도 지역이 높아지며 농도는 낮아지는 특성을 보인다. 또한 두 자료에서 동일하게 성층권 오존 농도는 봄철과 여름철에 높게 나타난다 (Fig. 3.3.26).

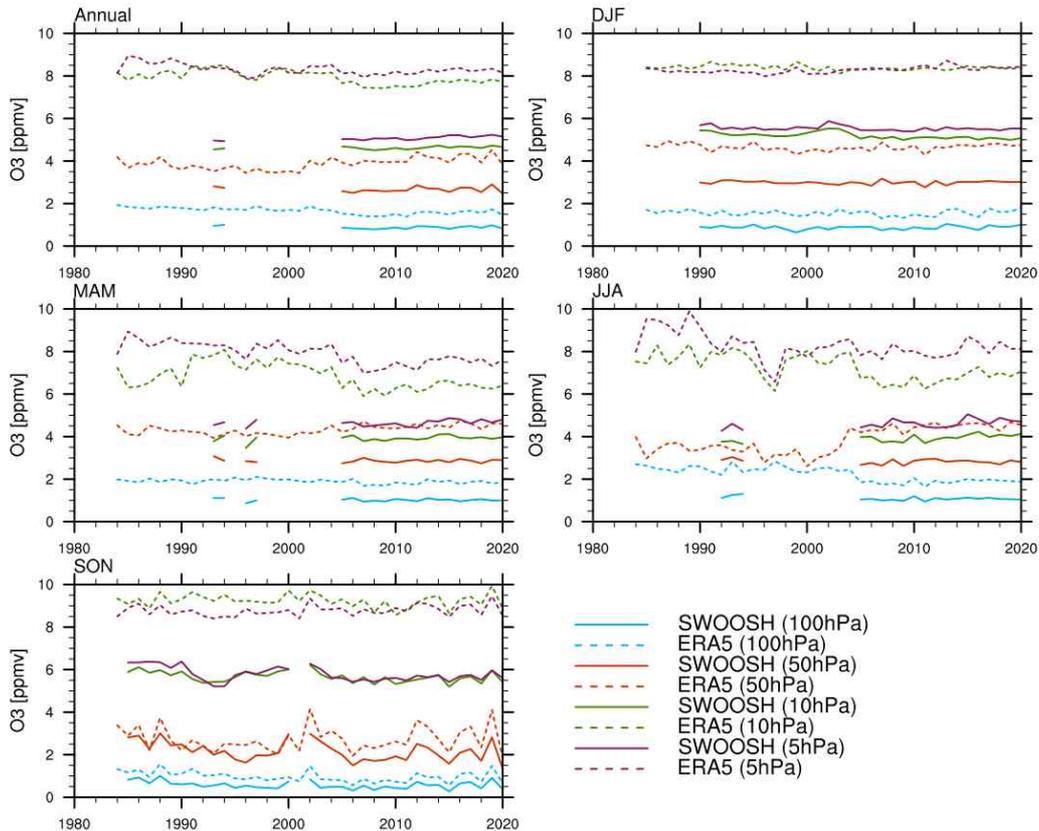


Fig. 3.3.27. SWOOSH와 ERA5 자료의 고도별 남극지역 연평균 및 계절별 평균 오존의 장기 변화

- 성층권 주요 고도인 100 hPa, 50 hPa, 10 hPa, 5 hPa 지역의 연평균, 계절별로 평균된 남극지역 농도의 시간에 따른 변화를 살펴보면 이러한 두 자료의 평균 농도의 차이가 확인된다. 하지만 두 자료가 모두 존재하는 2005년부터 2020년까지 연평균 및 계절평균 값의 경년 변동성에서는 ERA5 자료가 SWOOSH 자료의 변동 특성을 충실히 재현하고 있는 것으로 나타난다 (Fig. 3.3.27).
- 이러한 특성에 미루어 ERA5 자료의 1984년부터 현재까지의 오존 농도의 장기 변화를 살펴보면, 10 hPa, 5 hPa 지역의 성층권 오존 농도는 2000년 초반까지 가을철과 겨울철을 중심으로 지속적으로 감소하다가 이후 감소가 진행되지 않는 것으로 나타난다. 하지만 ERA5 자료에서 오존의 회복은 관찰되지 않는다.

- ERA5 재분석 자료에서 제공하는 오존의 경년변동성은 SWOOSH 자료의 경년 변동 특성을 잘 재현하고 있다. 이에 ERA5 100 hPa, 50 hPa, 10 hPa, 5 hPa 월평균 오존 농도 자료를 이용하여 남위 90도부터 남위 20도까지 지역의 월평균 어노말리의 경험적 직교함수 분석을 수행하여 남반구 지역 오존의 주요 변동성을 살펴보았다.

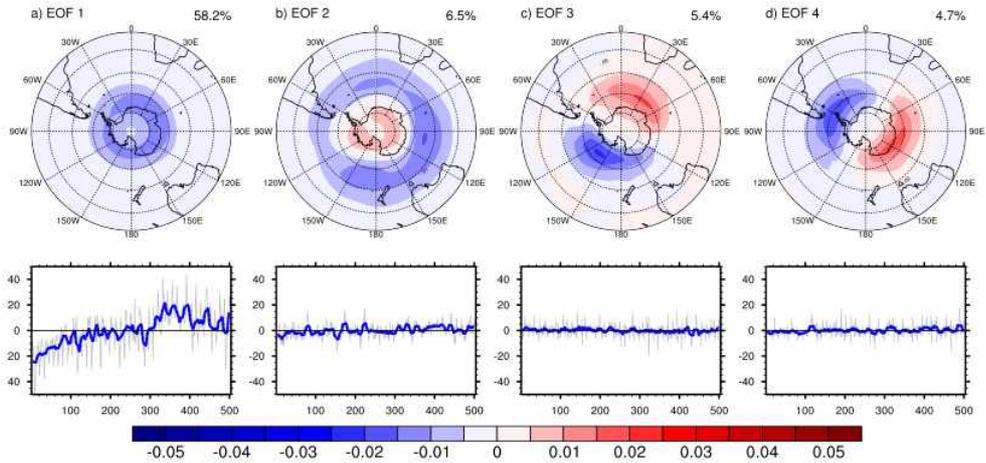


Fig. 3.3.28. ERA5 100 hPa 월평균 오존농도의 EOF 분석 결과

- 먼저 100 hPa 고도의 오존 변동성은 남극 대륙의 경계 지역을 중심으로 오존 농도가 남반구 전지역에서 동일하게 변화하는 변동성이 약 58.2%로 가장 크게 나타난다 (Fig. 3.3.28). 특히 이 첫 번째 EOF의 주성분의 시계열은 이렇게 분포된 오존이 1979년부터 2000년대 초반까지 감소하였다가 이후 약간 회복하고 있는 경향을 보인다. 두 번째 이후의 EOF들은 6.5% 이하의 변동성을 설명하는 모드들로 뚜렷한 변동 특성이 관찰되지 않는다.

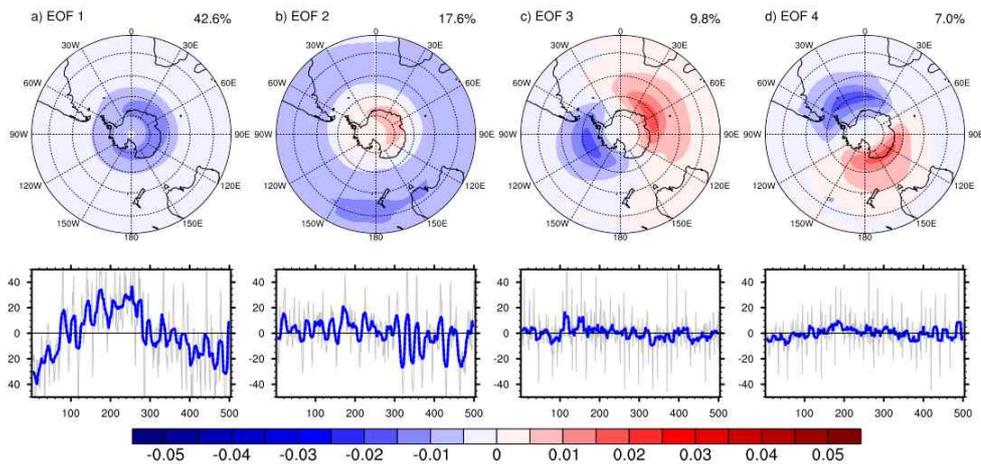


Fig. 3.3.29. ERA5 50 hPa 월평균 오존농도의 EOF 분석 결과

- 50 hPa 고도의 오존 변동성은 100 hPa와 유사하게 남극 대륙의 경계 지역 오존 농도가 동일하게 변화하는 변동성이 약 42.6%로 가장 크게 나타나나 100 hPa에 비교하였을 때 기여도가 약간 낮아지며, 이 첫 번째 EOF의 주 성분 역시 이 지역의 오존이 1990년대 후반까지 감소하였다가 이후 다시 증가하고 있는 것으로 나타난다 (Fig. 3.3.29). 장기적인 변화 경향을 살펴볼 때 50 hPa 지역의 오존의 회복이 약 10년 정도 100 hPa 지역의 오존에 비하여 약 10년 정도 선행한 것으로 나타난다. 50 hPa 고도의 두 번째 오존 변동성은 남극 지역과 주변 중고위도 지역의 오존이 반대로 변동하는 형태로 나타나며 13.4%의 변동성을 설명한다. 한편 100 hPa 오존의 경험적적교함수에서도 유사한 공간분포의 변동성이 나타났으나 6.5%로 낮았던 것에 비하여 기여도가 약간 높게 나타난다.

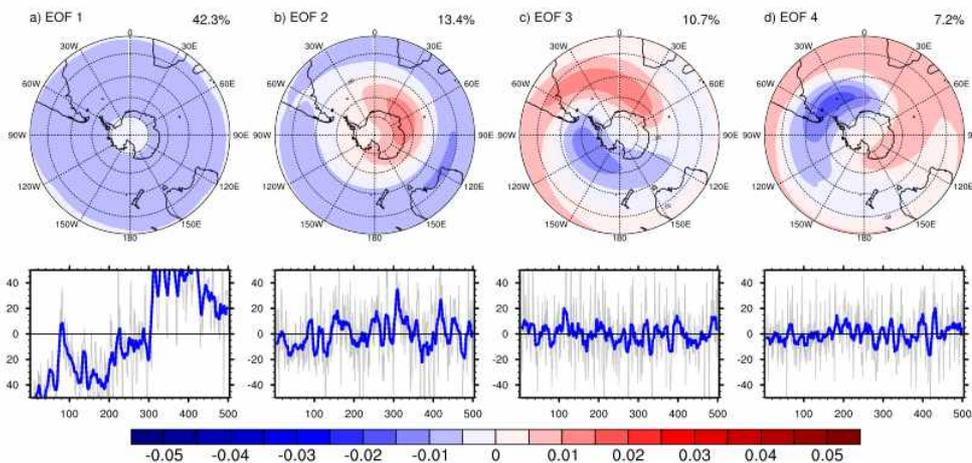


Fig. 3.3.30. ERA5 10 hPa 월평균 오존농도의 EOF 분석 결과

- 10 hPa 고도의 오존 변동성은 남반구 전지역의 오존이 동일하게 변화하는 형태가 첫 번째 모드로 나타나며 약 42.3%를 설명한다. 앞서 100 hPa와 50 hPa의 첫 번째 모드와 남반구 전지역에서 동일하게 변화하는 것은 일관되지만 두 고도의 주요 변동 지역이 남극 지역 중심이었던 것에 비하여 남반구 전체에 분포하는 형태로 약간 다른 특성을 보인다 (Fig. 3.3.30). 이 첫 번째 EOF의 주 성분 역시 약 2000년대까지 감소하다가 이후 다시 회복되고 있는 특성을 보인다. 10 hPa 고도의 두 번째 오존 변동성은 100 hPa, 50 hPa와 마찬가지로 남극 지역과 주변 중고위도 지역의 오존이 반대로 변동하는 형태로 나타나며 13.4%의 변동성을 설명한다. 한편 앞서 50 hPa의 두 번째 모드와 비교하였을 때 남극 지역의 변동 지역이 고위도 지역으로 더 확장된 형태로 나타난다.

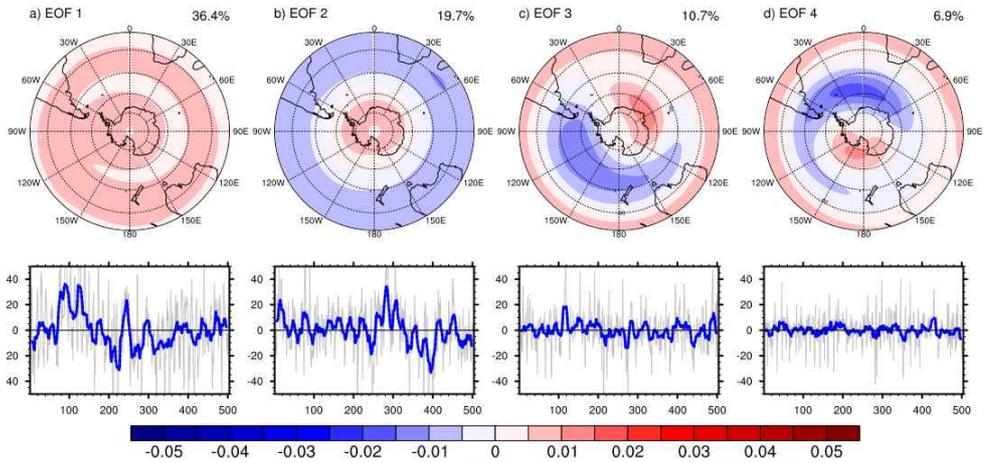


Fig. 3.3.31. ERA5 5 hPa 월평균 오존농도의 EOF 분석 결과

- 5 hPa 고도의 오존 변동성에서 역시 남반구 전 지역의 오존이 동일하게 변화하는 특성이 첫 번째 모드로 나타난다 (Fig. 3.3.31). 한편 이러한 첫 번째 모드는 약 36.4%를 설명하여 5 hPa 아래의 성층권에서 나타났던 기여도 보다 더 낮아진다. 첫 번째 EOF의 PC 역시 앞서 첫 번째 모드와 마찬가지로 남반구 지역의 오존 농도가 약 1990년대 후반까지 감소하다가, 이후 다시 회복되고 있는 형태를 보인다. 두 번째와 세 번째의 EOF 모두 10 hPa, 100 hPa에서 나타났던 변동 특성과 유사한 공간 분포 특성이 관찰되며, 이 지역 오존 변동에의 기여도는 19.7%, 10.7%로 상대적으로 높아지는 것이 관찰된다.
- 각 고도별 오존의 변동 특성을 살펴보기 위하여, 타 고도의 평균 오존농도 변화와 대기 주요변동성인 SAM, PSA1, PSA2, 앞서 정의된 남극 대륙 지면온도 변동지수인 남극대륙 전체 변동 지수 (NB1), 남극대륙 비대칭적 변동 지수 (NB2)와의 상관계수를 살펴보았다. 먼저 남극 지역 100 hPa 평균 오존 변화의 상관 관계 분석 결과 대류권 변동 특성 중 SAM과의 상관특성이 상대적으로 높게 나타나며 특히 봄철과 여름철의 경우 -0.33 , -0.50 으로 타 계절에 비하여 높은 음의 상관성을 보인다. 한편 100 hPa의 오존은 상대적으로 10 hPa의 오존 농도와 가을, 겨울철, 봄철에 걸쳐 높은 상관성을 유지하다가 여름철에는 낮아진다. 한편 50 hPa 오존과는 봄철, 여름철에 높으나 철에는 이러한 상관성이 역전되어 음의 상관성이 나타나는 특징을 보인다.

Table 3.3.1. 100 hPa 남극 지역 평균 오존농도의 연평균, 계절평균 연변화와의 상관계수

	ANN	DJF	MAM	JJA	SON
O3(50 hPa)	0.25	0.64	0.10	-0.60	0.83
O3(10 hPa)	0.76	0.28	0.51	0.76	0.71
O3(5 hPa)	0.42	-0.12	0.48	0.36	0.25
SAM	-0.25	-0.50	0.21	0.17	-0.33
PSA1	-0.13	0.24	-0.04	-0.11	-0.24
PSA2	-0.05	0.26	-0.06	-0.04	0.17
NB1	-0.13	0.18	-0.22	-0.23	-0.12
NB2	0.06	0.05	-0.06	-0.13	0.07

- 남극 지역 50 hPa 평균 오존 변화의 타 고도 평균 오존농도와 SAM, PSA1, PSA2, NB1, NB2 지수와의 상관계수를 살펴본 결과 100 hPa와 마찬가지로 SAM과의 상관특성이 상대적으로 높게 나타나며, 특히 봄철과 여름철의 상관계수가 상대적으로 높게 나타난다. 한편 가을철의 경우 지면온도 변동지수 NB1과 0.43으로 유의미한 양의 상관관계가 나타난다.

Table 3.3.2. 50 hPa 남극 지역 평균 오존농도의 연평균, 계절평균 연변화와의 상관계수

	ANN	DJF	MAM	JJA	SON
O3(100 hPa)	0.25	0.64	0.10	-0.60	0.83
O3(10 hPa)	-0.17	0.30	-0.34	-0.50	0.52
O3(5 hPa)	0.03	-0.40	-0.30	-0.10	0.51
SAM	-0.17	-0.30	-0.10	0.18	-0.41
PSA1	-0.10	-0.11	0.29	-0.12	-0.20
PSA2	0.14	-0.04	-0.07	0.07	0.21
NB1	0.33	-0.11	0.43	-0.06	0.11
NB2	0.01	0.29	0.08	0.07	0.05

- 남극 지역 10 hPa, 5 hPa 평균 오존 변화는 다른 고도와 마찬가지로 대류권 변동 특성 중 SAM과의 상관성이 높게 나타나며, 특히 봄철의 10 hPa의 상관지수가 -0.51로 높게 나타난다. 한편 5 hPa 역시 봄철 SAM과의 상관계수가 가장 높게 나타나 95% 신뢰수준에서 유의하지 않다.

Table 3.3.3. 10 hPa 남극 지역 평균 오존농도의 연평균, 계절평균 연변화와의 상관계수

	ANN	DJF	MAM	JJA	SON
O3(100 hPa)	0.76	0.29	0.48	0.76	0.71
O3(50 hPa)	-0.17	0.30	-0.34	-0.50	0.51
O3(5 hPa)	0.40	-0.40	0.71	0.58	0.22
SAM	-0.28	-0.20	-0.12	0.04	-0.51
PSA1	-0.21	0.07	-0.49	0.01	-0.19
PSA2	-0.06	0.20	-0.10	-0.03	0.17
NB1	-0.18	-0.09	-0.18	-0.05	0.06
NB2	0.09	0.13	0.07	-0.11	0.20

- 한편 가을철 10 hPa, 5 hPa 오존 변동성은 PSA1과 99% 신뢰수준에서 통계적으로 유의미한 음의 상관성이 공통적으로 나타나는데, 이는 10 hPa 이상 고도의 오존의 경험적직교함수 분석결과에서 두 번째 모드의 강한 동서방향 비대칭성의 기여가 커지는 특성과 연관되어 있을 것으로 추정된다.

Table 3.3.4. 5 hPa 남극 지역 평균 오존농도의 연평균, 계절평균 연변화와의 상관계수

	ANN	DJF	MAM	JJA	SON
O3(100 hPa)	0.42	-0.13	0.48	0.36	0.25
O3(50 hPa)	0.02	-0.16	-0.30	-0.10	0.51
O3(10 hPa)	0.40	-0.40	0.71	0.58	0.22
SAM	0.06	-0.04	-0.16	0.16	-0.24
PSA1	-0.04	0.06	-0.38	-0.06	0.12
PSA2	0.03	-0.12	-0.16	0.14	0.19
NB1	-0.15	0.37	-0.16	-0.10	0.31
NB2	-0.28	-0.19	-0.09	-0.21	0.04

- 다음으로 남극 지역 평균 성층권 고도별 오존 농도의 대기순환장과의 상관 특성을 살펴보기 위하여, 연평균, 계절별 평균 고도별 오존 농도의 대류권 및 성층권 대기순환장에 대한 회귀상관 분석을 수행하였다.

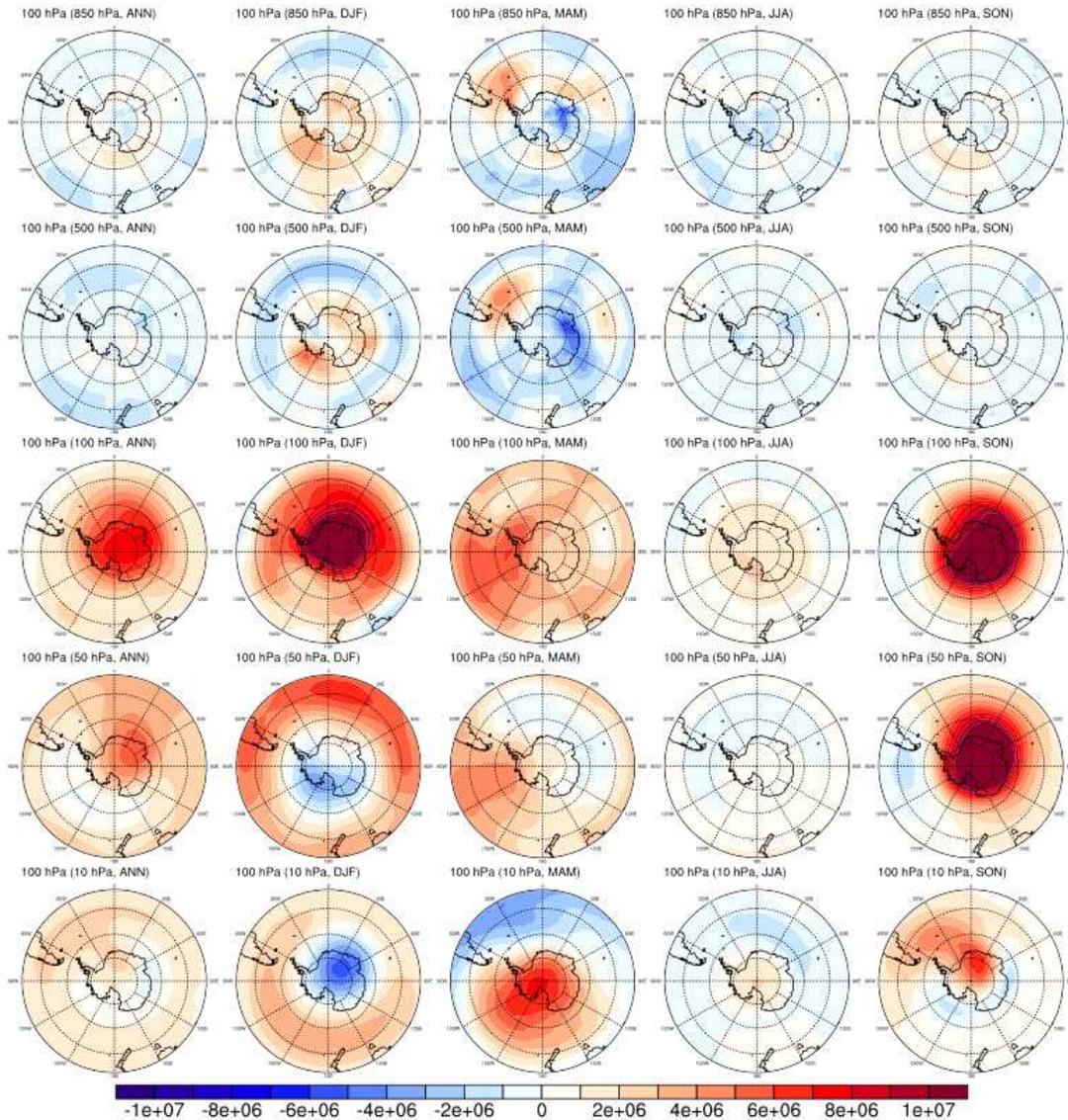


Fig. 3.332. 100 hPa 남극지역 평균 오존농도의 대기온도에 대한 회귀 계수 분포

- 100 hPa 남극지역 평균 오존농도의 변화는 100 hPa의 고도의 온도 변화와 가장 밀접한 회귀 상관관계가 나타나며 특히 봄철과 여름철에 남극대륙에서 강한 양의 상관성이 나타난다 (Fig. 3.332). 연평균 오존농도의 변화는 100 hPa 이상의 고도에서는 주로 남극 지역의 온도의 증가와 연관되어 있지만, 계절별로 살펴보면 이러한 상관성은 봄철에 가장 강하게 나타나지만 여름철의 경우 50 hPa 이상의 고도에서는 남극대륙의 온도 상관성은 오히려 음의 상관성으로 변하는 강한 계절적 특성이 나타난다. 이러한 변화는 대류권 계면의 계절성과 연관되어 있을 것으로 추정된다. 이에 반해 대류권 온도와의 상관관계는 100 hPa의 양의 상관관계와

대조적으로 음의 상관성이 일관적으로 나타난다.

- 50 hPa, 10 hPa 고도의 남극지역 평균 오존농도의 변화의 대기온도와의 상관분포 특성 역시 100 hPa 평균 오존 농도의 고도별 회귀 상관성이 일관적으로 나타난다. 즉 100 hPa의 남극대륙 지역의 봄철, 여름철 온도와 강한 양의 상관성이 나타나며, 특히 봄철의 경우 이러한 강한 상관성이 회귀 분석 대상 오존이 존재하는 고도까지 확장된다 (Fig. 3.3.33와 Fig. 3.3.34).

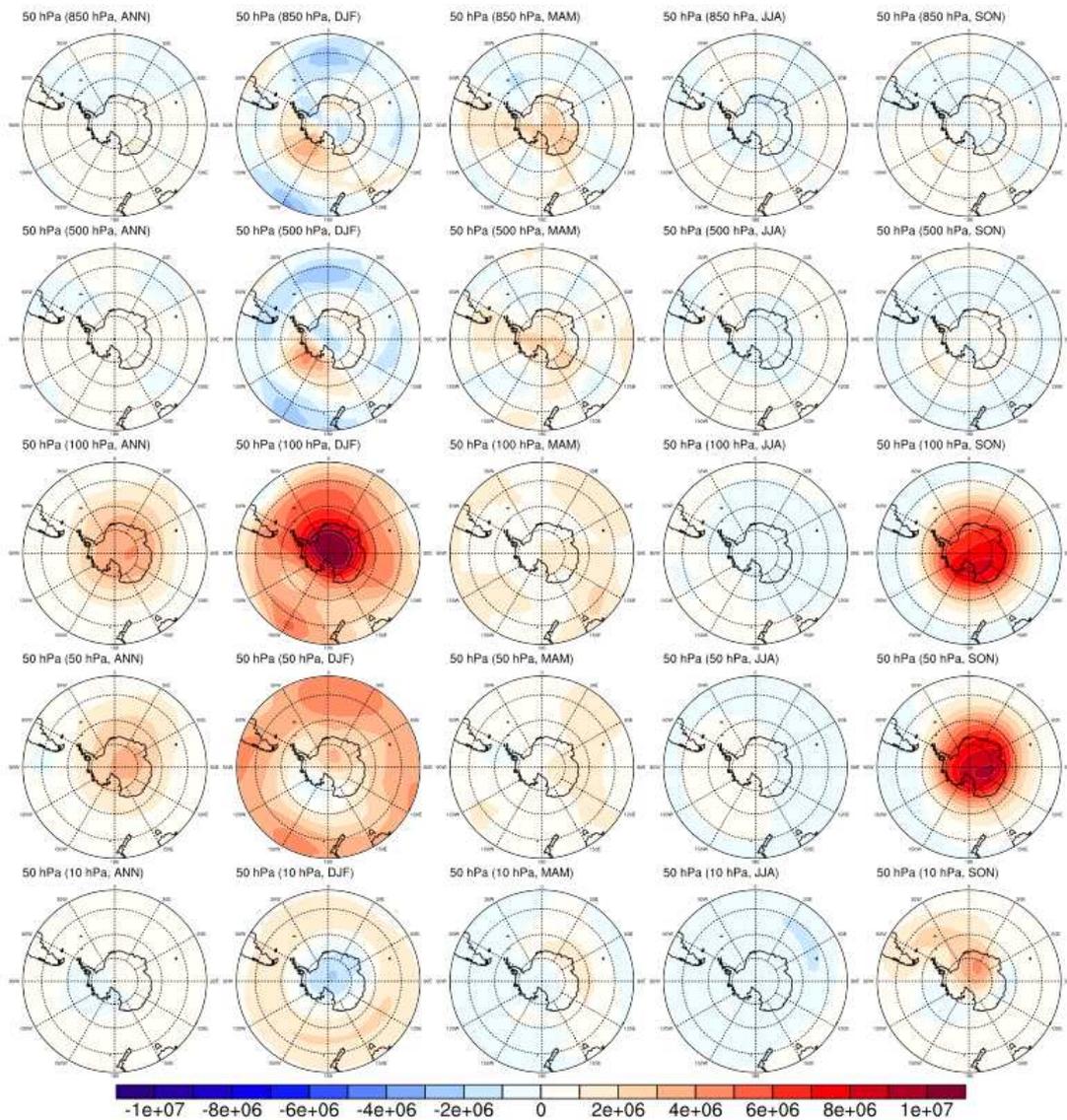


Fig. 3.3.33. 50 hPa 남극지역 평균 오존농도의 대기온도에 대한 회귀 계수 분포

- 즉 성층권 오존 변동은 성층권에서 오존 농도 변화가 가장 큰 고도의 봄철 계절의 온도 변화와 가장 큰 양의 상관성이 존재하는 것이 관찰되며, 대류권 온도의 영향은

여름철과 봄철에 상대적으로 크게 나타나지만 성층권의 반응에 비하면 상대적으로 약하게 나타난다.

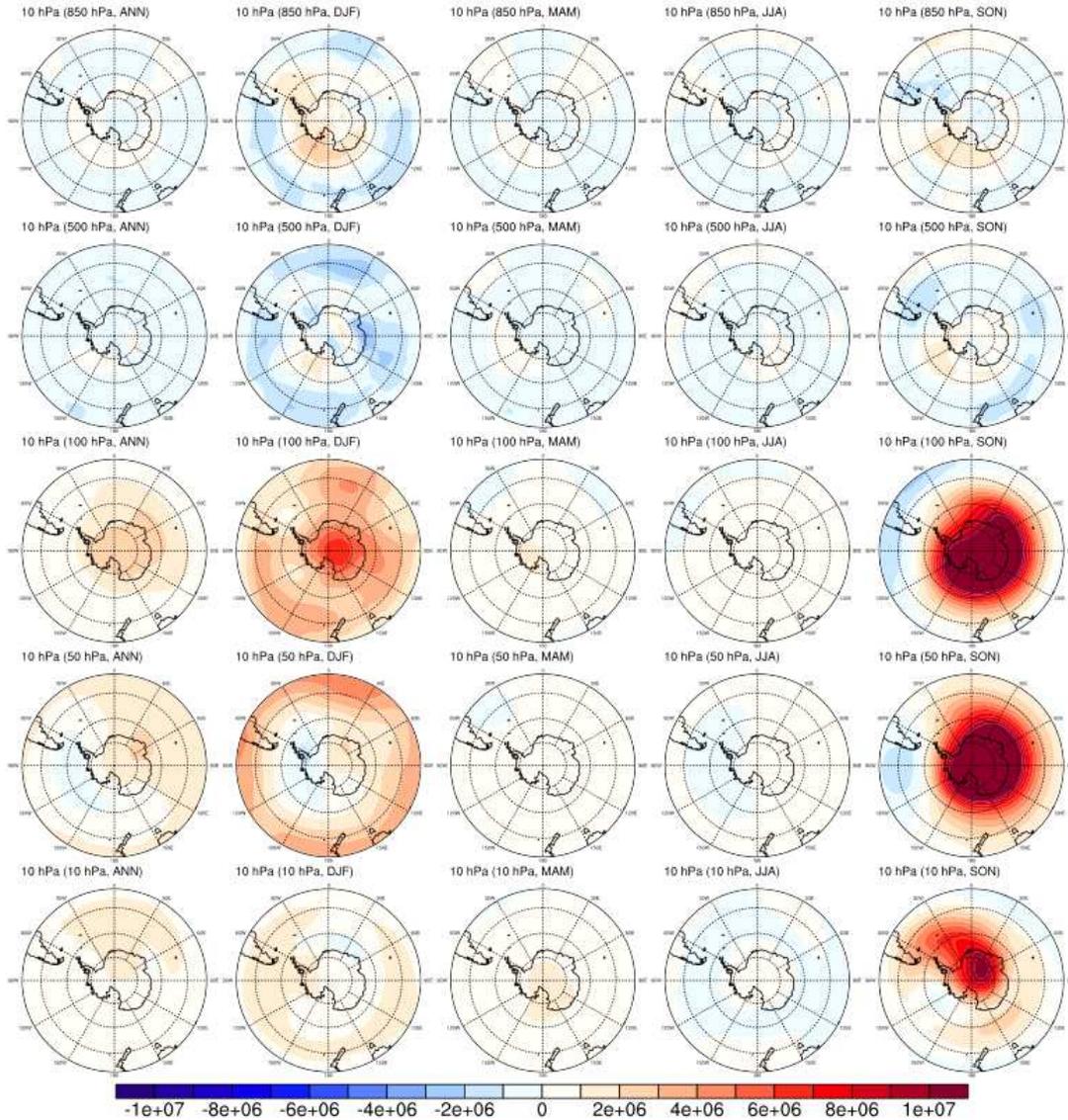


Fig. 3.334. 10 hPa 남극지역 평균 오존농도의 대기온도에 대한 대한 회귀 계수 분포

- 다음으로 남극 지역 평균 성층권 고도별 오존 농도에 대하여 동서방향 바람에 대한 회귀분석을 수행하여 동서방향 바람과의 상관성을 살펴보았다 (Fig. 3.335). 100 hPa 고도의 남극지역 평균 오존의 동서방향 바람과의 상관 특성은 성층권의 남극 주변 지역의 서풍의 약화와 밀접하게 연관되어 있으며 이러한 강한 상관성은 봄철, 여름철, 가을철에 크게 나타나며 겨울철에는 상관성이 약화된다. 이러한 동풍의 강화는 지위고도의 증가, 고기압성 순환의 강화로 앞서 살펴본 성층권의 온도의 증가와

물리적 인과성을 갖는다. 한편 앞서 온도의 상관 특성과는 달리 동풍의 약화는 봄철 및 여름철 대류권에서도 나타나며, 특히 여름철에는 남극 대륙 주변의 동풍이 크게 약화된다.

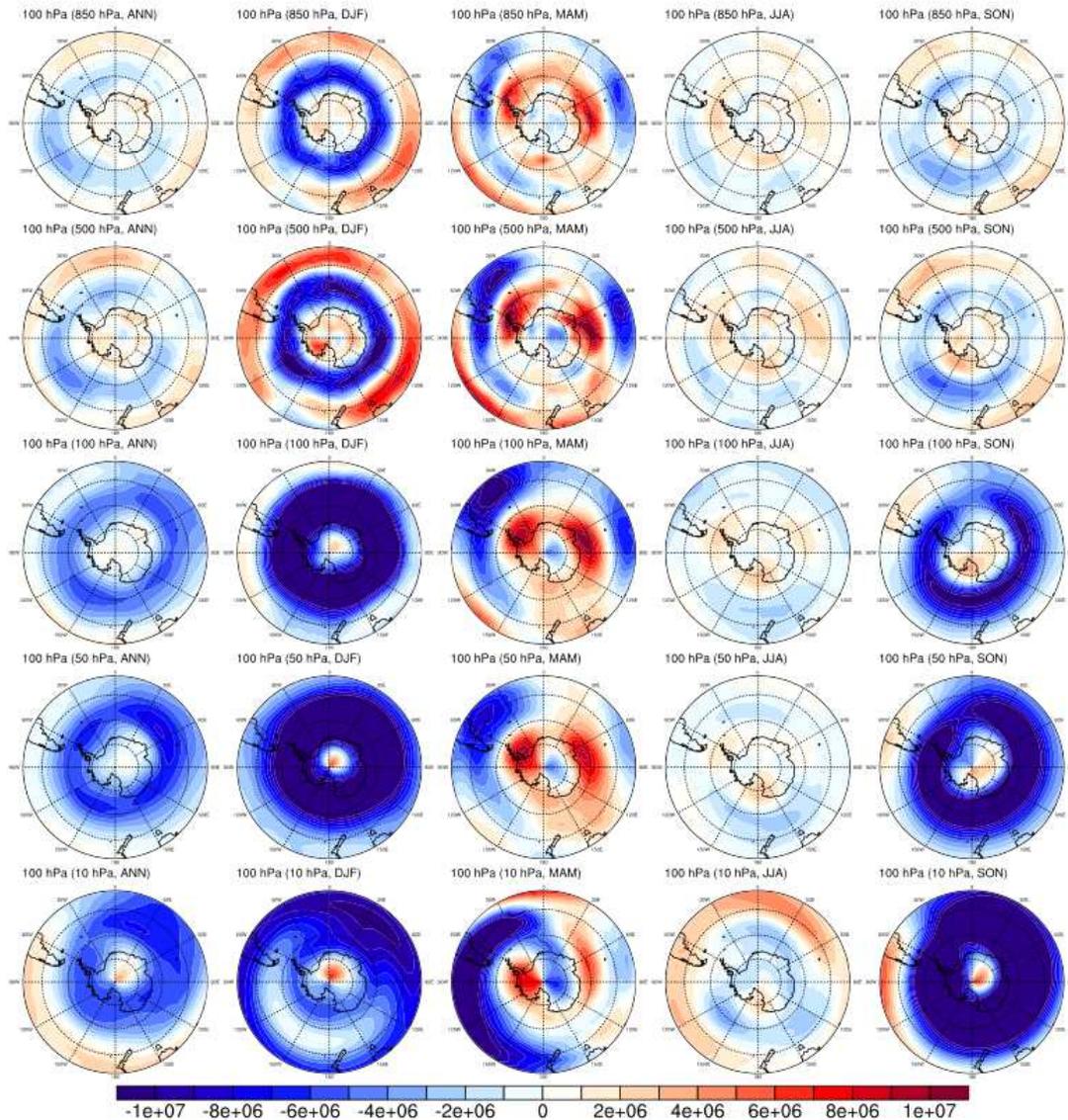


Fig. 3.3.35. 100 hPa 남극지역 평균 오존농도의 동서방향 바람에 대한 대한 회귀 계수 분포

- 50 hPa 고도의 남극지역 평균 오존의 동서방향 바람과의 상관 특성 역시 100 hPa 고도 오존의 상관특성과 거의 유사하게 나타난다. 먼저 성층권 에서의 남극 주변 지역의 봄철, 여름철, 가을철의 서풍의 약화와 연관되어 있으며, 봄철, 여름철, 가을철 대류권의 서풍의 약화와도 연관되어 있다 (Fig. 3.3.36).

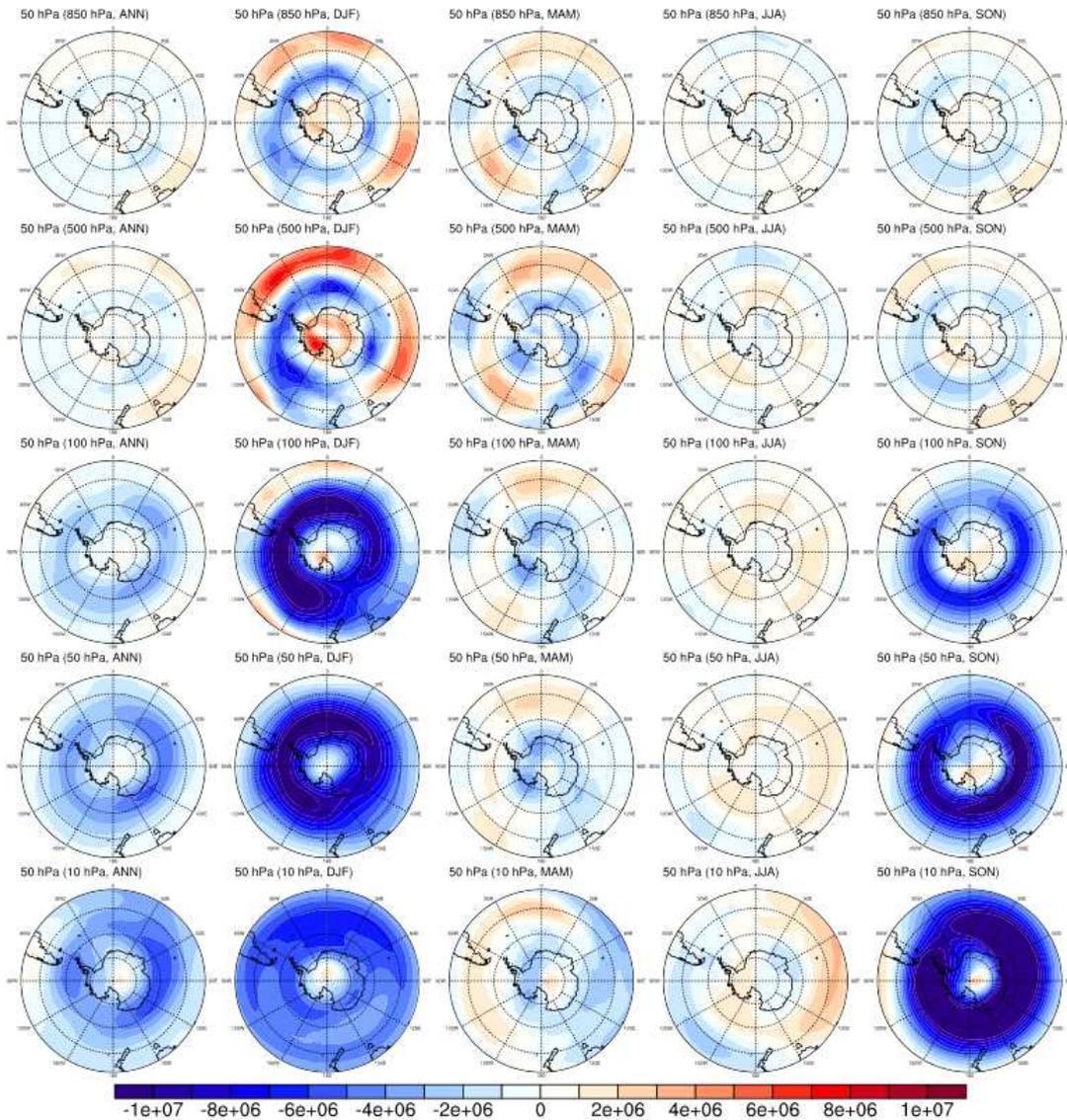


Fig. 3.3.36. 50 hPa 남극지역 평균 오존농도의 동서방향 바람에 대한 대한 회귀 계수 분포

- 10 hPa 고도의 남극지역 평균 오존의 동서방향 바람과의 상관 특성은 100 hPa과 50 hPa 고도 오존의 상관 분포와 유사하나, 계절성에서는 차이가 나타난다. 다른 계절에 매우 강한 상관성이 나타났던 여름철의 상관성이 상대적으로 약화되고, 봄철에 매우 강한 동풍의 강화와 상관성이 관찰된다. 대류권의 순환은 다른 성층권 고도와 마찬가지로 봄철과 여름철에 주로 나타나며, 50 hPa 고도와 달리 여름철의 동풍의 강화가 뚜렷하게 관찰된다 (Fig. 3.3.37).

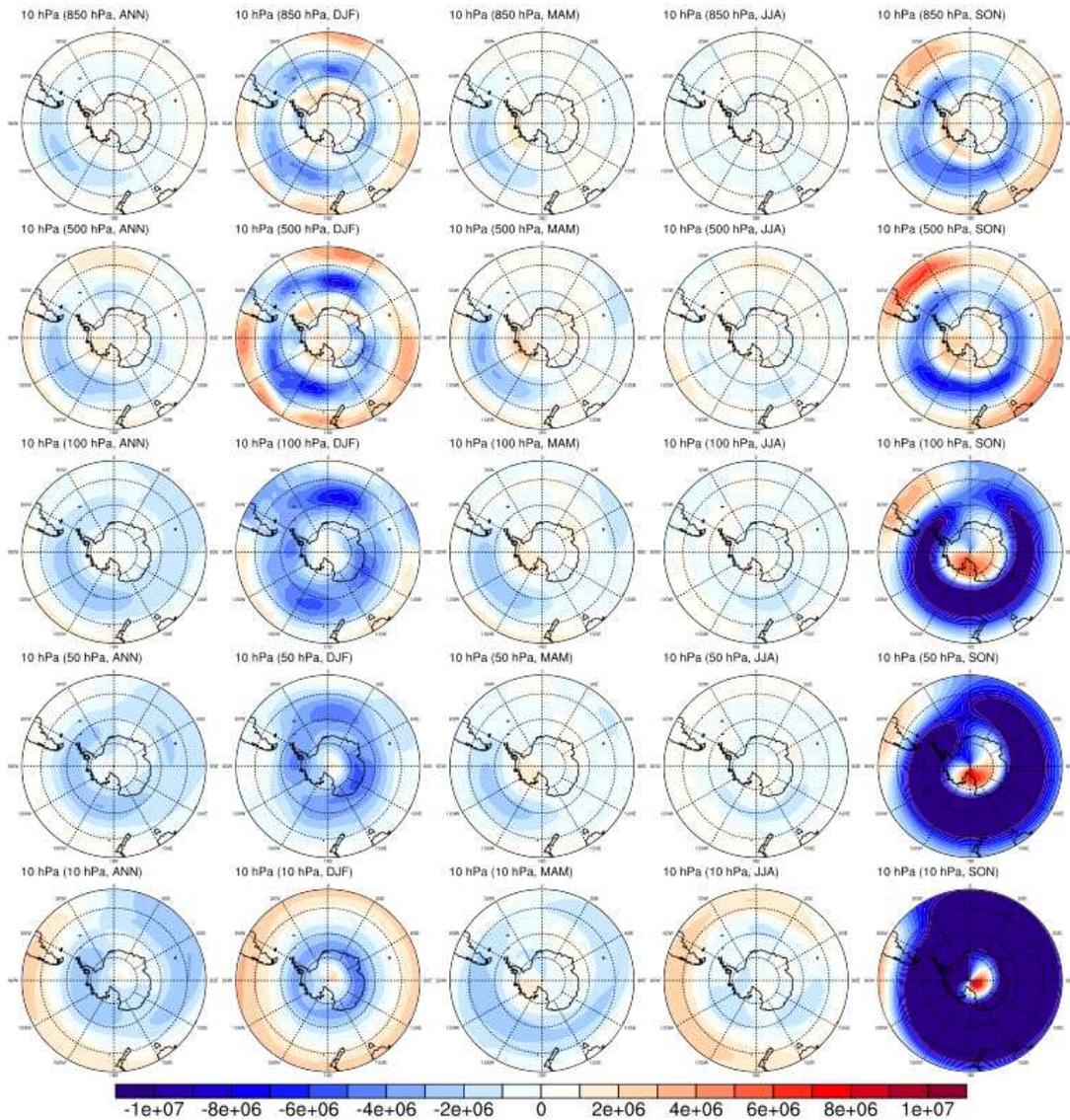


Fig. 3.337. 10 hPa 남극지역 평균 오존농도의 동서방향 바람에 대한 대한 회귀 계수 분포

- 즉 오존농도의 증가에 따른 남극지역 성층권 극소용돌이의 약화는 봄철에서 여름철에 주도적으로 나타나며, 봄철부터 가을철에 까지 대류권 남극 주변 서풍의 약화에 영향을 미친다. 하부 성층권 오존농도는 여름철과 가을철에, 상부 성층권 오존농도는 봄철과 여름철에 영향이 크게 나타난다.
- 남극 지역 성층권 오존 변화의 영향을 동서방향으로 평균된 서풍과 온도 변화에 대하여 살펴보았다. 남극 지역의 100 hPa부터 1 hPa까지 적분된 오존농도값을 동서방향 바람과 대기온도에 대하여 회귀상관 분석을 수행한 결과, 앞서 각 고도의 오존 농도의 회귀 상관 결과에서 관찰되었던 특성이 정돈되어 나타난다. 먼저 남극

지역 성층권 오존은 남반구 봄철부터 여름철에 걸쳐 영향이 가장 크게 나타난다. 성층권 오존 증가는 여름철 100 hPa 근처, 봄철 50 hPa 고도의 온도 증가와 상관관계를 보이며, 남위 60도의 성층권의 서풍의 약화에 뚜렷한 상관관계가 나타난다. 특히 여름철의 경우 이러한 성층권 오존의 변화에 따른 서풍의 약화는 하부 대류권 지역에 까지 영향을 미치는 것으로 나타난다 (Fig. 3.3.38).

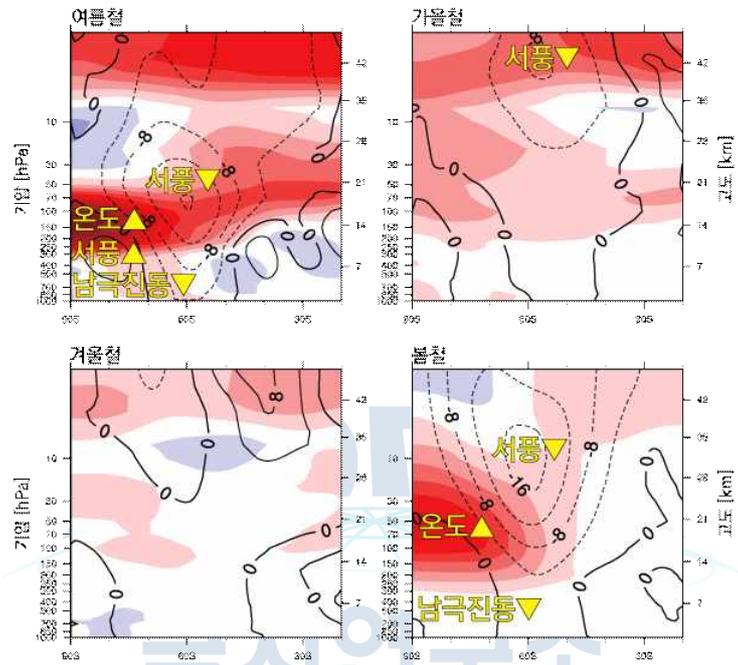


Fig. 3.3.38. 남극 100 hPa - 1 hPa 고도에서 적분된 오존 농도의 동서방향 바람과 온도의 회귀 분석 결과, 성층권 오존농도와 기온, 대기순환의 상관성 모식도

- 한편 생산된 남극 대륙의 변동 지수와 오존과의 상관성을 살펴보기 위하여 남극대륙 두 온도변동 지수(NB1, NB2)를 연평균, 계절별 오존농도에 대하여 회귀상관 분석을 수행하였다. 남극지역의 오존 변화가 대류권에서 거의 나타나지 않기 때문에, 첫 번째와 두 번째의 지면변동 모드 모두 대류권 지역의 오존 변동성과는 거의 상관성이 나타나지 않으며, 성층권 오존과는 높은 회귀상관 관계가 나타난다. 첫 번째 모드의 연평균 경년변동의 경우 남극지역의 50 hPa 오존과 양의 회귀 상관성이 나타나지만, 이러한 상관관계는 계절에 따라 부호가 반대로 변동하는 특성이 관찰된다 (Fig. 3.3.39).

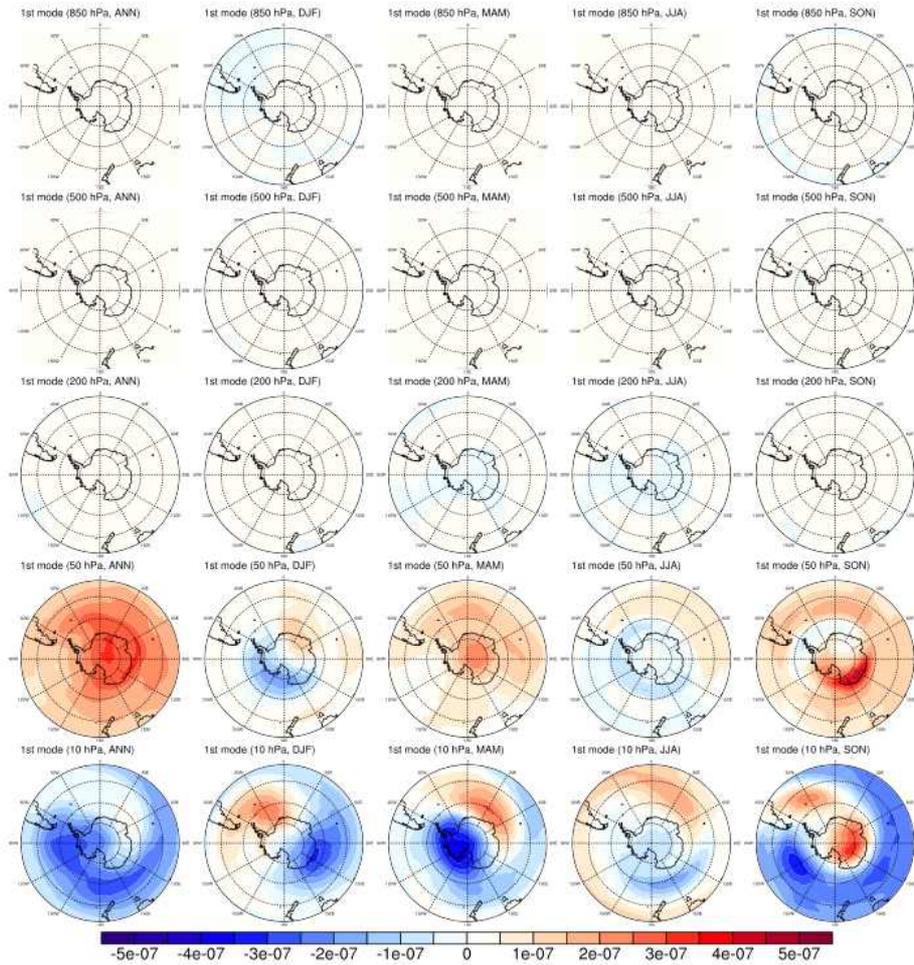


Fig. 3.3.39. 지면온도 변동의 첫 번째 모드의 오존에 대한 회귀 계수

- 다음으로 NB2 지수의 남반구 지역 오존과의 회귀상관 분포를 살펴보면 NB1의 성층권 회귀상관 계수보다는 전체적으로 약하게 나타나는 특성을 보인다. 이는 오존의 변화와 성층권 극소용돌이와의 밀접한 연관성과, NB1과 SAM이 성층권 극소용돌이의 변화를 통해 밀접하게 연관되어있는 특성에 영향을 받은 것으로 보인다. 한편 50 hPa 오존과의 상관성의 경우 봄철 서남극과 동남극 지역에서의 비대칭적 경향이 관찰되며, 이러한 봄철의 상관분포는 연평균 회귀상관계수 분포에서도 동일하게 관찰된다 (Fig. 3.3.40).

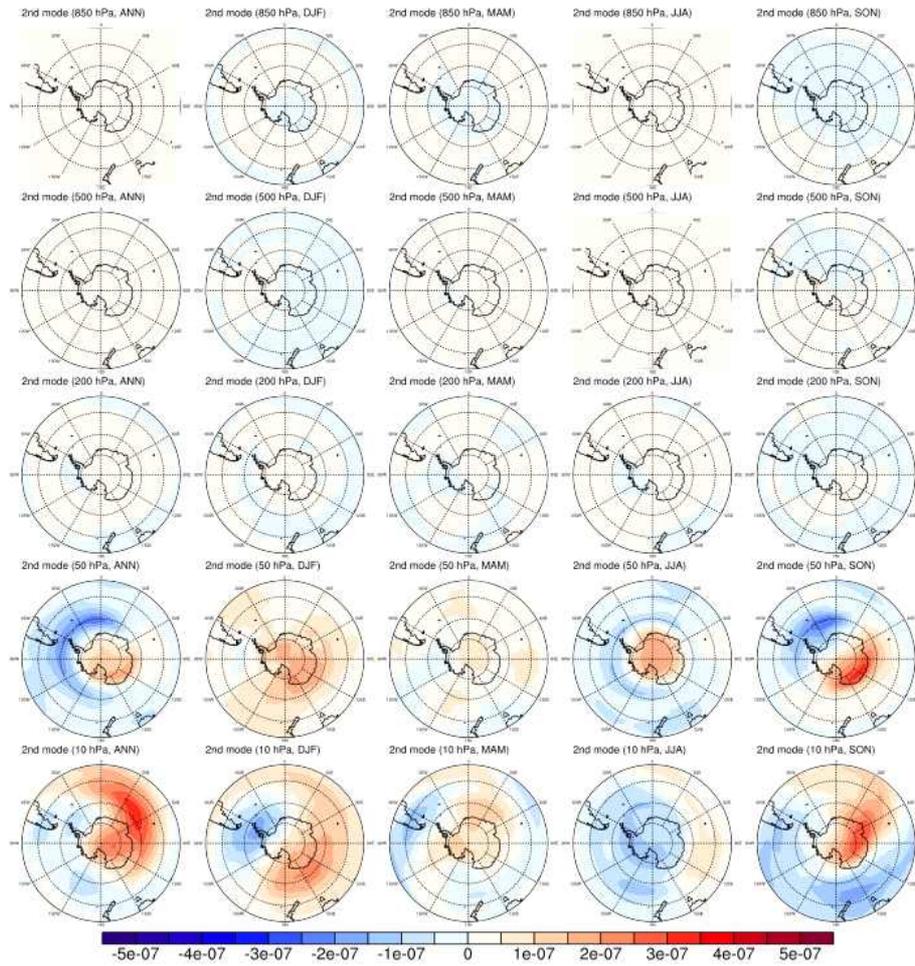


Fig. 3.3.40. 지면온도 변동의 두 번째 모드의 오존에 대한 회귀 계수

5) 대기화학모델 실험을 이용한 남반구 오존의 분포 차이의 영향 진단

- 미국국립대기과학연구소 (National Center for Atmospheric Research; NCAR)의 CESM 모형을 이용하여 대기화학모델의 유무에 따른 민감도 실험을 수행하고 남반구 오존 분포의 영향을 살펴보았다. CESM의 대기모형은 Community Atmospheric Model (CAM)으로, 종합물리과정의 버전에 따라 CAM4, CAM5, CAM6로 구분된다. 이중 물리과정에는 대기화학과정이 존재하며, 대기화학모델을 접합하는 경우 CAM4-Chem, CAM6-Chem으로 명명된다. 한편 CAM4-Chem은 대류권 오존 모의과정이 포함되어 있으나 성층권 오존 모의과정이 포함되어 있지 않은데 비하여 CAM6-Chem은 성층권 오존 모의과정이 포함되어 있어 CAM6-Chem 실험에서는 성층권 오존의 시간에 따른 변화가 모의된다. 따라 이러한 구성의 실험을 통해 실험을 통해 성층권 오존 변화와 주변 대기와의 상호작용에 따른 영향을 살펴볼 수

있다.

- 이에 대기화학모듈이 접합되어 있지 않은 CAM4, CAM6 모델, 그리고 대기화학모듈을 접합한 CAM4-Chem, CAM6-Chem을 이용하여 1975-1985년간 평균 해수면온도/해빙 조건을 처방한 1980년 기후 조건하에서의 평형기후 실험, 1995-2005년 평균 해수면온도/해빙 조건을 처방한 2000년 기후 조건을 활용한 평형기후 실험을 수행하였다.

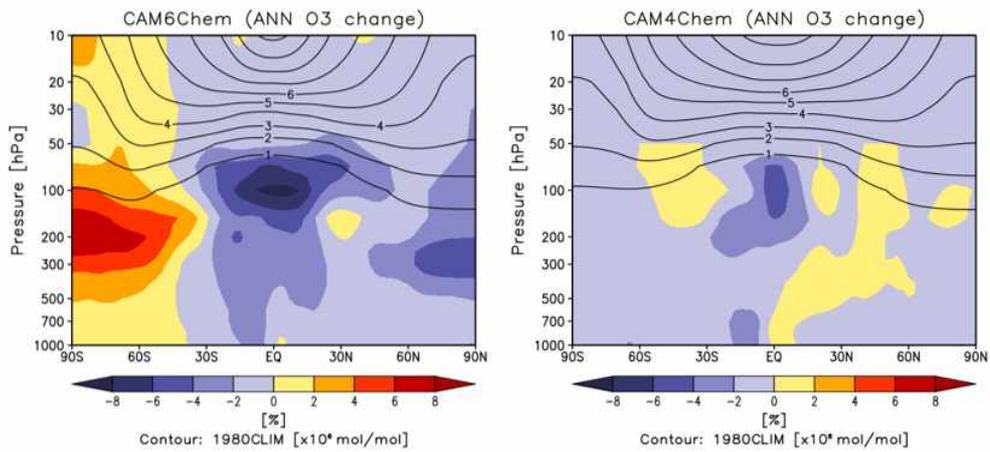


Fig. 3.3.41. CAM6-Chem과 CAM4-Chem의 2000년과 1980년 오존 농도 차이

- 먼저 CAM6 실험군과 CAM4 실험군에서 모의된 오존 농도의 차이를 차이를 서로 비교한 결과, CAM6-Chem과 CAM6의 오존 차이에서는 남반구 대류권 및 성층권 오존 농도의 차이가 뚜렷하게 관찰되나, CAM4 실험군에서는 성층권의 오존농도의 변화가 거의 관찰되지 않는다 (Fig. 3.3.41). 이에 두 모델군의 비교를 통해 오존 농도의 변화에 따른 전지구의 영향을 살펴볼 수 있다.

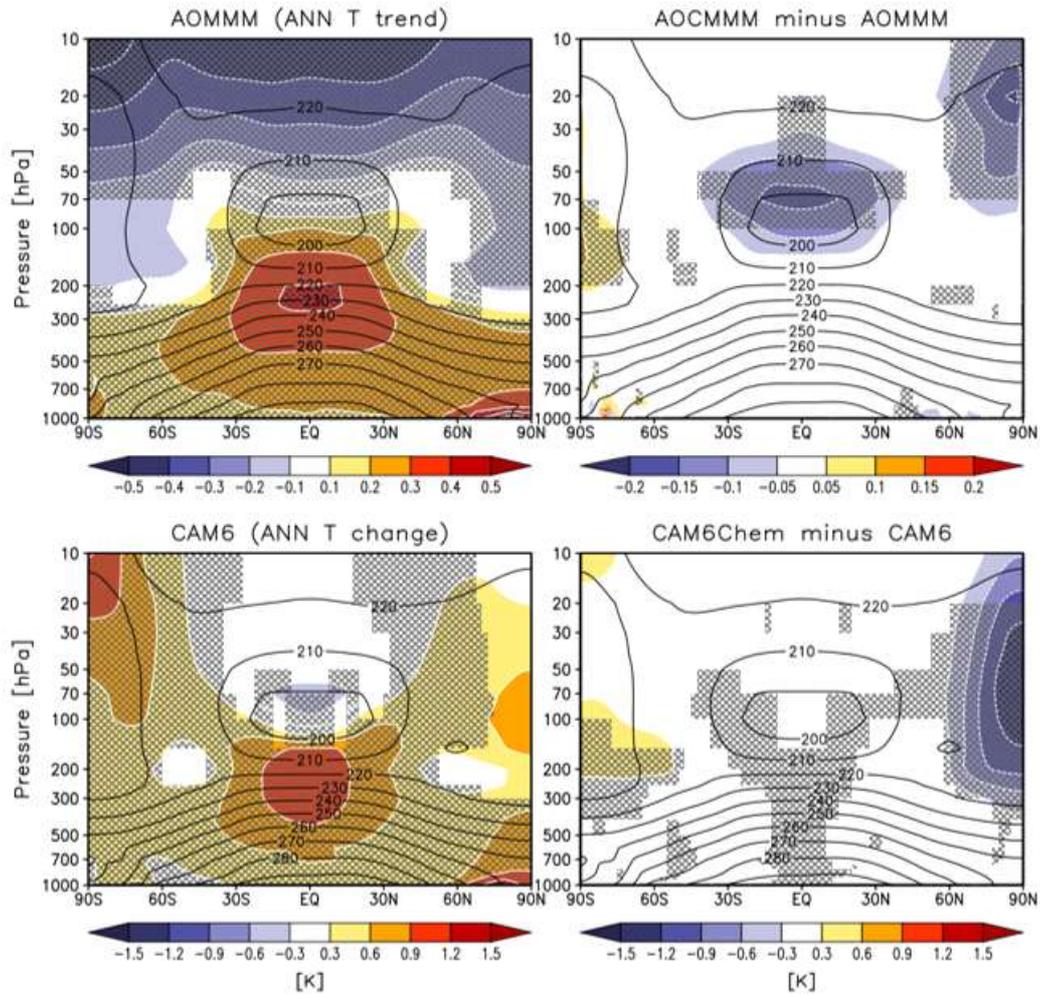


Fig. 3.3.42. CAM6에서 나타나는 2000년과 1980년 간의 연평균 동서방향 평균 온도 차이 (shading)과 1980년 CMI/CMIP6 모의 평균 분포 (contour)

- CAM6 실험군의 2000년과 1980년 실험의 차이에서 남반구 성층권의 연평균 온도는 증가가 관찰되며, 특히 남반구 여름철의 온도 증가가 가장 지배적으로 나타난다 (Fig. 3.3.42). 이러한 온도 증가는 앞서 살펴본 CAM6-Chem에서 오존 농도 증가가 모의된 고도에서 나타나며, 이러한 경향은 Chemistry Climate Model Initiative (CCMI)와 CMIP6에 참여한 대기화학모형과 대기모형 결과에서도 동일한 특성이 관찰된다.

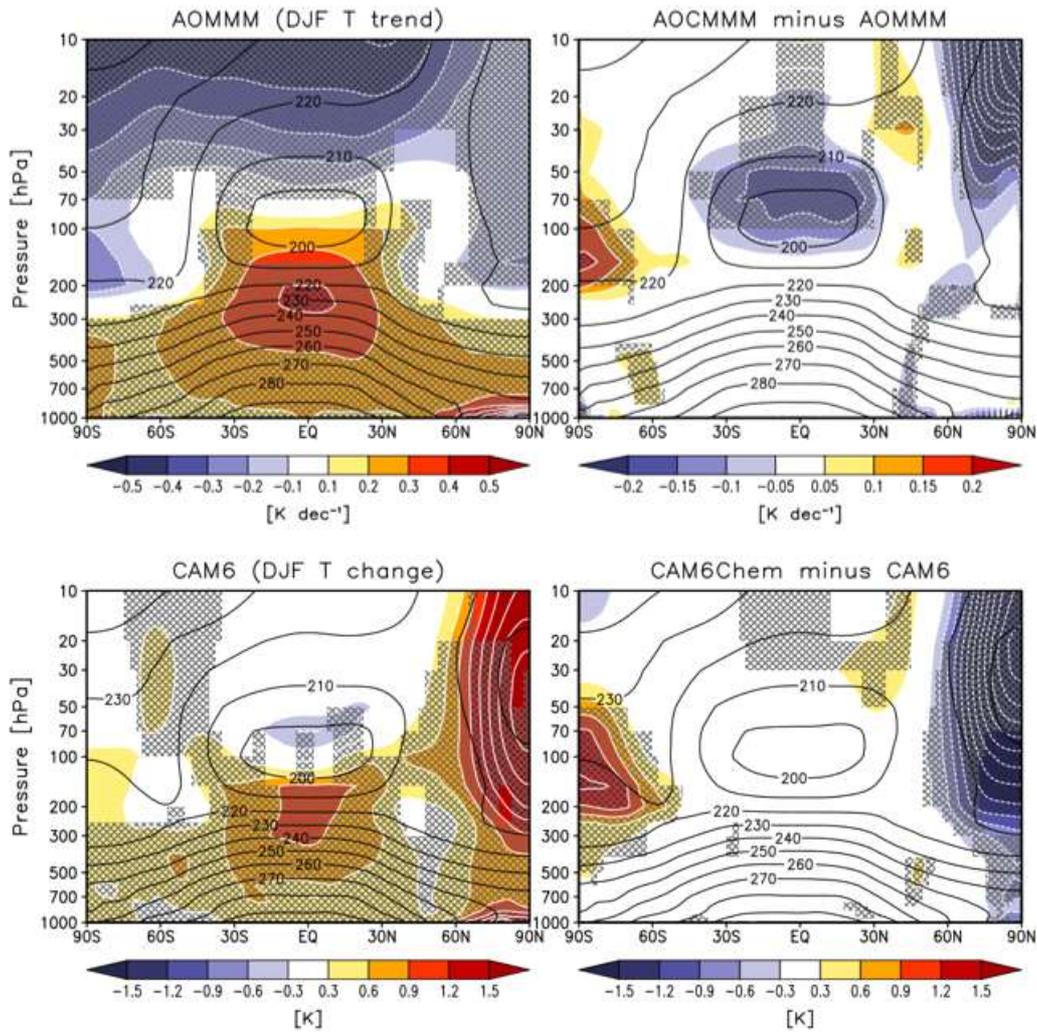


Fig. 3.3.43. CAM6에서 나타나는 2000년과 1980년 간의 북반구 겨울철 동서방향 평균 온도 차이 (shading)과 1980년 CMIP5/CMIP6 모의 평균 분포 (contour)

- 또한 CAM6-Chem의 모의 결과에서는 CAM6 모의 결과에 비교하여 성층권의 온도 증가와 함께 남반구 고위도 지역의 동풍의 강화가 나타난다 (Fig. 3.3.43). 이러한 경향은 앞서 오존 농도의 변화에서 살펴본 온도, 오존, 서풍의 변화의 물리적 인과관계와 동일한 특성이다. 또한 이러한 대기화학모형에서 남반구 고위도 지역의 동풍이 강화되는 특성은 CCM1/CMIP6 모형의 앙상블 평균에서도 동일하게 관찰된다. 재분석자료에서 나타났던 남극 지역 성층권 오존의 변화에 따른 남반구 순환장의 변화는 모델 실험에서도 동일한 특성이 관찰된다 (Fig. 3.3.44).

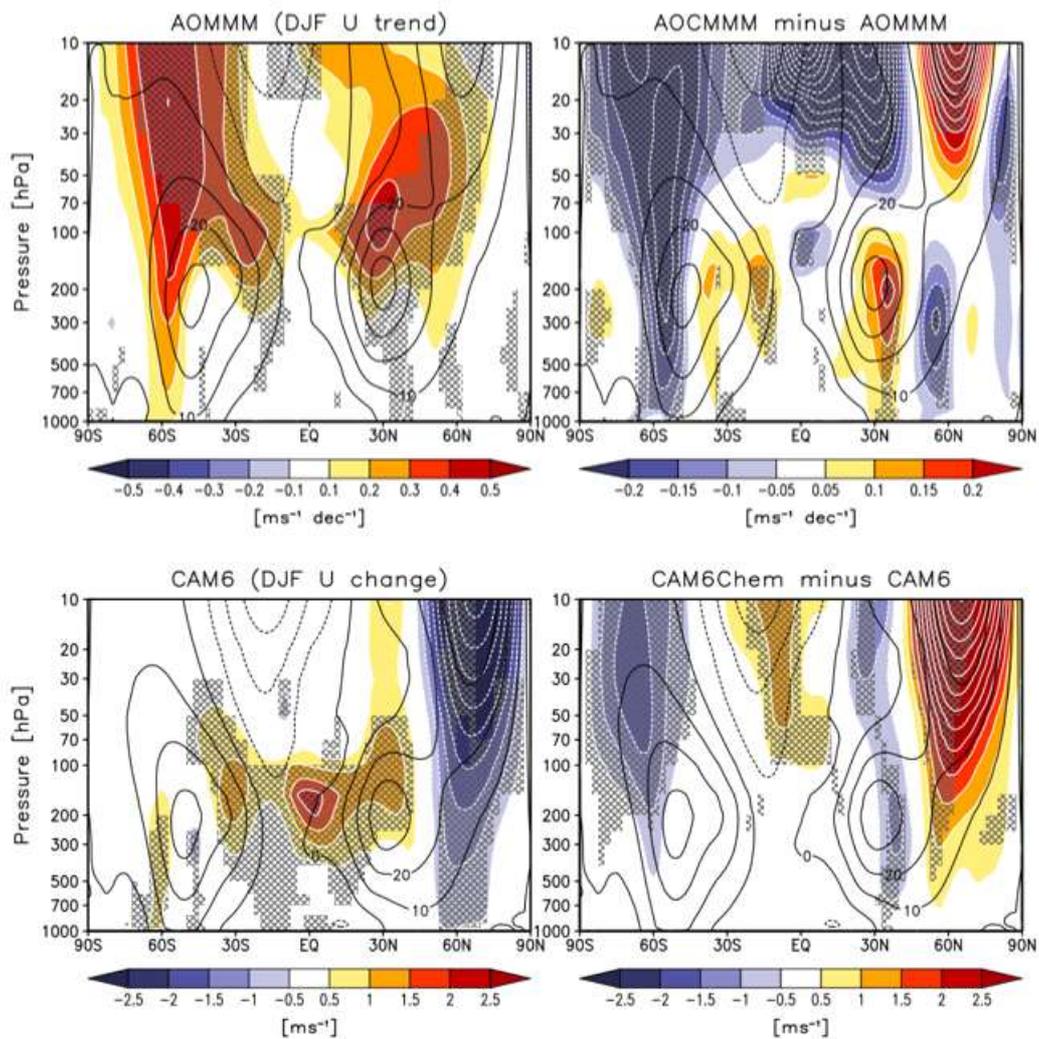


Fig. 3.3.44. CAM6에서 나타나는 2000년과 1980년 간의 북반구 겨울철 동서방향 평균 동서방향 바람 차이 (shading)과 1980년 CMIP5/CMIP6 모의 평균 분포 (contour)

- 이에 CMIP5/CMIP6 실험군에서 20세기 성층권 오존 변화만을 처방한 8종 모델 실험 결과 (Stratospheric Ozone only)를 수집하여 이 실험에서의 지면대기온도의 변화를 분석하였다.

Table 3.3.5. 성층권 오존 처방 실험 모형 목록

모델명	참여 MIP	양상블 개수
FGOALS-g2	CMIP5	2
GISS-E2-H	CMIP5	5
GISS-E2-R	CMIP5	5
CanESM5	CMIP6	10
GISS-E2-1-G	CMIP6	5
IPSL-CM6A-LR	CMIP6	10
MIROC6	CMIP6	3
MIR-ESM2-0	CMIP6	3

- 20세기의 남반구 지역 오존은 앞서 살펴본대로 20세기 후반에 감소하는 경향이 존재한다. 남반구 여름철, 가을철, 겨울철에는 이러한 남극 오존 감소에 따라 각 실험군에서는 서풍의 증가가 관찰된다. 이러한 서풍의 강화는 남극진동 양의 위상 순환의 강화와 연계되는데 이에 따라 남극대륙에는 지면 온도가 감소하며, 남극 반도의 동안 지역에서는 온도가 증가하는 경향이 관찰된다. 한편 남반구 봄철의 경우 여름철, 가을철, 겨울철과 달리 남극 대륙 지역의 한랭화 경향이 약화되어 동남극 일부 지역에서만 뚜렷한 한랭화 경향성이 관찰되며, 서남극 지역과 남극 반도 지역에서는 반대로 온도 증가 경향이 관찰된다 (Fig. 3.3.45).

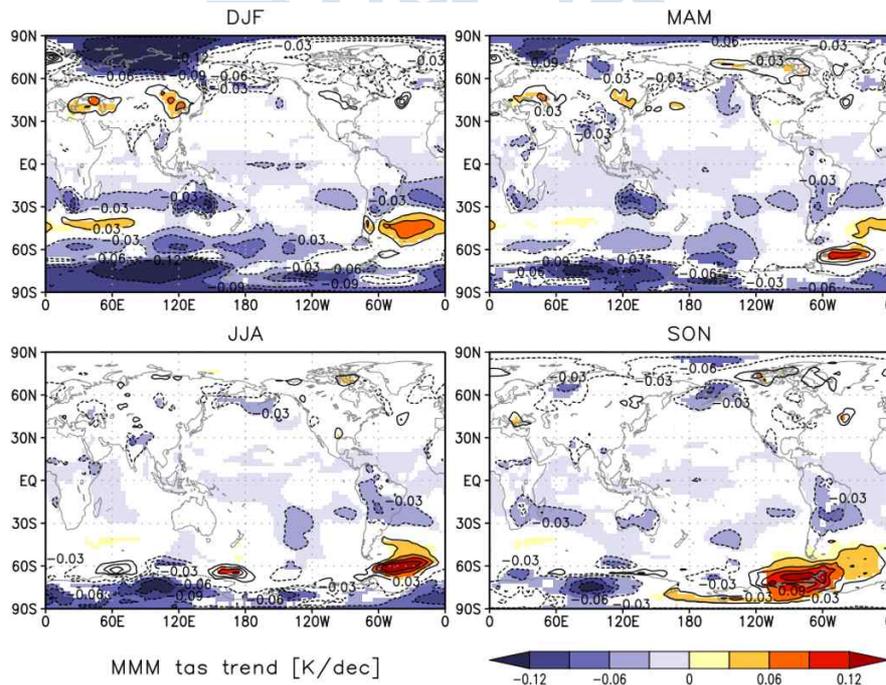


Fig. 3.3.45. 성층권 오존만을 처방한 20세기 기후 변화 실험에서 나타나는 계절별 지면대기온도의 변화 경향

다. 장기기상관측자료와 머신러닝을 활용한 남극 지상 기온 자료 복원

- 남극의 표층대기온도는 남극지역의 기후변화의 특성을 관찰할 수 있는 핵심적인 기후 변수이며, 남극 주변의 해빙, 남극 빙상의 용빙 등과 밀접한 연관을 갖는다. 그럼에도 불구하고 남극 지역의 빙권요소와 극한의 기상 특성은 장기 관측의 수행을 어렵게 하여왔다. 이러한 남극 지역의 극한의 환경은 남극 대륙 지역의 격자화된 표층대기온도 자료의 확보 역시 어렵게 한다. 이에 기존 연구에서는 다양한 방법을 활용하여 남극 대륙 지역에 격자화된 표층대기온도, 표층온도 자료의 생산을 시도하여왔으며, 최근 NB2014에서는 확보된 장기 지상관측자료를 통계적 방법을 이용하여 55년간의 표층대기온도 복원자료를 성공적으로 생산한 바 있다. 최근 인공지능 기법의 발달은 이러한 기존 다양한 통계적 방안들의 성능을 향상시킬 수 있는 가능성을 제시하고 있고 이에 기상관측자료와 통계적인 방법에 기계학습을 활용하여 최근 60년 동안의 월평균 남극 지면 대기온도 자료를 복원하였으며, 복원된 자료의 연간 및 계절별 기온 변화 추세를 살펴보았다.

1) 기계학습을 활용한 지면 대기온도 복원

- 본 연구에서는 kriging이라는 기존의 통계적 내삽법으로 복원된 남극 지면대기온도 자료를 기계학습을 통해 수정하여 더 정확한 복원 자료를 생산하였다. 여기서 kriging 내삽법은 여러 공간상에 측정된 관측값을 통해 관측되지 않은 지점의 값을 예측하는 통계적 방법이다. Nicolas & Bromwich (2014)에서는 이 kriging 내삽법을 이용하여 남극내 15개 지점의 관측값의 선형결합으로 관측되지 않은 지점의 기온값을 예측하였다. 이 때 선형결합에 들어가는 가중치는 재분석자료에서 계산되는 공간 상관관계수가 사용된다. 우리는 이 kriging 내삽법을 남극 내 15곳의 관측소의 월평균 기온, 기압 및 풍속 자료에 적용하여 각 기상인자에 해당하는 복원 자료를 생산하였다. 이렇게 생산된 복원 자료는 남극 전역의 1961년부터 2020년까지의 기간의 자료이다. 남극 내 관측소가 위치한 영역에서 예측된 지면수준의 기온, 기압, 풍속 세 개의 값과 그 관측소에서 관측된 기온값과의 관계식을 만들 수 있다면 다른 지점에서의 기온 예측값을 관계식에 맞게 수정할 수 있다. 앞서 말한 관계식은 기계학습 중 하나인 인공신경망(artificial neural network, ANN)으로 만들었으며, 인공신경망 학습 시 입력되는 변수에는 kriging 내삽법으로 계산된 지면수준의 월평균 기온, 기압 및 풍속과 ERA-Interim 재분석자료에서 얻은 월별 평균 기온값과

고도값이 사용되었다. 반대로 인공지능망 학습 시 각 입력값에 대응하는 정답지는 남극 대륙내 위치한 관측소에서 제공하는 월평균 지면대기온도자료이다. 인공지능망 학습의 대략적인 틀은 Fig. 3.3.46에서 살펴볼 수 있다.

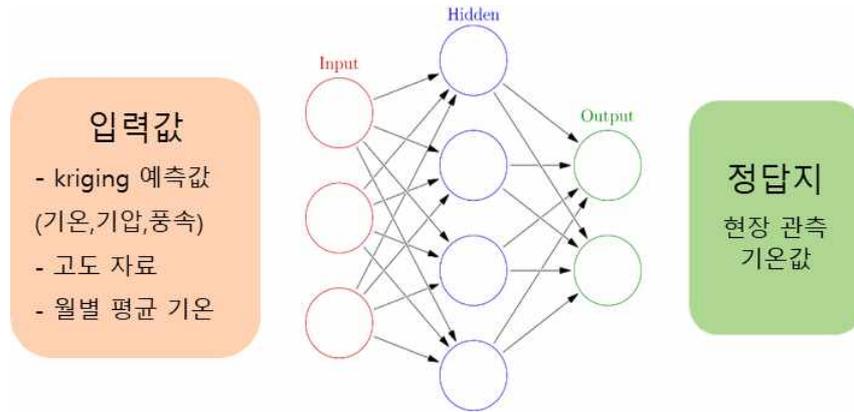


Fig. 3.3.46. 인공지능망(ANN) 학습 시 사용되는 자료의 종류

- 남극대륙에는 90개 이상 지점의 현장의 기상관측자료가 공개되어 있다. 그 중에 75개 지점의 관측지점에서 제공하는 월평균 지면대기온도 자료를 인공지능망의 정답지로 이용하였다. 사용된 모든 기온 관측값 중에서 약 1만6천개 이상의 값이 학습에 사용되었으며, 약 7천개 이상의 값은 예측값 평가에 사용되었다. Fig. 3.3.47은 사용된 현장 관측값의 위치를 보여주고 있다. 여기에서 푸른색 원으로 표시된 지역은 kriging 내삽법 시 사용되는 관측값이 측정된 관측소의 위치를 나타낸다.

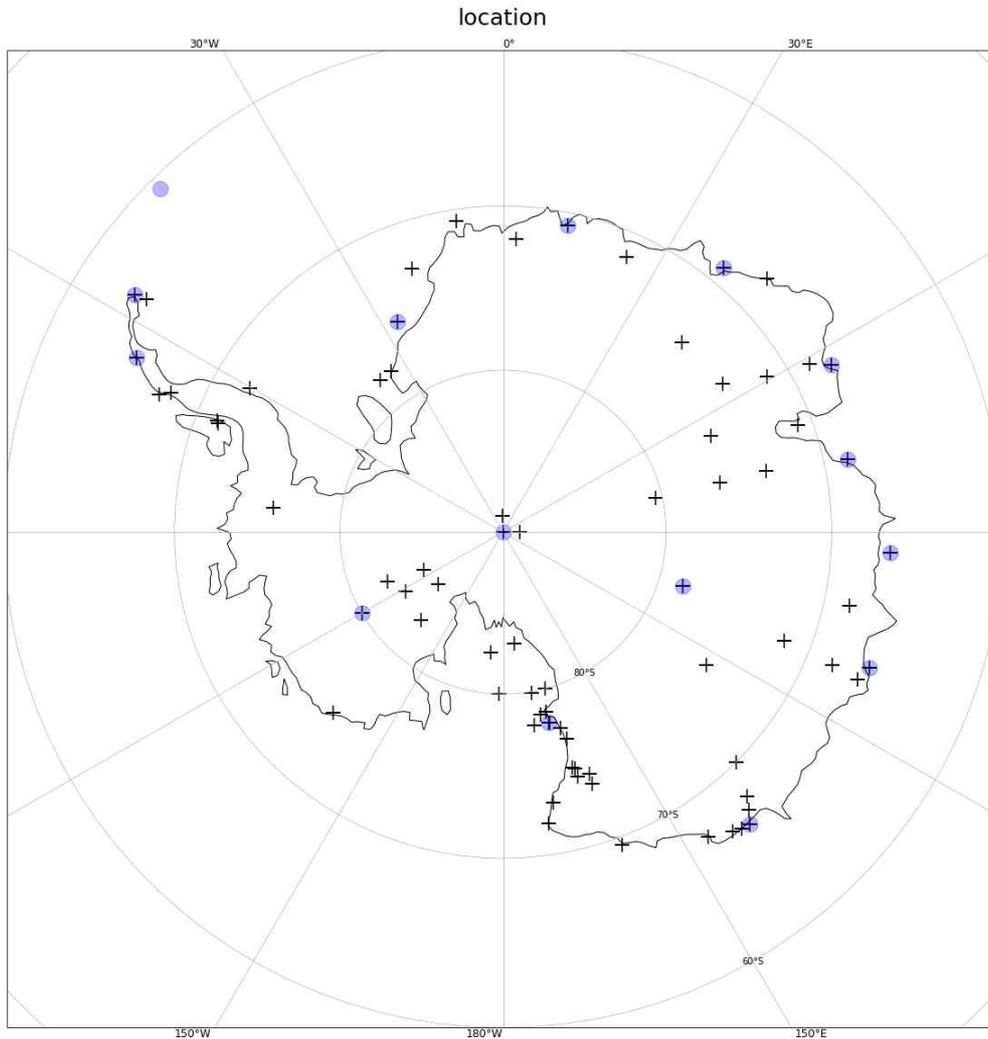


Fig. 3.3.47. kriging 내삽법 및 인공신경망(ANN) 학습에 사용되는 지면대기온도 관측값을 제공하는 관측소의 위치. 푸른색 점은 kriging 내삽법에 사용되는 관측소의 위치이며 십자가로 표시된 지점에서 측정된 기온 관측값은 기계학습에 활용됨

2) 기계학습을 통한 기존 복원 능력의 향상 정도

- 다음으로 kriging 내삽법으로 복원된 지면기온 자료를 기계학습을 통해 수정하여 복원의 정확성을 늘리고자 하였다. 새롭게 복원 또는 예측된 기온값의 예측력 향상 정도는 Fig. 3.3.48에서 확인할 수 있다. Fig. 3.3.48의 두 그래프 모두 예측값과 관측값의 오차의 도를 보여준다. 검은 점이 파란 실선에 가깝게 위치할수록 예측력이 높다고 볼 수 있다. 좌측의 그래프는 kriging 내삽법으로, 우측의 그래프는 ANN으로 예측된 값과 관측값의 오차를 보여준다. ANN으로 수정된 예측자료에서 평균제곱오차(mse)가 더 낮게 나온 것을 확인 할 수 있었으며 kriging 내삽법에 비해 정확성이 조금 더 향상되었음을 알 수 있었다.

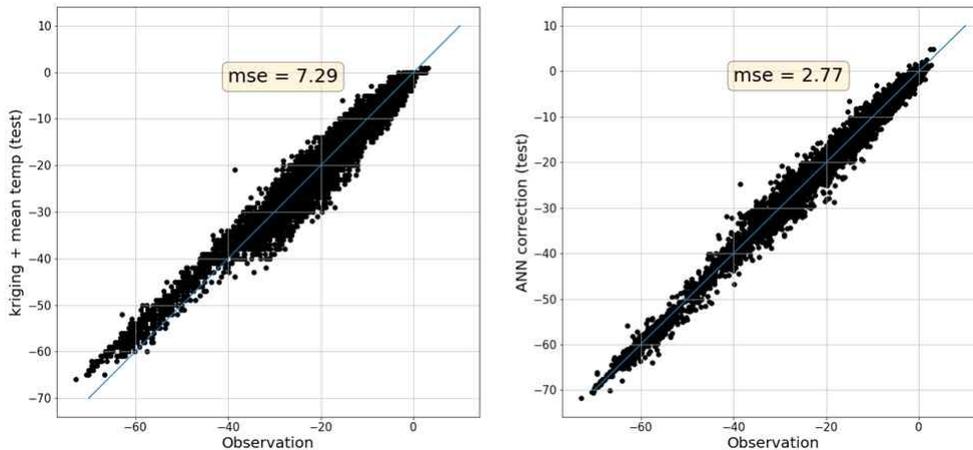


Fig. 3.3.48. 복원 자료와 관측값의 오차 정도. (좌) kriging 내삽법으로 복원된 자료와 관측값과의, (우) 인공신경망(ANN)으로 복원된 자료의 관측값과의 차이를 비교

3) 1961년부터 2012년까지 52년동안의 복원 자료의 연간 지면기온의 변화 추세

- Nicolas & Bromwich (2014)의 연구에서는 1958년부터 2012년까지 기간의 남극 지면기온을 복원하였다. 이에 2012년까지 복원된 자료를 기반으로 연간 지면기온 변화의 추세를 계산하여 기존 연구 결과와의 차이를 살펴보았다. Fig. 3.3.49에서 좌측은 kriging 내삽법으로, 우측은 ANN 기계학습을 이용하여 얻은 52년 동안의 복원 자료의 연간 기온 변화 추세이다. 기본적으로 ANN 기계학습시 kriging 내삽법의 자료가 입력자료로 사용되기에, 두 결과는 매우 다른 양상을 보이지 않는다. kriging 내삽법의 경우(Fig. 3.3.49의 좌측), Nicolas & Bromwich (2014)의 결과와 유사하게 남극 반도와 서남극 전역에서 온난화 추세가 나타났다. ANN 기계학습으로 복원된 자료의 기온 변화 추세는 Fig. 3.3.49의 우측에서 볼 수 있으며, kriging 내삽법의 결과에 비해 남극 반도에서 더 넓은 영역에서 더 강한 온난화 추세가 나타났고, 서남극에서는 부분부분 지역에 따른 온난화의 강세가 다르게 나타났다. 반면, 동남극에서는 두 방법의 경우 모두 유사한 추세 구조를 보였다.

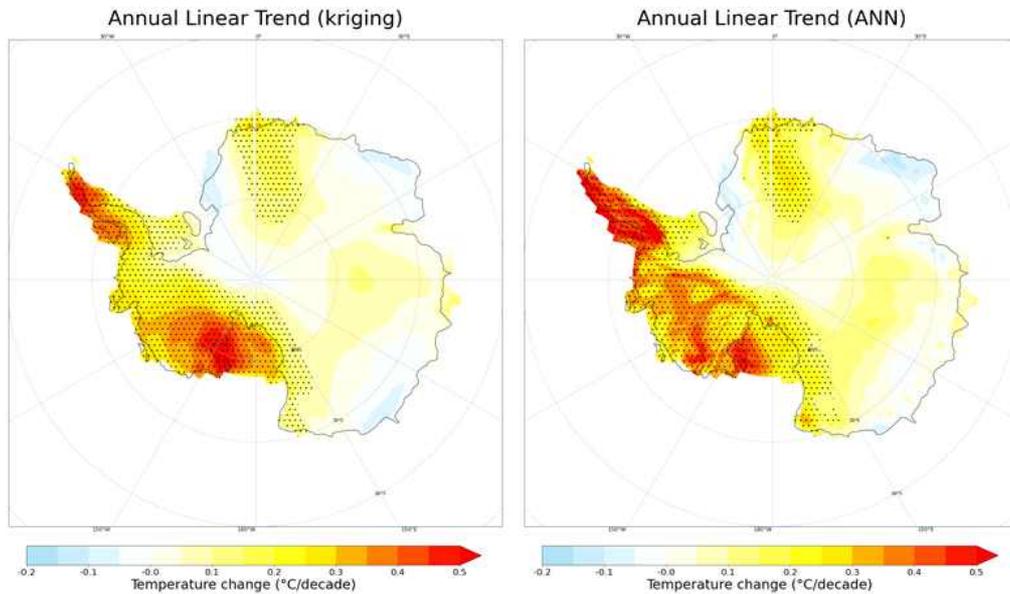


Fig. 3.3.49. ERA-Interim 자료와 현장관측기온값을 활용하여 1961년부터 2012년까지 재구성된 자료의 지면대기온도의 연간 추세. 좌측의 결과는 kriging 내삽법, 우측은 ANN 기계학습을 이용하여 도출됨 (검은 점은 유의수준 0.01에서 선형추세가 유의함을 나타냄)

4) 1961년부터 2020년까지 60년동안의 복원 자료의 연간 지면기온의 변화 추세

- 앞서 복원한 자료에 상대적으로 더 최근의 관측된 자료를 적용하여 1961년부터 2020년까지 60년간 남극의 지면대기온도 자료를 복원하였고, 그 기온자료에서 남극의 기온 변화 추세를 계산해 보았다. 복원자료는 마찬가지로 kriging 내삽법과 ANN 기계학습을 통해 생산했으면, Fig. 3.3.50에서 좌측과 우측에서 각각의 복원된 기온자료의 추세를 볼 수 있다. 두 방법 모두에서 52년간의 기온 변화 추세와 비교하여, 남극 전역의 온난화 지역이 확장되었지만 서남극 지역에서는 온난화 강도가 다소 낮아졌음을 확인 할 수 있다. 로스해에서 동남극의 Vostok 관측소로 이어지는 넓은 지역에서 유의한 온난화 추세가 나타났으며 0도와 동경 30도 사이에 해당하는 영역에서도 유의한 기온 증가 추세가 나타나는 지역이 늘어났다. kriging 내삽법으로 복원된 기온자료에 비해 ANN 기계학습으로 복원된 기온 자료(Fig. 3.3.50, 우측 그래프)에서 남극반도의 기온 증가률이 더 가파르게 나타났으며, 주로 남극 반도 내 상대적으로 고도가 높은 영역에서 높은 온난화 추세를 확인 할 수 있었다.

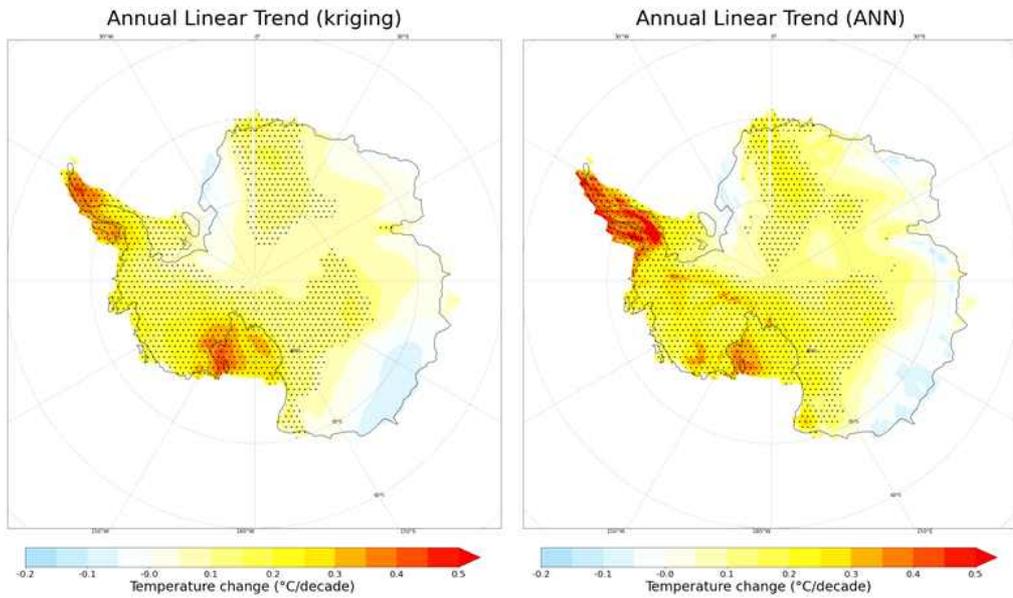


Fig. 3.3.50. ERA-Interim 자료와 현장관측기온값을 활용하여 1961년부터 2020년까지 복원된 자료의 지면대기온도의 연간 추세. 좌측의 결과는 kriging 내삽법, 우측은 ANN 기계학습을 이용하여 도출됨 (검은 점은 유의수준 0.01에서 선형추세가 유의함을 나타냄)

5) 1961년부터 2012년까지 52년동안 복원된 자료의 계절별 지면기온의 변화 추세

○ 연간 기온 변화 추세에 더불어 남극의 계절별 기온 변화 양상은 어떠한지 Fig. 3.3.51에 나타나 있다. Fig. 3.3.51의 좌측의 4개의 그래프는 kriging 내삽법을 이용하여 복원된 자료의 계절별 기온 변화 추세를 보여주며, 우측 4개의 그래프는 ANN 기계학습으로 복원된 자료의 기온 변화 추세를 보여준다. 두 방법의 경우에서 계절별 기온 변화 추세는 다소 비슷한 모습을 보여준다. 각 계절에서 두드러지게 큰 폭의 추세가 나타나는 지역은 두 경우 모두 유사하게 나타내며 통계적으로 유의한 추세를 지니는 지역도 역시 유사하게 드러난다. 다만, ANN 기계학습을 통한 복원 자료에서, 남반구의 겨울에 남극 반도의 온난화 추세가 더 강하게 넓은 지역에서 나타났으며, 봄에는 서남극의 온난화를 띠는 영역이 남극반도 방향과 로스해의 서쪽해안 방향으로 더 넓게 확장하였다. 공통적으로 나타나는 계절별 기온 변화 추세는 다음과 같다. 남반구 여름(4개 그래프 중 왼쪽 상단)엔 대륙 전체적으로 추세의 강도는 다른 계절에 비해 상대적으로 낮은 편이다. 다만, 남극반도와 서남극 일부에서는 다른 계절과 마찬가지로 통계적으로 유의한 온난화가 나타나며, 특이하게도 Vostok 관측소 중심으로 동남극의 넓은 영역에서 유의한 온난화가 나타난다. 이 동남극의 온난화 추세는 다른 계절에서는 나타나지 않았다. 남반구의

가을의 경우((4개 그래프 중 오른쪽 상단)에서는, 다른 계절에서는 잘 나타나지 않는 한랭화 추세가 눈에 띈다. 웨델해와 닿아있는 넓은 영역에서의 해안 지역과 동남극의 해안 지역에서 통계적으로 유의한 한랭화 추세가 나타난다. 이는 여름의 경우 매우 좁은 영역을 제외하고는 나타나지 않는 넓은 영역에서의 한랭화 추세이다. 그러나 가을의 경우에도 남극 반도에서는 역시 온난화 추세가 유지되었다. 남극 반도와 서남극의 온난화는 대체로 남반구의 겨울과 봄에서 기인하는 것으로 보인다. 남반구의 겨울의 경우(4개 그래프 중 왼쪽 하단)에 남극반도의 거의 모든 지역에서 강한 온난화 추세를 보인다. 그리고 봄(4개 그래프 중 오른쪽 하단)의 시기에 서남극 대부분에서 통계적으로 유의할 뿐만 아니라 높은 값의 기온 증가를 보여준다. 또한 겨울과 봄의 계절에서만 동남극의 동경 0도의 넓은 지역에서 유의한 온난화 현상이 보인다. 두 계절의 이러한 특징은 ANN에서 복원된 기온자료에서 더 두드러진다.

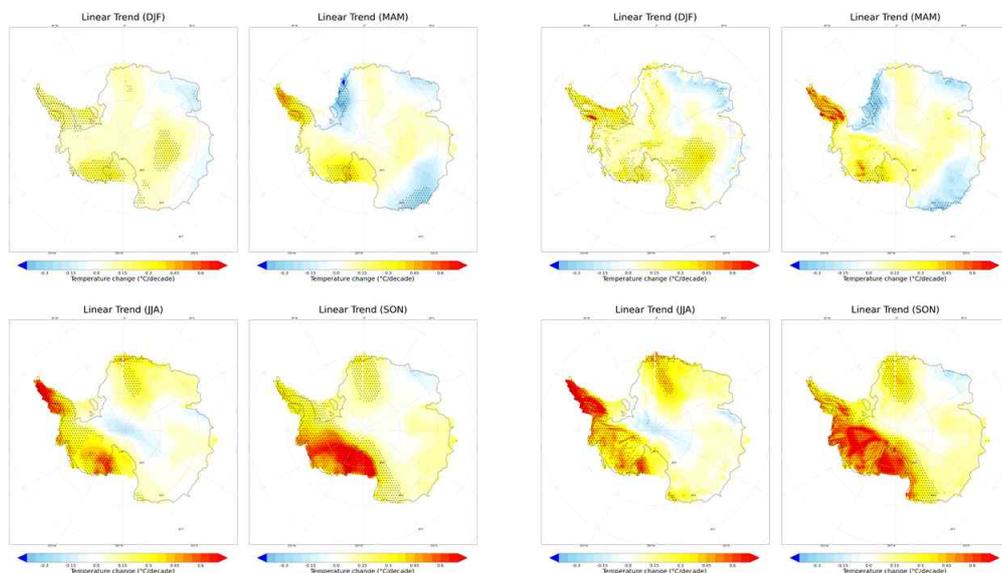


Fig. 3.351. ERA-Interim 자료와 현장관측기온값을 활용하여 1961년부터 2012년까지 52년동안 복원된 자료의 계절별 지면기온의 변화 추세. 좌측 4개의 그래프는 kriging 내삽법을, 우측 4개의 그래프는 ANN 기계학습을 이용하여 도출됨 (검은 점은 유의수준 0.05에서 선형추세가 유의함을 나타냄)

- 6) 1961년부터 2020년까지 60년동안 복원된 자료의 계절별 지면기온의 변화 추세
- 비교적 최근의 기상관측값을 적용하여 복원한 60년 기간의 복원자료에서도 전과 마찬가지로 계절별 기온 변화 추세를 분석하였다. 결과는 Fig. 3.352에서 확인할 수 있는데, 좌측 4개의 계절별 그래프는 kriging 내삽법을 활용하여 얻어진 것이며, 우측의 경우는 ANN 기계학습을 통해 얻어졌다. kriging 내삽법으로 얻어진 결과에

비해 ANN 기계학습으로 얻어진 기온 변화 추세는 크게 달라지지는 않았다. 통계적으로 유의한 추세를 보여주는 지역은 대동소이하였다. 다만, 남반구 가을과 겨울에 남극반도의 온난화가 더 넓고 강하게 나타나며, 봄철에 서남극에서 온난화 정도가 약간 더 높아졌다. 또한 여름의 계절에서만 유일하게 남극점을 비롯한 주변 지역에서 통계적으로 유의한 온난화 추세가 보였다.

- 두 방법 모두에서 공통적으로 나타나는 추세는 남극반도와 로스해의 동쪽해안 지역에서 4계절 내내 온난화 추세를 보여준다. 이는 Fig. 3.3.52의 52년 동안의 추세 분석에서도 동일하게 나타난다. 52년 동안의 기온 변화 추세에 비해 8년이 추가된 60년 동안의 추세는 계절별로 달라졌다. ANN 기계학습으로 복원된 자료에 한해서만 분석해보자면, 남반구 여름에는 두 시기 모두 유사한 기온 변화 추세 패턴을 보여주었다. 남반구의 가을엔 2013년부터 2020년까지 8년의 기간 동안 남극 전반적으로 온난화가 진행된 것으로 보인다. 52년 시기동안에 웨델해를 포함한 동남극해안에서 한랭화 패턴이 넓고 뚜렷하게 나타났으나 60년 동안의 추세에서는 유의한 한랭화 추세를 보여주는 지역이 거의 남지 않게 되었다. 겨울철 기온 변화 추세도 추산 시기가 연장됨에 따라 다른 양상의 추세 패턴을 보여준다. 앞선 52년 동안의 겨울철 기온 변화 추세는 남극반도의 매우 강한 온난화와 서남극 전역의 반도의 뚜렷한 온난화와 동경 0도 해안지역에서 남극점으로 이어지는 넓은 영역에서의 유의한 온난화 패턴의 특징을 지닌다. 그러나 60년 기간 동안에는 서남극 지역의 일부분만 온난화 추세를 보여주며 동경 0도 지역의 온난화 추세는 거의 사라지게 되었다. 8년의 차이가 나는 두 시기에서 가장 크게 기온 변화 양상을 보여주는 계절은 봄이다. 60년 기간 동안에 봄철에는 웨델해 해안지역, 동남극 해안 지역과 남극점 주변 지역을 제외한 거의 모든 영역에서 통계적으로 유의한 크고 작은 온난화 추세를 보여준다. 반면 52년 기간의 경우엔, 동남극의 대부분 영역에서 기온 변화 추세는 나타나지 않았다.

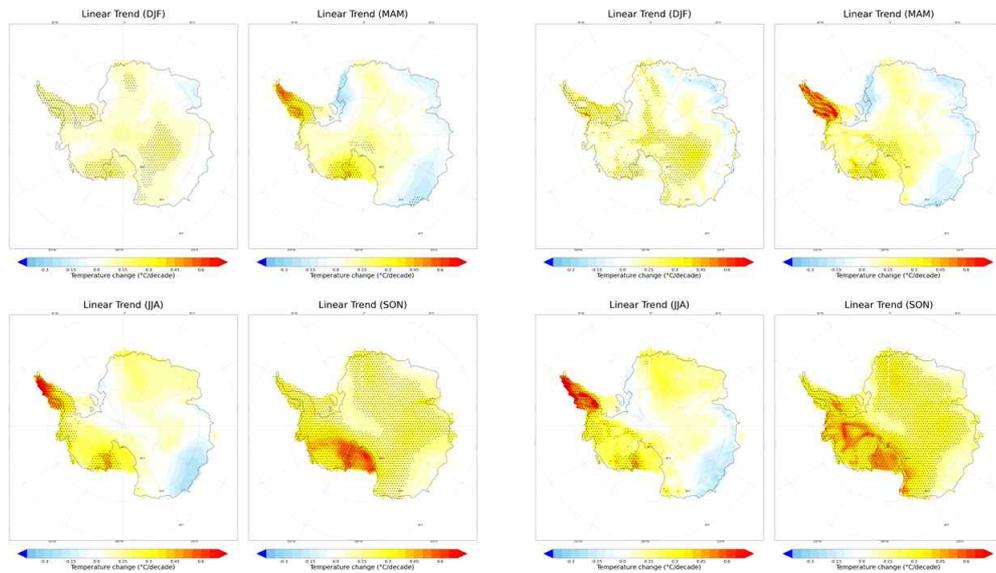


Fig. 3.3.52. ERA-Interim 자료와 현장관측기온값을 활용하여 1961년부터 2020년까지 60년동안 복원된 자료의 계절별 지면기온의 변화 추세. 좌측 4개의 그래프는 kriging 내삽법을, 우측 4개의 그래프는 ANN 기계학습을 이용하여 도출됨 (검은 점은 유의수준 0.05에서 선형추세가 유의함을 나타냄)



3.3.2 남극 및 남반구 고위도 지역 기후변동성간 상관 메커니즘 분석

가. 남극 해빙 변화 진단 및 남반구 기후변동성과의 상관 메커니즘

- 연속적인 위성관측이 시작된 1979년 이래로 북극에서는 해빙의 면적이 급격히 감소하는데 반해 남극에서는 해빙 면적이 증가하여 지구온난화에 상반되는 양상을 보이고 있다. 또한 대기 중의 온실기체 농도의 증가에 반응하여 기후모델들이 관측에 부합하게 북극 해빙의 감소 경향을 모의하고 있는 것과는 달리 남극 해빙의 증가 경향은 재현하고 있지 못하고 있어서 기후모델 실험으로부터 도출된 미래 기후예측의 신뢰성에 대한 의구심이 제기되고 있는 상황이다. 관측된 남극 해빙 면적의 증가 경향과 관측과 기후모델간 차이를 설명하기 위해 여러 가지 가설들이 제시되었다. 그러나 남극 해빙 면적의 증가 경향의 원인은 여전히 해결되지 않은 문제로 남아있다. 이와 관련하여 남극 해빙 면적의 증가 경향과 함께 남빙양에서 해수면 온도의 감소 경향이 관측된 사실(예, Fan et al., 2014; Armour and Bitz, 2015; Armour et al., 2016; Comiso et al., 2017)에 기반하여 상대적으로 관측기간이 긴 해수면 온도 자료를 함께 이용하여 남극 해빙의 변화와 장기 기후변동성과의 관련성을 살펴 보았다.

1) 남극 해빙 면적 및 남빙양 해수면 온도의 변화

- 연속적인 위성관측 자료가 존재하고 상당수의 CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project phase 6) 모델들이 15개 이상의 앙상블 멤버에 대한 모델 실험결과를 제공하는 1979년에서 2014년 기간에 대해 남극 해빙 면적과 남빙양 해수면 온도의 변화를 살펴 보았다. 연속적인 수동마이크로파 위성관측에 의하면 이 기간 동안 남극 해빙의 면적이 통계적으로 유의한 증가 경향($0.223 \pm 0.087 \times 10^6 \text{ km}^2$)을 보였다 (Fig. 3.3.53). 반면 대기 중의 온실기체 농도의 증가, 에어로솔의 변화 그리고 남극 성층권 오존 농도의 변화 등을 고려하여 수행한 기후모델 실험들은 대부분 남극 해빙 면적의 감소를 모의하여 위성관측과는 상반된 양상을 보이고 있다 (Fig. 3.3.53). 1979년에서 2014년 이외의 기간에서도 관측과 기후모델 간에 차이를 보이고 있지만 분석 기간의 증가에 따라 그 차이가 증가하는 양상을 보이고 있지 않는 것으로 분석되었다 (Fig. 3.3.54).

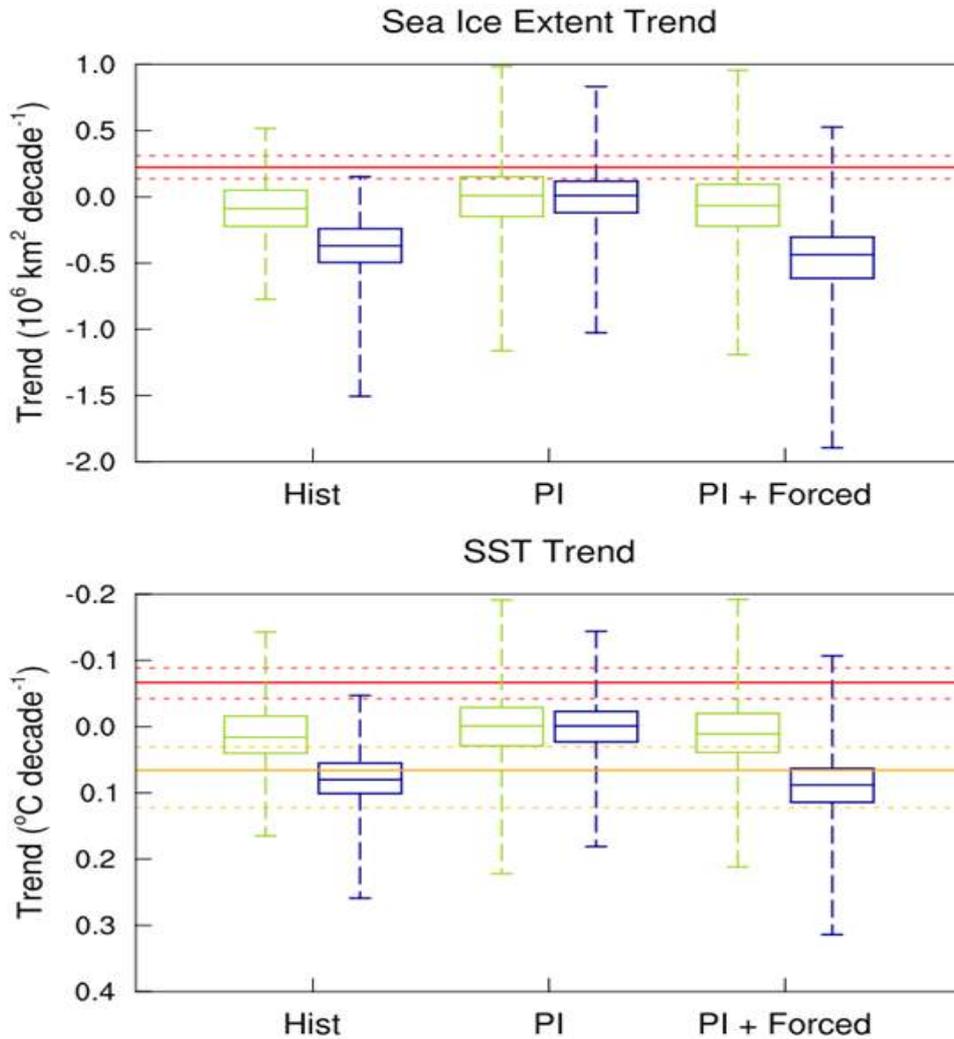


Fig. 3.3.53. 관측 (실선) 및 기후모델 실험 모의 (box plot) 남극 해빙 면적 및 남빙양 평균 해수면 온도 변화의 경향성. 붉은색 실선과 Hist로 표시된 남색 box plot은 1979년에서 2014년 기간의 경향성을 그리고 주황색 실선과 연두색 box plot은 1950년에서 1978년 기간의 경향성을 나타냄. Box plot에서 상자는 상·하위 25%, 상자 안의 세로선은 중간값, 그리고 양 끝단은 최소값과 최대값을 나타냄. PI는 외부강제 인자의 변화가 없는 산업혁명 이전의 기간을 대상으로 한 통제실험 자료를 이용하여 계산한 29년 기간 (연두색 box)과 36년 기간 (남색 box)의 경향성 분포를 나타내고, PI+Forced는 외부강제 인자에 기인하는 변화 경향성을 고려하여 보정한 PI 결과를 의미함

- 1979년에서 2014년 기간 동안에 관측된 남극 해빙 변화 경향의 공간 분포를 살펴보면 상당한 지역적인 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. Amundsen해와 Bellingshausen해에서는 해빙 면적의 감소 경향을 보이고 있지만 인도양과 서태평양 섹터 특히 Ross해에서는 해빙 면적이 크게 증가하여 남극 전체로는 해빙 면적의

증가 경향을 보이는 것으로 분석되었다 (Fig. 3.3.55).

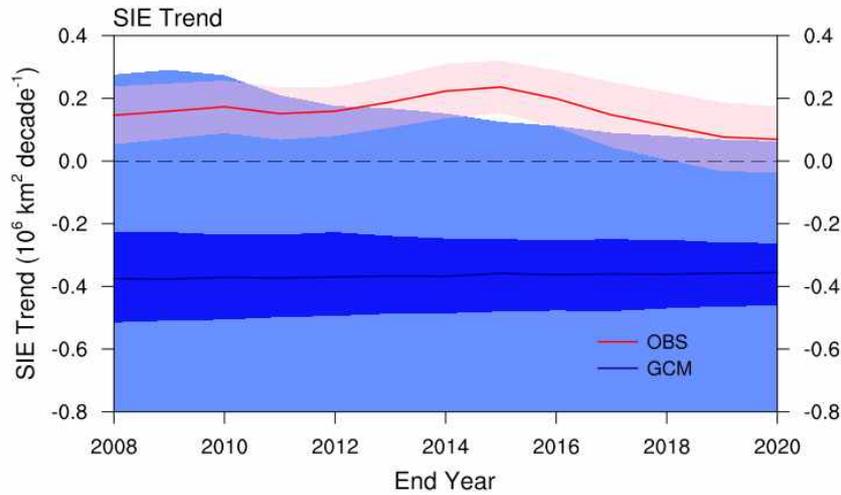


Fig. 3.3.54. 1979년부터 가로축에 주어진 해당 연도까지의 기간에 대한 연평균 남극 해빙 면적 변화의 경향성으로 붉은선과 남색선은 각각 위성관측과 모델실험 평균값을 나타냄. 남색선에 수반된 짙은 음영과 옅은 음영은 각각 모델 실험결과의 상·하위 25% 및 전체 범위를 나타냄

- 기존의 연구에서 보고된 바와 같이 1979년에서 2014년 기간 동안의 남극 해빙 면적의 증가 경향은 남빙양 해수면 온도의 감소 경향을 수반하고 있고 (Fig. 3.3.53), 특히 태평양 섹터에서 해수면 온도가 크게 감소한 양상을 보이고 있다 (Fig. 3.3.55). 반면 기후모델 실험의 경우 대기 중의 온실기체 농도 증가 등의 외부요인에 반응하여 남빙양 대부분의 지역에서 해빙의 농도가 감소하고 해수면 온도가 증가하는 공간 분포를 보이고 있으며 (Fig. 3.3.55), 대부분의 모델 실험들이 관측된 변화를 재현하지 못하고 있다 (Fig. 3.3.53).
- 기후모델 실험의 앙상블 크기가 관측과 기후모델 실험 사이의 차이를 일으키는 주요한 원인으로 작용하고 있는지 알아보기 위해 외부 복사강제인자의 변화가 없는 산업혁명 이전 기간의 통제실험 결과를 이용하여 36년 기간의 남극 해빙 면적과 남빙양 평균 해수면 온도 변화 경향성을 계산한 후 그 분포를 살펴 보았다 (Fig. 3.3.53, PI). 관측값과 기후모델 실험 결과 사이에 여전히 작지 않은 차이가 존재하지만 이 경우에는 관측값이 모델 실험 결과 분포 내에 위치해 있다. 이러한 결과는 관측된 남극 해빙 면적의 증가 경향이 상당 부분 기후시스템의 내부 변동성과 관련되어 있다는 것을 의미한다 (예, Roach et al., 2020; Polvani and Smith, 2013).

다음으로 내부 변동성이 기후 상태에 따라 크게 변하지 않는다는 가정하에 각각의 모델에 대해 1979년에서 201년 기간 경향성의 앙상블 평균을 더하여 PI 사례의 분포를 보정하였다 (Fig. 3.3.53, PI+Forced). 그 결과 상당수의 모델 실험들이 관측된 변화를 모의하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 앙상블 크기가 작아서 관측과 기후모델 실험 사이에 차이가 발생했다기 보다는 온실기체 농도의 증가로 인한 남극 해빙 면적의 감소가 과대 모의되었거나 또는 변화의 부호가 잘못되었다는 것을 의미한다. 또한 관측과 비교할 때 기후모델들이 내부 변동성을 과소 모의하는 경향이 있는 가능성이 있음을 시사한다.

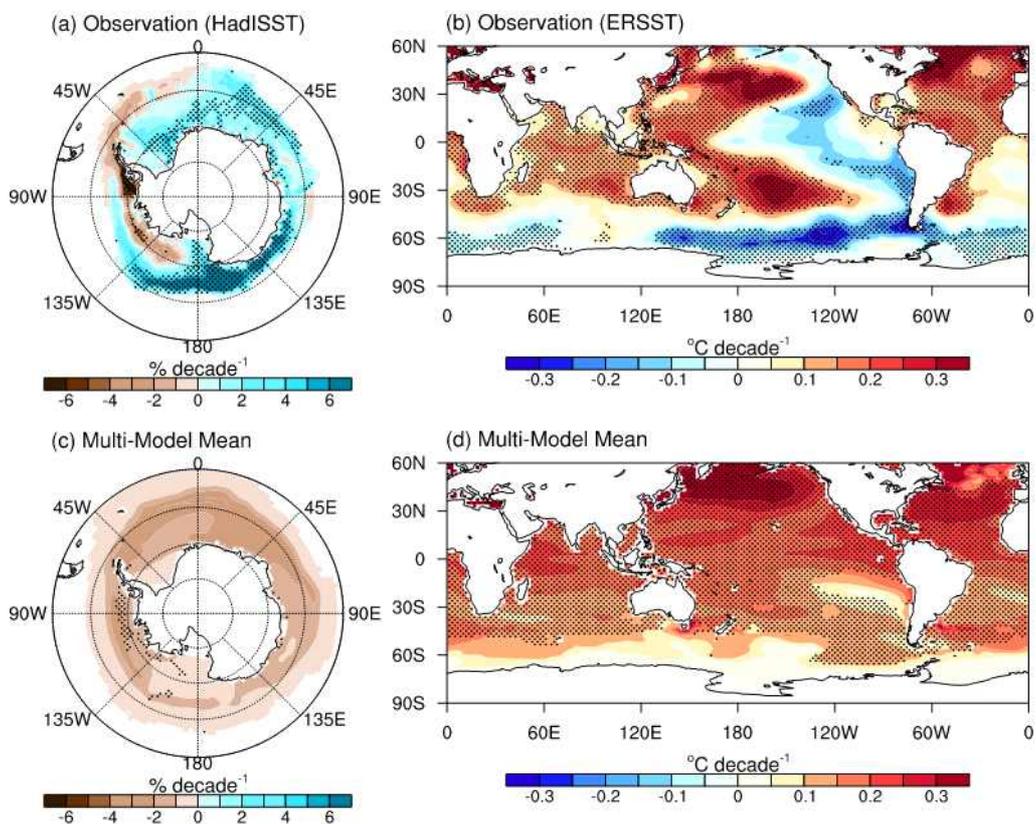


Fig. 3.3.55. 1979년에서 2014년 기간에 대한 관측 및 다중모델 평균, 앙상블 평균 해빙 농도 및 해수면 온도의 변화 경향성. 통계적으로 유의한 변화 경향성은 반점으로 표시되어 있음.

- 남극 대륙 빙붕의 용빙으로 인한 담수의 증가와 관련된 해양 표층 안정도의 증가로 인해 남극 대륙 주변의 해수면 온도가 감소하고 그 결과 해빙 면적이 증가할 수 있는 것으로 알려져 있는데, CMIP6 모델 실험에 빙붕의 용빙으로 인한 담수의 증가가 고려되어 있지 않기 때문에 CMIP6 기후모델들이 관측된 남극 해빙 면적의 증가 경향을 재현하지 못할 가능성이 있다 (예, Rye et al., 2020). 이와 더불어

기후모델들이 지구평균 온도 상승을 과대 모의하여 남극 해빙 면적의 감소의 크기에도 영향을 주고 있다는 결과가 제시되었다 (예, Roach et al., 2020). 1979년에서 2014년 기간에 대해 지구평균 온도 변화의 경향성과 남극 해빙 면적의 변화 경향성을 비교하면 둘 사이에 약한 음의 상관관계를 보이고 있다 (Fig. 3.3.56). 이러한 음의 상관관계를 고려할 때 관측과 기후모델 간의 지구온난화 크기의 차이가 해빙 면적 변화 경향의 차이에 일부 기여하고 있는 것으로 생각된다. 강제된 변화에 있어서 기후모델들에 문제가 있는 경우 관측과 기후모델 간의 이러한 차이가 분석기간이 길어짐에 따라 증가할 것으로 예상이 된다. 그러나 1979년에서 2020년 기간 동안의 남극 해빙 면적의 변화 경향성과 지구평균 온도 변화 경향성을 살펴보면 1979년에서 2014년 기간에 비해 관측과 기후모델 간에 차이가 줄어든 양상을 보이고 있다 (Fig. 3.3.56). 이러한 결과는 관측과 기후모델 간 차이에 내부 변동성이 관여되어 있음을 시사한다.

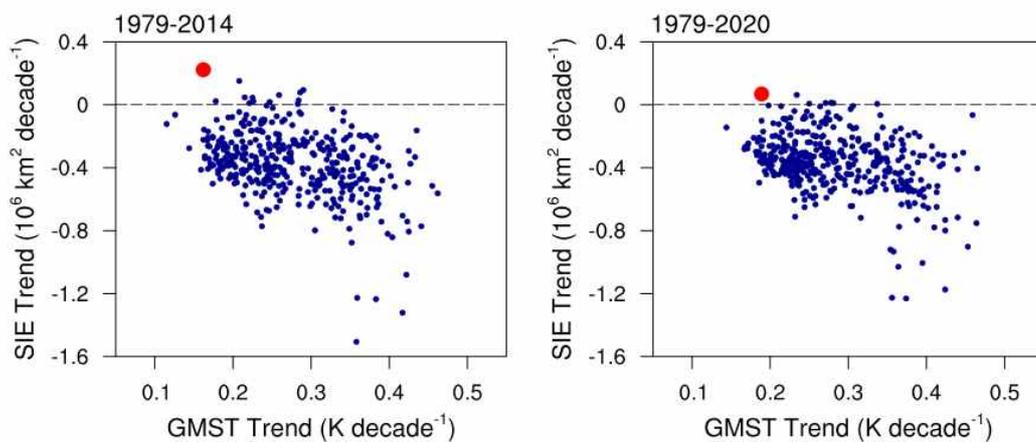


Fig. 3.3.56. 연평균 남극 해빙 면적 변화 경향성과 연평균 지구평균 지표온도 변화 경향성 사이의 산포도로 붉은점은 관측을 나타내고 작은 남색점들은 각각의 모델 실험결과를 나타냄. 왼쪽의 패널은 1979년에서 2014년 기간의 변화 경향성을 나타내고 오른쪽 패널은 1979년에서 2020년 기간의 경향성을 나타냄.

- 1979년에서 2014년 기간에 대한 남극 해빙 면적의 증가 경향성을 내부 변동성으로 설명할 수 있는지를 알아보기 위해 연평균 남극 해빙 면적의 시계열을 비교하였다 (Fig. 3.3.57). 각각의 기후모델로부터 산출된 앙상블 평균 남극 해빙 면적 편차의 시계열을 살펴보면 시간이 경과함에 따라 남극 해빙이 점진적으로 감소하는 경향을 보이고 있는데 반해 관측은 현저한 장기 변동성을 보이고 있다. National Snow and Ice Data Center (NSIDC) G02135 자료에 의하면 남극 해빙 면적이 계속적으로

증가하는 것이 아니라 2015년 이후로는 뚜렷한 증가 경향을 보이고 있지 않다. 또한 1979년 이전의 불연속적인 위성관측 (NSIDC-0192)과 육안관측 (NSIDC G00917) 자료 그리고 1964년 9월의 Nimbus-1 위성관측 자료의 분석결과 1964년에서 1978년 사이의 기간에는 해빙의 면적이 증가한 것이 아니라 오히려 감소한 경향을 나타내고 있다. 이와 더불어 1964년에서 2020년 사이의 기간의 경우 관측된 해빙의 변화 경향의 부호가 기후모델로부터 모의된 강제된 변화의 부호가 상반되지 않는 것으로 분석이 되었다. 이러한 결과는 수십년 이상 규모의 내부 변동성이 1979년에서 2014년 기간의 해빙 면적 증가 경향과 관련되어 있다는 것을 암시한다.

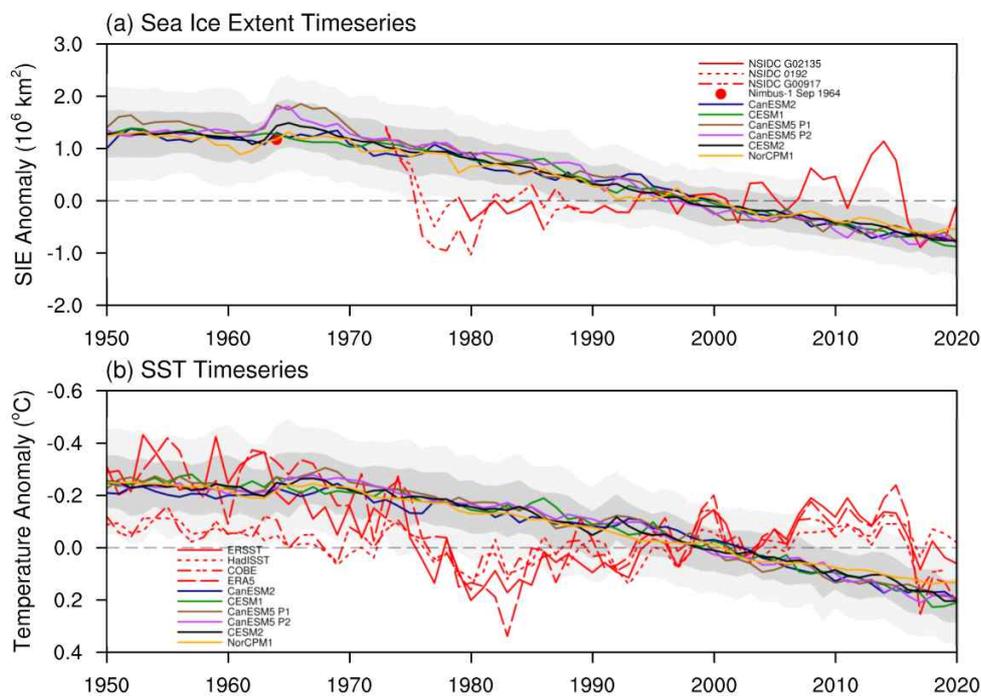


Fig. 3.3.57. 연평균 남극 해빙 면적과 남빙양 평균 해수면 온도 편차의 시계열로 붉은색 선들과 점은 관측을 나타내고 다른색 실선들은 각각의 기후모델 앙상블 평균 편차 시계열을 나타냄

- 1979년 이전에는 연속적인 위성관측이 이루어지지 않았기 때문에 남극 해빙 면적의 장기 변화를 정량적으로 결정할 수 없는 제약이 있다. 이러한 제약을 극복하기 위해 상대적으로 관측기간이 긴 해수면 온도의 변화를 살펴 보았다. 1950년에서 2020년 기간의 남빙양 평균 해수면 온도 편차 시계열을 비교하면 변화의 부호에 있어서 관측과 기후모델 실험결과 사이에 차이가 없는 것으로 나타났다 (Fig. 3.3.57). 또한 1979년에서 2014년 사이 기간의 해수면 온도 감소 경향과는 달리 2015년 이후에는 뚜렷한 감소 경향을 보이고 있지 않고 있으며 1950년에서 1978년 사이의 기간에는

오히려 증가 경향을 보이고 있는 것으로 분석되었다. 이러한 양상은 남극 해빙 면적이 현저한 장기 변동성을 보였음을 입증하는 것이다.

2) 열대지역 기후변동성과의 관련성

- 1979년에서 2014년 사이 기간의 해수면 온도 변화 경향성의 전지구 분포를 살펴보면 열대 중앙 및 동태평양 지역에서 현저한 해수면 온도의 감소 경향성을 보이는데 반해 북서 태평양과 남서 태평양 그리고 북서 대서양에서는 해수면 온도가 크게 상승하여 대조적인 양상을 보이고 있다 (Fig. 3.3.55). 이러한 분포는 남극 해빙 면적의 증가 경향성과 남빙양 해수면 온도의 감소 경향성이 태평양 지역의 기후 변동성인 Inter-decadal Pacific Oscillation (IPO) 그리고 북대서양 지역의 기후 변동성인 Atlantic Multidecadal Variability (AMV)와 관련이 있음을 시사한다 (예, Li et al., 2014; Schneider et al., 2015; Meehl et al., 2016; Purich et al., 2016).
- 1950년에서 2020년 사이 기간의 해수면 온도 변화 경향성이 외부 복사강제인자에 기인하는 강제된 변화를 나타낸다는 가정하에 선형 경향성을 제거하여 내부 변동성과 관련된 해수면 온도 변화 성분을 추정하였다. 산출된 내부 변동성과 관련된 해수면 온도 변화 시계열은 남빙양 해수면 온도가 현저한 장기 변동성을 보였음을 나타낸다 (Fig. 3.3.58). 각 지점에서 선형 경향성이 제거된 해수면 온도 편차 시계열과 해당 남빙양 평균 시계열 사이의 상관계수를 계산하였다. 산출된 상관계수의 공간 분포는 남빙양 해수면 온도의 장기 변동성이 IPO와 AMV와 밀접히 관련되어 있다는 점을 나타낸다 (Fig. 3.3.59). 이와 더불어 IPO와 AMV에 대한 해수면 온도 변화 회귀분석 결과의 공간분포도 유사한 결과를 보여 주고 있다 (Fig. 3.3.60).
- 강제된 변화가 비선형적인 양상을 보일 수 있기 때문에 기후모델 실험결과의 앙상블 평균 변화를 이용하여 해수면 온도 변화의 내부 변동성 성분을 추정하고 그로부터 IPO 그리고 AMV와의 관련성을 분석하였다. 기후모델간의 차이 등으로 인해 선형 경향성을 제거하는 방법으로부터 도출된 결과와 차이가 있기는 하지만 전반적으로 유사한 양상을 보이고 있는 것으로 확인되었다 (Fig. 3.3.60).

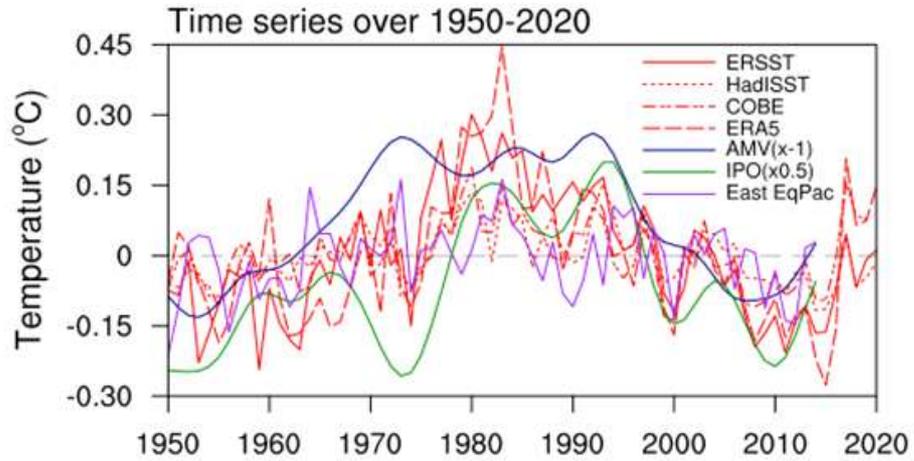


Fig. 3.358. 연평균 남빙양 평균 해수면 온도 변화의 내부 변동성 성분 시계열 및 IPO와 AMV 시계열

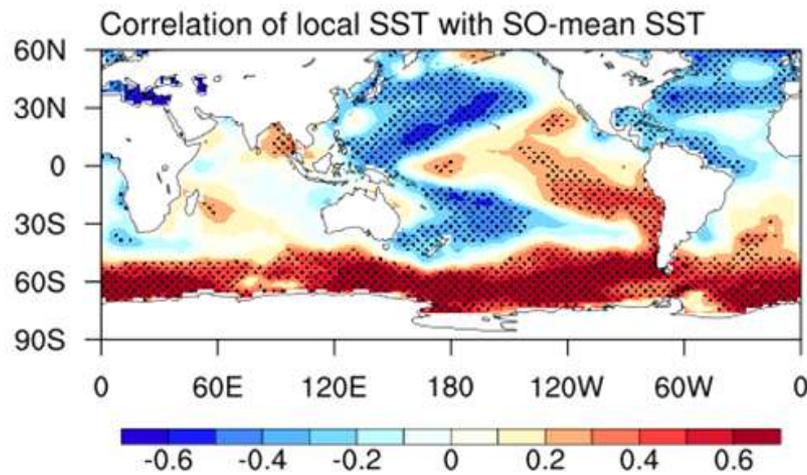


Fig. 3.359. 각 격자점에서의 연평균 해수면 온도 변화의 내부 변동성 성분 시계열과 남빙양 평균 시계열 사이의 상관계수 공간 분포

- 관측으로부터 도출된 남빙양 해수면 온도의 장기 변동성과 IPO/AMV 사이의 원격상관 관계를 기후모델들이 관측에 부합하게 모의하고 있는지를 알아보기 위해 산업혁명 이전 기간의 통제실험 결과를 이용하여 분석을 수행하였다 (Fig. 3.360). AMV와 관련된 원격상관에 있어서는 관측과 기후모델 그리고 기후모델 간에 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 차이는 AMV가 남반구 고위도 지역의 기후 변동성에 미치는 영향이 미미하거나 AMV와 관련된 원격상관을 기후모델들이 제대로 재현하지 못하고 있음을 의미한다.

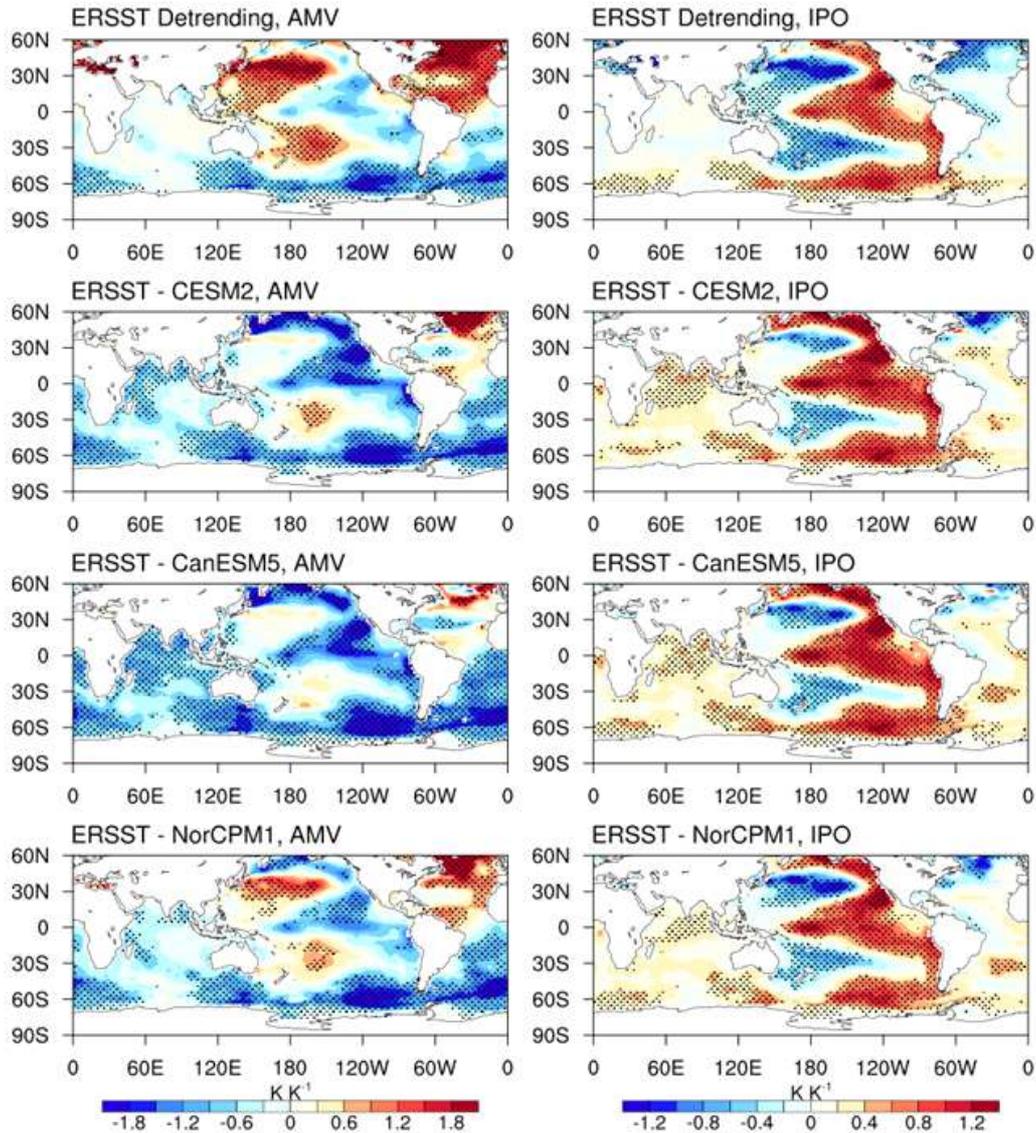


Fig. 3.3.60. AMV와 IPO 변화에 따른 해수면 온도 내부 변동성 성분 변화의 공간 분포. 첫 두 패널은 선형 경향성을 제거하여 해수면 온도 변화의 내부 변동성 성분을 추정한 경우이고, 나머지 패널들은 주어진 기후모델 앙상블 평균을 제거하여 내부 변동성 성분을 추정하여 회귀분석을 수행한 결과를 나타냄

- AMV와 관련된 원격상관 관계와는 달리 기후모델들이 IPO와 관련된 원격상관은 비교적 관측에 가깝게 모의하고 있는 것으로 분석되었다 (Fig. 3.3.61). 그러나 남빙양 태평양 섹터의 경우 IPO에 기인하는 해수면 온도 내부 변동성 성분의 변화의 크기가 관측에 비해 현저히 작은 것으로 나타났다. IPO 및 AMV와 관련된 원격상관의 관측-기후모델 간 차이는 기후모델들이 IPO와 AMV에 기인하는 남빙양 해수면 온도와 남극 해빙 면적의 장기 변동성을 과소 모의하는 것을 의미한다.

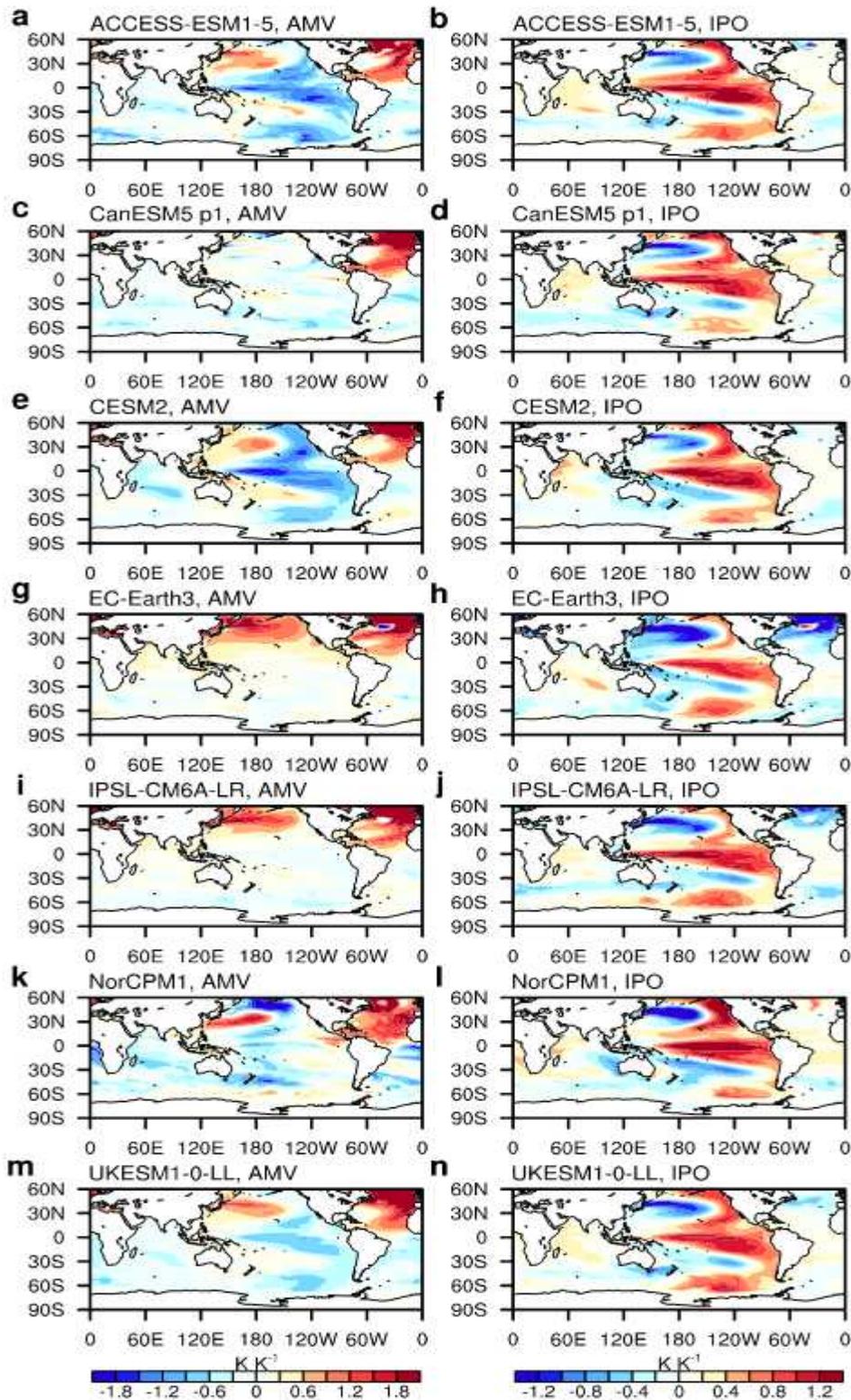


Fig. 3.361. 산업혁명 이전 기간에 대한 통제실험 결과자료의 회귀분석을 통해 도출된 AMV (왼쪽)와 IPO (오른쪽) 변화에 따른 연평균 해수면 온도 내부 변동성 변화의 공간 분포

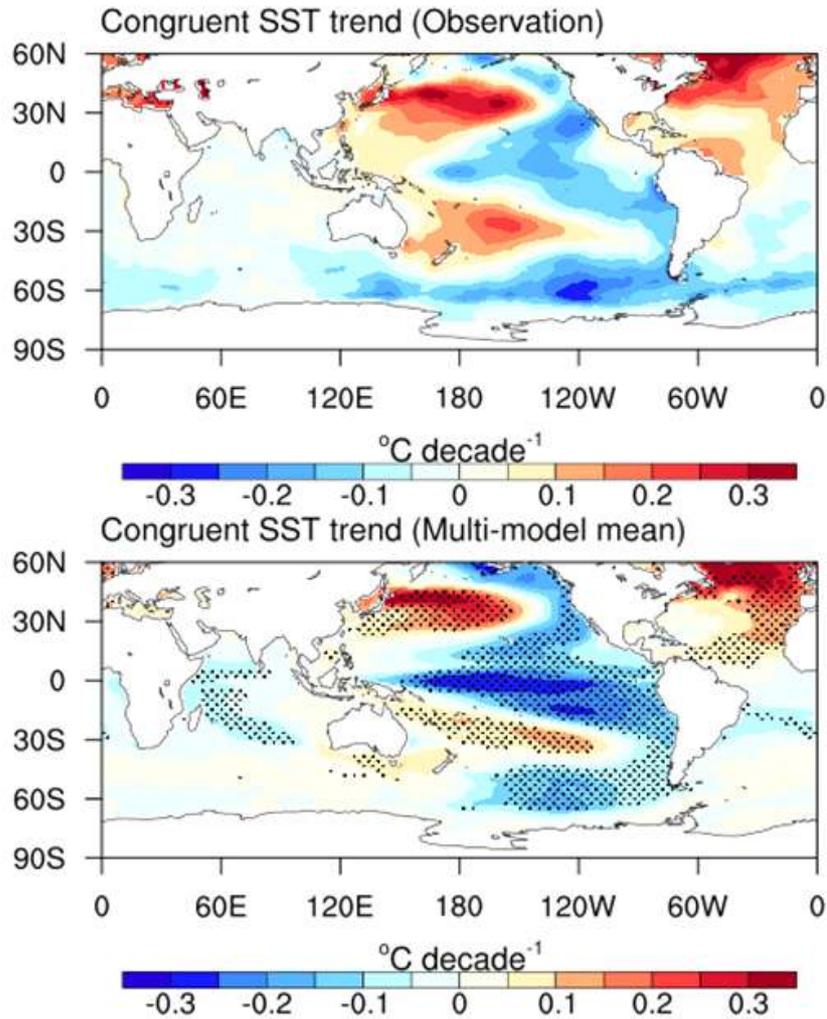


Fig. 3.3.62. 관측된 IPO 및 AMV 변화 경향과 관련된 1979년에서 2014년 기간의 해수면 온도 변화 경향으로 상단은 관측으로부터 도출된 다중회귀분석 회귀계수로부터 산출된 결과를 나타내고 하단은 산업혁명 이전의 통제실험으로부터 산출된 회귀계수를 이용하여 추정된 해수면 온도 변화의 다중모델 평균 분포

- IPO 및 AMV와 관련된 원격상관의 관측과 기후모델 사이의 차이를 보다 정량적으로 살펴보기 위해 IPO와 AMV를 독립변수로 그리고 해수면 온도 편차의 내부 변동성 성분을 종속변수로 하여 다중회귀 분석을 수행하여 IPO와 AMV에 대한 회귀계수를 구하였다. 기후모델의 경우 외부 복사강제인자의 변화가 없는 산업혁명 이전 기간에 대한 모델실험 결과를 사용하여 회귀분석을 수행하였다. 다음으로 1979년에서 2014년 기간 동안 관측된 IPO와 AMV 변화 경향성에 비례하는 해수면 온도의 변화 경향성을 관측과 기후모델 실험에 대해 각각 추정하여 추정된 해수면 온도 변화 경향성을 비교하였다 (Fig. 3.3.62). 관측의 경우 IPO 및 AMV와 관련된 원격상관이

남빙양 지역 특히 태평양 섹터에서 관측된 해수면 온도의 감소 경향성과 밀접히 관련되어 있는 것으로 분석되었다. 관측에 나타난 이러한 관련성을 기후모델들이 어느 정도 유사하게 모의하고 있지만 관측과 비교할 때 IPO 및 AMV 원격상관에 기인하는 남빙양 해수면 온도 감소 경향을 현저하게 과소모의하고 있다. 또한 지역에 따라 관측에 상반되는 변화 부호를 보이고 있어서 관측과 차이가 있음을 알 수 있다.

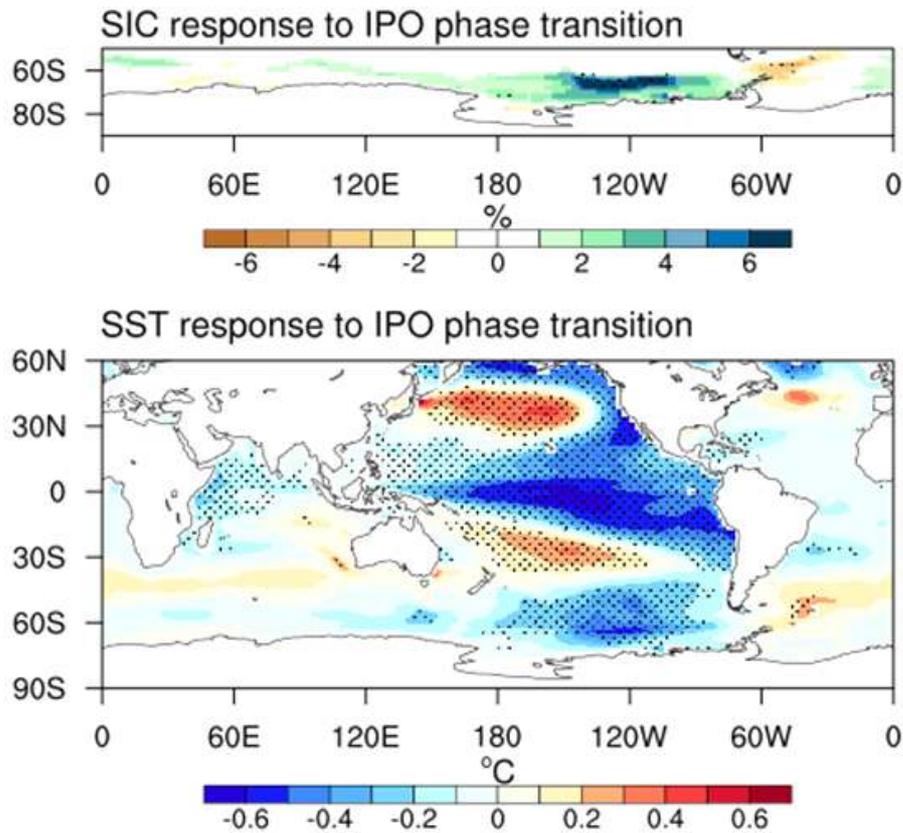


Fig. 3.3.63. 양에서 음으로의 IPO 위상 변화에 따른 해빙 농도 및 해수면 온도의 변화로 이상화된 CMIP6 모델실험으로부터 산출된 결과

- 1979년에서 2014년 사이의 기간 동안 IPO의 위상이 양에서 음으로 바뀌었다. 이와 관려해서 IPO의 위상변화가 남극 해빙 면적의 증가와 남빙양 해수면 온도의 감소 경향과 관련되어 있는지 알아보기 위해 이상화된 CMIP6 대기해양접합모델실험 (dcpp-pac-control, dcpp-ipv-pos 그리고 dcpp-ipv-neg) 결과를 분석하였다. 이상화된 실험이어서 관측된 변화 경향성과 직접적인 비교는 어렵지만 양에서 음으로의 IPO 위상 변화에 의해 남빙양 지역에서 해빙의 농도가 증가하고 동시에 해수면 온도가 감소하여 관측에 부합하는 변화를 보이고 있다 (Fig. 3.3.63).

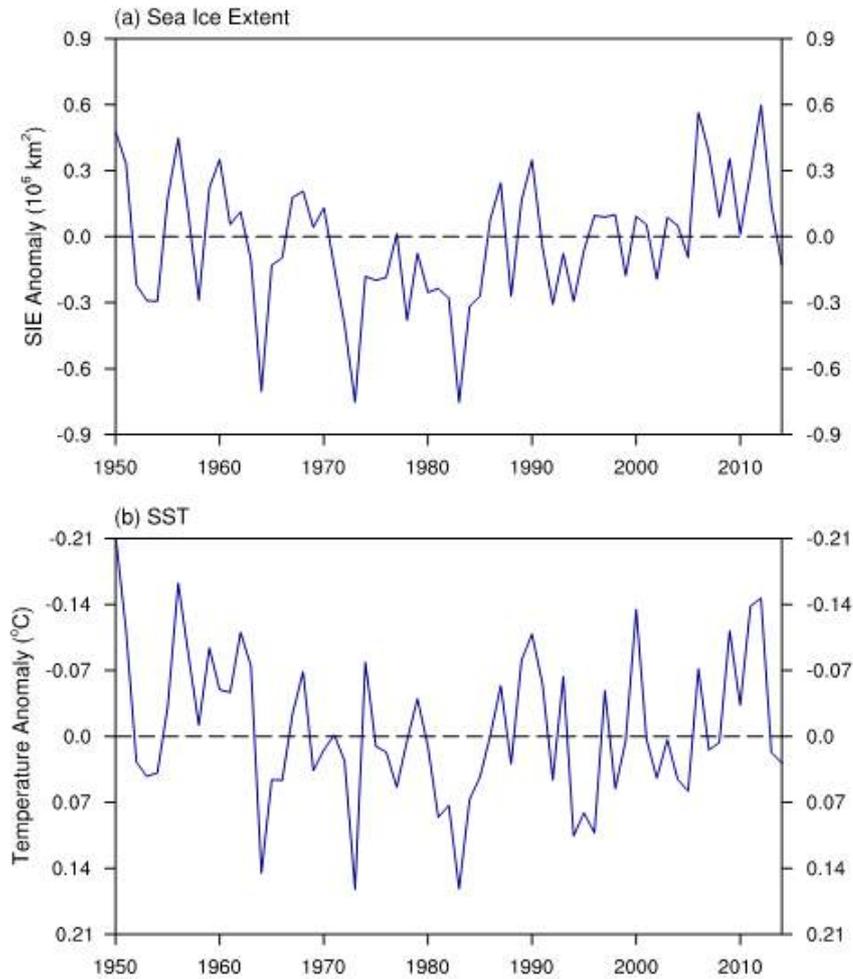


Fig. 3.3.64. 적도 동태평양 해수면 온도 변화에 따른 연평균 남극 해빙 면적 및 남빙양 평균 해수면 온도 변화 시계열로 pacemaker 실험 결과를 나타냄

- 1979년에서 2014년 사이의 기간 동안에 남극 해빙 면적이 증가하고 남빙양 평균 해수면 온도가 감소하는 경향성을 보인데 반해 1950년에서 1978년 사이의 기간에서는 이와 상반된 경향성을 보이고 있다. 이러한 상반된 변화 경향성이 적도 동태평양 지역의 해수면 온도의 장기 변동성, 즉 IPO와 밀접히 관련되어 있는지 알아보기 위해 관측된 적도 동태평양 지역 해수면 온도의 변화를 고려하여 수행한 대기-해양 접합모델 pacemaker 실험결과를 분석하였다 (Fig. 3.3.64). 모델실험으로부터 산출된 연평균 남극 해빙 면적과 남빙양 평균 해수면 온도 변화의 시계열을 살펴보면 경년 변동성이 상당하고 또한 장기 변화 경향성이 그다지 크지 않다. 그러나 1979년에서 2014년 그리고 1950년에서 1978년 이 두 시기 사이의 상반된 변화 경향성을 관측에 부합하게 재현하고있음을 알 수 있다. 이러한 결과는

열대 해양지역의 기후 변동성이 원격상관을 통해 남반구 고위도 지역에서 상당한 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

나. 남극해빙 변화의 남극 주변 기후변동성과의 상관 메커니즘

- 연평균 남극 해빙면적은 1979년 위성 관측 이후 꾸준한 증가 경향을 보이고 있었으나 (Hobbs et al., 2016), 2016년 봄에 관측 기간 이래 처음으로 급격한 감소를 보인 이후 낮은 해빙면적이 연이어 나타나며 증가 경향이 크게 둔화되고 있다 (Parkinson, 2019). 1979년부터 2015년까지는 10년당 20만 km²의 감소 경향을 보였으나 2020년까지 포함하면 6.3만 km²의 감소 경향으로 낮아진다. 2016년 봄의 큰 감소는 기록적인 음의 남극진동(SAM, Southern Annular Mode) 지수와 함께 나타난 해면기압 편차와 관련되어 나타났는데 (Turner et al., 2017), 엘니뇨가 길게 지속되면서 원격상관으로 나타난 동 로스해, 아문젠해, 벨링스하우젠해의 해면수온 편차와도 연관이 있음이 제시되었다 (Stuecker et al., 2017).

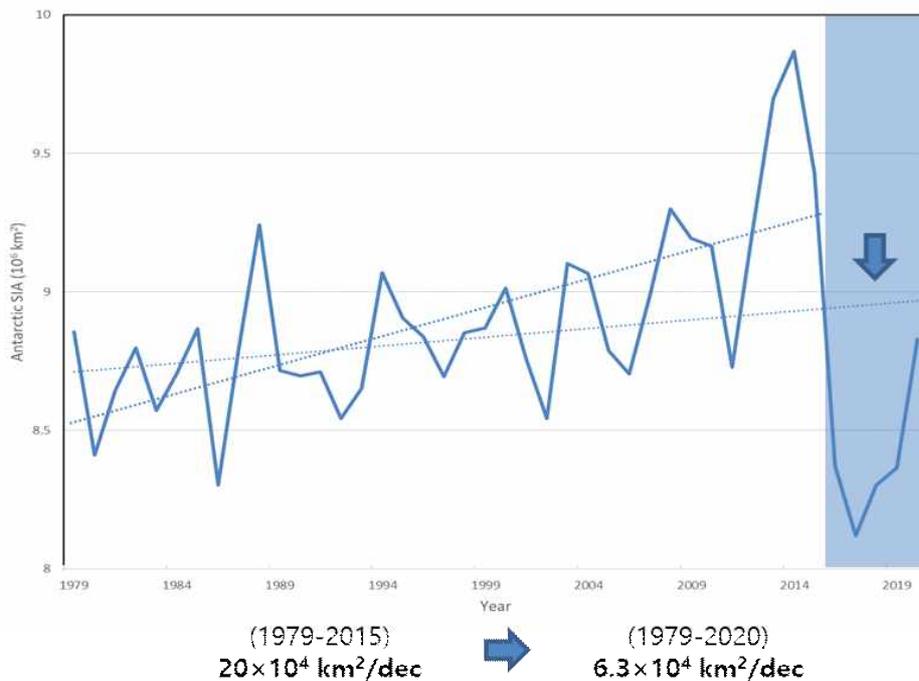


Fig. 3.3.65. 연평균 남극 해빙면적의 경년 변동 및 추세

- 남극 주변의 기후변동은 전통적으로 크게 세 가지 주요 대규모 순환 모드에 의해 조절됨이 알려져 있다. 이는 남반구 중위도 제트의 남북 이동과 연관되어 있는 남극진동(SAM)과 열대 태평양에서 남반구 중위도로 뻗어있는 파열 특징이 있는 두

태평양-남미 패턴(PSA, Pacific-South American patterns: PSA1 & PSA2)이다 (Marshall and Thompson, 2016). 이러한 대규모 순환의 주요 모드들은 남극 주변의 기후변동을 조절하며 표층 온도나 해빙의 변화를 야기한다.

- 이 섹션에서는 남극 해빙의 꾸준한 증가 경향과 급감에 있어 중요한 두 해역인 웨델해와 로스해에 대하여 계절별로 해빙 변동을 야기하는 기후 모드들과의 관계를 파악한 후, 남극 전체 해빙 변동에 대하여 종합하였다.

1) 웨델해의 해빙 변화와 기후변동성과의 관계

- 웨델해는 300°W-20°E 사이 남대서양 섹터의 거대한 만 형태를 띄는 해역으로 연평균 남극 해빙면적의 약 40%를 차지하고 있다. 웨델해에서는 2015년까지 여름철(DJF)과 가을철(MAM)의 해빙면적 증가가 뚜렷하였으나 2016년 급감 이벤트 후 낮은 수준을 유지하며 증가 경향 둔화에 기여하였다. 겨울철(JJA)에는 경향이 약한 감소이나 미약하고, 봄철(SON)에도 감소 경향이 있었고 최근 약간 커졌다.

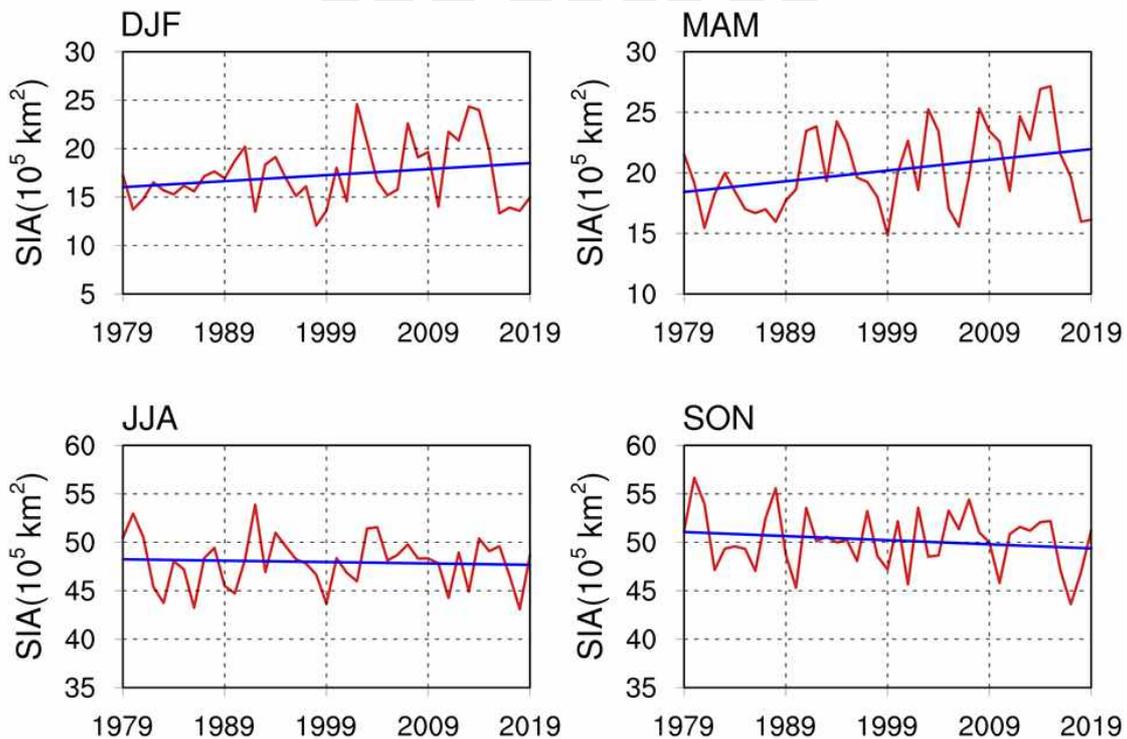


Fig. 3.3.66. 웨델해 지역에서의 1979-2019년간의 계절별 해빙면적의 경년 변동 및 추세

- 이러한 웨델해 해빙면적의 기후변동 특성을 이해하기 위해 웨델해 해빙농도 공간 분포 월자료를 계절자료로 하여 경험적 직교함수(EOF, empirical orthogonal

function) 분석을 수행하여 주성분 추출을 시도하였다. 해빙의 변동은 계절 간의 메모리가 있어 계절 변화 의존적인 모드를 추출할 수 있는 Season-reliant EOF (S-EOF) 분석 기법을 적용하였다 (Wang and An, 2005). 이를 위해 공간 상태에 대한 매트릭스는 $[SIC^{SON}(s, t), SIC^{MAM}(s, t), SIC^{JJA}(s, t), SIC^{DJF}(s, t)]$ (여기서 $s=(x, y), t=year$)로 구성하여 S-EOF를 수행하였다.

- 수행 결과 추출된 계절 간 연동된 주요 세 모드들의 공간 패턴과 PC(principal component) 시계열(PC1-3)을 표출하면, 첫 번째 모드(전체 변동의 22.8%)에는 연중 해빙농도가 꾸준히 많거나 적은 상태의 특징이 장기적으로 증가하다 2016년 이후 급감하는 상태가 포착되었고, 두 번째 모드(전체 변동의 12.4%)에는 웨델해 지역 동부 내해와 서부 외해 간의 해빙농도 재분포 패턴(내해의 편차는 여름과 가을에 커짐)이 내해 쪽에서 증가하는 추세를 보이다 최근 약 2015년 이후 역전되는 양상이 포착되었으며, 세 번째 모드(전체 변동의 9.3%)에는 겨울과 봄의 웨델해 동서 재분포 패턴에서 여름과 가을의 과동형(공간적으로 양-음-양-음 반복) 패턴으로 계절 전이하는 형태가 특별한 경향성은 없이 포착되었다.

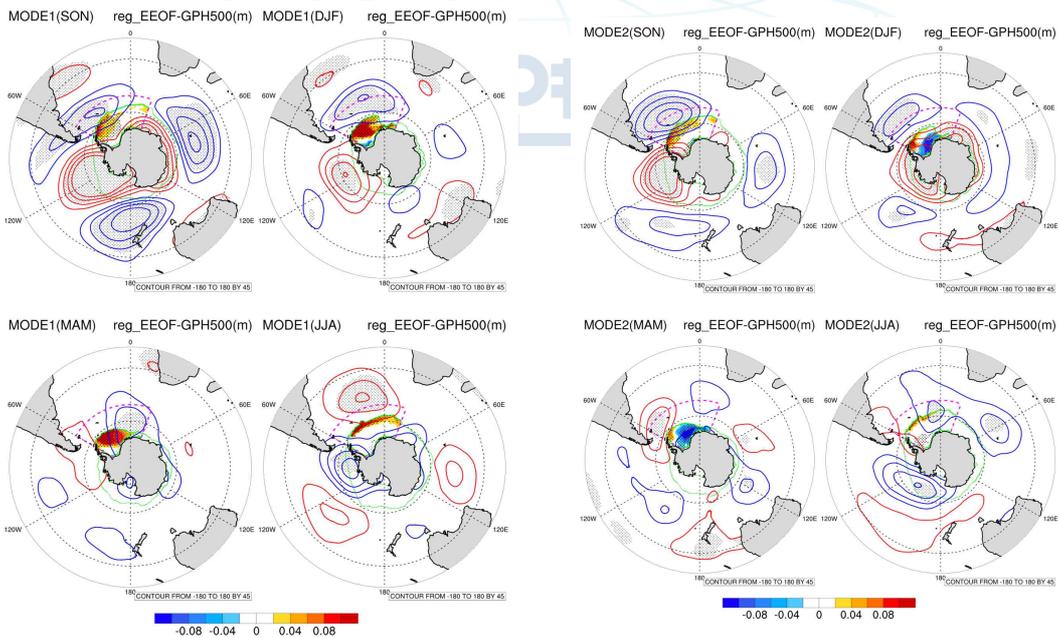


Fig. 3.3.67. S-EOF 모드 1 연관 GPH500 공간 패턴

Fig. 3.3.68. S-EOF 모드 2 연관 GPH500 공간 패턴

- S-EOF 결과 첫 번째 모드와 두 번째 모드의 조합으로 장기 경향과 최근 급감을

해석할 수 있다고 판단하고, 두 모드의 시계열 PC1, PC2와 연관된 500 hPa 지위고도를 회귀분석하여 대규모 순환 패턴을 산출하고, 각 PC 시계열과 SAM, PSA1, PSA2, Nino3.4와 같은 남반구 중위도 기후변동성과 연관된 기후 지수들 간의 상관관계를 계절별로 구하였다.

- 봄철(SON) 웨델해 서부 외해의 해빙농도 변화는 모드 1과 2 모두 아문젠-벨링스하우젠해와 서부 남대서양 간의 파열을 나타내는 PSA1 패턴과 연관되어 나타나고 특히 모드 1에는 SAM 패턴도 연관되어 있다. 여름철(DJF) 웨델해 전체의 해빙농도 증감을 나타내는 모드 1은 여전히 아문젠-벨링스하우젠해와 남대서양 간의 파열 구조가 뚜렷한 PSA1 패턴 형태가 지배적이나, 서부 외해와 동부 내해 간의 진동을 나타내는 모드 2는 SAM 형태에 더 가깝다. 가을철(MAM)의 해빙농도 패턴 형성에 있어 가을철의 기후 지수들과 연관된 대규모 순환 패턴 형성의 영향은 작은 것으로 나타났다. 겨울철(JJA)에는 웨델해 외해 지역의 해빙농도 증감을 나타내는 모드 1은 남태평양에서 벨링스하우젠해를 거쳐 남대서양 중앙에 이르는 지위고도의 파열 패턴과 연관되어 있다.
- 각 모드의 PC 시계열과 계절별 기후 지수와의 상관계수를 통해 해당 모드의 해빙농도 계절변화 패턴 형성에 있어 주요 기후 모드들의 역할이 어떻게 작동하는 추론이 가능하다. 모드 1의 시계열 PC1과 SAM 지수의 상관관계는 봄철에 국한되어 나타나고, PSA1 지수와의 상관관계는 봄과 여름에 걸쳐 나타난다. 열대 태평양 해수면 온도를 나타내는 Nino 지수와의 상관도는 전년 겨울(JJA(-1))부터 상승하여 봄과 여름까지 지속된다. 즉, 엘니뇨가 발달하는 남반구 봄철에 남반구 대기순환에 음의 SAM 지수와 양의 PSA1 지수가 나타날 때 웨델해 전체적으로 해빙면적이 증가하는 계절 변화가 나타나는 경향이 있으므로 해석할 수 있다. 추가적으로 봄철 SAM-PSA1-ENSO 간의 유의한 연계성도 시사한다. 한편, 모드 2의 시계열 PC2는 PSA1 지수와 상관관계가 비록 상대적으로 약하지만 PC1처럼 봄에 증가하는 것으로 나타난다. 그러나 SAM 지수와는 여름에 상관관계가 더 높고 PC1에는 없었던 PSA2 지수와의 상관관계도 약간 나타난다. Nino 지수와의 상관도는 미약하다 당해연도 겨울(JJA(0))에 급증하는데 이는 PC2 연관 해빙변동 모드가 유의한 해에는 열대 태평양에 ENSO 시그널이 뒤따라옴을 뜻한다. 모드 2는 대표적인 기후 지수와의 상관도가 PC1보다 상대적으로 약하고 분산되어 있어 좀더 지역적으로 국한된 인자를 찾아야 할 필요가 있다.

Table 3.3.6. 각 PC 시계열과 계절 평균 기후 지수들 간의 1979-2019년 기간의 상관계수. S-EOF 수행시 한 해의 시작을 SON으로 하였기 때문에 SON부터 당해연도 인덱스인 0를 사용

구분		MAM(-1)	JJA(-1)	SON(0)	DJF(0)	MAM(0)	JJA(0)
PC1	SAM	-0.10	-0.21	-0.58	0.01	0.17	0.22
	PSA1	0.14	0.08	0.47	0.48	0.26	-0.01
	PSA2	0.02	0.12	0.09	-0.06	-0.09	0.23
	Nino3	-0.10	0.23	0.31	0.30	0.19	0.14
	Nino4	0.15	0.34	0.33	0.29	0.29	0.18
	Nino3.4	-0.02	0.31	0.33	0.31	0.27	0.14
PC2	SAM	0.02	0.10	-0.25	-0.38	0.10	-0.01
	PSA1	0.07	0.20	0.38	0.00	-0.08	-0.26
	PSA2	-0.17	-0.11	-0.20	-0.33	-0.14	-0.23
	Nino3	0.08	0.13	0.21	0.18	-0.03	-0.39
	Nino4	0.23	0.15	0.08	0.05	-0.14	-0.37
	Nino3.4	0.16	0.16	0.17	0.14	-0.05	-0.41

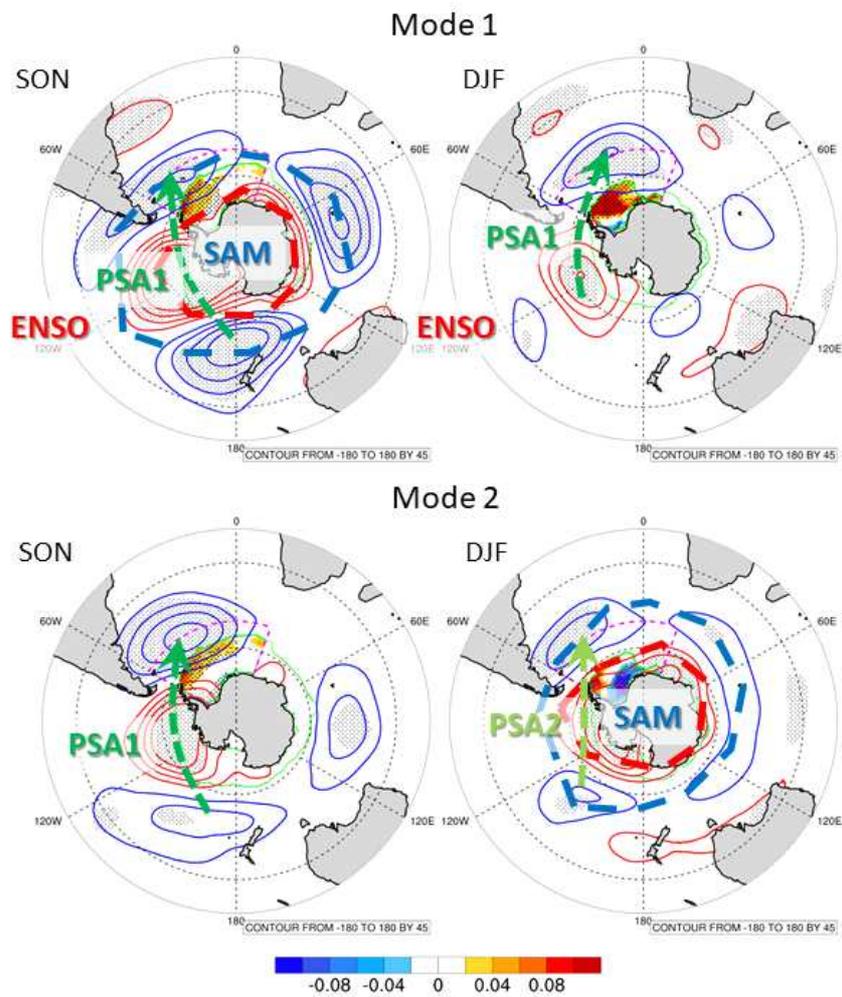


Fig. 3.3.69. 웨델해 해빙 변동 주요 두 모드에 기여하는 기후 지수에 대한 모식도

- 각 모드별 2016년 이후 웨델해에 나타난 해빙면적 감소에 대해 위의 모드별 분석 결과로 해석 가능한 기후변동성의 역할을 정리하였다.

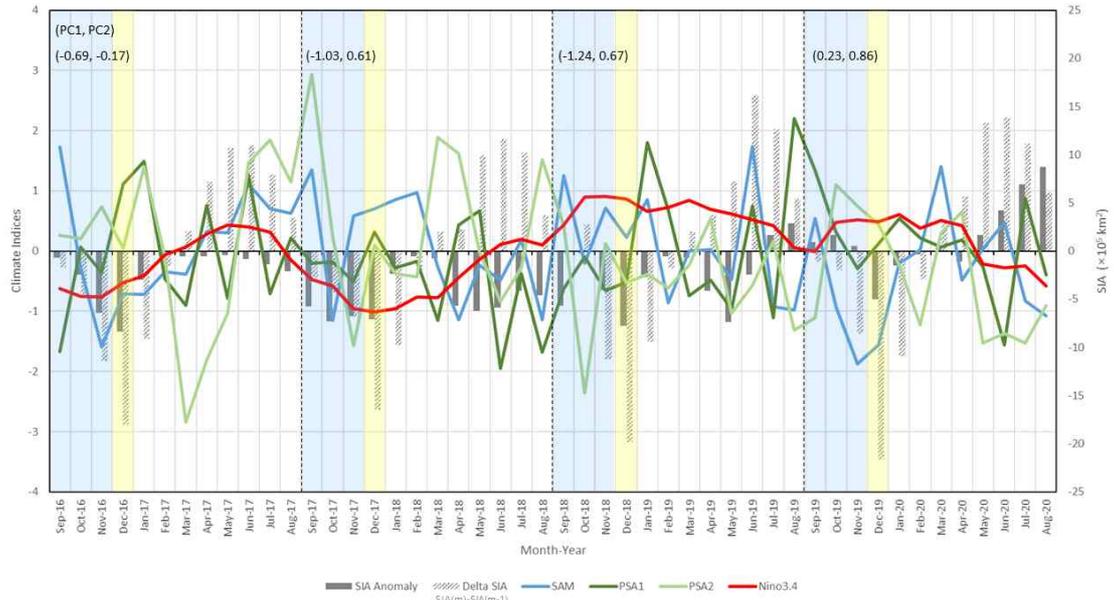


Fig. 3.3.70. 2016년 9월~2020년 8월간의 월별 웨델해 해빙면적 변동 지수(SIA Anomaly, Delta SIA=SIA(m)-SIA(m-1))와 기후 지수(SAM, PSA1, PSA2, Nino3.4) 시계열

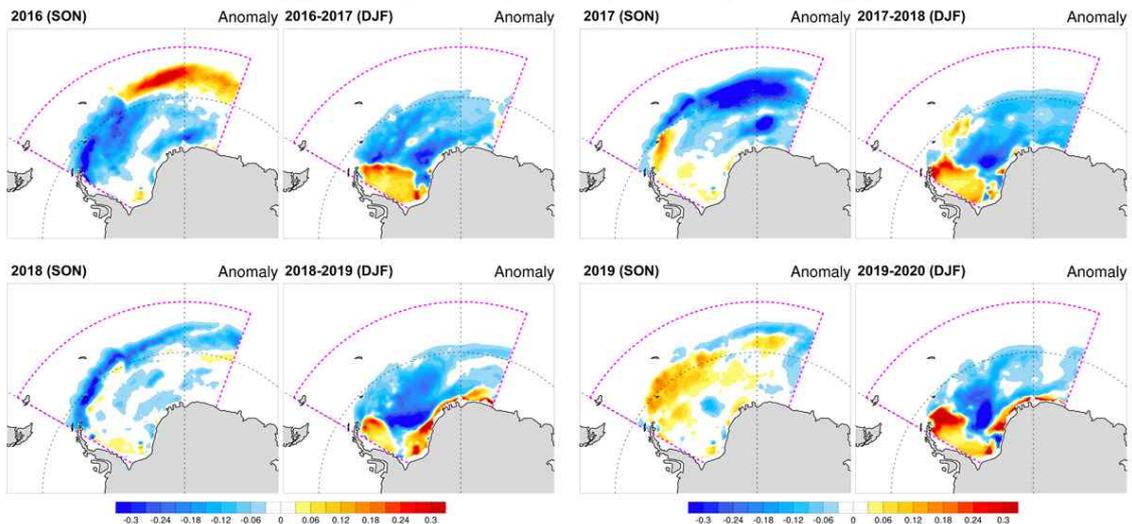


Fig. 3.3.71. 2016-2019년의 봄과 여름의 계절 평균 웨델해 해빙농도 아노말리 패턴

- 2016년: 봄철에 음의 PSA1 형태의 순환 편차 나타나 모드 1과 2 모두 웨델해 서쪽 섹터를 중심으로 해빙감소에 기여하였다. 여름의 낮은 농도는 11월 감소에 기인한다.

- 2017년: 9월에 강한 양의 SAM과 PSA2 형태의 순환 편차가 나타나 해빙면적이 크게 감소하였고, 이후로 낮은 면적 편차가 지속되었다. PSA1도 봄철 내내 약하지만 음의 지수를 보여 해빙면적 감소에 기여했다. 여름의 낮은 농도는 봄철의 감소에 기인한다.
- 2018년: 봄철에 양의 SAM과 음의 PSA1 형태의 순환 편차 나타나 해빙 감소에 기여했다. 16, 17년에 비해 11월 대비 12월에 면적의 감소가 더 커 이 해에는 12월 감소의 기여가 컸다.
- 2019년: 봄철에 음의 SAM과 양의 PSA1이 나타나 해빙면적에 양의 편차가 나타났으나 12월에 급격히 감소하여 여름철 해빙면적은 16-18년에 필적할만한 낮은 수준을 기록하였다. 12월에 강한 음의 SAM 편차가 나타났는데, 봄철과 달리 여름의 음의 SAM 편차는 웨델해 중앙과 동쪽에 음의 해빙농도 편차를 유발하여 해빙농도를 오히려 감소시켰다.

2) 로스해의 해빙 변화와 기후변동성과의 관계

- 로스해는 160°E-140°W 사이 남태평양 섹터의 거대한 만 형태를 띠는 해역으로 내해역은 로스 빙붕으로 덮여있다. 로스 빙붕 바깥의 로스해의 해빙은 연평균 남극 해빙면적의 약 25%를 차지하고 있다. 로스해에서는 사계절 내내 해빙면적의 증가 경향이 있는데, 이는 여름철과 가을철에만 증가 경향이 강한 웨델해와는 차이가 있다. 2016년 급감 이벤트 이후 4년 정도 낮은 수준을 유지하다 2020년에 다시 증가하였다. 그러나 이후 여름철 로스해 해빙면적은 크게 감소하여 2023년 1월에는 역대 최소를 기록하였다.

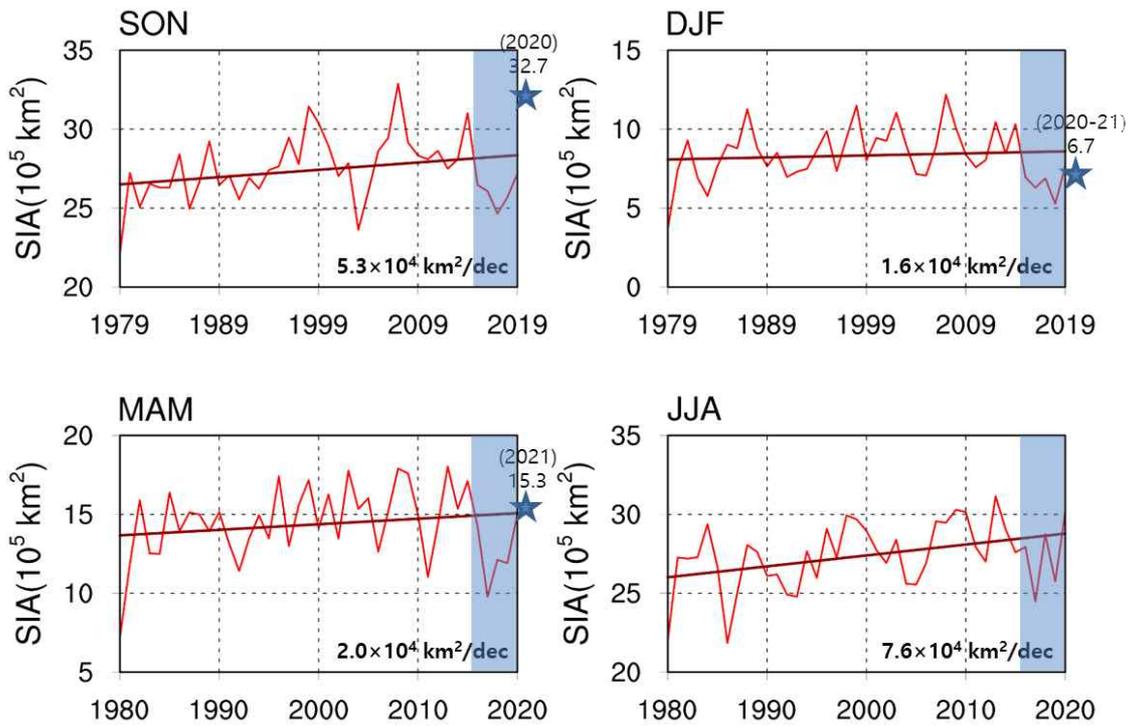


Fig. 3.3.72. 로스해 지역에서의 1979-2020년간의 계절별 해빙면적의 경년 변동 및 추세

- 이러한 로스해 해빙면적의 기후변동 특성을 이해하기 위해 웨델해 해빙농도에 적용한 방법과 동일하게 해빙농도 공간 분포 월자료를 계절자료로 하여 S-EOF 분석을 수행하여 주성분 추출을 시도하였다.
- 수행 결과 추출된 계절 간 연동된 주요 세 모드들의 공간 패턴과 PC 시계열(PC1-3)을 표출하면, 첫 번째 모드(전체 변동의 24.7%)에는 연중 해빙농도가 꾸준히 많거나 적은 상태의 특징이 장기적으로 증가하다 2014년 이후 급감하는 상태가 포착되었고, 두 번째 모드(전체 변동의 14.4%)에는 장주기 변동성을 가진 로스해 지역 동부 외해와 서부 외해-연근해 간의 해빙농도 재분포 패턴(내해의 편차는 여름과 가을에 커짐)이 포착되었으며, 세 번째 모드(전체 변동의 11.3%)에는 장기 경향성이 있는 봄의 외해 증감 패턴에서 여름과 가을의 남동-북서 간 재분포 패턴으로 전이하는 형태가 포착되었다.

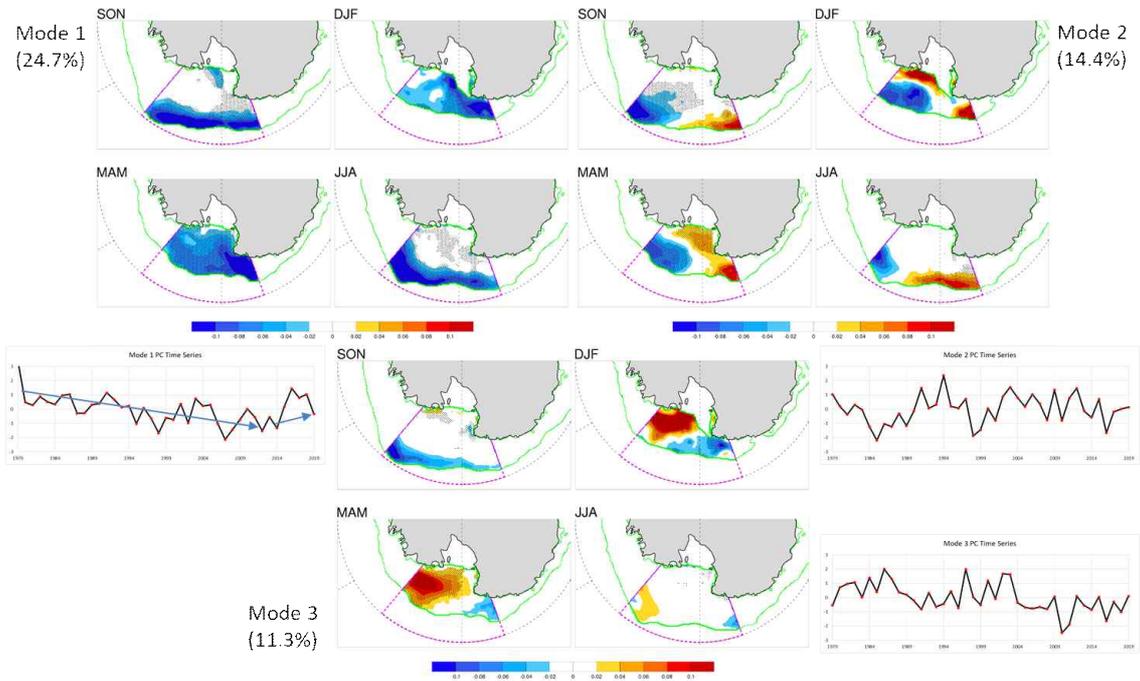


Fig. 3.3.73. 로스해 해빙농도의 S-EOF 세 주요 모드의 공간 변동 패턴과 각 모드의 PC 시계열

- 세 모드의 PC 시계열과 해면기압과 해수면온도를 회귀분석하여 연관된 대규모 패턴을 산출하고, 각 PC 시계열과 SAM, PSA1, PSA2, Nino3.4와 같은 남반구 중위도 기후변동성과 연관된 기후 지수들 간의 상관관계를 계절별로 구하였다. 각 모드의 PC 시계열과 계절별 기후 지수와의 상관계수를 통해 해당 모드의 해빙농도 계절변화 패턴 형성에 있어 주요 기후 모드들의 역할이 어떻게 작동하는 추론이 가능하다.

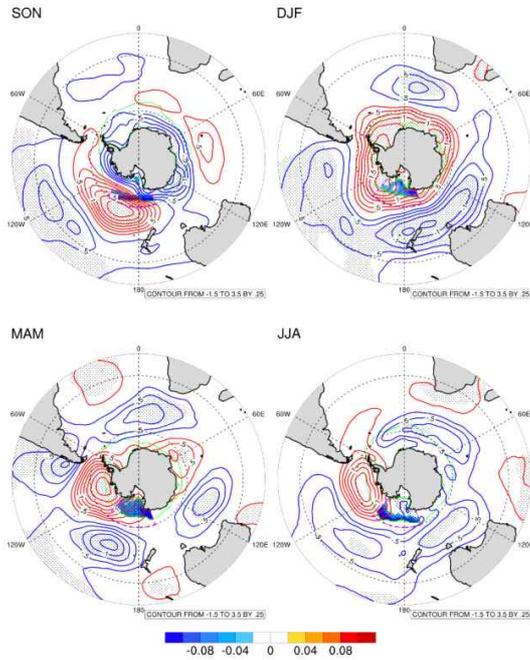


Fig. 3.3.74. S-EOF 모드 1 연관 해면기압 공간 패턴

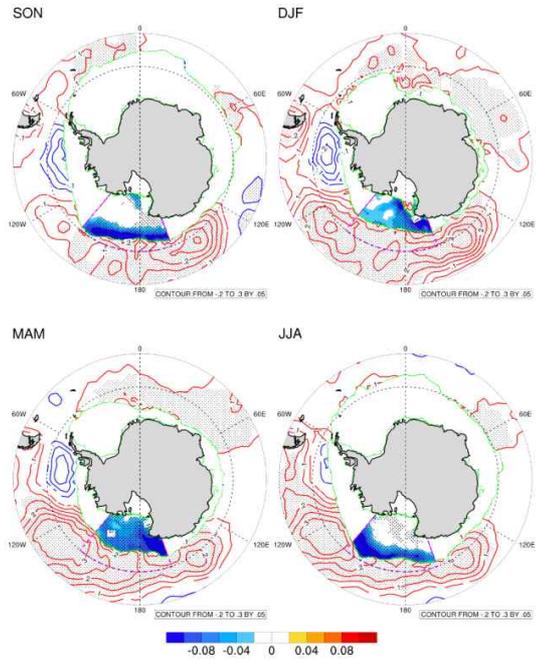


Fig. 3.3.75. S-EOF 모드 1 연관 해수면온도 공간 패턴

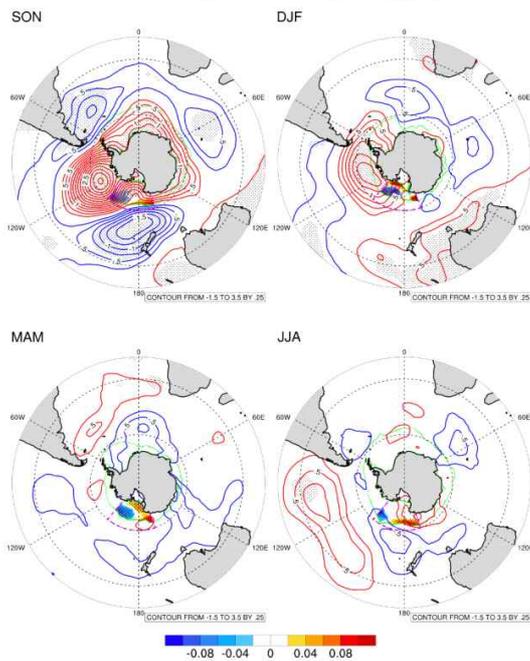


Fig. 3.3.76. S-EOF 모드 2 연관 해면기압 공간 패턴

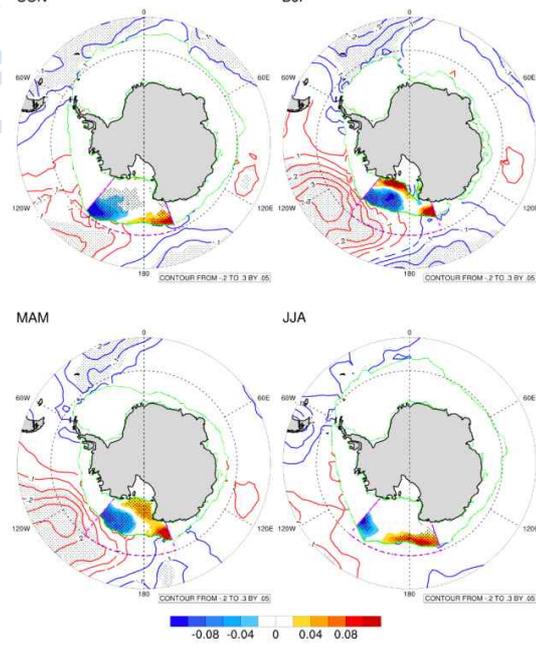


Fig. 3.3.77. S-EOF 모드 2 연관 해수면온도 공간 패턴

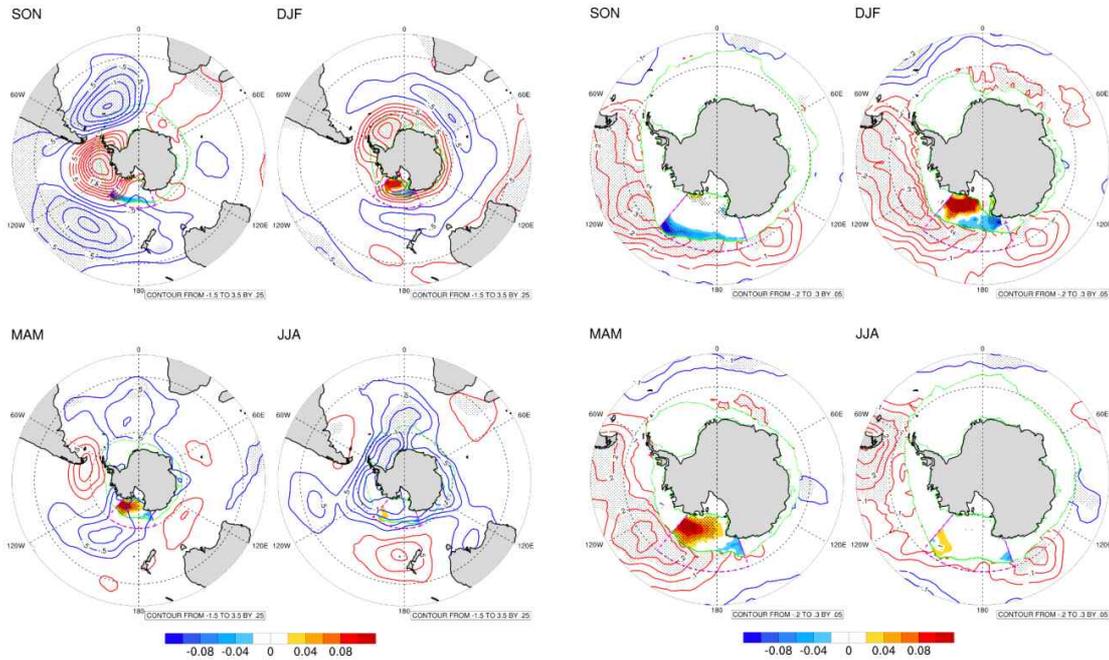


Fig. 3.3.78. S-EOF 모드 3 연관 해면기압 공간 패턴

Fig. 3.3.79. S-EOF 모드 3 연관 해수면온도 공간 패턴

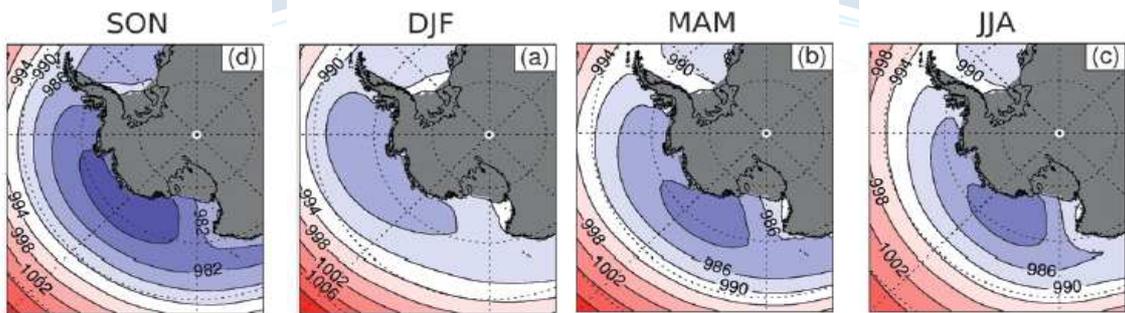


Fig. 3.3.80. 아문젠해 저기압(ASL, Amundsen Sea Low)의 계절 변화 (Hosking et al., 2013)

Table 3.3.7. 각 PC 시계열과 계절 평균 기후 지수들 간의 1979-2019년 기간의 상관계수. S-EOF 수행시 한 해의 시작을 SON으로 하였기 때문에 SON부터 당해연도 인덱스인 0를 사용

		MAM(-1)	JJA(-1)	SON(0)	DJF(0)	MAM(0)	JJA(0)
PC1	SAM	0.10	0.42	0.39	-0.47	-0.29	0.06
	PSA1	0.19	-0.02	0.04	-0.06	0.32	0.34
	PSA2	-0.09	0.13	0.31	0.35	-0.01	-0.07
	Nino3	0.04	0.00	0.12	0.22	0.26	0.11
	Nino4	0.17	0.13	0.14	0.29	0.33	0.32
	Nino3.4	0.15	0.07	0.15	0.28	0.36	0.24
PC2	SAM	0.02	-0.13	-0.41	-0.08	0.13	-0.02
	PSA1	0.23	0.28	0.55	0.46	0.22	0.06

	PSA2	0.17	0.18	0.20	-0.22	0.04	-0.02
	Nino3	-0.05	0.36	0.41	0.42	0.19	-0.05
	Nino4	0.30	0.54	0.51	0.45	0.38	0.10
	Nino3.4	0.11	0.48	0.46	0.46	0.35	-0.01
PC3	SAM	-0.17	-0.04	-0.09	-0.33	0.11	0.25
	PSA1	0.17	0.19	0.50	-0.17	-0.02	-0.19
	PSA2	-0.20	0.09	-0.16	-0.07	-0.24	-0.10
	Nino3	-0.03	0.24	0.38	0.35	0.12	-0.16
	Nino4	-0.05	0.14	0.25	0.20	-0.01	-0.18
	Nino3.4	-0.04	0.31	0.38	0.31	0.11	-0.15

- 로스해 전체의 해빙농도 감소 또는 증가를 나타내는 모드 1

- 봄철(SON) 해빙 감소는 로스해 외곽 고압성 편차와 남극 연근해의 환형 저압성 편차와 연관되어 나타난다 (ASL의 서쪽 지역 저기압 약화).
- 여름철(DJF) 해빙 감소는 남극을 둘러싼 고압성 편차와 연관되어 나타난다 (ASL 약화).
- 가을철(MAM): 해빙 감소는 뉴질랜드 동쪽 해상으로부터의 파열 패턴과 연관된 아문젠-벨링스하우젠해의 고압성 편차와 연관되어 나타난다 (ASL 동쪽 지역 저기압 약화).
- 겨울철(JJA): 해빙 감소는 아문젠-벨링스하우젠해의 고압성 편차와 연관되어 나타난다 (ASL 동쪽 지역 저기압 약화).
- 전년도 겨울(JJA(-1))과 봄(SON(0))의 양의 SAM 형태에서 DJF(0)의 음의 SAM 및 PSA2 형태로 변화한다.
- 가을(MAM(0))과 겨울(JJA(0))에는 PSA1 형태가 우세해지고, 열대 Nino4, Nino3.4 지역 해수면온도와의 원격상관이 나타난다.
- 연중 해빙농도가 낮을 때 로스해를 둘러싼 남태평양의 해수면온도가 상승한다.

- 로스해 동부 외해와 서부 외해-연근해 간의 진동을 나타내는 모드 2

- 봄철 로스해 동부 해빙 감소(서부 해빙 증가)는 엘니뇨 시기의 PSA1 파열 패턴과 음의 SAM과 연관된 ASL 약화와 연관되어 나타난다.
- 여름철 로스해 동부 외해 해빙 감소(내해 및 서부의 해빙 증가)는 엘니뇨 시기의 ASL 약화와 연관되어 나타난다 (PSA1과 연관).
- 가을철 해면기압 패턴은 모호하나 여름부터 이어져 온 중-동태평양 섹터의

해수면온도 반응은 유지된다 (여름 해빙 패턴의 지속).

- 겨울철에는 약한 로스해 서부 내해 고압성 편차와 외해의 저압성 편차가 존재하나 다양한 기후 지수들이 연관된 패턴 형성은 미약하다.

- 로스해 봄의 외해 증감 패턴에서 여름-가을의 남동-북서 간 재분포 패턴으로 전이하는 모드 3

- 봄철 외해 해빙 감소 PSA1과 연관된 아문젠-벨링스하우젠해의 고압성 편차 (ASL 약화)와 연관된다.
- 여름철 로스해 남동부 해빙 증가(북서부 해빙 감소)는 남극을 둘러싼 고압성 편차와 연관된다 (음의 SAM).
- 가을철과 겨울철의 로스해 동부 해빙 증가(서부 해빙 감소)는 저압성 편차와 연관되어 있으나 기후 지수들과 연관된 패턴 형성은 미약하다.

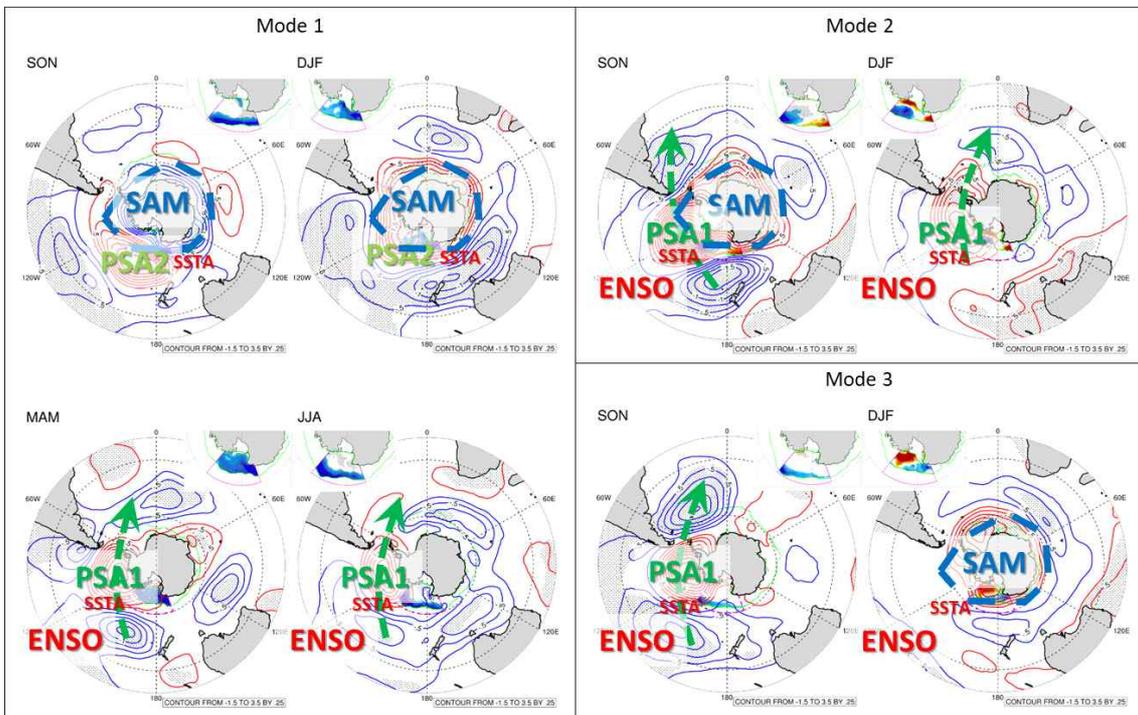


Fig. 3.3.81. 로스해 해빙 변동 주요 세 모드에 기여하는 기후 지수에 대한 모식도 (작은 그림은 각 모드와 연관된 해당 계절의 해빙농도 패턴)

- 로스해 해빙 변동 주요 세 모드에 기여하는 기후 지수에 대한 모식도를 나타내었다. 모드 1의 시계열 PC1과 SAM 지수와의 상관관계는 전년도 겨울과 봄에 양의 상관에서 여름에 음의 상관으로 전이한다. 봄과 여름에 PSA2의 형태가 나타나나

당해연도 가을과 겨울에는 PSA1의 형태가 우세하다. PSA1 형태의 출현은 Nino3나 Nino3.4와의 상관도가 증가하는 것과 연관되어 있는데, 이는 PC1 연관 해빙변동 모드가 유의한 해에는 열대 태평양에 ENSO 시그널이 뒤따라오는 경우가 있음을 뜻한다. 다음으로 모드 2의 시계열 PC2과 SAM 지수의 상관관계는 봄철에 국한되어 나타나고, PSA1지수와의 상관관계는 봄과 여름에 걸쳐 나타난다. 열대 태평양 해수면 온도를 나타내는 Nino 지수와의 상관도는 전년 겨울부터 상승하여 봄과 여름까지 지속된다. 즉, 엘니뇨가 발달하면서 남반구 대기순환에 음의 SAM 지수와 양의 PSA1 지수가 나타날 때 로스해 동부 해빙감소 및 서부 해빙증가의 계절 변화가 나타나는 경향이 있다. 마지막으로 모드 3의 시계열 PC3는 PSA1 지수와 상관관계가 PC2처럼 봄에 증가하는 것으로 나타나고, SAM 지수와는 여름에 상관관계가 나타난다. Nino3나 Nino3.4와의 상관도는 봄과 여름에 약간 올라간다. 하지만 모드 3는 봄과 여름을 제외하고 대표적인 기후 지수와의 상관도가 약하다.

3) 남극 전체 해빙 변화와 기후변동성과의 관계

- 웨델해와 로스해의 지역적 해빙 변동에 영향을 미치는 기후 모드들의 계절별 변화를 살펴보고, 이를 남극 전체로 확장하여 분석하고자 한다. 우선 남극 전체 해빙면적이 여름과 겨울에 각각 어떤 장기변화를 보이는지 살펴보면 두 계절 모두 2014년까지 증가 경향이 있다 2015년 봄부터 급감하기 시작하였다. 단, 겨울에는 2019-2020년에 빠른 회복세를 보이다 2021년부터 다시 감소한 반면, 여름에는 급감 이후 미약한 반등 후 다시 급격히 감소하여 역대 최소를 기록하였다.

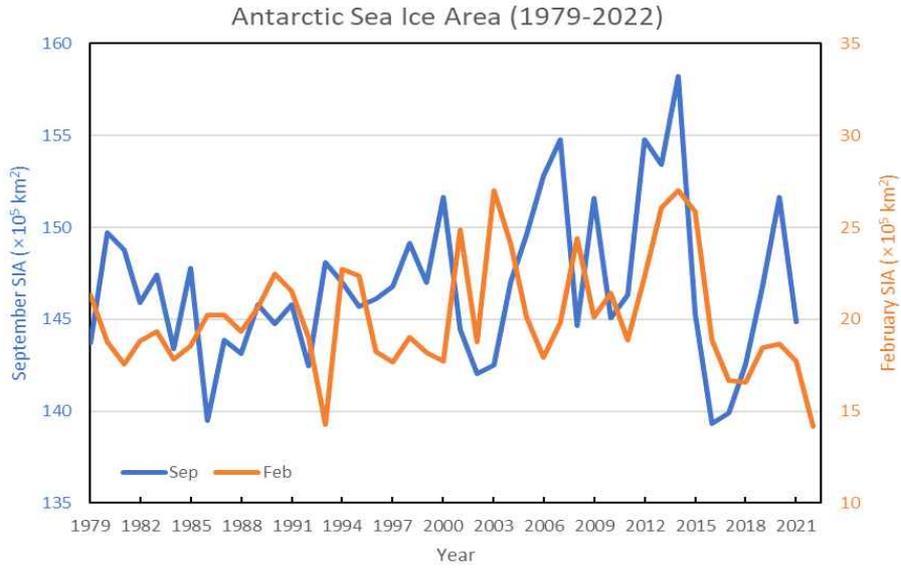


Fig. 3.3.82. 1979년 이후 9월과 2월의 남극 해빙면적 시계열

- 남극 전체 해빙면적에도 워델해, 로스해 해빙농도에 적용한 방법과 동일하게 해빙농도 공간 분포 월자료를 계절자료로 하여 S-EOF 분석을 수행하여 주성분 추출을 시도하였다.

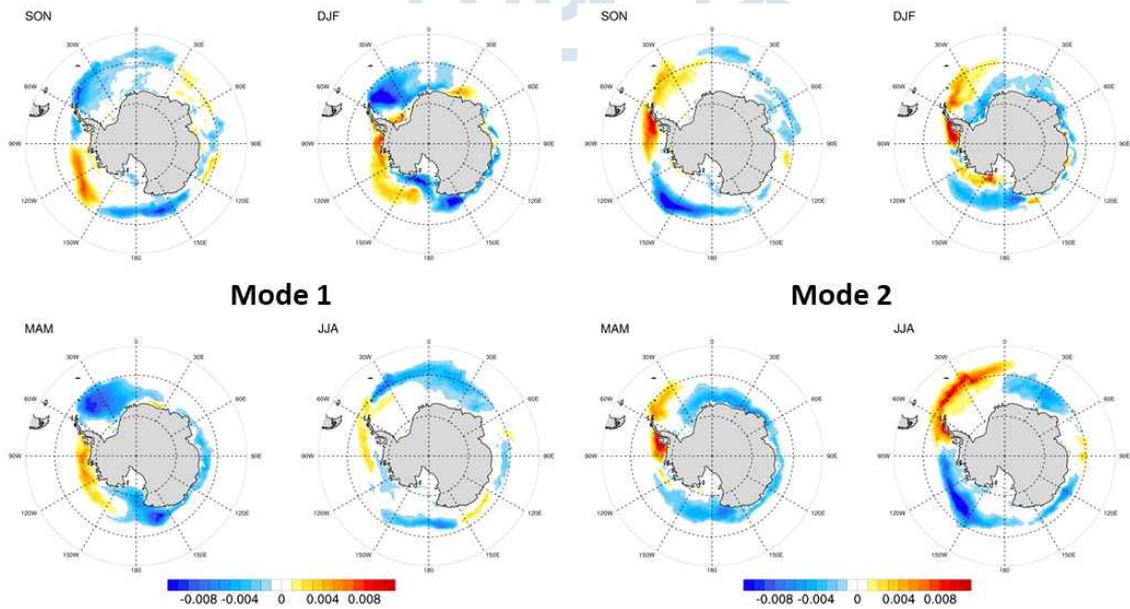


Fig. 3.3.83. 남극 해빙농도의 S-EOF 두 주요모드의 계절에 따른 공간변동 패턴

Table 3.3.8 남빙양 해역 구분

남빙양 해역	경도 범위
로스해	160° E-140° W
아문젠-벨링스하우젠해	140° W-60° W
웨델해	60° W-20° E
인도양	20° E-90° E
서태평양	90° E-160° E

- 남극 전체 해빙농도 S-EOF의 주요 1 모드는 웨델해, 로스해에 같은 해빙농도 편차가 형성될 때 아문젠해에 반대 편차가 형성되는 패턴이 나타났고, 주요 2 모드는 웨델해, 벨링스하우젠해와 아문젠해, 로스해 외해역 간 반대 편차가 형성되는 패턴으로 나타났다. 모드 1은 전년도 겨울(JJA(-1))과 봄(SON(0))에 양의 SAM 형태가 극대화되고, 열대 태평양 Nino 4 지역을 중심으로 수온이 낮아지는 경향을 보인다. 그리고 봄(SON(0))부터 시작하여 여름(DJF(0))까지 음의 PSA1 형태가 발현되며, 가을(MAM(0))과 겨울(JJA(0))에는 주요 기후변동지수와 상관계수가 약해진다. 모드 2는 여름(DJF(0))에 음의 SAM 형태가 우세해지는 것을 제외하고 전년도 겨울(JJA(-1))부터 연중 양의 PSA1 형태가 우세하고, 겨울(JJA(-1))부터 가을(MAM(0))까지는 열대 태평양 Nino 3.4 지역을 중심으로 수온이 높아지는 원격상관이 뚜렷하다. 이렇게 남극 전체 해빙 변동 주요 모드에 기여하는 남극과 열대 태평양의 기후지수에 대하여 모식도로 정리하였다.

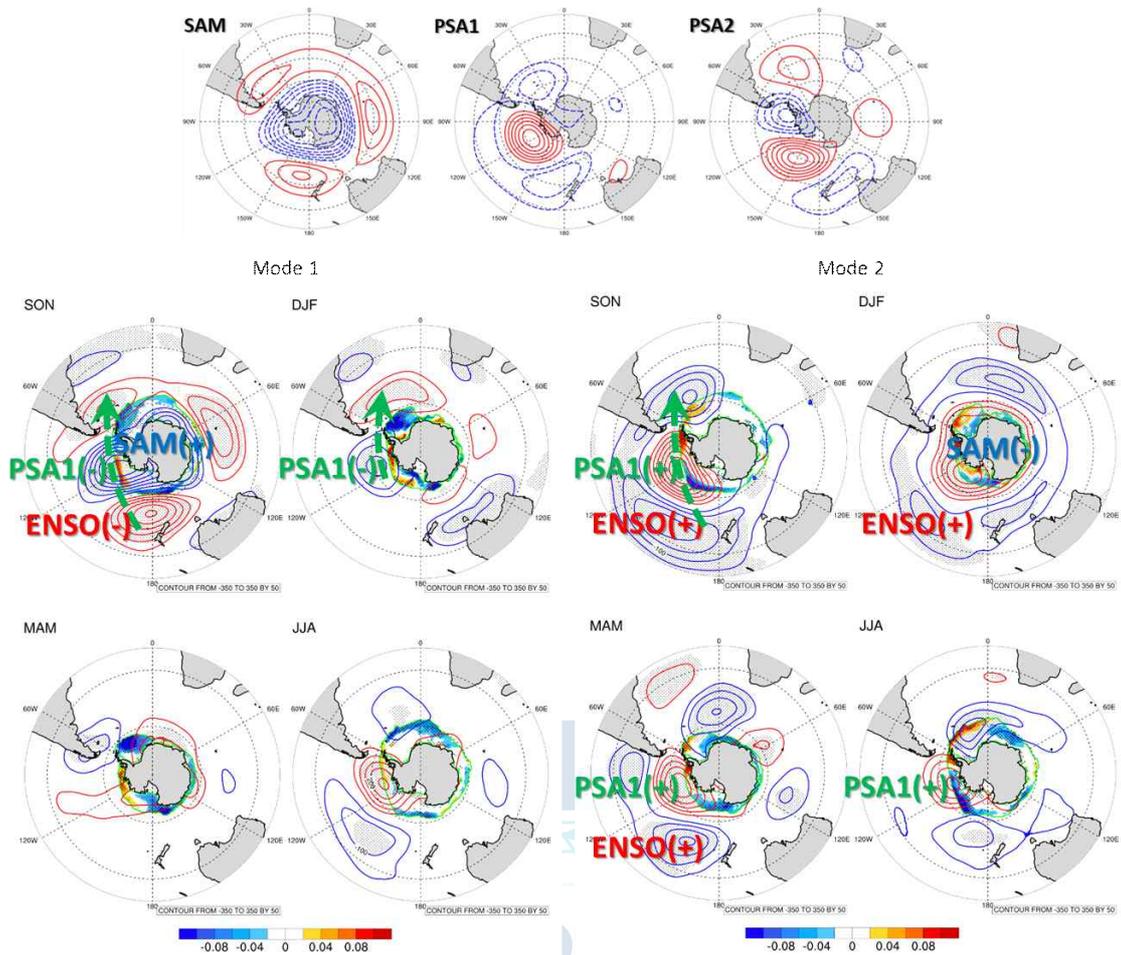


Fig. 3.3.84. S-EOF 주요 두 모드의 PC 시계열에 회귀한 500 hPa 지위고도의 계절별 패턴 및 계절별 패턴 형성에 관여하는 기후지수에 대한 모식도 (상단은 남반구 500 hPa 지위고도 EOF 분석의 주요 세 모드로 SAM, PSA1, PSA2로 명명함)

- 이 두 계절변화 공간 패턴의 모식도를 기반으로 최근 급감이 일어난 2021-22년의 해빙면적 변화를 해석하고자 한다. 2021년 12월부터 2022년 1~3월과 6~7월은 월간 남극 해빙면적의 역대 최소 기록을 갈아치웠다. 해빙면적은 9월부터 전달 면적 대비(Delta SIA) 감소가 나타났는데, 이는 위성 관측 이래 네 번(1992, 2010, 2016, 2022) 있었던 드문 현상이다. 2021-22년의 모드 1과 모드 2의 PC 시계열 강도는 (0.96, -1.05)으로 진폭이 커 모드 1의 순위상과 모드 2의 역위상의 해빙농도 편차 패턴에의 기여도가 높아졌다. 2021-22년 봄(SON)에는 PSA(-), ENSO(-) 위상에 의한 순환 패턴이 웨델해, 벨링스하우젠해의 해빙농도 감소와 아문젠해 외해의 해빙농도 증가의 원인이 되었고, 여름(DJF)에는 SAM(+), ENSO(-)가 모드 2의 역위상 발현을 통해 웨델해 외해와 동로스해 내해의 해빙농도 감소의 원인이 되었다.

가을(MAM)에는 ENSO(-) 위상이 유지되고 있고 동로스해를 중심으로 저기압이 강화되며 로스해와 서아문젠해 연안의 해빙농도가 크게 감소하나 S-EOF 모드 패턴과연계된 해빙농도 편차와의 연계성은 낮다. 겨울(JJA)에는 ENSO(-) 위상이 유지되고 PSA1(-) 위상의 강화가 나타나 모드 2의 역위상이 발현되어 웨델해, 벨링스하우젠해의 해빙농도 감소와 로스해 외해의 해빙농도 증가가 나타났다.



3.3.3 남극 지면온도와 해빙의 최근 기후변화 특성 요약

○ 남극 지면온도는 남극 대륙 전지역의 온도가 동일하게 변화하는 첫 번째 변동모드와 남극횡단산맥을 중심으로 서쪽과 동쪽이 반대로 변화하는 두 번째 변동모드의 변화로 최근 기후변화 양상을 설명할 수 있다. 이 두 모드는 남반구 지역의 주요 변동성인 SAM, PSA1, PSA2의 변동과 밀접하게 연관되어 있으며, 이러한 대기변동성을 통해 남극 주변 해양부터 적도 지역의 여러 기후요소와 상호 영향을 미친다. 한편 남극 대륙의 해빙의 연변화, 계절별 변화 역시 이러한 주요한 대기변동성과 밀접하게 연관되어 있으며, 또한 적도 태평양 지역의 ENSO, IPO, AMV 등의 경년부터 수십년까지의 장주기 변동성과도 대기과동을 통해 원격지 상관성을 갖는다. 이러한 최근 남극대륙의 기후요소의 변화와 상관 특성에 대한 주요 결과를 Fig. 3.3.85의 모식도에 정리하였다.

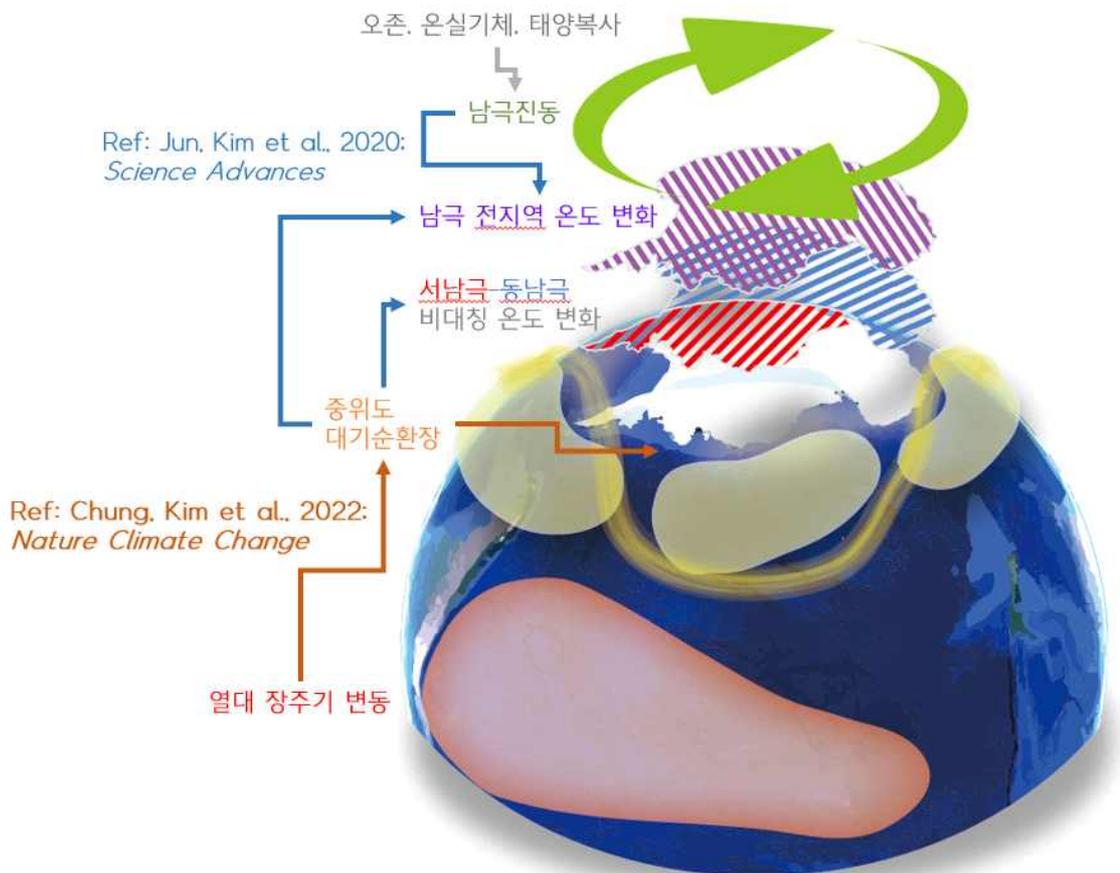


Fig. 3.3.85. 최근 남극지역 지면온도와 해빙의 변화의 상관특성 모식도

- 한편 이러한 남극 지역의 기후요소와 적도 지역 기후요소간의 원격상관 특성은 수치모델과 관측에서 서로 다르게 나타나며, 특히 기후시스템의 자연변동성은 위상 변화 주기와 공간적 특성의 재현 정도에 모델간 큰 불확실성이 존재한다. 따라서 추후 남극 지역의 기후변화 특성 진단과 전지구 영향 파악을 위해서는 이러한 남극 지역 기후시스템 내의 다양한 상관기작에 대한 이해 심화와 함께 각 분석 자료의 불확실성을 함께 고려해야함을 시사한다.



3.4 남극 대기 에어로졸 물리화학 특성 현장 관측

3.4.1 세종과학기지 기반 에어로졸 물리 특성 연속 관측

가. 세종기지 장기 입자 수농도 크기분포와 구름 응결핵 활성화 특성 연구

- 에어로졸은 태양 복사 에너지를 산란 및 흡수하고, 구름 응결핵으로 작용하기 때문에 기후 변화에 직/간접적인 영향을 준다. 신규 입자 생성 (New Particle Formation, NPF) 현상은 다양한 기원지로부터 생성된 전구물질에 의해 발생하며, 새로 생성된 입자가 다양한 중간 과정을 거쳐 구름 응결핵 (Cloud Condensation Nuclei, CCN) 역할을 한다고 알려져 있으나, 정확한 메커니즘에 대한 이해 부족으로 기후 변화 예측의 불확실성이 높다. 이러한 불확실성을 줄이기 위해 남극 전역에 위치한 여러 기지에서 에어로졸 입자의 물리/화학적 특성 관측 및 연구가 진행되고 있지만, 남극의 여름철 관측 데이터를 사용한 연구가 대부분이기 때문에 전 계절을 대표하기에는 제한적이다. 따라서, 남극세종과학기지에서 연속적으로 관측된 에어로졸 미세 물리 특성 데이터를 사용하여 여러 기원지의 영향을 받아 발생한 NPF가 CCN 성장에 미치는 영향을 분석하였다.
- 남극세종과학기지 대기 빙하 관측동에서는 실시간 에어로졸 물리 특성 데이터 관측을 수행 중이며, 본 분석에 사용된 데이터는 다음과 같다.
 - CN2.5 및 CN10: TSI사의 CPC3776 및 CPC3772를 사용하여 실시간으로 매 1초마다 2.5nm 이상 및 10nm 이상의 대기 중 총 입자 수농도 측정
 - NNUC, NAIT, 및 NACC: TSI사의 Nano-SMPS 및 Regular-SMPS를 사용하여 각각 3분 간격으로 관측된 3nm-63.8nm 및 10-300nm 크기 범위의 입자 수농도를 1시간 평균함. 각각 1시간 평균된 데이터를 20nm에서 병합하여 3-300nm의 입자 크기 분포를 만든 후, 각 크기 구간별로 적분한 수농도를 본 분석에 사용함 (NNUC: Nucleation mode 입자 수농도 (3 - 25nm), NAIT: Aitken mode 입자 수농도 (25 - 100nm), NACC: Accumulation mode 입자 수농도 (100 - 300nm))
 - CCN 수농도: DMT 사의 CCN-100을 사용하여 1초 간격의 구름 응결핵 수농도를 측정함. 과포화도는 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 및 1.0%로 설정하여 각각 10, 5, 5, 5, 5분 관측되며, 설정된 과포화도의 CCN 수농도를 모두 관측하면 약 30분이 소요됨.
 - BC 농도: Magee 사의 Aethalometer (AE22 및 AE33)를 사용하여 각각 5분 및 1분 간격의 실시간 대기 중 Black Carbon (BC) 농도 측정

○ 추가적으로, Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectories (HYSPPLIT) 모델을 사용하여 공기의 48시간 이동 경로를 계산하고, 지리 정보 및 위성 데이터를 결합하여 잠재적 기원지를 3가지 도메인 (해양 (ocean), 해빙 (sea ice) 및 육지 (land))으로 분류하였다. 또한 해양 생물학적 전구물질의 영향을 파악하기 위해 1시간 간격으로 해당 공기의 해양 표층 Chlorophyll-a (Chl-a) 및 dimethylsulfoniopropionate (DMSPt) 노출 정도를 정량화하였다. 관측지 주변에 여러 오염원이 존재하고 있기 때문에, 남극의 배경 대기 에어로졸 데이터만을 사용하기 위해 2가지 기본 데이터 필터링이 1차적으로 수행되었다. 관측소 기준으로 풍향이 355°-55° 사이에 있거나, 풍속이 2 m s^{-1} 이하일 때의 데이터는 오염원의 영향을 받았다고 가정하고 이 조건에서 생산된 자료는 사용하지 않았다. 또한, 오염 데이터를 선별하기 위해 2016년부터 2019년까지 관측된 1시간 평균 BC 농도를 기반으로 6개의 오염 등급을 구분하여 아래 그림에 나타냈다.

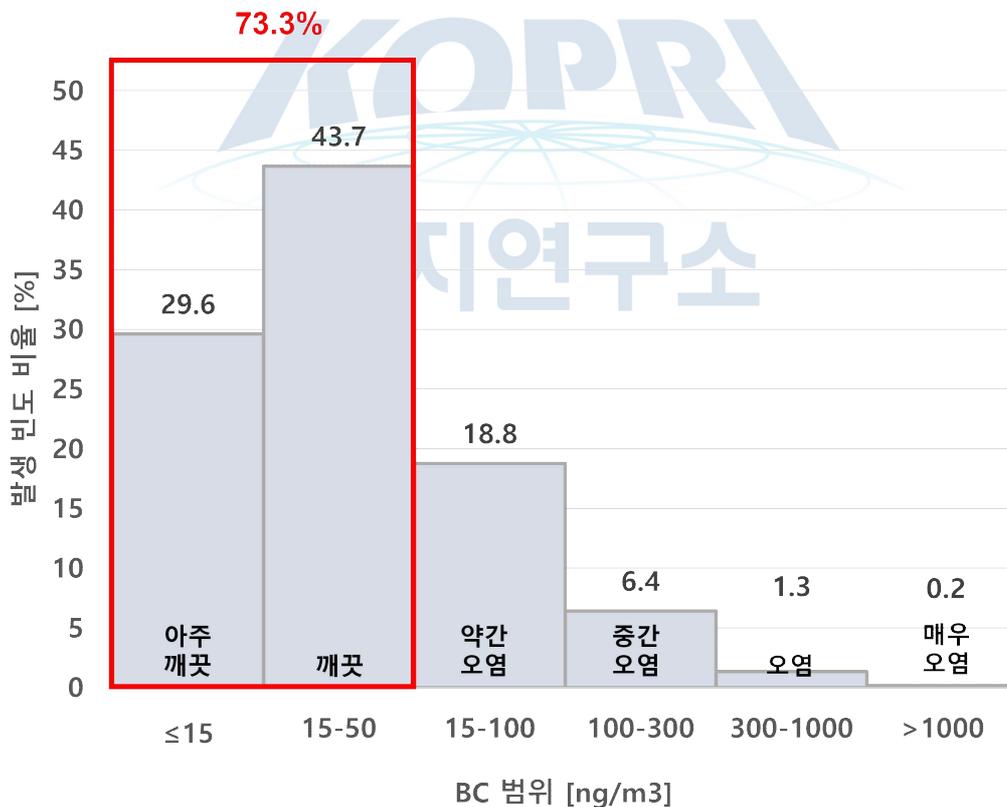


Fig. 3.4.1. 2016-2019 기간 동안 관측된 1시간 평균 BC 농도의 구간별 발생 빈도 비율 및 6가지 오염 등급 구분

○ BC 오염 등급은 1) 15 ng m^{-3} 이하일 때 “아주 깨끗”, 2) $15 - 50\text{ ng m}^{-3}$ 일 때 “깨끗”, 3) $50 - 100\text{ ng m}^{-3}$ 일 때 “약간 오염”, 4) $100 - 300\text{ ng m}^{-3}$ 일 때 “중간 오염”, 5)

300 - 1,000ng m⁻³일 때 “오염” 및 6) 1,000ng m⁻³를 초과할 때 “매우 오염”으로 구분했다. “아주 깨끗” 및 “깨끗” 등급이 약 4년간 관측된 BC 농도 데이터의 73.3%를 차지하기 때문에, 풍향 및 풍속 필터링을 적용한 후의 BC 농도가 50ng m⁻³ 미만인 경우를 배경 대기로 정의하였다. 따라서, 2018년 1월 1일부터 2018년 12월 31일까지 관측된 남극세종과학기지 배경 대기 에어로졸 미세물리 특성 데이터를 사용하여 NPF 이벤트를 분석하였다.

- 지름 3-300nm 입자크기분포를 1시간 평균한 시계열 데이터를 사용하여 NPF 이벤트를 선정하였다. NPF 이벤트는 3-25nm의 입자 크기분포 (Nucleation mode)가 1시간 이상 고농도로 유지될 때 시각적으로 선정되었다.

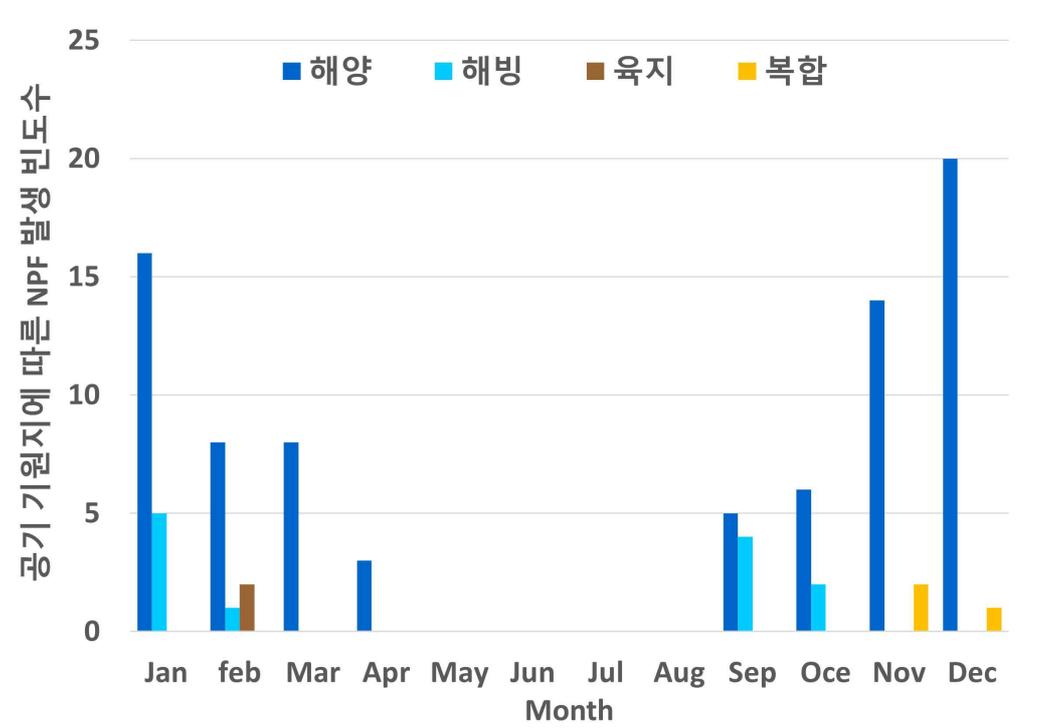


Fig. 3.4.2. 공기 기원지 (해양, 해빙, 육지 및 복합)에 따른 NPF 발생 빈도수

- 공기 기원지에 따른 NPF 발생 빈도수를 분석한 결과, 1년 동안 97개의 NPF 이벤트가 발생하였으며, 97개 NPF의 공기 기원지를 해양, 해빙, 육지 및 복합으로 분류하였다. 복합은 해양, 해빙, 육지의 영향을 동시에 받은 경우로 정의하였다. 주로 남극의 여름인 12월에서 2월 사이에 NPF가 가장 빈번하게 발생하였으며, 해양 (80 케이스), 해빙 (12 케이스), 복합 (3 케이스) 및 육지 (2 케이스) 순으로 높은 비율을 차지했다. 전체 97개의 NPF 이벤트 중 92개가 해양 및 해빙 기원지의 영향을

받았다는 결과를 통해, 두 기원지에서 생성된 전구물질이 남극 대기의 신규 입자 형성에 중요한 역할을 할 것으로 분석되었다.

- 해양, 해빙 및 복합 공기 기원지에 따른 NPF 발생 환경을 이해하기 위해, 각 기원지에 따라 평균한 신규 생성 입자의 수농도, 입자 생성, 성장 및 침적률을 분석했다.

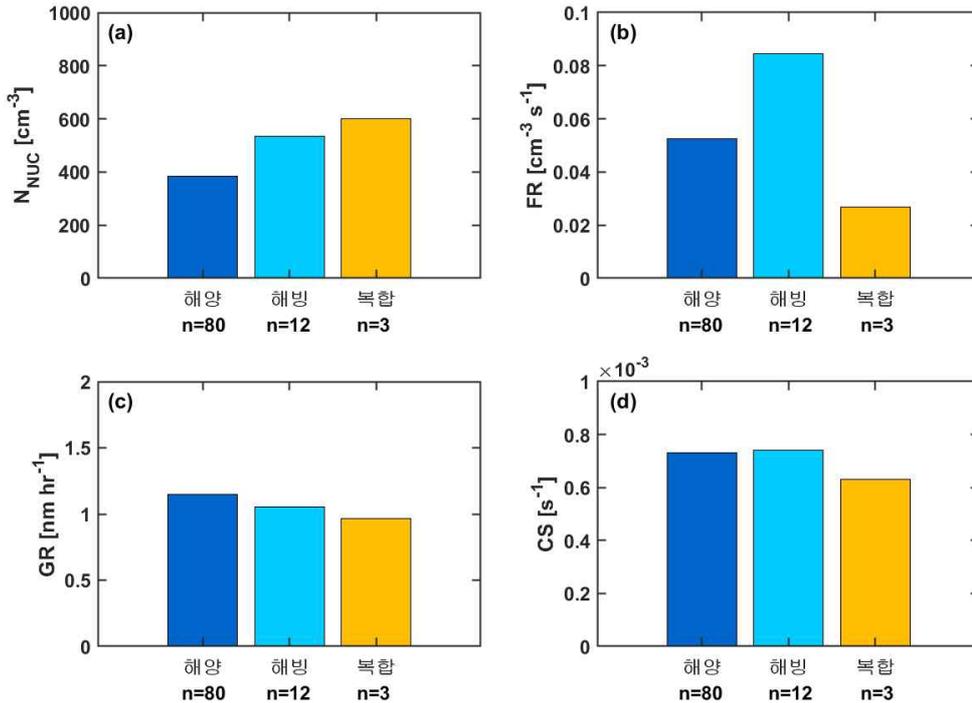


Fig. 3.4.3. 해양, 해빙 및 복합 기원지에 따른 (a) Nucleation mode (3 - 25nm) 입자 수농도 (NNUC), (b) 3-25nm 입자 형성률 (formation rate, FR), (c) 시간에 따른 입자 성장률 (Growth Factor, GF), (d) 입자 침적률 (Condensation Sink, CS)

- 해양 기원지의 영향을 받은 NPF는 발생 빈도가 80회로 높지만 NNUC 및 FR이 해양에 비해 낮았다. 반면, 해빙 기원지의 경우 발생 빈도는 해양에 비해 상대적으로 낮지만, NNUC 및 FR이 해양 기원지에 비해 높기 때문에 상대적으로 생성되는 입자 수농도가 많고 빠른 생성 속도를 보인다. 마지막으로 복합 기원지의 경우 NNUC은 높았으나 FR은 낮아, 입자 생성 속도는 낮지만 생성된 입자는 많음을 확인하였다. 세 공기 기원지의 입자 성장률과 입자 침적률은 모두 비슷한 값을 보였기 때문에 큰 차이를 보이지 않았다.

- 추가적으로, 기원지 차이에 따른 잠재적인 NPF 영향을 확인하기 위해 평균 태양

복사밀도 및 해양 기원 생물학적 전구물질 (chl-a 및 DMSPt)의 평균 농도를 분석하였다.

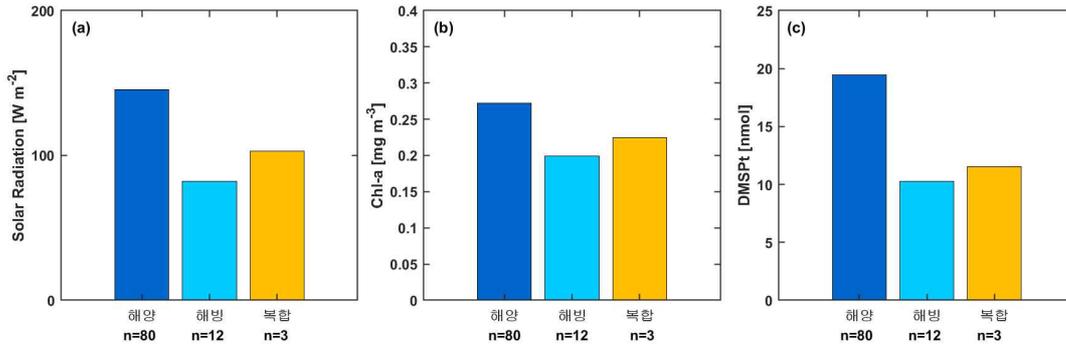


Fig. 3.4.4. 해양, 해빙 및 복합 기원지에 따른 (a) 태양 복사 조도, (b) chl-a 농도 및 (c) DMSPt 농도

○ 각 공기 기원지에 따른 평균 태양 복사 조도는 $100-150W m^{-2}$ 로 큰 차이가 없었다. Chl-a 농도는 해양, 복합, 해빙 순으로 높았고, DMSPt 농도는 해양, 복합, 해빙 순으로 높았다. 따라서, 기원지 차이에 의해 발생한 다른 전구물질이 NPF 발생에 영향을 주었을 것으로 추정된다.

(i) 해양 기원지를 통과한 공기의 경우, 생물 기원 전구물질인 Chl-a와 DMSPt가 높게 나타났다. 이는 식물성 플랑크톤에 의해 발생한 바이오매스인 DMS에 의해 NPF 형성에 영향을 미칠 수 있음을 보인다.

(ii) 해빙 기원지를 통과한 공기의 경우, 해양에 비해 Chl-a와 DMSPt 농도가 낮기 때문에 해빙으로 덮인 지역에서 관측되는 휘발성 요오드 혼합물 또는 할로젠 전구물질이 NPF 생성에 영향을 줄 수 있다.

(iii) 복합 기원지를 통과한 공기의 경우, 3 케이스뿐이지만 다른 기원지에 비해 높은 nucleation mode 수농도가 나타났다. 다양한 기원지의 영향을 받은 복합 기원지는 해양과 해빙 기원 전구물질 (DMSP 및 요오드)뿐만 아니라 대륙으로부터 온 다양한 전구물질 (남극세종과학기지 근처의 바다새 군락지, 지의류 및 이끼와 같은 식생 및 meltwater ponds)의 영향을 받아 NPF가 발생하였기 때문에 높은 수농도를 보였을 것으로 분석된다.

○ 각 기원지별 발생한 신규 생성 입자와 구름 응결핵 연관성을 이해하기 위해, CCN 수농도 관련 요소들을 그림에 보였다.

- (a) CCN concentration: 과포화도가 0.4%일 때의 평균 CCN 수농도
- (b) CCN Activity: 대기 중 입자가 구름 응결핵으로 성장한 비율
- (c) Critical diameter (Dc, 임계 직경): 대기 중 입자가 구름 응결핵으로 성장하기 시작하는 직경

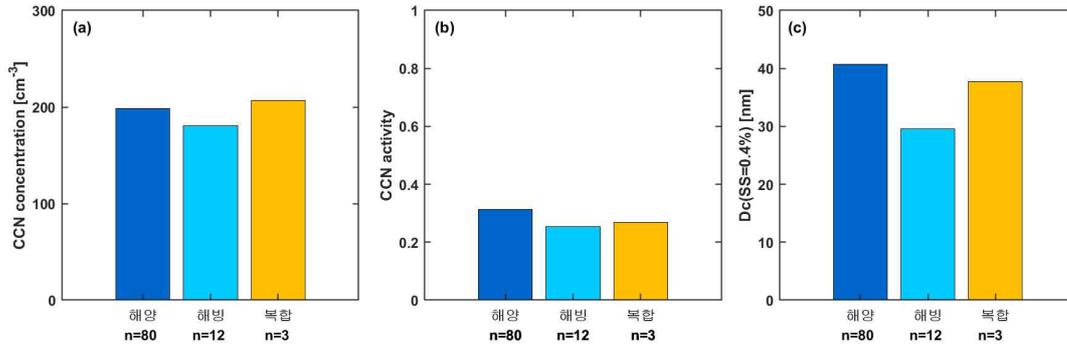


Fig. 3.4.5. 해양, 해빙 및 복합 기원지에 따른 과포화도가 0.4%일 때의 (a) CCN 수농도, (b) CCN 활성화도 및 (c) 임계 직경 (Critical diameter, Dc)

- 과포화도가 0.4%일 때 평균 구름 응결핵 수농도는 복합, 해양, 해빙 순으로 높았다. 그리고 CCN 활성화도는 세 기원지에서 비슷한 값을 보인다. 신규 생성 입자가 구름 응결핵으로 성장하기 시작하는 직경은 약 30-40nm임을 확인하였으며, 낮은 임계 직경 결과는 깨끗한 환경에서의 적은 입자 수농도 때문인 것으로 설명할 수 있다.
- NPF 발생 이후 CCN 수농도는 전체 케이스 (97개) 중 83개가 증가 추세를 보였으며, 시간당 최소 1.3 cm^{-3} 부터 최대 76.7 cm^{-3} 까지 증가하여 평균적으로는 시간당 14.6 cm^{-3} 증가하였다. (2-268% 증가). 본 결과는 NPF를 통해 새롭게 생성된 입자가 구름 응결핵 증가에 영향을 줄 수 있다는 직접적인 증거를 제시한 첫 번째 연구이다.

나. 세종기지의 에어로졸 특성 연속 관측

- 세종기지는 대기 중 입자크기 2.5nm와 10nm 이상 총 수농도를 실시간 측정하기 위하여 두 대의 CPC (Condensation Particle Counter, 모델 3776, 3772, TSI 사)를 설치하여 관측 중이다. 두 CPC의 재원 및 관측 영역은 아래 표에 제시되어 있다.

Table 3.4.1. CPC3776과 3772 사양 비교

구분	CPC3776	CPC3772
측정범위	2.5 - 3 μm	1.0 - 3 μm
관측농도	0-10 ⁵ 개	0-10 ⁵ 개
관측주기	1초	1초
유량	1.5 또는 0.3 LPM	1.0 LPM



Fig. 3.4.6. 세종과학기지 대기 관측동에서 운영 중인 CPC3776과 3010 (3772)의 모습

- 2020년 관측 결과에 의하면 입자 총 수농도의 월평균 분포는 2.5nm 이상의 평균값이 10nm 이상의 평균값보다 높게 관측되었으며 두 장비 모두 남반구의 계절적 특징인 여름 (12, 1, 2월)에 높고 겨울 (7, 8, 9월)로 접어들수록 낮아지는 경향을 보인다. 지름 2.5nm 이상에서 관측된 1년 동안의 평균 수농도는 $859.4 \pm 819.5 \text{ cm}^{-3}$ 최고값은 12월로 $2,504.9 \pm 2,985.7 \text{ cm}^{-3}$ 이며, 최저값은 5월에 $141.1 \pm 47.5 \text{ cm}^{-3}$ 의 값을 보였다. 입자의 지름 10nm 이상에서 관측된 전 기간 평균 수농도는 $715.7 \pm 794.0 \text{ cm}^{-3}$ 이며, 최고는 12월에 $2,011.3 \pm 2,287.4 \text{ cm}^{-3}$, 최저는 5월에 $86.0 \pm 29.4 \text{ cm}^{-3}$ 로 관측되었다. CPC3772의 경우 2020년 7월부터 관측장비의 적정 유량 불안정으로 인한 문제가 발생하여 결측이 발생했으나 11월부터 관련 문제를 해결하여 이후 정상 관측을 수행했다.

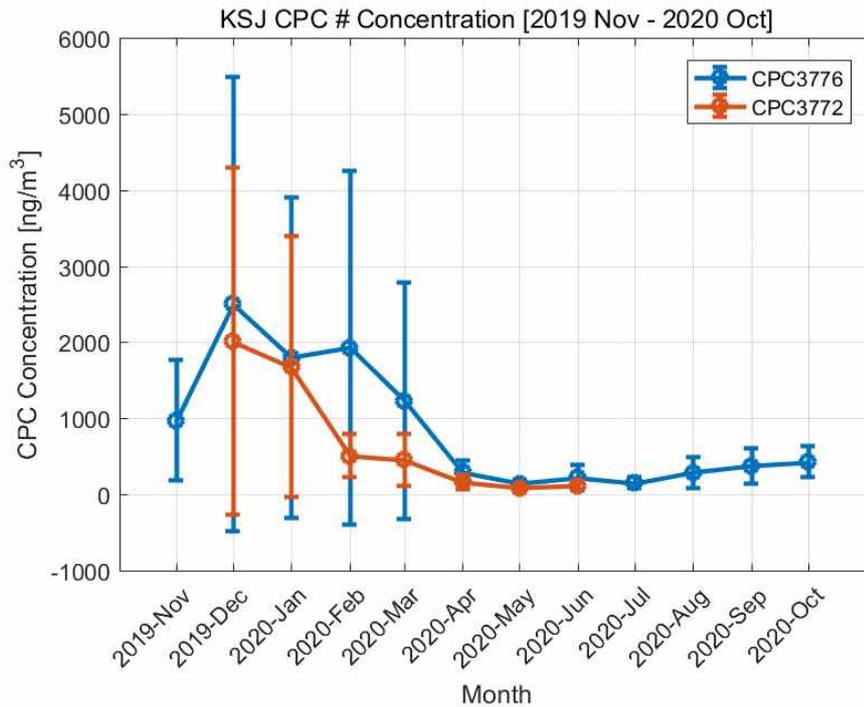


Fig. 3.4.7. 세종기지에서 관측된 대기 중 입자의 수농도 (2019년 11월 - 2020년 10월, CPC3776 (D > 3nm), 3772 (D > 10nm))

Table 3.4.2. 세종기지에서 관측된 대기 중 입자의 총수농도(2.5, 10nm 이상) 월 평균값 (2019년 11월 - 2020년 10월)

구분	CPC3776(2.5 nm 이상)		CPC3772(10nm 이상)	
	평균	표준편차	평균	표준편차
2019년 11월	971.5	794.3	-	-
2019년 12월	2504.9	2985.7	2011.3	2287.4
2020년 1월	1796.4	2109.8	1678.1	1721.3
2020년 2월	1928.4	2327.2	506.6	284.9
2020년 3월	1229.3	1552.4	450.7	340.4
2020년 4월	291.5	145.3	164.8	92.8
2020년 5월	141.1	47.5	86.0	29.4
2020년 6월	218.1	162.6	112.3	52.1
2020년 7월	149.5	74.0	-	-
2020년 8월	286.1	201.6	-	-
2020년 9월	371.7	231.8	-	-
2020년 10월	424.3	206.1	-	-

- 연구년도 2차년도에는 CPC 3772 모델의 경우 현장에서 문제가 발생하여 2021년 2월까지만 운영되었다. 이 기간동안 2.5nm 이상의 총 수농도 최대값과 최소값은 여름인 1월에 $1,471.34 \text{ cm}^{-3}$, 그리고 겨울인 7월에 113.08 cm^{-3} 로 각각 나타났으며, 입자가 많이 발생하는 여름철에 농도가 높게 나타났다. 남반부의 겨울철로

접어들수록 입자의 수농도가 감소하는 경향을 보인다. 지름 10nm 이상의 총 수농도 최대값과 최소값은 여름인 1월 776.60 cm⁻³과 2월 505.00 cm⁻³으로 나타났으나 관측장비의 고장으로 인한 연속자료 부재로 계절적 특성을 특정할 수는 없었다.

Table 3.4.3. 세종기지에서 관측된 총수농도(2.5, 10nm 이상) 월평균과 표준편차

구분	CPC3776(2.5 nm 이상)		CPC3772(10nm 이상)	
	평균	표준편차	평균	표준편차
2020년 11월	650.01	422.50	464.87	164.52
2020년 12월	1221.94	1749.99	536.65	337.11
2021년 1월	1471.34	3108.94	776.60	637.92
2021년 2월	692.71	434.57	505.00	159.66
2021년 3월	421.63	195.91	-	-
2021년 4월	235.59	105.56	-	-
2021년 5월	140.27	67.82	-	-
2021년 6월	113.69	70.38	-	-
2021년 7월	113.08	68.46	-	-
2021년 8월	120.90	65.26	-	-

- 2022년 관측된 입자 총 수농도 월평균 값은 $678.5 \pm 682.1 \text{ cm}^{-3}$ 이었으며 여름에 높고 겨울에 낮아지는 뚜렷한 계절적 변화 경향을 보였으며 최고값은 남극의 여름인 12월 $2,600.6 \pm 2,969 \text{ cm}^{-3}$ 이며 최소값은 남극의 겨울인 7월 $175.2 \pm 108.6 \text{ cm}^{-3}$ 로 관측되었다.

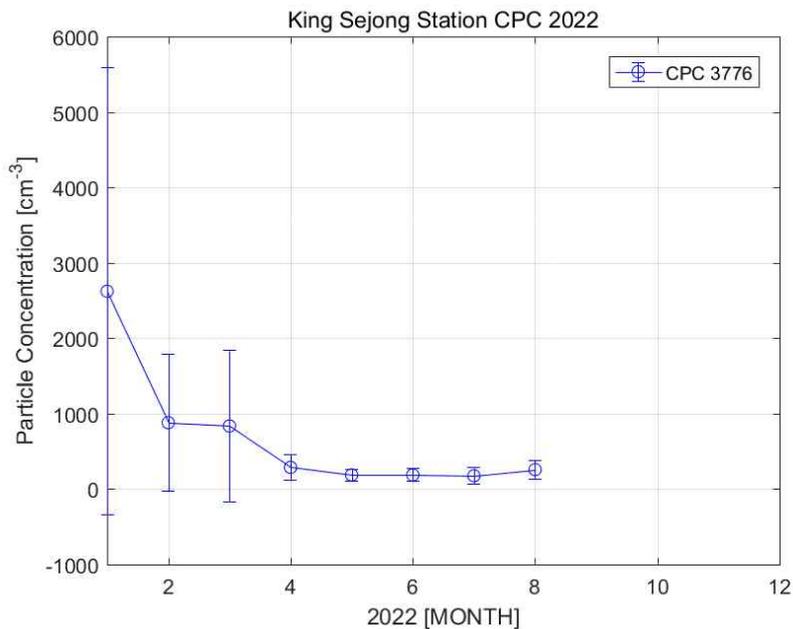


Fig. 3.4.8. 남극 세종과학기지 에어로졸 직경 2.5nm 이상 입자 수농도 변화 (2022년)

Table 3.4.4. 남극 세종과학기지 에어로졸 직경 2.5nm 이상 입자 수농도 월평균과 표준편차

입자수농도 월평균 [#/㎤]	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월
평균	2600.6	880.0	835.4	286.7	185.9	185.9	175.2	256.3
표준편차	2969	913.6	1001.1	173.4	78.1	86.7	108.6	126.5

- 대기 중 입자의 총수농도를 관측하는 CPC의 현장 관측자료 분석 중 장비 자체 이상 또는 주변에서 유입되는 인위적인 오염원에 의해 발생하는 농도의 급격한 변화를 QC 과정 중 분석자가 직접 디지털 자료에서 일부를 제거하는 과정에서 발생하는 사항을 개선하였다. QC 과정의 개선은 현장 담당자가 수기로 기록하는 장비와 현장 상황에 관한 일체의 수기 내용을 디지털 자료로 생성하여 자료 분석 시 다른 연구 장비에 일괄적으로 적용하여 자료 DB 고도화를 더욱 발전시킬 수 있었다.

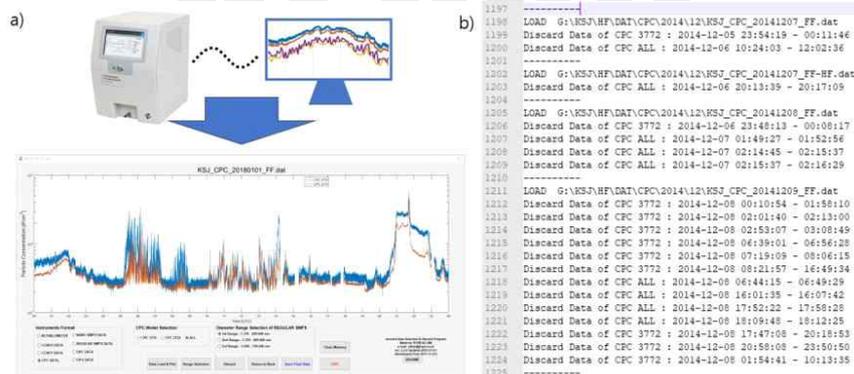


Fig. 3.4.9. 입자수농도를 측정하는 CPC 관측자료의 분석을 위한 후처리 QC 개선 그림: (a) 관측장비에서 집록한 자료를 자체 제작한 GUI 시스템에서 로드하여 사용자가 원하는 부분의 자료 제거 가능, (b) GUI 시스템에서 제거한 정가 디지털 파일로 저장되도록 함.

- 세종기지 대기 중 입자의 크기 특성 분석을 위해 SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)와 nano-SMPS를 설치하여 운영하였다. SMPS는 지름 7.64 - 310.6nm 사이의 입자를 분류하여 크기별 수농도를 측정하는 장비로써 입자를 분류하는 DMA (Differential Mobility Analyzer, TSI사 모델 3081A)와 분류된 입자를 측정하는 CPC3772 그리고 두 장비를 상호 작동하도록 하는 컨트롤러 (TSI사)로 구성된다. nano-SMPS는 2.02 - 63.8nm 사이의 입자를 분류하여 크기별 수농도를 측정하는

장비로써 입자를 분류하는 nano-DMA (TSI사 모델 3085A)와 분류된 입자를 측정하는 CPC3776 그리고 두 장비를 상호 작동하도록 하는 컨트롤러 (TSI사 모델 3082)로 구성된다. 두 관측장비는 실시간 (약 3분 단위)으로 측정하고자 하는 특정 크기의 입자를 컨트롤러에서 DMA로 0V부터 약 10,000 V까지 전압을 변경하며 내부 전기장 내의 동역학을 이용하여 특정 크기로 분류/선택한 뒤 입자를 CPC 장비를 통해 수농도를 측정한다.

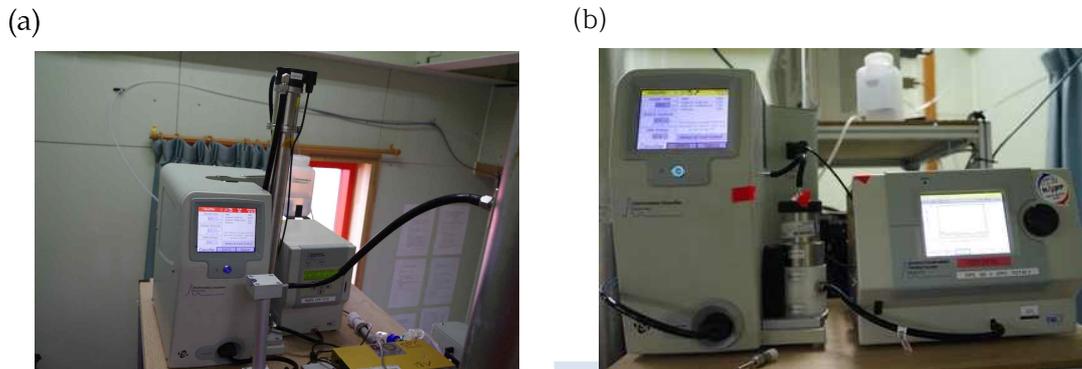


Fig. 3.4.10. 세종기지에 설치되어 대기 중 입자의 크기별 수농도 관측에 활용 중인 SMPS와 nano-SMPS

- SMPS를 이용하여 남극 대기 관측 기간 동안 (2019년 11월 - 2020년 4월) 관측한 결과에 따르면, 특징적으로 3가지 입경 모드 (각각 13.1nm, 33.4nm 그리고 126.3nm)가 뚜렷하게 나타났으며, nano-SMPS (관측 기간 2019년 11월 - 2020년 10월) 관측자료에서는 입경 30nm에서 뚜렷한 1개의 모드를 보였다. 입경 10nm 이하의 입자 특성을 정확히 파악하기 위해서는 보다 많은 관측자료가 축적되어야 할 것으로 보인다. SMPS는 정상 관측 중 CPC3772의 문제가 발생하여 2020년 4월부터 관측을 중단하였으며 한국으로 반입한 뒤 수리하여 2021년부터 다시 관측을 수행하였다. nano-SMPS는 2018년 문제가 발생하여 2019년 12월 재설치하여 정상 관측 진행 중이다.

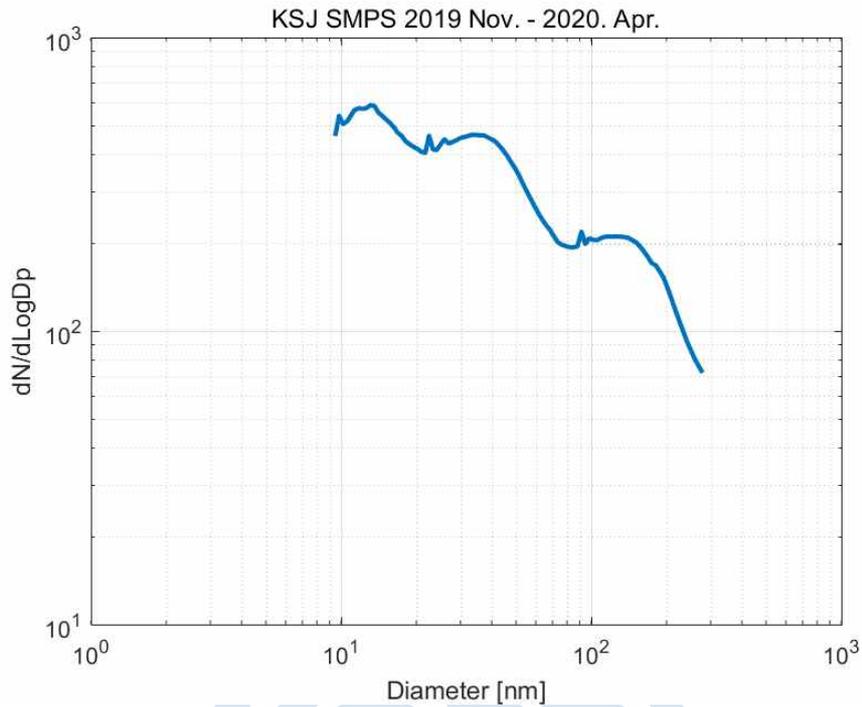


Fig. 3.4.11. SMPS을 이용하여 관측한 입자의 크기별 분포 (2019년 11월 - 2020년 4월)

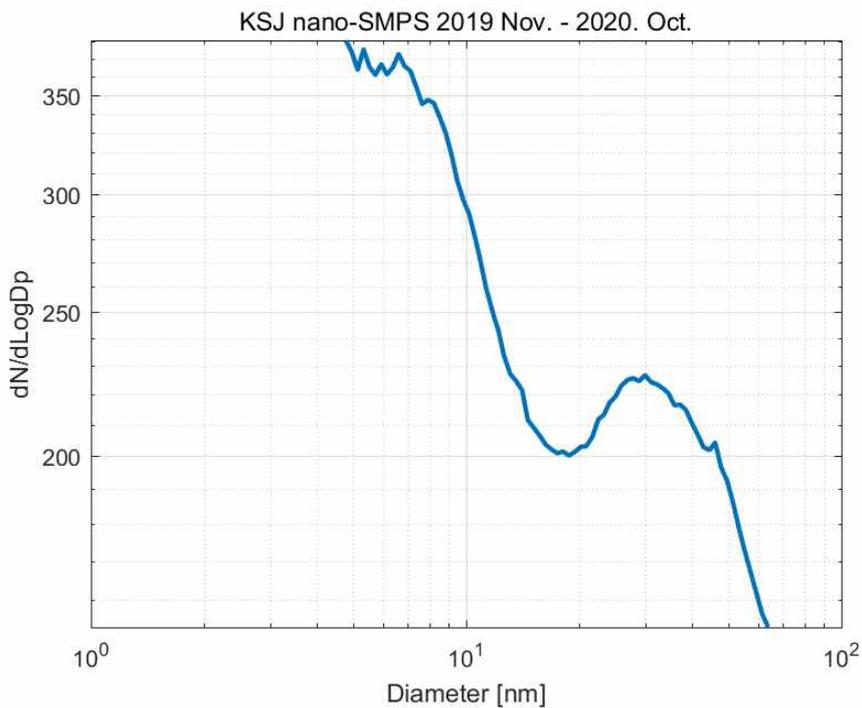


Fig. 3.4.12. nano-SMPS을 이용하여 관측한 입자의 크기별 분포 (2019년 11월 - 2020년 10월)

- 대기 중 블랙카본 (black carbon, 이하 BC) 농도 관측을 위하여 세종기지에 Aethelometer (model AE33, MAGEE사)를 설치하여 관측 중이다.



Fig. 3.4.13. 세종과학기지 대기 관측동에 설치된 Aethelometer (AE33)

- AE33는 본체 내부에 BC 측정을 위한 챔버, 공기 포집을 위한 내장 펌프, 흡입구 유량 제어 (약 5LPM)를 위한 유량 조절기 (mass flow controller), 그리고 제어 부분으로 이루어진다. 해당 장비는 총 7개의 파장 (370, 470, 520, 660, 880, 950)을 이용하여 장비 내부에 있는 석영 필터에 포집되는 입자의 각 파장별 흡수성 차이를 활용하여 BC 농도를 ng m^{-3} 단위로 1분마다 산출한다.

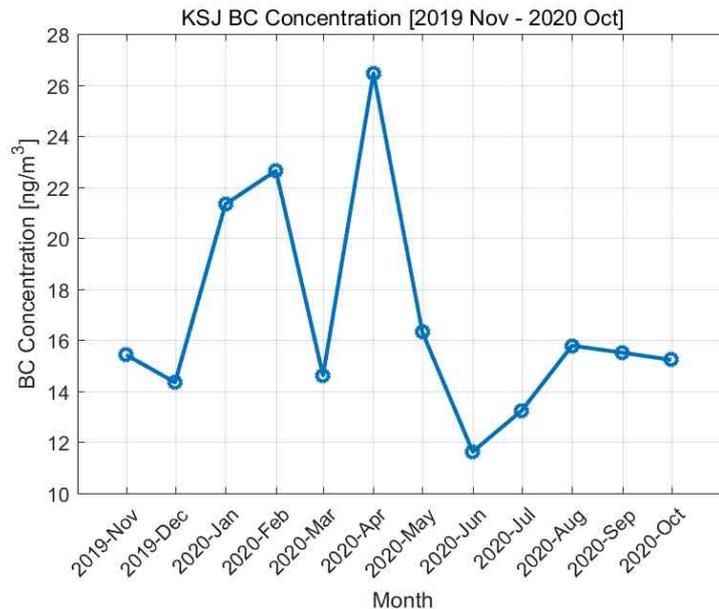


Fig. 3.4.14. 세종기지의 대기 BC 월평균 농도 : 2019년 11월 - 2020년 10월

Table 3.4.5. 세종기지 대기 BC 월평균 농도 단위[ng m⁻³] : 2019년 11월 - 2020년 10월

구분	BC [ng/m ³]	
	평균	표준편차
2019년 11월	15.4	85.0
2019년 12월	14.3	41.2
2020년 1월	21.3	53.1
2020년 2월	22.6	61.9
2020년 3월	14.6	42.2
2020년 4월	26.5	188.8
2020년 5월	16.3	46.6
2020년 6월	11.6	33.5
2020년 7월	13.2	74.6
2020년 8월	15.8	47.4
2020년 9월	15.5	65.1
2020년 10월	15.2	47.9

- 2019년 10월부터 2020년 10월까지 1년간 관측된 월평균 BC 농도의 변화는 특별한 계절적 변화 양상을 보이지 않았으며, 이 기간 동안 평균 BC 농도는 $16.9 \pm 41.5 \text{ ng m}^{-3}$ 이며 최대값은 2020년 4월에 $26.5 \pm 188.8 \text{ ng m}^{-3}$, 최소값은 2020년 6월에 $11.6 \pm 33.5 \text{ ng m}^{-3}$ 을 나타냈다. 2020년 11월부터 2021년 8월 기간동안의 BC 수농도의 월평균 최고값과 최소값은 1월에 측정된 $71.73 (\pm 74.54) \text{ cm}^{-3}$ 와 5월에 측정된 $37.71 (\pm 33.71) \text{ cm}^{-3}$ 로 나타났으며, 계절 변화에 따른 뚜렷한 변화 경향은 없었다.

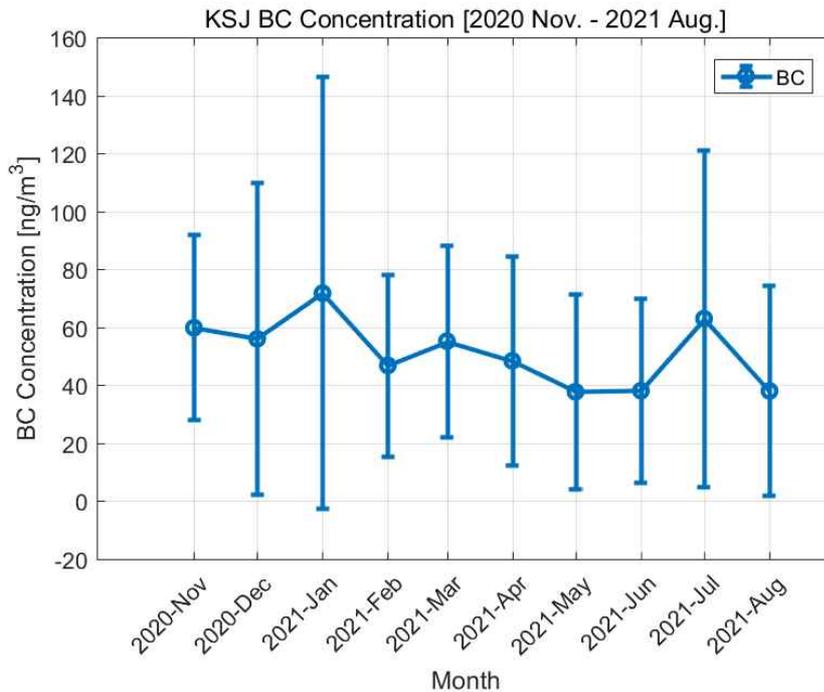


Fig. 3.4.15. 세종기지 월평균 BC 수농도 : 2020년 11월 - 2021년 8월

Table 3.4.6. 세종기지 AE-33에서 측정된 BC의 월평균과 표준편차 값 : 2020년 11월 - 2021년 8월

구분	BC	
	평균	표준편차
2020년 11월	59.82	31.99
2020년 12월	55.99	53.84
2021년 1월	71.73	74.54
2021년 2월	46.79	31.39
2021년 3월	55.18	33.05
2021년 4월	48.37	36.01
2021년 5월	37.71	33.71
2021년 6월	38.06	31.85
2021년 7월	62.96	58.03
2021년 8월	37.99	36.35

- 2022년 관측값 역시 계절적 변화 양상을 보이지 않았으나, BC 최고 농도는 여름철인 2월에 관측된 $27.7 \pm 17.2 \text{ ng m}^{-3}$ 이었으며 최소 농도는 겨울철인 7월에 관측된 $19.0 \pm 15.3 \text{ ng m}^{-3}$ 으로 관측되었다.

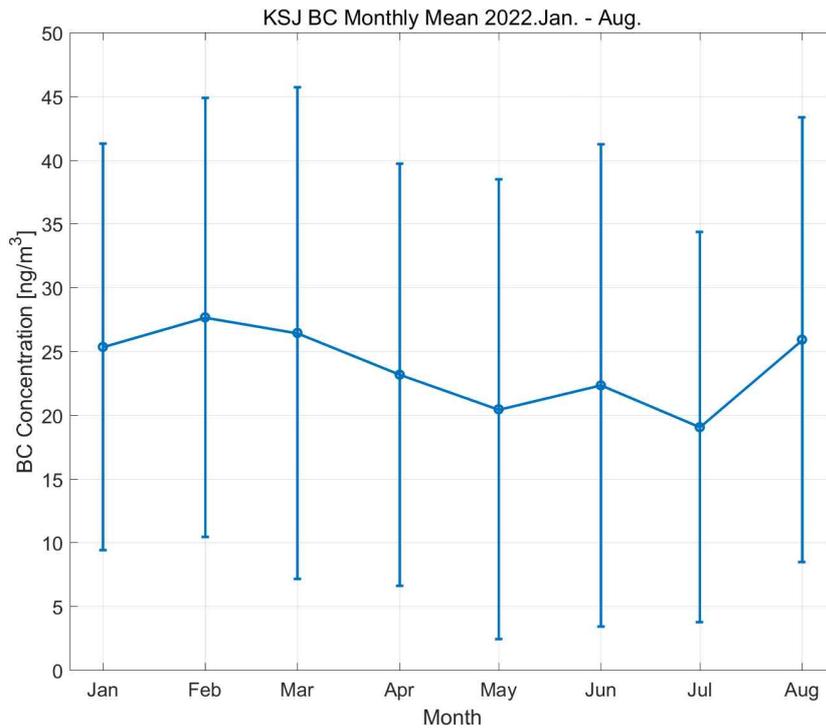


Fig. 3.4.16. 세종기지 월평균 BC 수농도 : 2022년 1월 - 2022년 8월

Table 3.4.7. 남극 세종과학기지 블랙카본 월평균 농도와 표준편차 단위[ng/m³] : 2022년 1월 - 2022년 8월

블랙카본 월평균농도 [ng/m ³]	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월
평균	25.3	27.7	26.4	23.2	20.5	22.3	19.0	25.9
표준편차	15.9	17.2	19.3	16.6	18.0	18.9	15.3	17.4

- 장보고 과학기지에서 대기 중 BC 농도를 측정하기 위해 Aethalometer (AE22-HSMC, Magee Scientific)를 대기 구성물질 관측동 (Observatory for atmospheric constituents)에 2015년 2월에 설치하여 운영 중이다. 대기 구성물질 관측동은 장보고기지 본관동으로부터 북북서 직선 방향으로 약 900m가량 떨어져 있는 곳에 위치한다. 장보고 과학기지 BC의 원시자료는 5분간 누적된 값이며, 10분 평균값을 집계하는 기상자료 관측주기에 맞춰 10분 이동평균 시켜 월평균을 산출하였다.
- 2020년 2월 2일부터 10월 31일까지 정상 관측되었으며 아래 그림은 2020년 2월부터 10월까지 BC의 월평균 농도를 나타낸다. BC의 월평균 농도 값은 아래 표와 같으며, 6월에 약 $4.61 \pm 4.70 \text{ ng m}^{-3}$ 의 최소값을 보였으며 2월에 약 $12.10 \pm 15.13 \text{ ng m}^{-3}$ 의 최대값을 보인다. 그리고, 2월을 제외한 관측된 모든 달에서 10 ng m^{-3} 이하 값을 보인다.

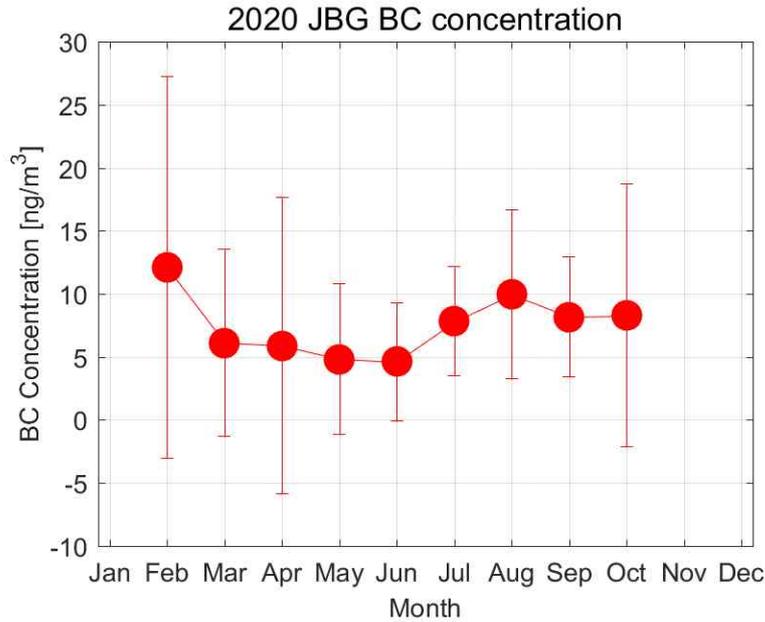


Fig. 3.4.17. 장보고 기지에서 관측된 블랙카본 월평균 농도 변화 그래프:
2020년 1월 - 2020년 10월

Table 3.4.8. 2020년 장보고 과학기지 블랙카본 월평균 농도 (ng/m³)

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT
2020년	-	12.10 ± 15.13	6.11± 7.41	5.89± 11.73	4.81± 5.97	4.61± 4.70	7.82± 4.33	9.95± 6.71	8.16± 4.75	8.28± 10.39

○ 아래 그림은 2020년 2월부터 10월까지 풍향에 따른 BC의 농도를 나타낸 것이다. 인위적인 오염원이라 판단되는 100 ng m⁻³ 농도를 기준으로 위에 그림은 0부터 100 ng m⁻³ 미만일 때이며, 아래 그림은 100 ng m⁻³ 이상일 때의 풍향별 BC 농도를 보인 것이다. 2월부터 10월까지 데이터 중에 100 ng m⁻³ 미만 농도는 전체 중에 약 98.8%, 30ng m⁻³미만은 약 93.3%를 보였다. 이는 장보고 과학기지의 주 풍향이 (북)서풍으로 오염원이 없는 깨끗한 남극 대기 입자 때문인 것으로 판단되며 주 풍향이 아닌 방향에서 바람이 불어올 때 100 ng m⁻³이상의 BC 농도가 측정된 것을 확인할 수 있었다. 보고과학기지 내의 본관동이 관측동 기준으로 남동 방향에 위치해 있어 오염원으로 작용한 것으로 보인다. 그러나 100 ng m⁻³ 이상의 값이 차지하는 비율은 전체 중에 약 0.39 %로 매우 미미한 수준을 보였다.

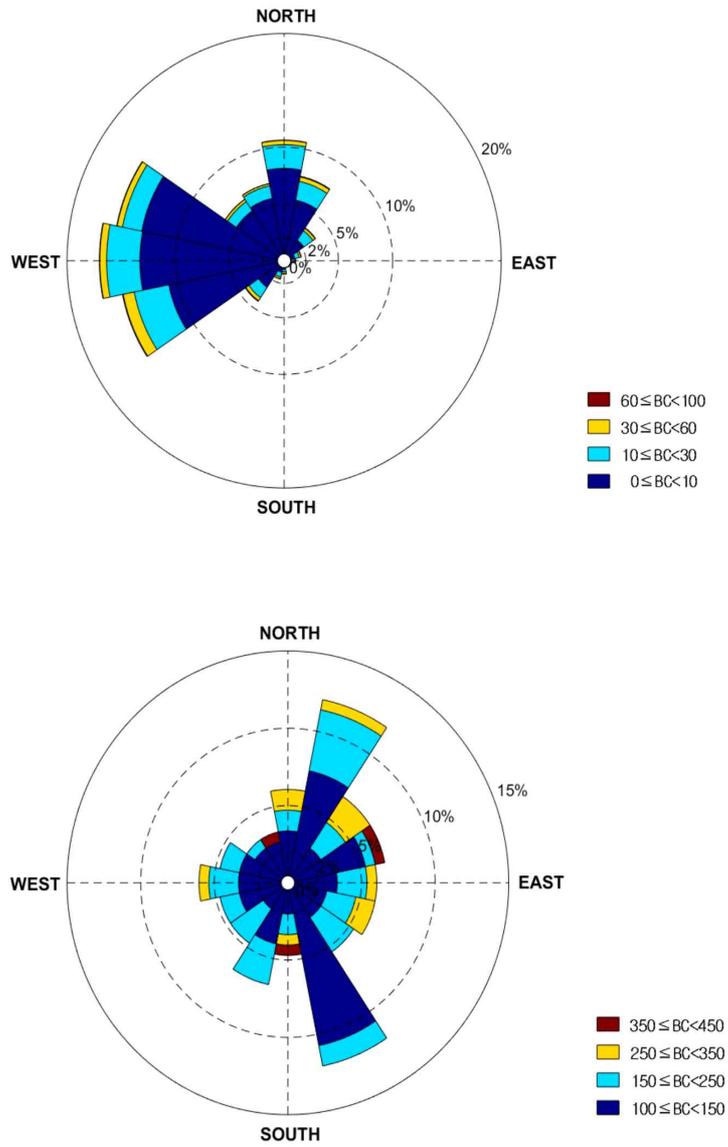


Fig. 3.4.18. (위) 풍향별 블랙카본 농도 ($BC < 100 \text{ ng/m}^3$),
 (아래) 풍향별 블랙카본 농도 ($BC \geq 100 \text{ ng/m}^3$)

- 세종기지에서 구름 응결핵 수농도 (Cloud condensation nuclei, CCN)를 측정하는 장비는 미국 DMT사의 CCN-100을 이용하고 있으며 1Hz마다 $0.75\text{-}10.0 \mu\text{m}$ 사이의 입자를 흡입하여 장비 내부의 온도 차로 입자를 구름 방울로 성장시켜 구름 응결핵 수농도를 측정한다.



Fig. 3.4.19. 세종과학기지 대기 관측동에서 운영 중인 구름 응결핵 계수기 CCN-100

- 2020년 11월부터 2021년 8월까지 관측된 CCN 수농도의 월평균 최고값과 최소값은 1월에 측정된 $275.95 (\pm 89.19) \text{ cm}^{-3}$ 와 7월에 측정된 $62.19 (\pm 29.39) \text{ cm}^{-3}$ 로 나타났으며, 여름철에는 높고 겨울철에는 낮아지는 뚜렷한 계절별 변화 특성을 보인다.

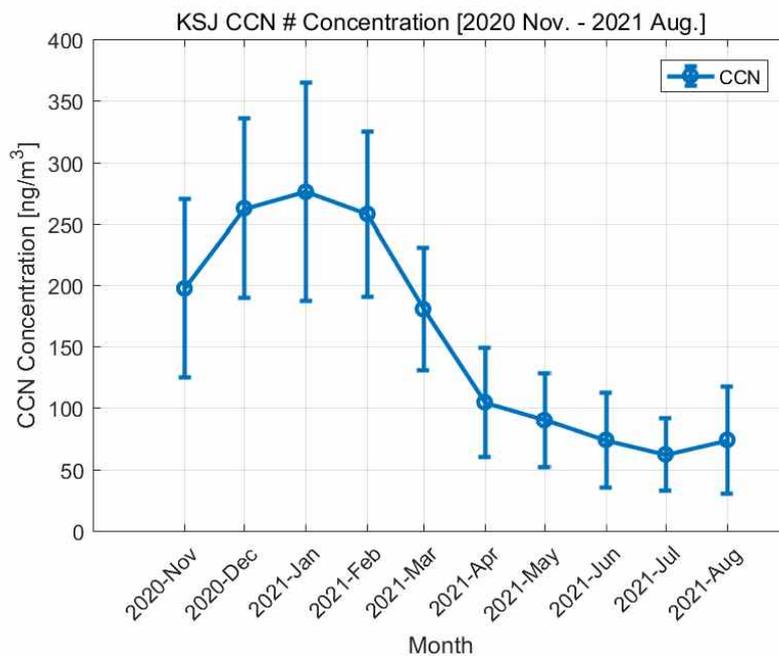


Fig. 3.4.20. 세종기지 월평균 CCN 수농도 시계열 : 2020년 11월 - 2021년 8월

Table 3.4.9. 세종기지 CCN 월평균과 표준편차 값 : 2020년 11월 - 2021년 8월

구분	구름 응결핵 수농도	
	평균	표준편차
2020년 11월	197.29	72.58
2020년 12월	262.55	72.94
2021년 1월	275.95	89.19
2021년 2월	257.98	67.27
2021년 3월	180.46	49.99
2021년 4월	104.59	44.37
2021년 5월	90.03	38.06
2021년 6월	74.00	38.59
2021년 7월	62.19	29.39
2021년 8월	73.96	43.44



3.4.2 세종과학기지 기반 에어로졸 화학 특성 및 전구물질 관측

가. 남극세종과학기지 인근 에어로졸 화학 특성 및 전구물질 관측

○ 남극세종과학기지 대기 빙하 관측동을 거점으로 2018-19년, 2019-20년, 그리고 2021-22년 하계 연구 기간 동안 대기 에어로졸 내 화학 특성 분석과 극지 에어로졸의 대표적인 생물 기원 전구물질 중 하나인 DMS의 현장관측이 수행되었다. 남극 에어로졸 화학 특성 변화 관측의 일환으로 대용량입자시료포집기 (high volume sampler)를 이용하여 포집된 PM2.5 입자 내 주요 이온 성분들이 이온 크로마토그래피 (ion chromatograph) 기법을 활용하여 분석되었다. 이 과정에서 인위적인 활동에 의한 분석 오차를 최소화하기 위하여 풍향풍속제어장치 (wind sector controller)를 이용하여 풍향이 남극세종과학기지 방면 (풍향 기준 355-55도 범위 이내)에서 불어오는 경우와 대기 정체를 야기할 수 있는 낮은 풍속 조건 (풍속 기준 3 m s^{-1} 이하) 하에서 일시적으로 샘플링을 중단하는 시스템을 활용하였다. 다음으로, 남극 대기 DMS 농도는 DMS 전처리 장치, 불꽃 광도 검출기 (Pulsed Flame Photometric Detector; PFPD), 그리고 가스 크로마토그래피 (gas chromatograph)로 구성된 DMS 분석기기를 활용하여 실시간으로 관측되었다.

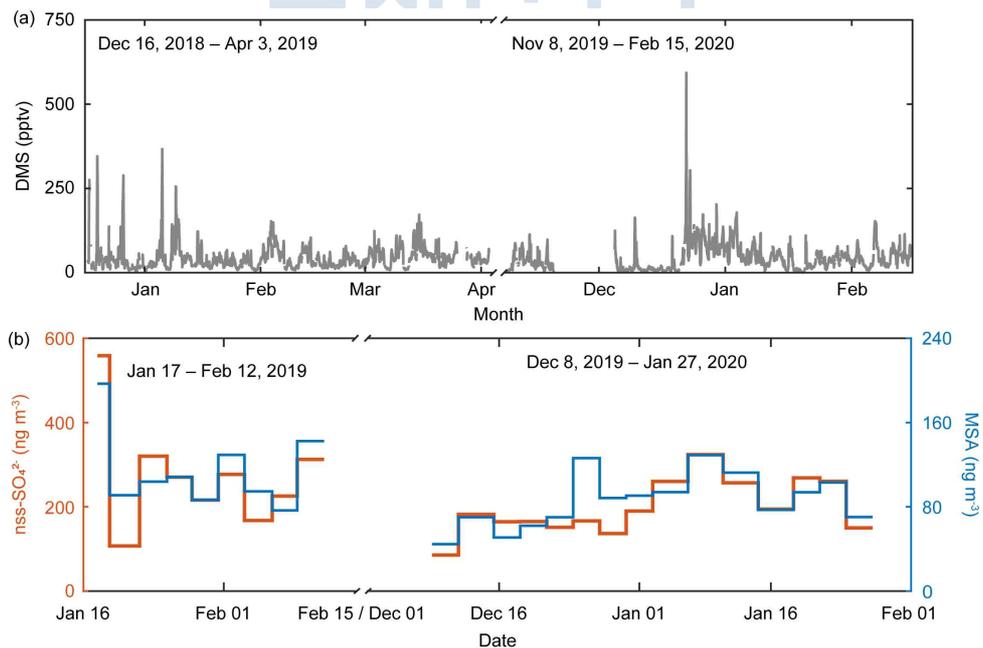


Fig. 3.4.21. (a) 남극세종과학기지 대기 DMS 농도 및 (b) PM2.5 입자 내 nss-SO_4^{2-} 와 MSA 이온 농도의 시계열

- 2018년 12월 16일부터 2019년 4월 3일 그리고 2019년 11월 8일부터 2020년 2월 15일까지 남극세종과학기지에서의 대기 DMS 농도는 0 - 593.2pptv 범위 내에서 급격한 변동성을 나타내었으며, 전체 관측 기간 동안 평균 농도는 43.7 ± 36.7 pptv 수준으로 확인되었다. 해당 관측 기간 동안 PM2.5 입자 내 대기 DMS의 최종산물인 MSA와 $nss-SO_4^{2-}$ 의 농도는 각각 85.5 - 558.8 $ng\ m^{-3}$ 그리고 44.6 - 196.9 $ng\ m^{-3}$ 범위 내에서 변동성을 나타내었으며, 각각 96.3 ± 32.8 $ng\ m^{-3}$ 그리고 225.5 ± 97.4 $ng\ m^{-3}$ 의 평균 농도를 나타내었다. 여기서 DMS의 최종 산화물 중 하나인 MSA는 대부분 생물학적으로 형성된 DMS의 산화 과정을 통해 기인하는 $nss-SO_4^{2-}$ 의 경우 바이오매스 연소를 포함하는 인위적인 형성원이나 화산 활동 등에 영향을 받을 수 있다. 이러한 점을 고려했을 때, 본 연구 기간 동안 분석된 MSA와 $nss-SO_4^{2-}$ 농도의 양적 상관관계($r^2 = 0.71$)는 두 성분 모두 대기 DMS의 산화 과정을 통해 형성되었음을 나타낼 수 있다.

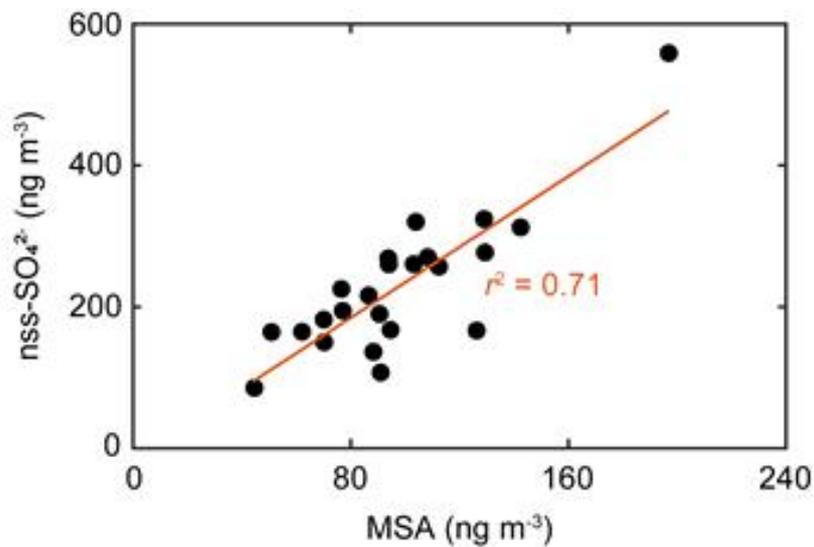


Fig. 3.4.22. 2018-19년 그리고 2019-20년 남극 하계 연구 기간 PM2.5 입자 내 MSA와 $nss-SO_4^{2-}$ 농도 사이의 선형 회귀분석 결과

- 2021-22년 남극세종과학기지 하계 연구 기간 동안의 대기 DMS 농도는 2018-19년 그리고 2019-20년의 관측치와 비교했을 때 전반적으로 증가된 대기 농도를 나타내었다. 2021년 12월 20일부터 2022년 3월 1일까지 남극세종과학기지 인근 대기 DMS 농도의 전체 평균값은 110.6 ± 221.6 pptv로 확인되었으며, 월별 평균값은 1월 (175.7 ± 321.8 pptv), 12월 (67.8 ± 51.8 pptv), 2월 (59.3 ± 37.2 pptv), 그리고 3월 (24.0 ± 10.4 pptv)의 순으로 높게 나타났다. 다음과 같은 남극 대기 DMS의 계절적

변동성은 2018-19년 그리고 2019-20년 하계 연구 기간 동안의 관측치와 매우 유사한 것으로 확인되었다. 특히적으로 해당 관측 기간동안 대기 DMS 농도는 0 - 2,111 pptv (n = 3293) 범위 내에서 높은 시간적 변동성을 나타내었으며, 2022년 1월의 경우 1,000 pptv 이상의 대기 DMS 초고농도 사례가 5차례가량 발생하였다. 이는 2017 - 18 하계 연구 기간 남극세종과학기지에서 대기 DMS 측정을 시작한 이후 관측된 최대값인 600 pptv 수준 (2019년 12월)과 비교했을 때 이례적으로 높은 수치이다. 다음과 같은 초고농도 사례의 원인은 식물성 플랑크톤의 DMS 생산력, 공기과 유입경로, 그리고 기상학적 요인 등의 시공간적 변화에 따른 복합적인 결과로 추정해 볼 수 있다. 최근 관심이 집중되고 있는 남극반도의 극한 고온 현상과 같은 급격한 기후 변화가 남극반도 인근 해양 식물성 플랑크톤의 DMS 생산력에 주요한 영향을 미칠 수 있다는 점을 고려했을 때 다음과 같은 초고농도 사례의 세부적인 원인 규명을 위해서는 다양한 남극 관측거점에서의 장기간 대기 DMS의 현장관측이 수반되어야 할 필요성이 있다.

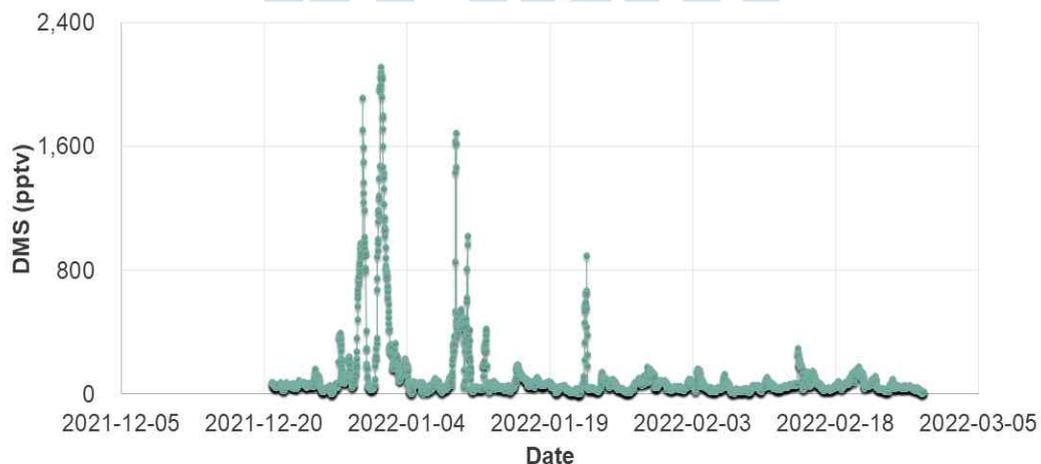


Fig. 3.4.23. 2021년 12월 20일부터 2022년 3월 1일까지 남극세종과학기지에서 관측된 대기 DMS 농도의 시계열

나. 남극세종과학기지 인근 황 에어로졸 발생 특성

- 남극세종과학기지에서 관측된 대기 DMS 농도와 에어로졸 입자 내 DMS 산화물의 농도 정보를 바탕으로 공기과 기원지에 따른 황 에어로졸 발생 특성 분석이 수행되었다. 대기 DMS와 DMS의 산화물에 대한 동시 관측이 수행된 2018-19년 그리고 2019-20년 하계 연구 기간 동안 HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델 기반의 공기과 역궤적 및 군집 분석을

수행하였다. 여기서, 공기괴 역궤적 시간은 기존 보고된 대기 DMS의 산화속도 ($38 - 68\% \text{ day}^{-1}$)를 기준으로 48시간으로 설정되었다. 더불어 해빙 면적 정보를 바탕으로 각 위경도 격자별 지리학적 특성이 Ocean, Ice-Free Marginal Ice Zone (IF-MIZ), Sea-ice, Marginal Ice Zone (MIZ), 그리고 Land로 분류되었다. 여기서, IF-MIZ는 겨울철에는 해빙 지역이었으나 여름철 ice-free인 해양 영역, MIZ는 해빙 농도가 15 - 80%에 해당하는 천이 구역 (transition zone), 그리고 Sea-ice는 해빙 농도가 80% 이상인 총빙 구역 (pack ice zone)으로 정의되었다.

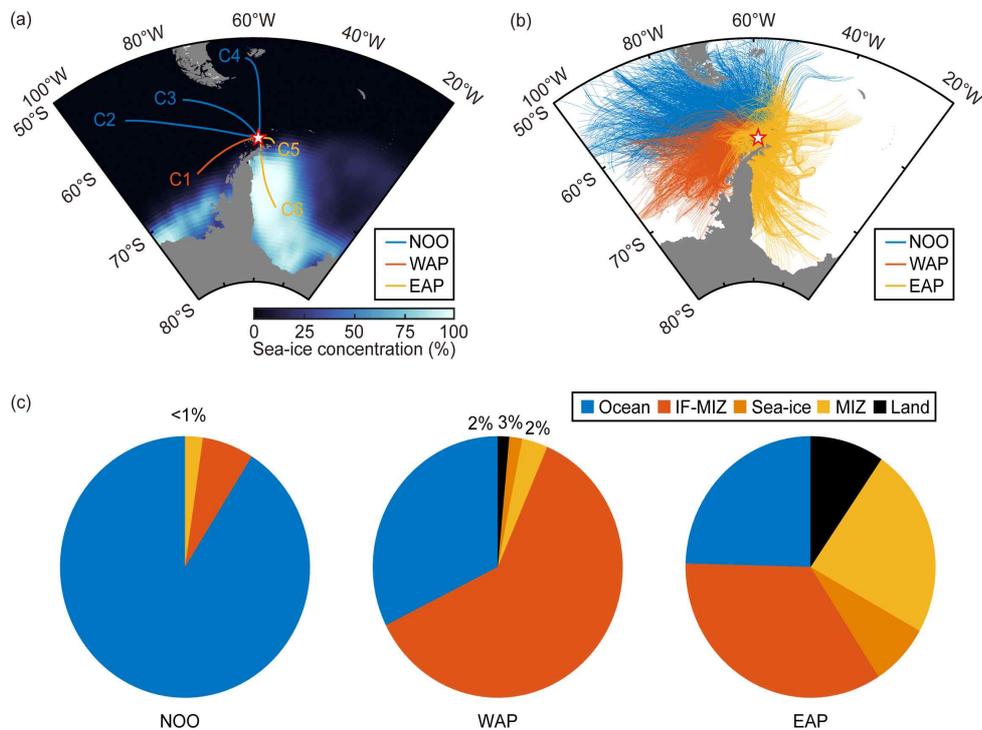


Fig. 3.4.24. 대기 DMS 관측 기간 동안 (a) 공기괴 역궤적 군집 분석 결과, (b) 각 공기괴 군집별 공기괴 역궤적 분포 및 (c) 공기괴 유입경로 상에서의 각 지형학적 특성별 체류시간 비율

- 2018년 12월 16일부터 2019년 4월 3일 그리고 2019년 11월 8일부터 2020년 2월 15일까지 1시간 간격으로 형성된 총 4,420개의 공기괴는 군집 분석을 통해 총 6개의 군집으로 분류되었으며, 공기괴 유입경로 상에서 Ocean, IF-MIZ, MIZ, Sea-ice, Ocean, 그리고 Land에서의 체류시간을 바탕으로 3개의 그룹으로 재분류되었다. 이때 각 그룹은 주로 외해를 장시간 체류하여 공기괴가 도달한 남극 외양 (Northern Open Ocean; NOO), 1년생 해빙의 용해를 통해 노출된 외해를 장시간 체류하여 공기괴가

도달한 서남극 반도 (Western Antarctic Peninsula; WAP), 그리고 다년생 빙을 장시간 체류하여 공기괴가 도달한 동 남극반도 (Eastern Antarctic Peninsula; EAP)로 명명되었다. 더불어, 앞서 NOO, WAP, 그리고 EAP로 군집화된 공기괴 역계적들의 발원 빈도를 정량적으로 산출하고, 2% 이상의 발원 빈도를 나타낸 좌표점을 각 공기괴 발원지를 대표하는 영역으로 정의하였다.

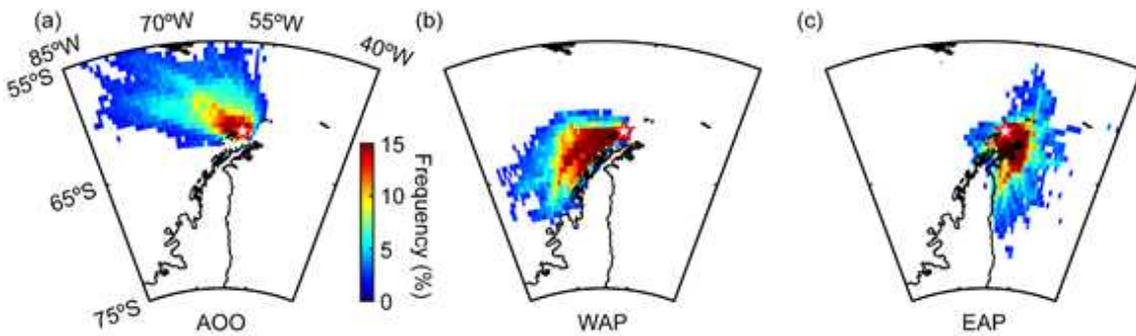


Fig. 3.4.25. AOO, WAP, 그리고 EAP로 군집화된 공기괴 역계적들의 유입 빈도

- 남극세종과학기지 하계기간 동안의 대표적인 공기괴 군집으로 분류된 NOO, WAP, 그리고 EAP에 해당하는 공기괴가 대기 DMS 및 DMS의 산화물인 MSA와 nss-SO_4^{2-} 의 농도 변화에 미치는 영향이 분석되었다. 이때, 대기 DMS 농도는 관측 시점에 도달하는 공기괴의 기원지에 따라 NOO, WAP, 그리고 EAP로 분류되었으며, PM2.5 입자 내 MSA와 nss-SO_4^{2-} 의 이온 농도는 포집 기간 동안 NOO, WAP, 그리고 EAP에 해당하는 공기괴의 상대적인 비율이 가장 높은 특정 영역으로 분류되었다. 먼저 각 공기괴 군집별 대기 DMS 농도의 평균값은 NOO (57.7 ± 36.9 pptv), WAP (47.8 ± 41.7 pptv), 그리고 EAP (24.0 ± 19.8 pptv) 순으로 높았으며, 특이적으로 NOO와 WAP에서의 대기 DMS 농도는 EAP과 비교하여 2배 이상 높은 수치를 나타내었다. 반면에, 각 공기괴 군집별 PM2.5 입자 내 MSA와 nss-SO_4^{2-} 의 농도는 WAP (142.9 ± 39.5 ng m^{-3} 및 352.2 ± 139.4 ng m^{-3}), NOO (99.6 ± 17.9 ng m^{-3} 및 209.4 ± 78.0 ng m^{-3}), 그리고 EAP (74.4 ± 20.0 ng m^{-3} 및 190.9 ± 54.2 ng m^{-3}) 순으로 높게 나타났으며, 특히 WAP에서의 MSA와 nss-SO_4^{2-} 의 PM2.5 농도는 모두 NOO와 EAP에 비해 1.5-2배가량 높은 수치를 나타내었다. MSA와 nss-SO_4^{2-} 는 대기 DMS의 대표적인 최종산물이라는 점을 고려했을 때, 각 공기괴 군집별 대기 DMS와 DMS의 산화물 농도의 불일치 현상은 공기괴 기원지에 따라서 DMS의 형성원과 산화 능력이 크게 다르다는 것을 시사할 수 있다.

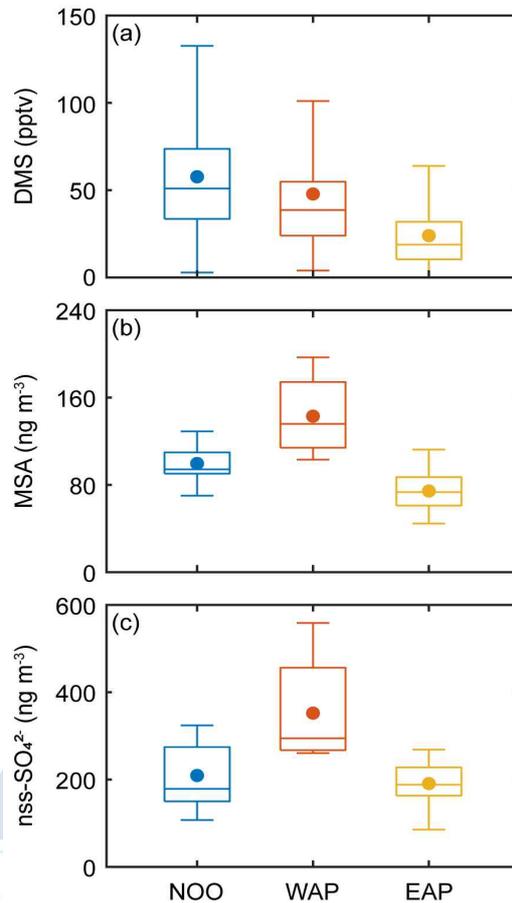


Fig. 3.4.26. 남극세종과학기지로 유입된 대표적인 공기괴 군집별 (a) DMS, (b) MSA, 그리고 (c) nss-SO_4^{2-} 의 농도 변화

- 남극세종과학기지 인근 대표적인 공기괴 기원지별 DMS 방출량의 차이를 발생시키는 주요 인자를 살펴보기 위하여 위성 자료 기반의 해양 생물학적 추정치 (클로로필 농도, 순 일차생산량, 단위 클로로필 당 DMSP농도, 그리고 식물성 플랑크톤의 종 조성) 및 물리적 추정치 (광합성 유효광 그리고 해수 표면 풍속)가 활용되었다. 먼저 AOO, WAP, 그리고 EAP에 해당하는 공기괴 이동 경로 상에서 평균화된 클로로필 농도, 일차생산력, 광합성 유효광, 그리고 해표면 풍속은 기원지별 유의미한 차이를 나타내지는 않았다. 하지만, 단위 클로로필 농도 대비 DMSP 농도는 NOO ($110.4 \pm 34.5 \text{ mmol g}^{-1}$), WAP ($81.7 \pm 28.3 \text{ mmol g}^{-1}$), 그리고 EAP($63.6 \pm 16.6 \text{ mmol g}^{-1}$) 순으로 높게 나타났다. 이는 NOO와 WAP 영역 내에 단위 생물량 대비 DMS(P)의 생산력이 높은 식물성 플랑크톤이 우점한다는 사실을 암시할 수 있다. 위성 기반의

알고리즘을 통해 유추해봤을 때, NOO와 WAP의 경우 남극 생태계 내 대표적인 DMS 생산자로 알려진 *phaeocystis*와 *ice algae*가 상대적으로 우점할 것으로 추정되었다.

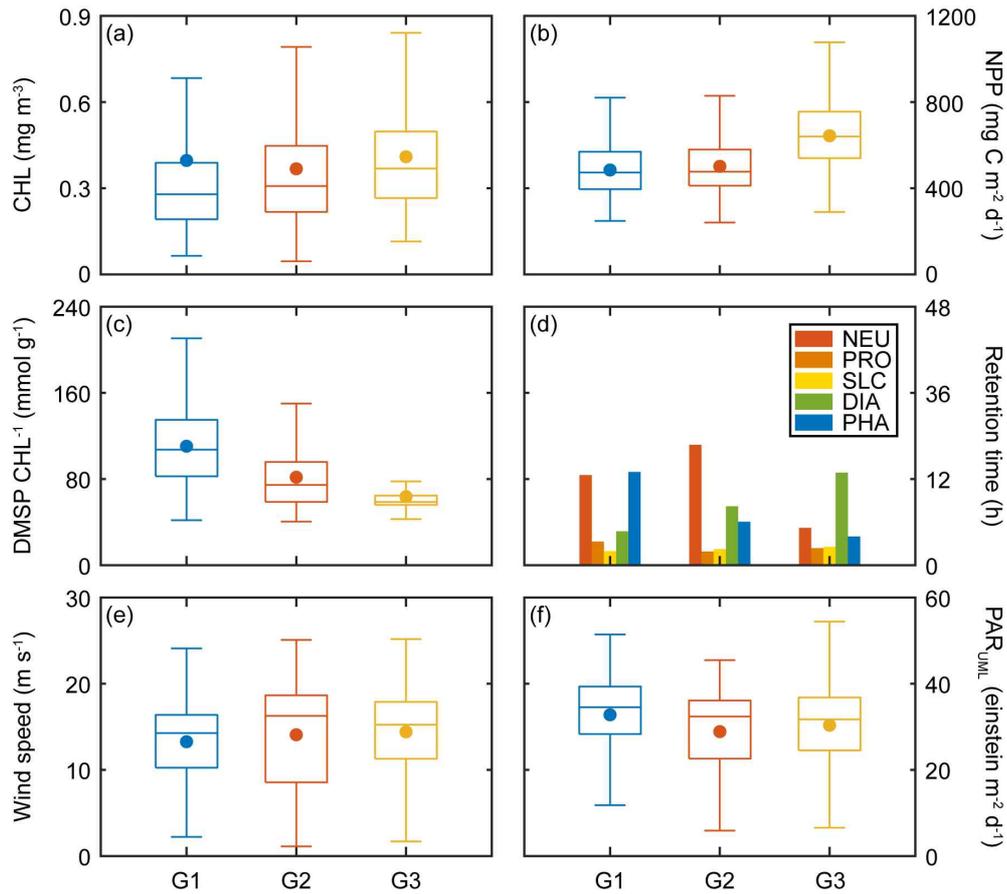


Fig. 3.4.27. 남극세종과학기지로 유입된 대표적인 공기괴 군집별 (a) 클로로필 농도, (b) 순 일차생산량, (c) 단위 클로로필 대비 DMS/CHL 농도, (d) 식물성 플랑크톤 종별 우점비, (e) 해표면 풍속, 그리고 (f) 광합성 유효광

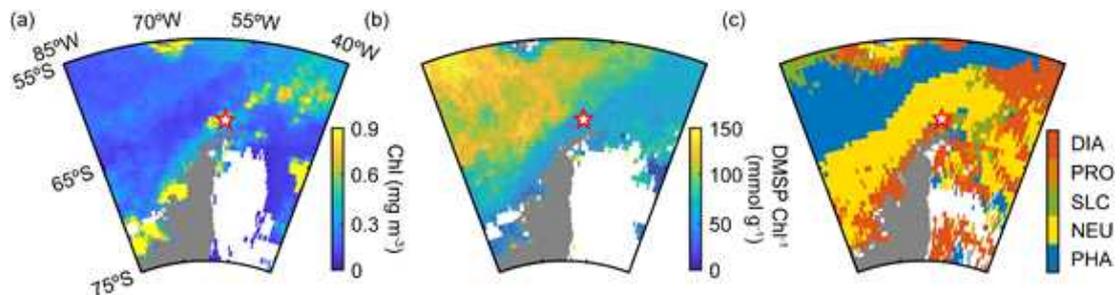


Fig. 3.4.28. 남극반도 인근 평균 클로로필 농도, DMS/CHL과 클로로필의 농도비, 그리고 해양 식물성 플랑크톤의 주요 종 조성 분포

○ Bromine monoxide (BrO)는 남극 대기 중 DMS 산화 과정의 상당 부분을 기여하는 대표적인 산화제 중 하나이다. 특히 극지역에 넓게 분포하는 일년빙은 브로민 재순환과 빙화학적 반응을 통해 대기 중 BrO 농도의 폭발적인 증가를 야기하는 주요 형성원으로 알려져 있다. 따라서, 상대적으로 일년빙의 분포비가 높은 WAP 영역의 경우 NOO와 EAP 영역에 비해 높은 표면 BrO 농도를 나타낼 수 있다. 실제로 CAM-Chem 모델 기반의 BrO 농도 추정치를 각 영역별로 비교해봤을 때 각 영역별 BrO 농도는 일년빙 분포비와 동일하게 나타났다. 이에 따라, 단위 DMS 대비 MSA와 nss-SO_4^{2-} 의 농도비 (S-to-DMS ratio)는 BrO 농도의 양상과 동일하게 WAP, EAP, 그리고 AOO 영역 순으로 높게 나타났다. 결과적으로, 직경 10-25nm 범위에 해당하는 새롭게 형성된 입자들의 수농도 (CN10-25) 또한 동일한 공간분포를 나타내었다는 점을 고려했을 때, 일년빙은 대기 DMS의 주요한 형성원으로 작용하면서 동시에 주요 DMS 산화제인 BrO를 대기 중으로 공급하면서 황 에어로졸 입자 형성을 가속화하는 것으로 추정되었다. 특이적으로 동 남극반도에서 남극 외양에 비해 낮은 MSA와 nss-SO_4^{2-} 의 농도를 나타내었음에도 불구하고, 상대적으로 높은 CN10-25를 나타내었다. 이는 DMS 이외의 연안 지역에 서식하는 펭귄과 해양포유류의 배설물로부터 기인한 메틸아민과 암모니아 등의 질소화합물과 해빙 내 빙화학과정을 통해 대기 중으로 방출된 아이오딘 산화물들의 입자화 과정에 의한 결과로 추정되었다. 다음과 같은 결과는 에어로졸 입자 형성 과정의 보다 체계화된 이해를 위해서는 보다 정밀화된 에어로졸 화학 특성 분석과 더불어 복합적인 에어로졸 전구물질 관측의 필요성을 시사한다.

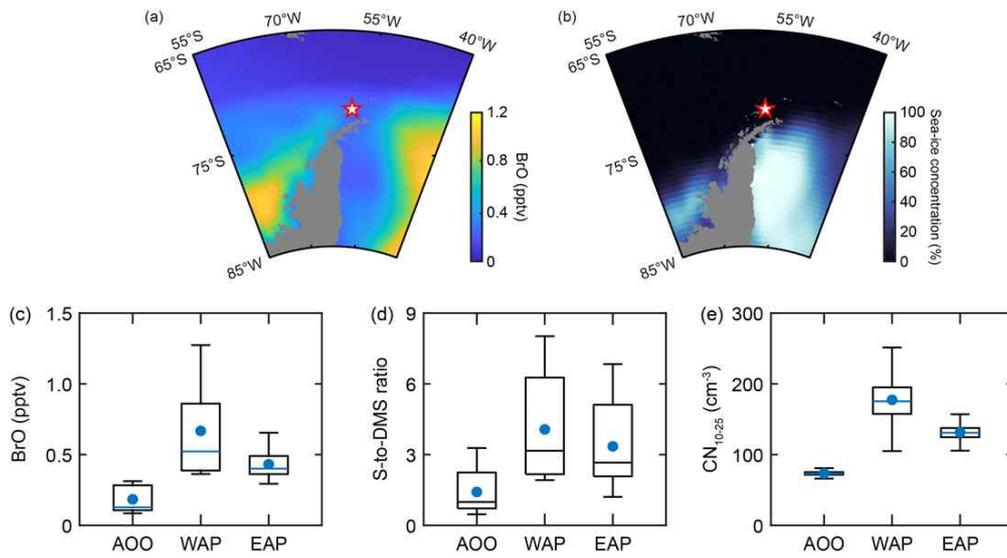


Fig. 3.4.29. 남극 봄 여름철 기간동안 남극반도 인근 (a) BrO 표층 농도와 (b) 해빙 농도 및 남극세종과학기지로 유입된 대표적인 공기괴 군집별 (c) BrO 표층 농도, (d) DMS에서 황화합물 (MSA + nss-SO₄²⁻)로의 변환율, 그리고 (e) 입자 직경 10-25nm에 해당하는 새롭게 형성된 에어로졸 입자의 수농도 (CN₁₀₋₂₅)

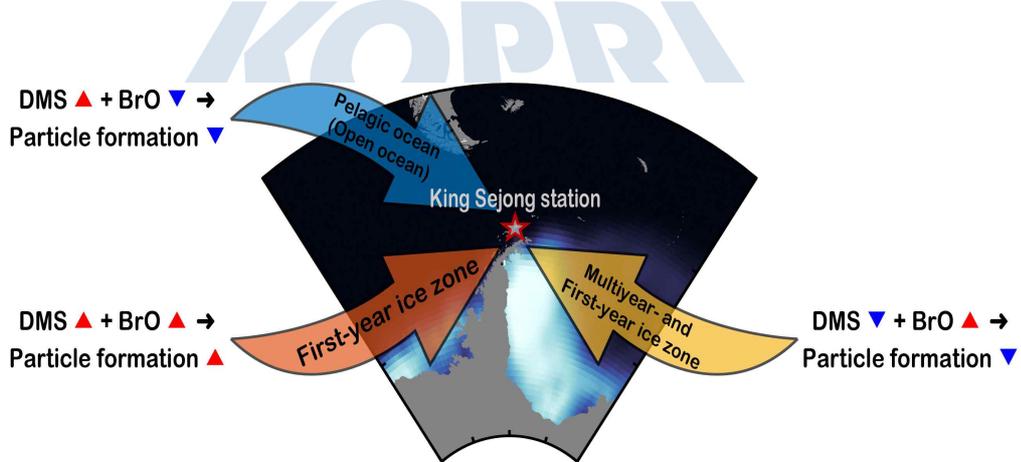


Fig. 3.4.30. 남극반도 인근 공기괴 기원지에 따른 황 에어로졸 형성 과정 모식도

3.4.3 세종과학기지 신규 대기구성물질 관측동 구축

가. 남극세종과학기지 신규 대기구성물질 관측동 구축 현황

- 남극세종과학기지에 기 구축된 대기 병하 관측동의 활용성 보완을 위해 신규 대기구성물질 관측동(이하, 신규대기관측동)을 구축하였다. 신규대기관측동 구축 목적은 크게 (1) 신규 관측 프로그램 확장(대기 입자 화학 특성 분석 강화, 에어로졸 전구물질 분석 시스템 추가 등)과 기지 내 오염원 영향 최소화(발전소 및 소각장에서 발생하는 인위적 오염원의 대기 관측동 유입을 최소화하여 남극 자연 대기를 대표할 수 있는 관측자료 확보 빈도 증가)이다. 2019-20년 월동기간 동안 신규대기관측동 내/외부 주요 시설물 설치 및 보수 작업이 수행되었다. 이 과정에서 신규대기관측동은 크게 (1) 에어로졸 분석실 (에어로졸 물리화학적 특성 관측), (2) 미량기체 분석실, 그리고 (3) 국제 공동연구실로 구분되었으며, 별도로 진공펌프 및 고압가스 실린더 보관실을 구비하였다. 에어로졸 분석실의 경우 내외부에 에어로졸 관측장비의 운용을 위한 인렛을 설치하였으며, 기존 관측장비들을 이전하기 전 신규 대기 관측동 구축 목적 중 하나인 인위적 오염원의 영향을 사전 평가하기 위하여 대표적인 블랙카본(black carbon, 이하 BC) 농도 측정용 장비 중 하나인 Aethalometer를 에어로졸 분석실 내부에 신규 설치하고 운영하였다. 더불어, 최대 15개의 PM_{2.5} 입자 샘플을 자동적으로 포집할 수 있는 대용량입자포집기 (스위스 DIGITEL, DHA-80 모델)를 2018-19년과 2021-22년 각 1대씩 설치하였으며, 포집된 PM_{2.5} 입자 시료의 전처리 과정에 필요한 클린벤치와 시료 보관용 냉장고 및 냉동고를 국제 공동연구실 내부에 구비하였다.



Fig. 3.4.31. (a) 신규 대기구성물질 관측동 및 (b) 미량기체연구실, (c) 국제 공동연구실, 그리고 (d) 에어로졸 분석실 내부



Fig. 3.4.32. 에어로졸 분석실 내부에 설치된 (a-b) 에어로졸 물리 관측장비용 인렛 내외부 및 (c) 블랙카 본 농도 측정용 장비



Fig. 3.4.33. 신규대기관측동 내 (a) 대용량입자시료포집기, (b) 클린벤치, 그리고 (c) 시료 보관용 냉동고 및 냉장고

나. 대기 빙하 관측동과 신규대기관측동의 인위적인 오염원 비교

○ 남극 에어로졸 연구에 있어서 인간 활동으로부터 발생될 수 있는 BC 등의 인위적인 공급원은 남극 대기 에어로졸의 자연적인 형성 과정을 이해하는데 있어서 큰 분석 오차를 야기할 수 있다. 이에 따라, 현재 대기 빙하 관측동에서는 인간 활동의 영향을 평가하기 위하여 BC 농도 관측을 장기간 수행하고 있으며 이를 바탕으로 현장관측 데이터 처리를 수행하여 왔다. 특히 대기 빙하 관측동의 경우 반경 30km 이내에 8개의 과학기지와 공항이 존재하고 있으며 남극세종과학기지의 기반 시설인 생활관, 발전소, 그리고 소각장 등과 불과 약 200m 떨어진 거리에 위치하고 있어 높은 빈도로 인위적인 오염원에 의해 관측 데이터가 튀는 현상이 지속적으로 확인되어져 왔다. 다음과 같은 이유로 인위적 오염원의 영향을 최소화하기 위해 구축된 신규대기관측동은 남극세종과학기지의 주요시설들과 약 800m가량 떨어진 곳에 위치되었다.



Fig. 3.4.34. 남극세종과학기지 주변 기지 분포 및 구 관측동과 신규 관측동의 위치

- 대기 빙하 관측동과 신규대기관측동 사이의 인위적인 오염원 정도의 차이를 평가하기 위하여 각각 동일 제조사에서 개발된 Aethalometer인 AE33 및 AE16 모델을 설치하여 2019-20년에 걸쳐 대기 중 BC 농도 측정을 수행하였다. 더불어, 보다 세부적인 분석을 위해 대기 빙하 관측동 인근에 위치한 Automated Meteorological Observation System (AMOS)와 신규대기관측동 인근에서 임시로 운영된 Automated Winding Systems (AWS)로부터 얻어진 풍향 및 풍속자료가 사용되었다. 먼저 두 장비 간 모델 차이로 인해 발생할 수 있는 오차를 검증하기 위하여 대기 빙하 관측동 내 실내공기를 두 장비를 이용하여 동시 관측을 수행한 다음 BC 농도를 각 구간별로 평균화하였다. 그 결과, BC 농도가 100ng m^{-3} 이하일 때, AE33이 AE16보다 농도를 더 높게 측정하는 경향을 나타낸 반면 100ng m^{-3} 를 초과하는 BC 평균 농도의 경우 두 장비의 값이 거의 유사한 것으로 확인되었다. 두 모델에서 관측된 BC 농도를 100ng m^{-3} 미만인 구간과 범위 $100\text{--}500\text{ng m}^{-3}$ 구간으로 나누어 비교했을 때 결정계수는 각각 0.63과 0.93으로 고농도 조건 하에서 모델 간의 편차가 상대적으로 낮다는 것을 확인하였다. 이에 따라 100ng m^{-3} 이상의 고농도 조건의 데이터를 활용하여 대기 빙하 관측동과 신규대기관측동 사이의 인위적인 오염원의 영향 정도를 평가하였다. 추가적으로, BC 농도는 풍향 및 풍속에 주요한 영향을 받을 수 있기 때문에 대기 빙하 관측동과 신규대기관측동 인근에서 운영된 AMOS와 AWS로부터

얻어진 두 기상 데이터의 성능 검증을 수행하였다. 그 결과 모든 기상 변수(기온, 기압, 습도, 풍향, 풍속)의 결정계수는 0.84~1.00 범위를 나타내었으며, 신규대기관측동에서 약 1km가량 떨어진 거리에 위치한 AMOS 기상자료만으로도 두 대기 관측동의 기상 상태를 대표할 수 있을 것으로 판단되었다.

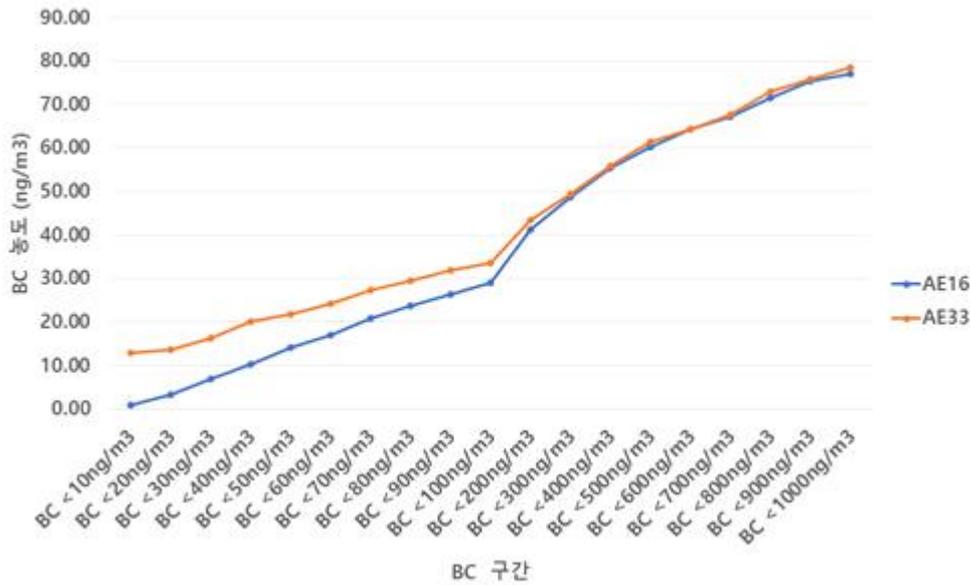


Fig. 3.4.35. AE33 및 AE16의 각 구간별 BC 평균 농도값

- 위에서 검증한 AE16, AE33 및 기상 데이터를 바탕으로 총 14달간 (2019년 3월 1일부터 2019년 12월 31일 그리고 2020년 2월 1일부터 2020년 5월 31일) 대기 빙하 관측동과 신규 대기 관측동에서 관측된 BC 농도를 풍향 및 풍속에 따라 비교 분석하였다. 이때, 풍향 및 풍속자료는 2019년의 경우 대기 빙하 관측동 인근에 위치한 AMOS, 그리고 2020년의 경우 각각 대기 빙하 관측동과 신규 대기 관측동 인근에 위치한 AMOS 및 AWS로부터 얻어진 자료를 사용하였다. 위 관측 기간 동안 대기 빙하 관측동과 신규 대기 관측동 모두 동풍과 서풍이 주 풍향인 것으로 확인되었으며, 각각 남극세종과학기지 주요 시설들이 위치한 북동 (340 - 50도)과 남서 (180 - 270도) 방향에서 바람이 불어올 때 100ng m^{-3} 이상의 BC 농도가 높은 빈도로 관측되었다. 이는 인위적 오염원의 영향 정도의 남극세종과학기지의 영향과 그에 따른 풍향 의존성을 직접적으로 나타낼 수 있다. 세부적으로, 해당 비교 분석 기간 중 BC 농도가 100ng m^{-3} 이상일 경우 대기 빙하 관측동과 신규 대기 관측동에서의 평균 BC 농도는 각각 863.84ng m^{-3} 및 $1,090.74\text{ng m}^{-3}$ 으로 신규 대기관측동이

상대적으로 약 20%가량 높은 수치를 나타내었다. 하지만, 100ng m^{-3} 이상의 BC 농도가 관측된 총 누적 관측 시간은 각각 965.5시간 (전체 관측일의 약 9.3%) 및 626.7시간 (전체 관측일의 약 6%)로 신규 대기 관측동에서의 인위적인 오염원의 영향 빈도가 상대적으로 더 적은 것으로 확인되었다. 다음과 같은 분석 결과들을 종합적으로 고려했을 때, 장기간의 현장관측 시 신규대기관측동이 대기 빙하 관측동에 비해 상대적으로 남극세종과학기지로부터 유입된 인위적인 오염원의 영향을 적게 받을 것으로 추정되었다..



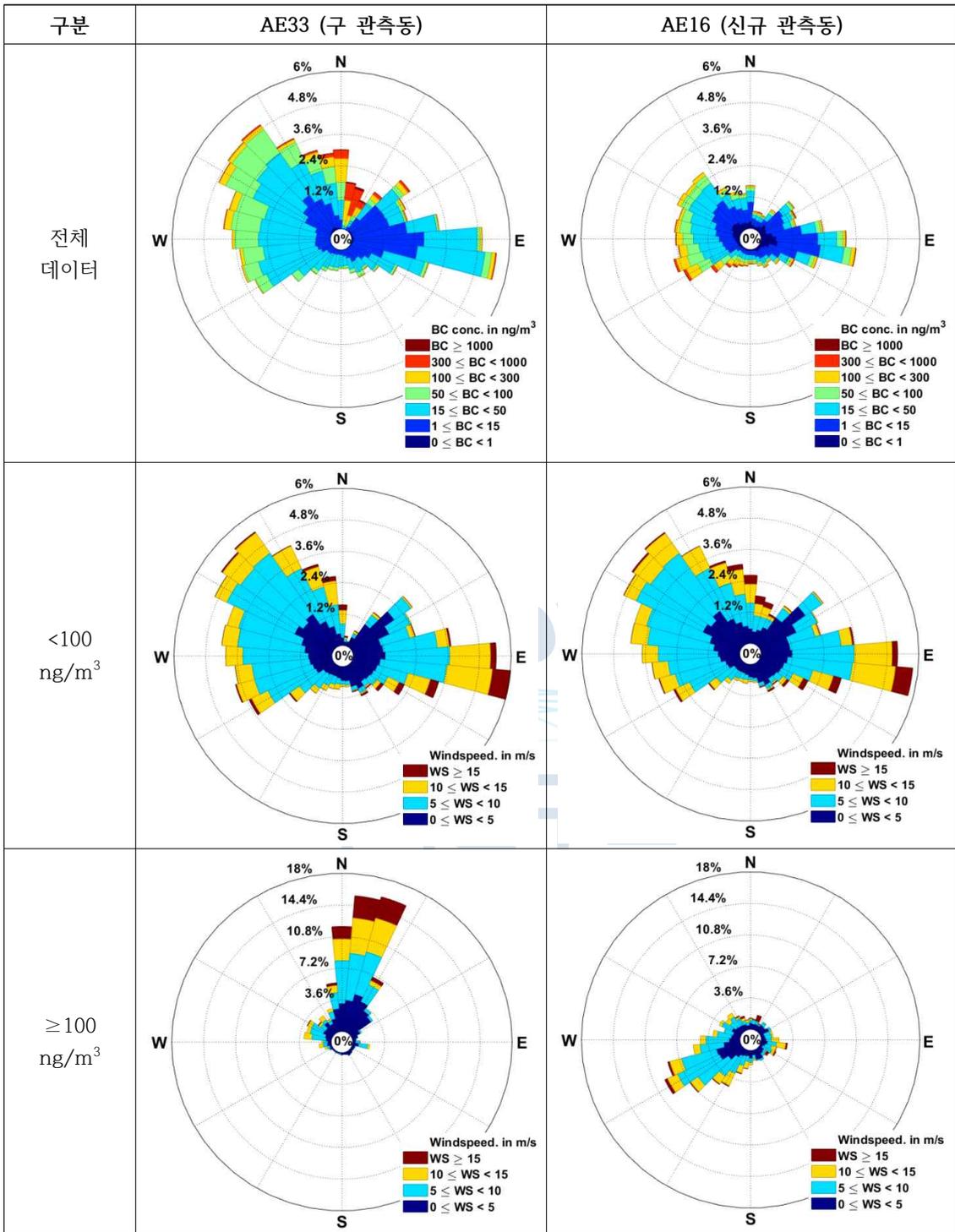


Fig. 3.4.36. 100ng/m³의 BC 농도를 기준으로 분석한 구 관측동과 신규 관측동에서의 풍향 영향

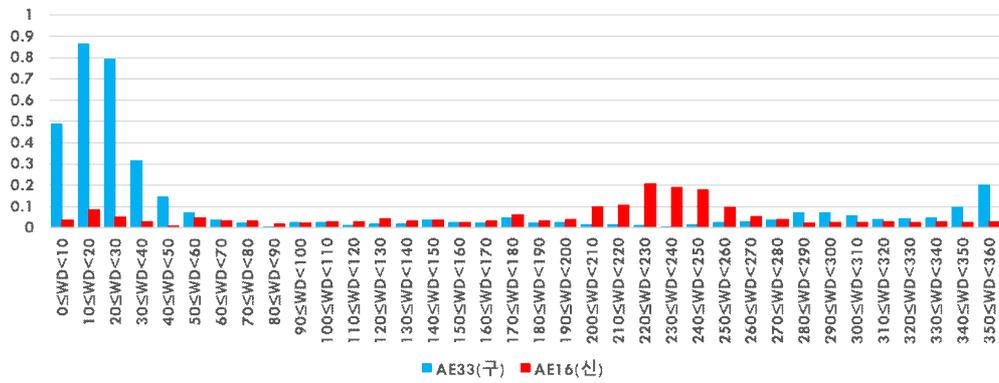


Fig. 3.4.37. 풍향별 100ng/m³ 이상의 BC 농도 발생 비율



3.4.4 아라온 기반 에어로졸 물리 특성 관측

가. 남극 항해('21년 1월 - 3월) 중 에어로졸 입자 관측 수행

- 아라온을 활용한 남반구에서의 에어로졸 입자 수농도 측정을 위해 TSI사의 CPC 3776과 3772 이용(입자크기 2.5nm 이상, 10nm 이상 측정)하여 항해 경로에 따른 에어로졸 수농도를 측정하였다. 항해 기간 동안 측정된 2.5nm 이상의 입자 수 농도는 평균 $11,884 \pm 25,178 \text{ cm}^{-3}$ 이었으며 최고 농도값은 $167,622 \text{ cm}^{-3}$ 으로 측정되었고 10 nm 이상의 입자 수 농도는 평균 $673 \pm 1,255 \text{ cm}^{-3}$ 이었으며 최고 농도값은 $8,361 \text{ cm}^{-3}$ 으로 측정되었다. 항해 기간 중 2월 중에는 수농도 분석 장비의 문제로 인하여 일정 기간 자료 결측이 있었다.

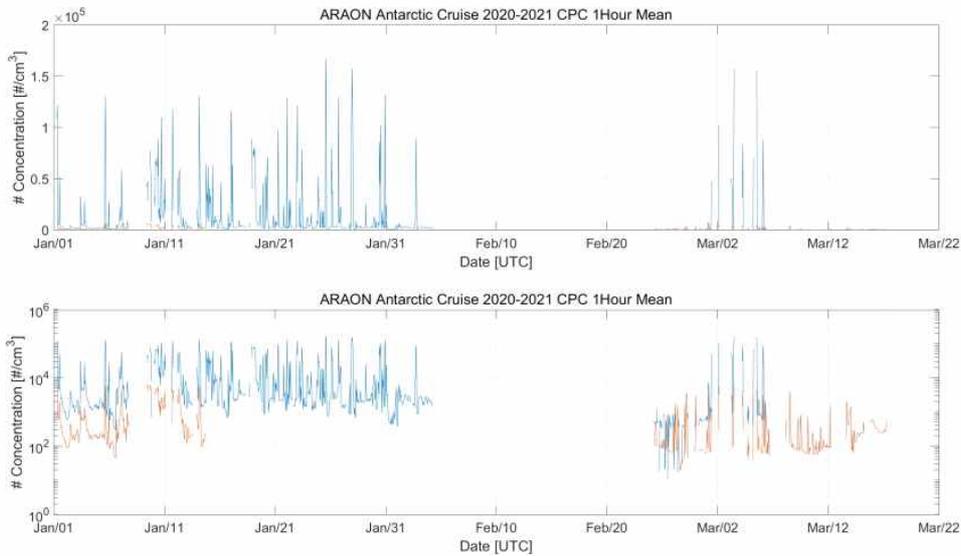


Fig. 3.4.38. 아라온 남극 항해 중 측정된 1시간 평균 입자 수농도 : 2021년 1월 - 2021년 3월

- 아라온 이동 경로에 따라 1시간 평균 입자 수 농도의 값을 나타낸 결과, 뉴질랜드 인근에서는 높은 농도가 관측되었으며 뉴질랜드에서 점차 멀어지며 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 이 결과는 뉴질랜드 육상에서 발생하는 인위적인 활동에 의한 영향으로 분석된다. 간헐적으로 먼바다에서 갑작스러운 고농도가 발생한 경우는 아라온의 정선으로 인한 선박 배기가스의 영향에 의한 것으로 분석된다.
- 드레이크 해협 (Drake passage)에서는 입자크기 2.5nm 이상의 농도는 평균 $2,500 \text{ cm}^{-3}$ 정도였으며 10nm 이상의 농도는 평균 $1,000 \text{ cm}^{-3}$ 으로 측정되었으며 칠레 폰타 아레나스에 접어들며 농도가 더 높아졌다.

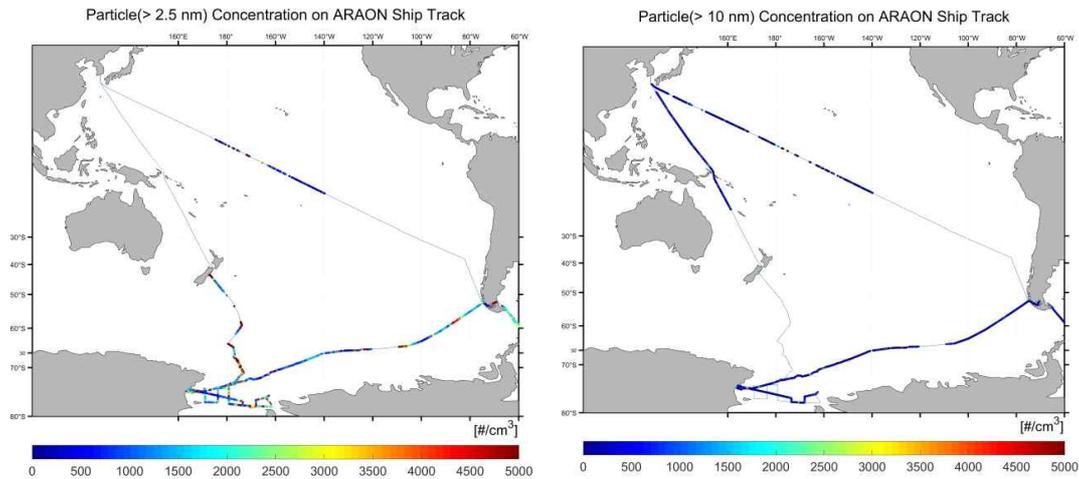


Fig. 3.4.39. 아라온 항해 경로에 따른 입자크기 2.5nm와 10nm 이상의 1시간 평균 수농도 (2021년 1월 - 2021년 3월)

- 남극 항해 중 (2021년 12월 - 2022년 1월) 아라온 이동 경로에 따른 BC 농도와 에어로졸 입자수농도 실시간 관측: 2021년 12월-2022년 1월 기간 동안 아라온 3테크 대기과학실에 BC 분석기 (MAGEE사 AE-21)를 이용하여 실시간 BC 농도와 에어로졸 미세입자 실시간 분석기(TSI사 CPC3776, CPC3772)를 이용하여 실시간 에어로졸 입자 수농도를 관측했다. AE -21은 내장 펌프에서 구동되는 버전이나 내장 펌프 고장으로 인하여 외부에 별도의 펌프를 설치한 뒤 유량보정을 수행하여 정상적인 관측이 수행될 수 있도록 하였다.
- 관측 기간 동안 BC 농도 100ng m^{-3} 이하의 자료만 선별하여 분석하였을 경우 인간 활동이 보다 많은 북반구 중위도에서 높은 농도를 보였으며, 점차 저위도로 이동할수록 농도가 낮아지는 경향을 보였다. 같은 기간 측정된 에어로졸 입자 수농도 분석을 위해 임계 값인 입자 수 $15,000\text{ cm}^{-3}$ 이하인 경우를 선별했으며, 선별된 자료의 분포 경향은 북반구 중위도에서 상대적으로 높은 농도를 보였으며 점차 저위도로 이동할수록 농도가 낮아지는 경향이 BC 분포와 일부 유사했다. 같은 입자를 측정하는 장비 간의 차이는 2.5nm 이상의 입자를 측정하는 CPC3776의 농도가 더 높게 나타났으며 일부 항해 구간에서는 관측이 정상적으로 이뤄지지 않은 경우도 발생했다.

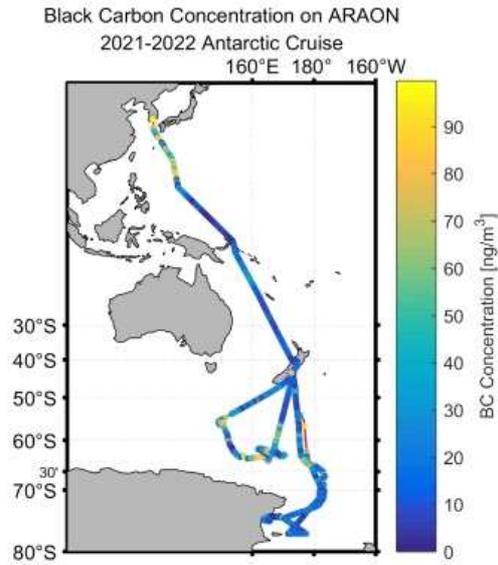


Fig. 3.4.40. 아라온 경로에 따라 관측한 블랙카본 농도(100ng/m^3 이하인 경우만 표출함)

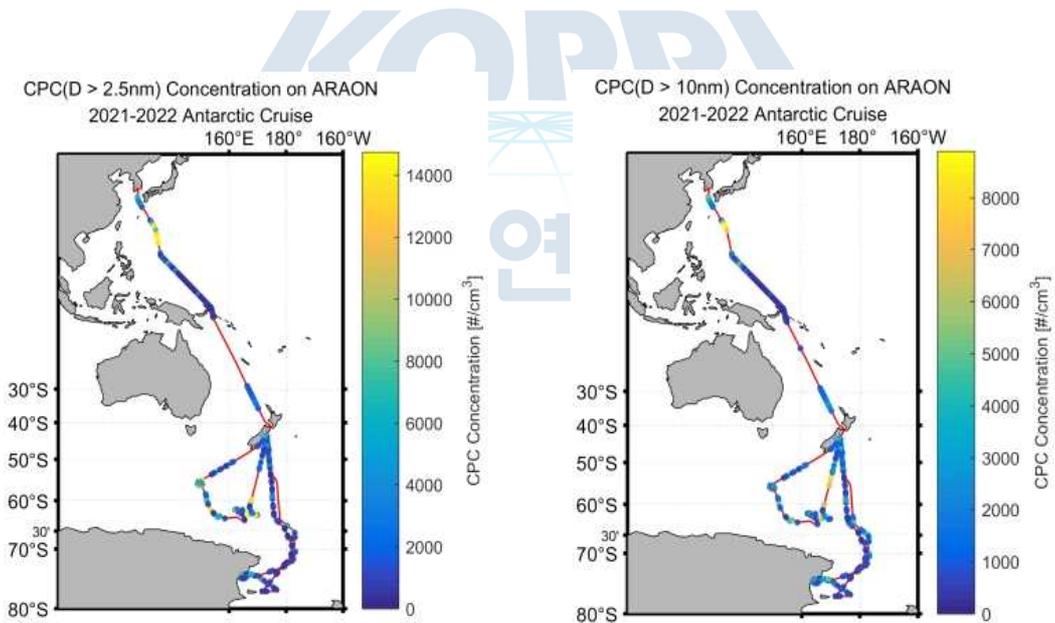


Fig. 3.4.41. 아라온 이동 경로에 따라 관측한 에어로졸 입자 수농도 풍향·풍속 및 블랙카본 농도를 기준으로 인위적인 오염원으로 판단되는 경우는 제거함 : (a) 입자크기 2.5nm 이상인 경우, (b) 입자크기 10nm 이상인 경우

3.4.5 국제 공동연구를 통한 남극 에어로졸 흡습성 변화 관측

가. 남극세종과학기지 에어로졸 흡습성 시계열 분석

- 2022년 12월에 남극 하계기간 중 극지연구소와 아일랜드 콜웨이 국립대학과 공동으로 세종기지에서 단일입자의 흡습성을 평가하는 현장 연구를 수행 중에 있으며, 이 공동 현장 관측의 사전 연구로서 2018년 세종기지 자료를 활용하여 에어로졸의 흡습성을 분석하였다. 극지 에어로졸은 발생원에 따라 다양한 크기, 모양 및 화학 조성으로 구성되며, 단일 에어로졸의 특성에 따라 구름 응결핵 활성화 여부가 결정된다. 에어로졸의 수분 흡수 특성은 에어로졸의 구름 응결핵 활성화 여부를 파악하는 데 중요한 요소 중의 하나이다.
- 다양한 물리-화학적 특성을 가지는 대기 에어로졸의 수분 흡수 특성 및 화학 조성을 간접적으로 추정하기 위해, 흡습도 (Hygroscopicity parameter, 이하 κ)를 사용할 수 있다. Köhler 이론으로부터 발전시킨 κ -Köhler 이론을 새롭게 정립하여 대기 에어로졸의 κ 를 계산할 수 있는 방정식을 본 연구에서는 사용하였다. 남극세종과학기지 대기 빙하 관측동에서는 2009년부터 현재까지 대기 에어로졸의 미세물리 관측을 수행하고 있으며, κ -Köhler 이론의 방정식에 대기 에어로졸 수 농도 데이터를 적용함으로써 κ 를 계산하였다.
- 에어로졸의 흡습도, κ , 계산을 위해 사용된 대기 에어로졸 미세물리 관측 데이터는 아래와 같다. 또한, (1), (2) 및 (3) 데이터가 동시에 존재해야 κ 계산이 가능하다.
 - (1) CN10: TSI CPC3772로 관측한 10nm 이상 전체 대기 에어로졸의 수 농도
 - (2) n(D) 및 total N: TSI SMPS로 관측한 구간별(10-310nm) 입자크기 수 농도 및 10-310nm 구간의 전체 입자 수 농도
 - (3) CCNSS: DMT CCN-100 (CCNC)으로 관측한 각 과포화도 설정에 따른 구름 응결핵 수 농도. CCNC의 과포화도 환경은 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 및 1.0%로 설정함.
- 남극세종과학기지에서 에어로졸 미세물리 관측을 시작한 이래로 2018년도의 데이터 획득률이 가장 높았기 때문에, 2018년 데이터를 1시간 평균하여 사용하였다. 시간 평균한 에어로졸 미세물리 데이터를 사용하여 임계 직경 (Critical Diameter, D_c)을 먼저 계산하고, 시간별 κ 를 도출한 후 이를 일 평균 하여 일 평균 시계열을 분석하고자 하였다.

$$\int_{D_c}^{310nm} n(D)dD = \frac{CCN_{ss}}{CM10} *$$

- 위 식에서 D_c 는 SMPS로 관측한 10-310nm의 에어로졸 범위와 전체 에어로졸 중 구름 응결핵으로 성장한 에어로졸의 비율을 사용하여 계산했다. 계산 완료된 D_c 는 최종적으로 κ 를 도출하는데 사용되었다. 이 과정에 사용한 방정식은 아래와 같다.

$$\kappa = \frac{4A^3}{27D_c^3 \ln^2 SS} \quad A = \frac{4\sigma_{s/a} M_w}{RT\rho_w}$$

- 위 식에서 $\sigma_{s/a}$ 는 물의 표면장력 ($0.072J m^{-2}$), M_w 는 물의 분자량 ($20g mol^{-1}$), R 은 보편기체상수 ($8.314J mol^{-1} K^{-1}$), T 는 표준온도 ($298.16K$), ρ_w 는 물의 밀도($1g cm^{-3}$), D_c 는 임계 직경 및 SS 는 CCNC에서 설정한 과포화도이다.
- Black carbon과 같은 소수성 에어로졸의 κ 는 0, 일반적으로 대기에서 관측할 수 있는 가장 강한 흡습성을 가진 NaCl의 경우 κ 가 1.4라고 알려져 있다. 따라서 1.4 이상인 κ 의 경우 분석에서 제외하였다.

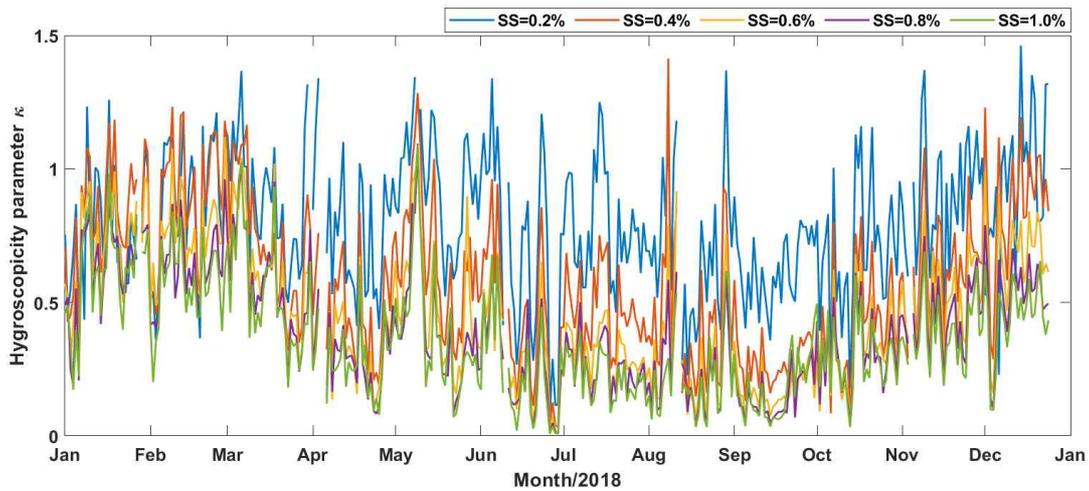


Fig. 3.4.42. 2018년 기간 동안 세종기지에서 관측한 에어로졸 자료로부터 계산된 일평균 흡습도의 시계열

- 과포화도가 0.2%일 때 높은 κ , 1.0%일 때 낮은 κ 를 보였다. 높은 흡습성을 가지는 대기 에어로졸은 낮은 과포화도 환경에서도 구름 응결핵으로 쉽게 성장할 수 있지만, 낮은 흡습성을 가지는 소수성 입자는 높은 과포화도 환경에 도달해야 구름 응결핵으로 성장할 수 있기 때문으로 추정할 수 있다. 2018년도의 일평균 흡습성 시계열을 통해, 남극세종과학기지 대기 에어로졸의 흡습도는 여름 (11월-3월)에 높고, 겨울 (6월-9월)에 낮음을 확인하였다.

3.5 남극 에어로졸 발생 프로세스 파악

3.5.1 에어로졸 발생 모사 실험을 통한 극지 해양-육상 기원 에어로졸 형성 기작 파악

가. 남극해 바닷물을 활용한 에어로졸 모사 챔버 실험

○ 남극 세종과학기지 인근 바닷물을 샘플링하여 남극 세종과학기지 내 대기 관측동에서 일차에어로졸 생성 과정을 모사할 수 있는 챔버 실험을 진행하였다. 수직낙하젯 방법을 이용하여 일차에어로졸을 생성시키고, 생성된 일차에어로졸은 드라이어를 통과하여 건조된 뒤 다양한 에어로졸 관측 장비를 이용하여 측정하였다. 챔버 내 해수 시료의 온도는 약 0도로 유지하고, 해수의 유량은 액체 펌프 및 유량계를 이용하여 3 LPM으로 유지하며 실험을 진행하였다. 남극 세종과학기지 연안의 총 5개의 해수 샘플 (GS1-GS5)을 이용하여 생성된 일차에어로졸의 입자 크기별 수농도 분포(직경 3-1,000nm)를 측정하였다. 마리안 소만과 가장 인접한 곳에서 샘플링한 해수 GS1 샘플과 점차적으로 멀어지는 거리에서 샘플링한 GS2-GS5 해수 샘플에 대한 일차에어로졸 생성 특성 비교 결과, GS1 샘플에서 가장 높은 에어로졸 입자 수농도가 관찰되었다. 최대 일차에어로졸의 총 수농도는 $1.13 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 이었으며, 직경 91nm 입자에서 가장 높은 수농도가 나타났다. 본 에어로졸 모사 챔버 시스템을 통해 일차에어로졸 생성 과정을 정밀하게 모사할 수 있었으며, 빙하 기원 유기물의 특성이 일차에어로졸 생성에 미치는 영향을 확인하였다.

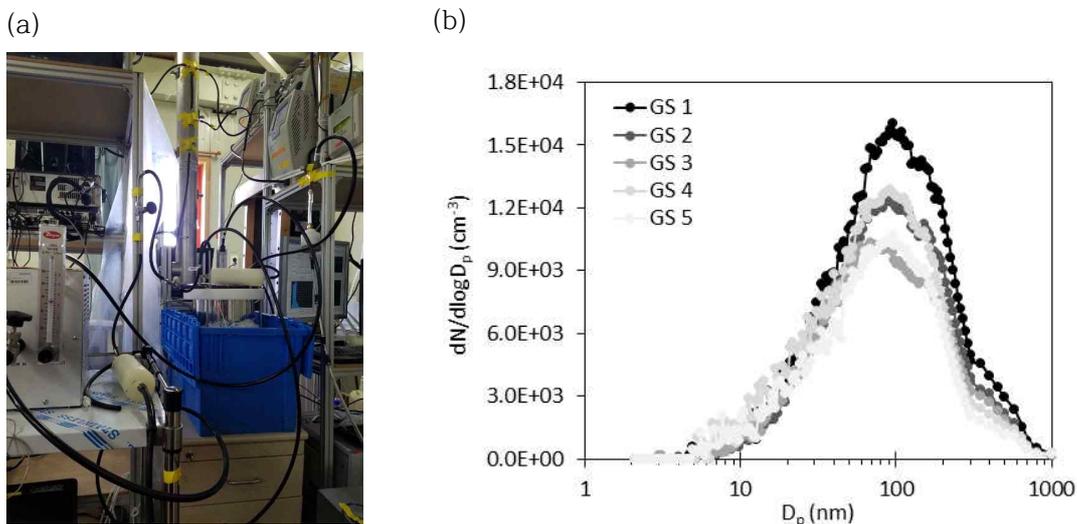


Fig. 3.5.1. (a) 남극 세종과학기지 대기 관측동에서 수행 중인 에어로졸 모사 챔버 실험 (b) 남극 세종과학기지 연안 해수를 이용하여 생성된 일차에어로졸의 수농도 분포곡선

나. 에어로졸 모사 실험을 통한 육상 기원 유기물과 에어로졸 상관성 파악

○ 세종기지 인근 해수 (마리안 소만, 맥스웰 베이, 펑귄 마을) 표층수를 샘플링하여 실험실 규모의 물방울 생성 챔버 실험을 수행하였다. 마리안 소만, 맥스웰 베이, 펑귄 마을에서 샘플링한 표층수에서 생성된 일차에어로졸은 2nm에서 1,000nm 크기의 분포를 보였으며, 생성된 일차에어로졸의 수농도 분포곡선은 각각의 샘플별로 큰 차이가 없었다 (마리안 소만: $1.13 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, 맥스웰 베이: $1.19 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, 펑귄 마을: $1.1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$). 각 샘플의 용존 유기탄소 (dissolved organic carbon: DOC) 농도 분석 결과, 마리안 소만과 맥스웰 베이 샘플의 경우 거의 유사하게 나타났고, 펑귄 마을 샘플의 경우 약 1.2배 정도 더 높게 나타나는 것을 확인하였다 (마리안 소만: $693 \mu\text{g L}^{-1}$, 맥스웰 베이: $672 \mu\text{g L}^{-1}$, 펑귄 마을: $814 \mu\text{g L}^{-1}$). 육상유기물의 지표로 활용될 수 있는 CDOM (chromophoric dissolved organic matter)을 추가로 분석하였고, 그 결과 마리안 소만 해수 샘플에 대해서 가장 높은 값이 관찰되었다 (마리안 소만: $2.64 \mu\text{g L}^{-1}$, 맥스웰 베이: $0.11 \mu\text{g L}^{-1}$, 펑귄 마을: $0.10 \mu\text{g L}^{-1}$). 이처럼 해수 내 육상 기원 유기물이 맥스웰 베이와 펑귄 마을 해수보다 마리안 소만 해수에서 약 23-27배 정도 높게 나타났음에도 불구하고, 마리안 소만, 맥스웰 베이, 펑귄 마을에서 샘플링한 표층수에서 생성된 일차에어로졸의 수농도는 큰 차이가 나타나지 않았다. 따라서 일차에어로졸 발생에 육상 기원 유기물보다는 다른 인자들의 영향이 클 것으로 보이며, 위에서 빙하 기원 유기물은 일차에어로졸 발생에 영향을 미치는 것으로 확인됨에 따라 빙하 기원 유기물에 대한 심도 있는 연구가 더 필요하다.

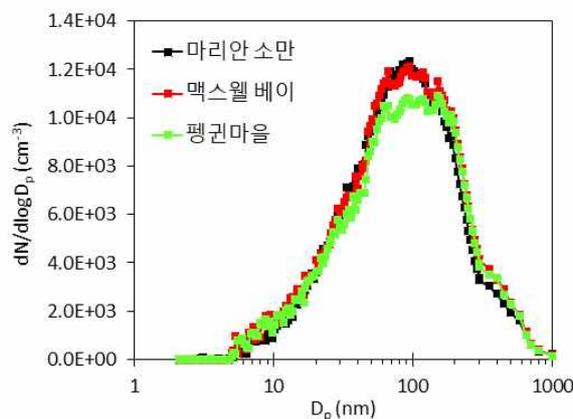


Fig. 3.5.2. 마리안 소만, 맥스웰 베이, 펑귄 마을에서 샘플링한 표층수에서 생성된 일차에어로졸의 수농도 분포곡선 결과

3.5.2 초고분해능 질량분석기를 활용한 남극 해양, 육상, 해빙 유기물 특성 정밀 분석

가. 세종기지 기반 해양-육상 기원 에어로졸 물리화학 특성 관측

- 2018년 4월 남극세종과학기지 인근 연안 표층해수 (FJ1, FJ2, FJ3, FJ4)와 Sea-ice가 존재하는 해역의 표층해수 (SI1, SI2, SI3)의 샘플링을 진행하였다.

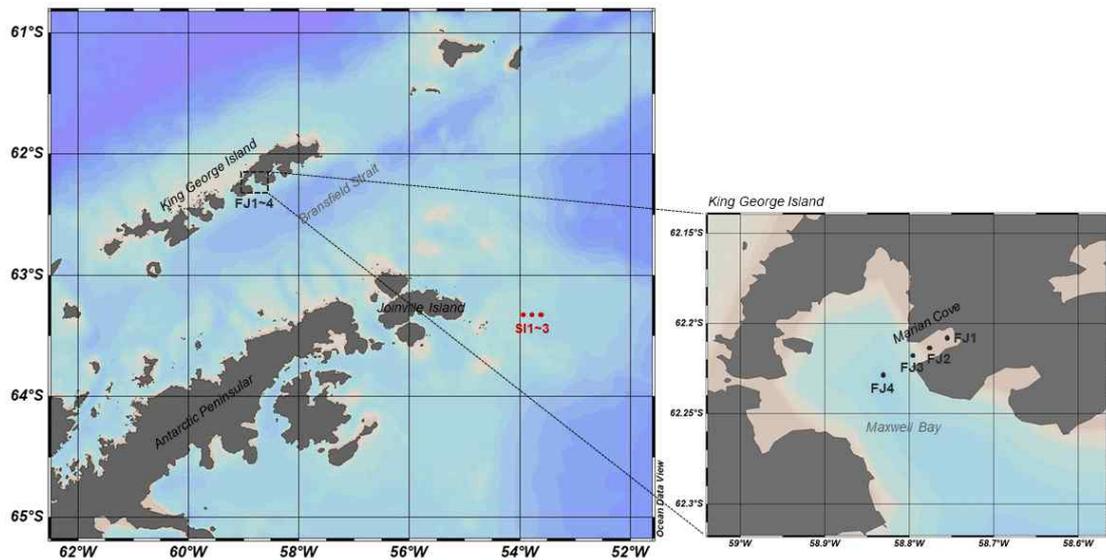


Fig. 3.5.3. 세종기지 인근 연안 해수 (FJ1~4) 및 해빙 지역 해수 (SI1~3) 샘플링 위치

(a)



(b)



Fig. 3.5.4. (a) 2018년 4월 아라온 남극 연구 항해 중 해수 샘플링 모습 및 (b) 해빙 지역

Table 3.5.1. 2018년 4월 아라온 남극 연구 항해 중 샘플링한 해수의 시료 위치 및 특성 (온도, 전기전도도, 염도, 용존 유기물량, 용존 질소량)

Sampling site	Latitude/Longitude	Temp. (°C)	Salinity (PSU)	DOC (μM)	DTN (μM)
FJ1	62.205° S/58.74° W	0.1173	33.889	63.8 ± 0.6	30.5 ± 0.2
FJ2	62.214° S/58.77° W	0.2887	34.042	51.7 ± 3.8	30.6 ± 1.0
FJ3	62.218° S/58.79° W	0.1839	34.038	48.9 ± 0.2	29.9 ± 1.5
FJ4	62.230° S/58.84° W	0.2666	34.012	38.8 ± 4.6	23.5 ± 1.4
SI1	63.322° S/53.97° W	-1.8439	34.204	48.2 ± 0.7	29.3 ± 0.3
SI2	63.319° S/53.89° W	-1.8340	34.205	52.6 ± 4.4	27.9 ± 0.1
SI3	63.315° S/53.79° W	-1.8153	34.223	54.0 ± 4.2	29.6 ± 0.8

- Sea-ice가 인근에 광범위하게 분포한 해역에서 확보한 3개 샘플 (SI1, SI2, SI3)의 온도는 각각 -1.84~-1.81°C로 매우 마리아나 소만 내에서 채취한 4개 샘플 (FJ1, FJ2, FJ3, FJ4; 0.12~0.29°C) 보다 낮았다. 마리아나 소만의 평균 염도, DOC, 용존 질소량 (dissolved total nitrogen; DTN)은 34.0PSU, 50.8 μM , 28.6 μM 로 해빙지역의 값 (염도: 34.2PSU, 51.6 μM , 28.9 μM)과 유의미한 차이를 보이지 않았다.
- 우선 해빙이 존재하는 해역의 샘플 (SI1, SI2, SI3)에 대해서 초고분해능 질량분석기인 Orbitrap-MS를 활용하여 해빙의 영향을 받는 해수 시료의 용존 유기물 분자구조를 분석하였다. Orbitrap-MS는 남극 해수 샘플을 포함한 다양한 환경 시료의 원소비율 및 화학 특성 분석에 활용할 수 있는 장비이다. Orbitrap-MS를 활용한 남극해 SI 샘플 분석 결과, 세 샘플 간의 유사한 화학 특성을 확인하였다. 특히, 세 샘플 모두 lipid 유사, protein 유사 molecule이 높은 비율로 나타났고, carbohydrates 유사, unsaturated hydrocarbons (UH) 유사, lignin 유사, tannins 유사, condensed aromatic structure (CAS) 유사 molecule은 상대적으로 낮은 비율로 나타났다. 추가적으로 DBE (double bond equivalent) 분석을 통해 해빙 샘플 (sea ice)과 빙하 샘플 (fjord)이 해양 샘플 (open sea)보다 double bond 또는 aromatic compounds를 더 많이 포함하는 것을 확인하였다. 남극해 해빙의 영향을 받는 바닷물 속 용존 유기물의 경우 lipid 유사와 protein 유사 성분을 많이 포함하는 것을 확인하였고, 향후 실험실 규모의 에어로졸 모사 실험을 통해서 이들이 물방울 파괴 메커니즘을 통해서 남극 대기 중으로 직접적으로 배출될 수 있는지에 대한 프로세스 연구를 수행하고자 한다.

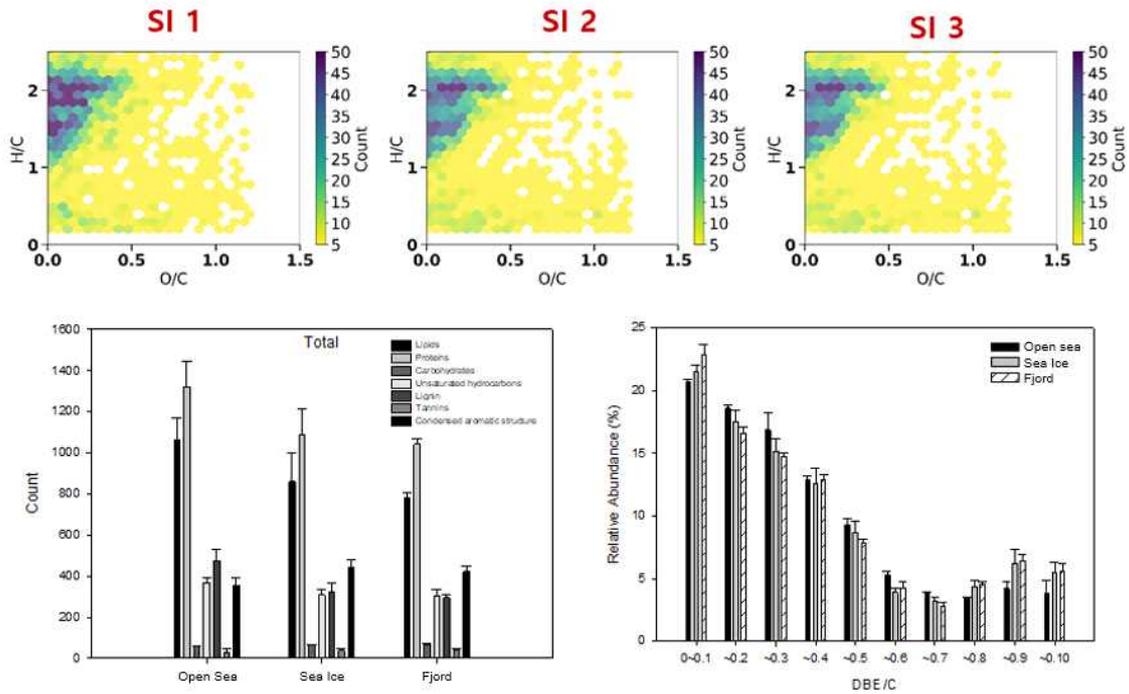


Fig. 3.5.5. 남극해 SI 샘플에 대해서 용존 유기물의 분자구조 분석

- 빙하 기원 해양 유기물의 특성을 조금 더 상세하게 파악하기 위해서 마리안 소만 빙벽에서 떨어진 거리에 따라 (FJ1-FJ4 해수 샘플) 염도, DOC, DTN, CDOM의 농도를 비교하였다. FJ1 샘플의 경우 마리안 소만과 매우 인접한 곳 (마리안 소만과 0.93 km 떨어진 곳)에서 샘플링을 진행하였기 때문에 빙하 기원 유기물의 특성을 대표할 것으로 기대하였다. 결과적으로, 마리안 소만과 가장 가까운 곳에 위치한 FJ1 해수 샘플의 경우 염도가 가장 낮게 나타났고, 염도는 DOC ($r^2 = 0.53$) 및 CDOM ($r^2 = 0.54$) 과 음의 상관관계를 보였다. 세종과학기지 인근 해역인 마리안 소만과 맥스웰 베이 사이의 표층수는 활발한 이동이 이루어지고 있고, 육상 기원 용존 유기물 또한 조수 차이에 의하여 세종과학기지 인근 해수로 유입될 수 있다. 따라서 이러한 결과는 용존 유기물이 남극 육상 얼음과 빙하가 녹으면서 해수로 유입될 때 육상과 빙하에 존재하던 생물학적 유기물들의 영향으로 인한 것으로 예상된다.

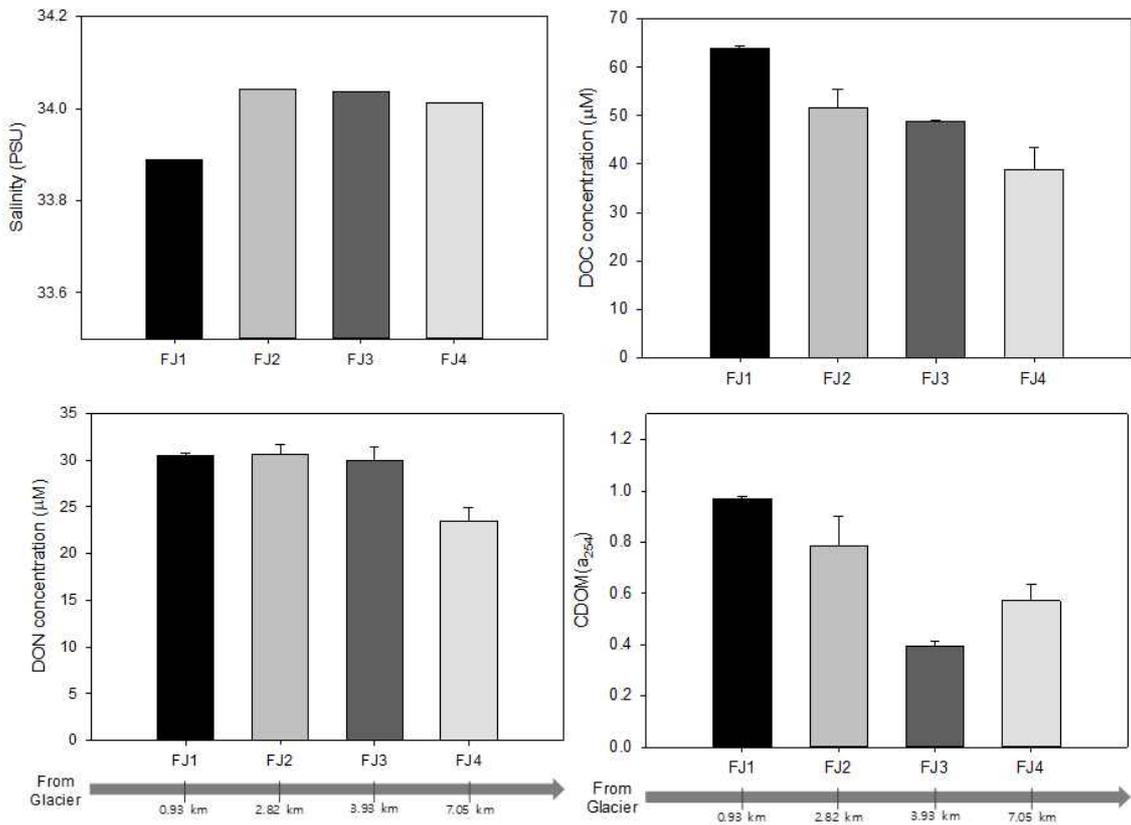


Fig. 3.5.6. 마리안 소만 빙벽에서 떨어진 거리에 따른 (FJ1-FJ4 해수 샘플) 바닷물의 염도, 용존 유기물 농도, 용존 유기질소 농도, CDOM의 농도 비교

- 형광 분광계를 활용하여 마리안 소만 빙벽에서 떨어진 거리에 따라 (FJ1-FJ4 해수 시료) 바닷물 속 유기물의 광학적 특성을 분석하고, 초고분해능 질량분석기를 활용하여 바닷물 속 유기물의 분자구조를 분석하였다. 광학적 특성 분석 결과에서 피크 A, 피크 M, 피크 C, 피크 B, 피크 T는 각각 terrestrial humic 유사, marine humic 유사, humic 유사, tyrosine 유사, tryptophan 유사물질을 의미한다. 결과적으로, 모든 시료에 대해서 피크 A와 피크 M이 높게 나타났고, 이는 빙하 기원 용존 유기물이 휴믹 성분의 물질이 상대적으로 높은 비율로 존재하는 것을 의미한다. FJ1-FJ4의 표층해수 내 유기물의 분자구조 특성의 경우 시료 간의 차이는 나타나지 않았고, 모든 시료에 대해서 lipid 유사와 unsaturated hydrocarbons (UH) 유사 성분이 높은 비율로 나타난 것을 확인하였다. 이러한 결과는 용해되어 흘러나온 육지 얼음 및 빙하와 함께 육지 DOM (이끼류에 의해 생성되었을 가능성이 있음) 유입이 발생했음을 나타낸다. 기후 온난화는 이끼류 생물의 빠른 성장을 야기했고 그들의

서식지를 확장시켰다. 적은 샘플 수로 인해 남극해의 DOM 증가에 대한 이끼류 생물의 기여도를 평가하기에는 어려움이 있으나, 남극의 여름에 특히 이끼류 생물과 육지 얼음 및 빙하 유출로 인해 영향이 증가할 수 있다. 또한, 지상 생물에서 유래한 DOM은 1차 유기 에어로졸 생산을 증가시켜 지구 대기에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상되며, 이는 기후 온난화의 원인이 될 수 있다. 따라서, 이끼류 생물의 기여에 대한 훨씬 더 명확한 증거를 제공하기 위해 남극해에서 더 많은 샘플링과 분자 수준의 DOM 모니터링이 수행되어야 한다.

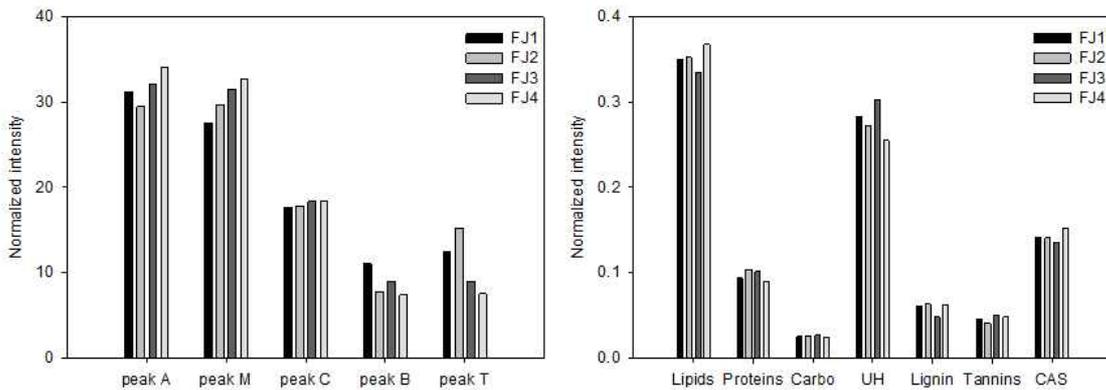


Fig. 3.5.7. 마리안 소만 빙벽에서 떨어진 거리에 따른 (FJ1-FJ4 해수 시료) 바닷물 속 유기물의 광학적 특성 및 분자구조 분석

- Orbitrap-MS를 활용하여 2019년 1~2월 (9개 시료) 및 2019년 12월~2020년 1월 (15개 시료)에 세종기지에서 확보한 총 24개의 에어로졸 시료의 유기물 복합구조에 대해 정밀 분석 수행하였다. 총기간 동안 유기물의 intensity가 Van Krevelen diagram의 C1 위치 (파란색 점선상자)에 $55.2 \pm 13.0\%$ 로 우세하게 나타난 시료가 18개, C2 위치 (빨간색 점선상자)에 $33.1 \pm 17.8\%$ 로 우세하게 나타난 시료가 6개 확인되었다. 이와 같이, 시료들을 C1과 C2 group으로 나뉘었을 때, C1 group의 에어로졸은 C2 group에 비해 상대적으로 해빙이 없는 해양에서 더 채류한 것으로 보이며, C2 group은 해빙 지역에서 더 채류한 것으로 나타났다. 또한, C1 group의 에어로졸 내 유기물은 C2 group에 비해 lipid 유사와 UH 유사 성분의 intensity가 높게 나타난 반면, C2 group에서는 lignin 유사와 CAS 유사 성분의 intensity가 C1 group보다 높게 나타났다.

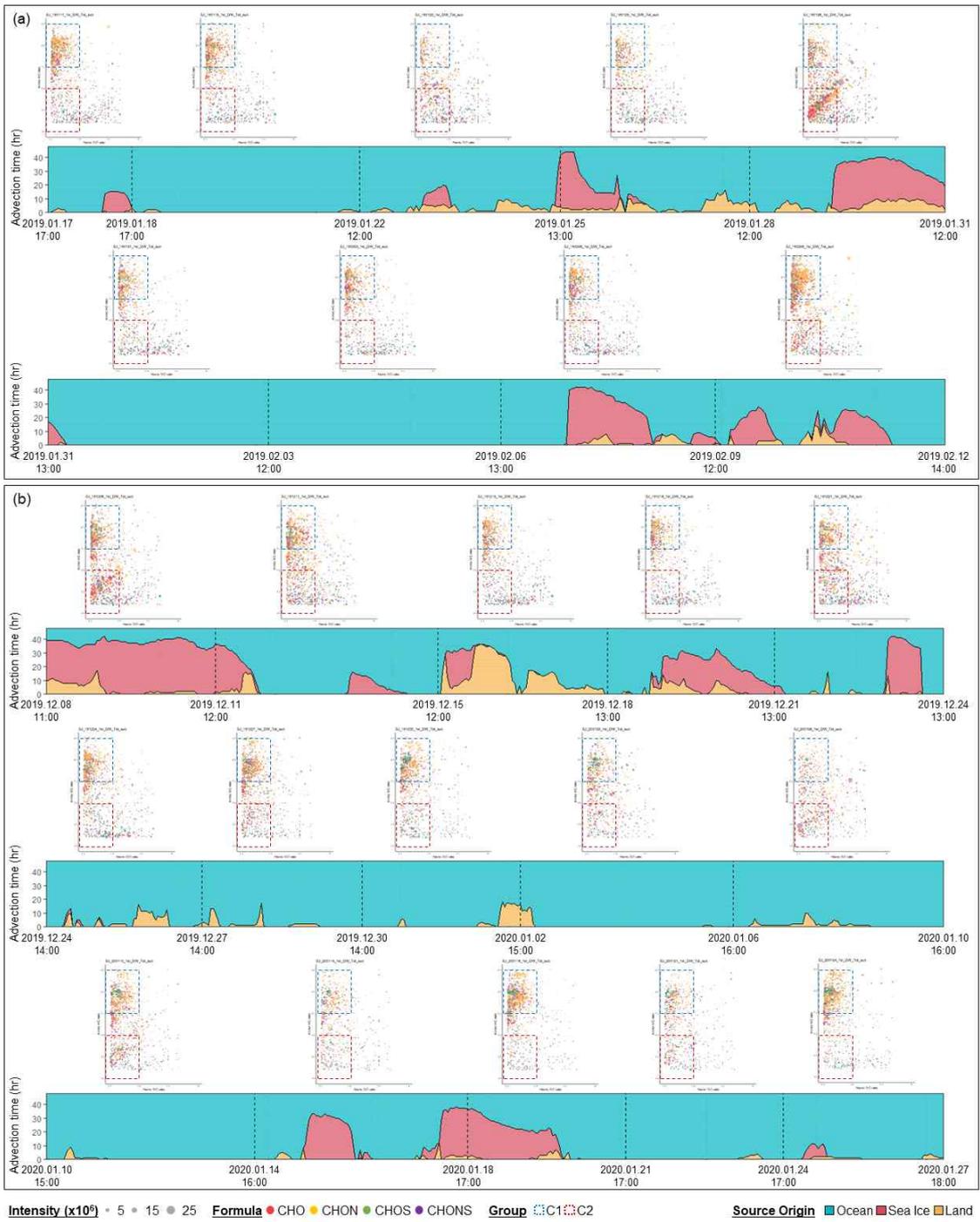


Fig. 3.5.8. 남극 세종과학기지에서 채집한 에어로졸의 유기물 분석 결과 (Van Krevelen diagram)와 공기피역적모델 (HYSPLIT)에 의해 구현된 채집 전 48시간 동안 해양, 해빙, 육지에서서의 공기피 체류 할당시간: (a) 2019년 1~2월, (b) 2019년 12월 ~ 2020년 1월

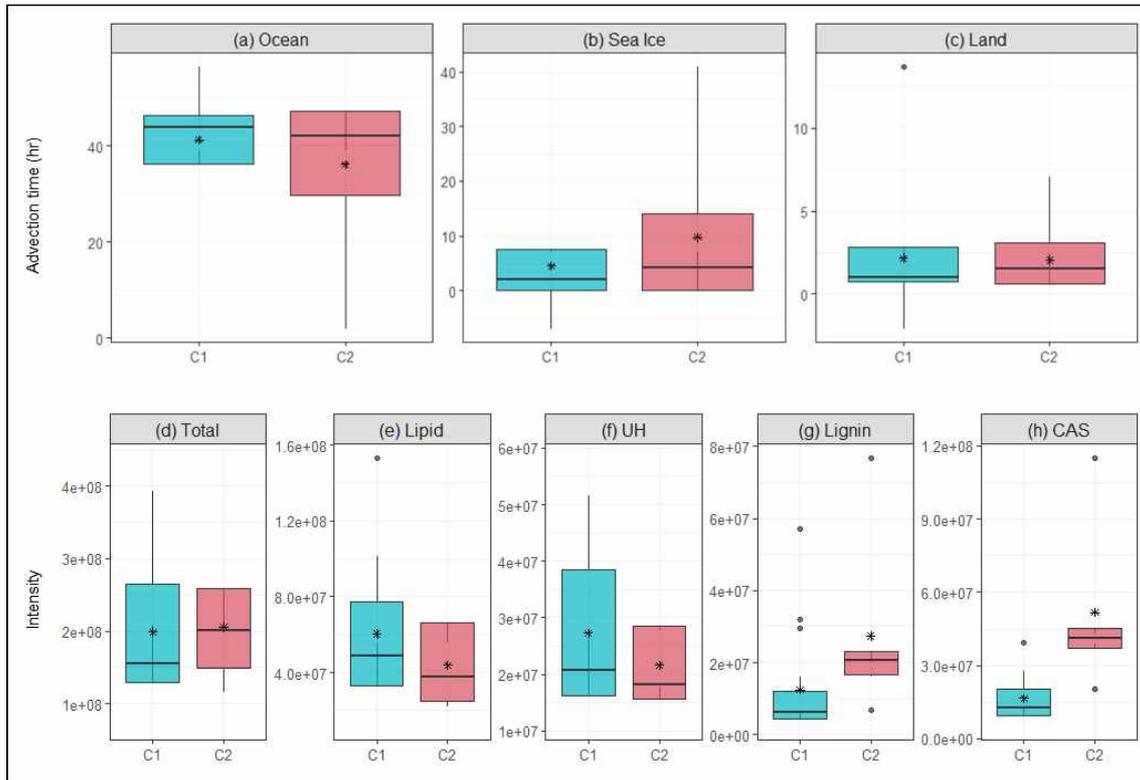


Fig. 3.5.9. C1과 C2 group 대기 시료들의 (a~c) 공기과 체류시간 비교 및 (d~h) 유기물 복잡구조 비교

○ 남극 세종기지에서 확보한 대기 에어로졸의 기원을 추적하기 위해 인근 해양 (open ocean: Bransfield Strait, coast: Maxwell Bay) 및 육상 환경 (Melted Ice, Melted Snow) 샘플들의 유기물 특성을 비교/분석하였다. 결과적으로, 에어로졸 C1 group은 open seawater와 유사한 유기물 성분 비율을 보였으며, 에어로졸 C2 group은 coastal seawater, melted ice, melted snow의 유기물 성분 비율과 유사하게 나타났다. 에어로졸 C1 group과 open seawater에서 높게 나타난 lipid 유사 성분은 미생물 등 높은 생산성과 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 또한, 에어로졸 C2 group 및 coastal seawater, melted ice, melted snow에서 우점했던 lignin 유사와 CAS 유사 성분들은 육지나 해빙의 식물성 유기물의 유입과 관련하여 보고된 바 있다. 따라서, 해양에서 기원한 기단은 생물학적으로 구동되는 유형의 유기 에어로졸 (lipid 유사 에어로졸)을 동반할 가능성이 더 크며, lignin 유사 및 CAS 유사 유기 에어로졸은 육지 및 해빙과 같은 지역에서 생성된 기단과 관련이 있었다.

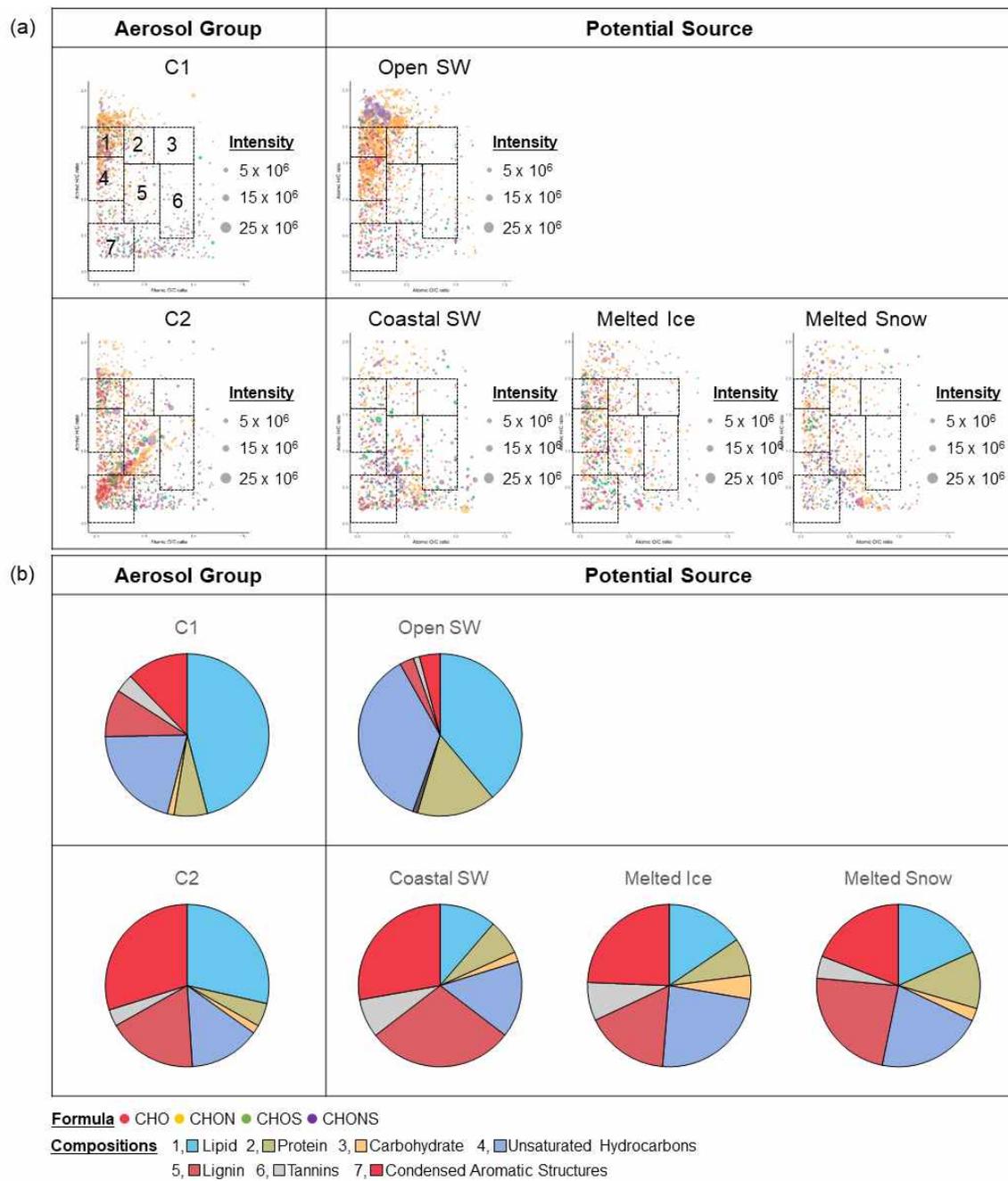


Fig. 3.5.10. 에어로졸의 유기물 기원지 파악을 위한 해양, 육지 시료의 유기물 분석 결과: (a) Van Krevelen diagram, (b) 주요 유기물 성분 비율

나. 아라온 기반 남극 해빙, 육빙 기원 물리화학 특성 관측을 통한 대기 에어로졸 기원 파악

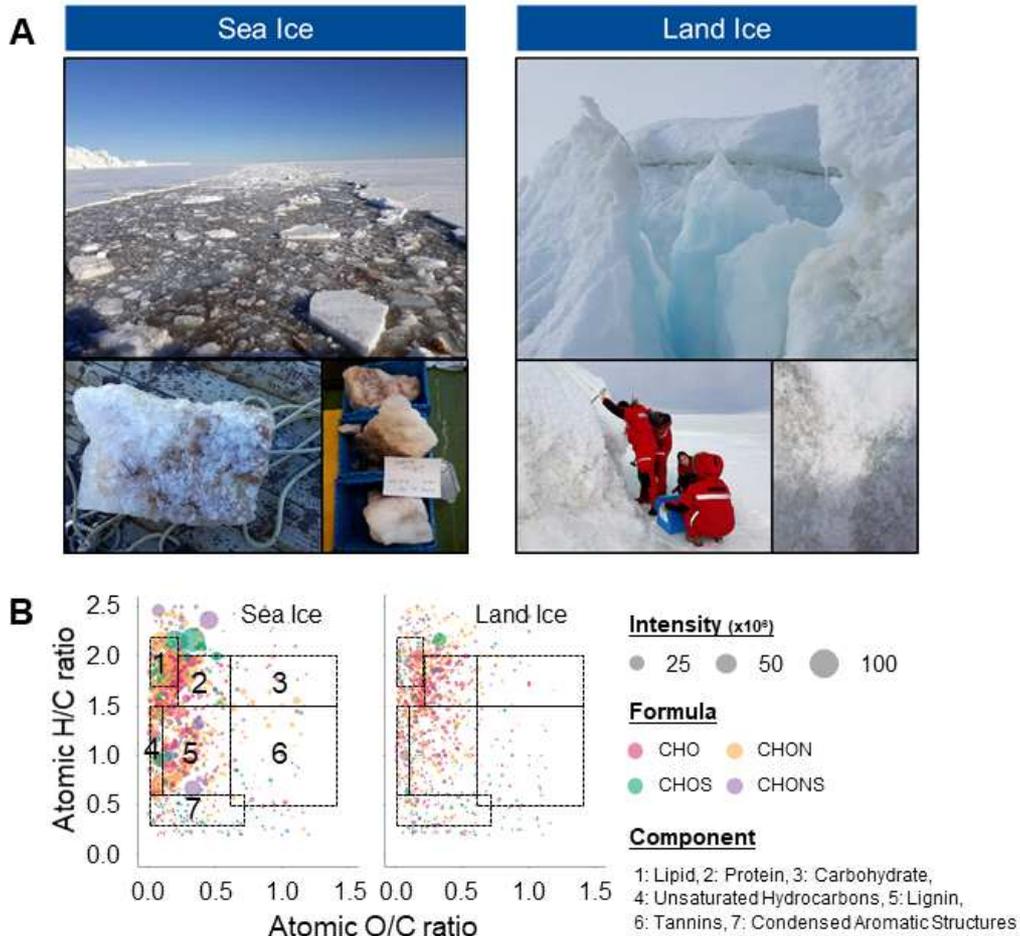


Fig. 3.5.11. (A) 남극 로스해와 장보고 기지 주변에서 채취한 해빙과 육빙 시료, (B) 해빙과 육빙 유기물의 van Krevelen diagram

- Orbitrap-MS를 이용하여 2019년 12월 남극 로스해와 장보고 기지 주변에서 채취한 해빙 및 육빙 유기물의 화학적 특성을 분자 수준에서 정밀 분석하였다. 해빙과 육빙 유기물 모두 H/C 0.6-2.2와 O/C ≤ 0.2 유의미하게 풍부하게 나타났는데, van Krevelen diagram에서 해당 유기물은 주로 lipid 유사 성분에 할당된다. 이러한 lipid 유사 성분의 기원은 1) 미생물, 2) 크릴새우, 3) 대기 퇴적물로 추정된다. 로스해는 남극에서 생물학적으로 가장 활발한 지역으로, lipid 유사 성분에 해당하는 van Krevelen diagram의 영역은 해빙에 녹조 및/또는 미생물이 활발히 존재하는 기존 연구들의 유기물 특성과 일치하였다. 다음으로 크릴새우는 남극해에 서식하며 플랑크톤을 소비하고 지질 형태로 저장하는 종이다. 크릴 지질은 여름과 초겨울

사이에 최대 10배까지 증가하는 것으로 보고되고 있어, 해빙 내 지질 함량의 기원으로 추정된다. 마지막으로, 지질이 대기 퇴적의 결과일 가능성을 제시할 수 있다. 태평양의 육상 식물의 지질학적 분포에 관한 이전 연구는 육상 식물의 OM이 인근 대륙에서 먼바다 환경으로 쉽게 이동된다는 것을 입증했다. 본 연구 결과는 해양과 대기 에어로졸의 유기물 분석 결과와 비교 분석에 활용될 수 있으며, 해빙과 육빙이 존재하는 북극과 남극 지역을 포함한 전 세계 해양의 유기물 분포를 탐색하고 에어로졸의 유기물에 미치는 영향을 파악하는 데 기여할 것이다.

3.5.3 생물 기원 에어로졸 전구물질 분석기술개발

가. 해양생물 장기 연속 배양 및 저농도 냉각 가스 자동 분석 시스템 개발

- 해양생물에 의한 냉각 가스 발생량을 정량적으로 분석하기 위하여 해양 미세조류를 안정적으로 장기간 배양하고, 동시에 미세조류에 의해 만들어지는 생물 기원 냉각 가스를 주기적으로 자동 분석하는 시스템을 개발하였다. 일반적으로 해양 미세조류는 성장 과정에서 지연기(lag phase), 지수성장기(exponential phase), 정지기 (stationary phase), 그리고 쇠퇴기(decline phase)를 거치며 성장 과정에서 다양한 휘발성유기화합물(volatile organic compounds)을 합성한다. 성장 과정에서 미세조류가 만들어내는 휘발성 유기화합물은 성장 단계에 따라 발생하는 화학성분 및 발생량이 큰 차이를 보이는데, 관련 분석을 위해서는 미세조류의 성장 조건을 연구 목적에 맞게 유지시켜 주는 것이 중요하다. 이에 따라, 전자식 유량 제어장치와 자동화 프로그램을 통해 배양조의 미세조류가 지수 성장에 적합하도록 배양 조건(영양염류, 광량, pH, 미세조류 밀도)을 일정하게 유지시켜 줄 수 있는 장치를 설계하였다. 먼저 해양생물 장기 연속 배양 시스템의 경우 2개의 연동펌프 동작을 통해 주기적으로 배양조 내의 시료가 희석조의 해수로 희석되며, 전자저울을 통해 한계수위 및 최소수위 수준을 유지시켜 준다. 이는 자동화 프로그램을 통해 초단위로 제어가 가능하여 미세조류의 지속 성장이 가능한 환경을 조성한다. 다음으로 저농도 냉각 가스 자동 분석 시스템에서는 주기적으로 이산화탄소를 포함하는 가스를 배양조 내부로 주입시켜 pH를 일정 수준으로 유지시켜주고, 배양조 내부에서 발생한 휘발성 유기화합물을 이온 선택형 질량분석기로 전달한다. 결과적으로 다음과 같은 일련의 과정을 통해 해양생물 장기 연속 배양 및 저농도 냉각 가스 자동 분석 시스템은

배양조에서 발생하는 미세조류 기원 휘발성 유기화합물을 별도의 전처리 작업 없이 이온 선택형 질량분석기(SIFT-MS)를 통해 사용자가 필요로 하는 시간에 자동/연속 분석할 수 있다.

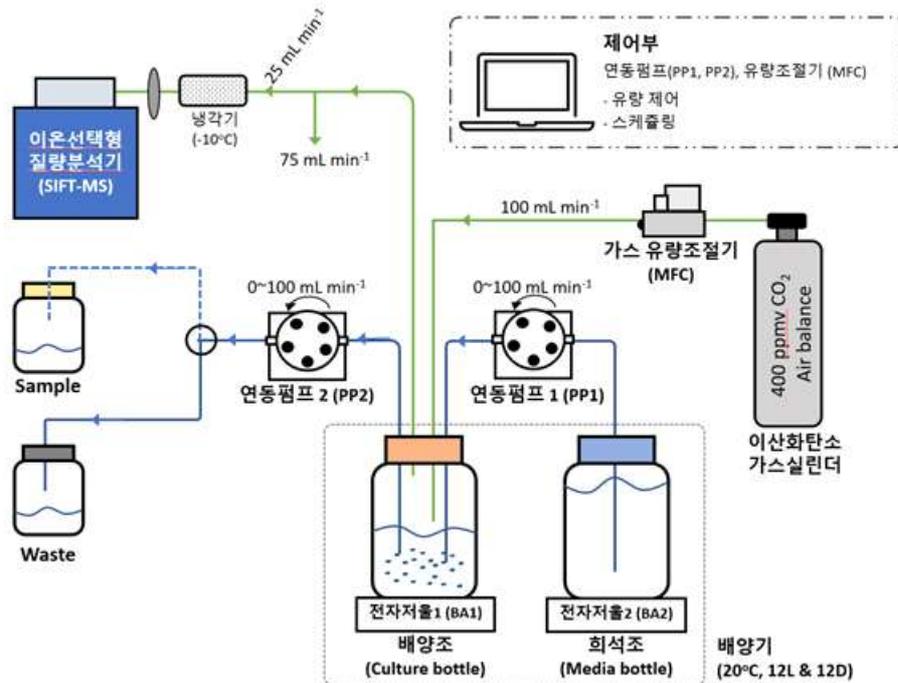


Fig. 3.5.12. 해양 미세조류 장기 배양 및 생물 기원 휘발성유기화합물 분석 장치 모식도

- 해양 미세조류 장기 배양 및 생물 기원 휘발성유기화합물 분석 장치의 성능 검증을 위하여 와편모류의 일종인 '*Oxyrrhis marina* (LIMS-PS-2690)'를 이용하여 장기 연속 배양 과정에서 발생하는 휘발성 유기화합물을 주기적으로 자동 분석이 수행되었다. 이 과정에서 영양염이 포함된 500mL의 해수를 담은 배양조에 대상 미세조류를 최초 접종 후, 지수생장기에 이르렀을 때 유량 제어장치, 자동화 프로그램 등을 이용하여 희석조의 해수로 배양조를 희석시켜 주었다. 그 결과 실험 기간 동안 배양조 내의 셀 농도가 20,000 - 50,000 mL⁻¹ 수준으로 유지되었으며, 이를 통해 개발된 분석 시스템이 해양 미세조류가 지속적으로 성장이 가능한 환경을 조성해줄 수 있다는 사실을 검증하였다. 동시에 이온 선택형 질량분석기로 DMS를 포함한 다양한 휘발성유기화합물 18종에 대한 정량 분석을 수행함으로써 사용자가 원하는 시기에 연속/자동 분석이 가능한 것을 확인하였다.

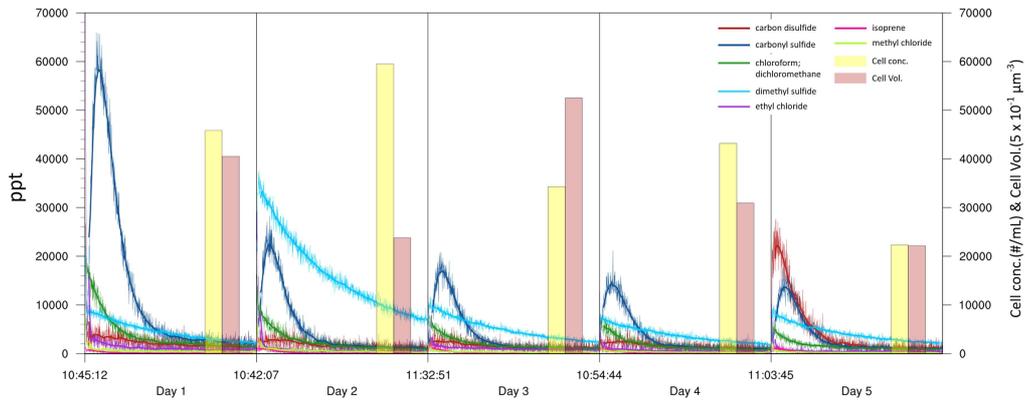


Fig. 3.5.13. 개발한 장치를 이용한 *Oxyrrhis marina* 연속 배양 및 휘발성유기화합물 분석 그래프

나. 해양생물 배양을 통한 생물 기원 가스 발생 모사 실험

- 기구축한 해양 미세조류 배양 장치 및 용존 가스 분석이 가능한 이온 선택형 질량분석기 시스템을 활용하여 미국 NCMA 및 한국 해양시료도서관을 통해 확보한 9종의 해양 미세조류(이하 도표 참조)가 성장 과정에서 만들어내는 18가지(1,4-dichlorobenzene, bromoform, carbon disulfide, chlorobenzene, chloroform, dimethyl sulfide, dimethyl sulfoxide, ethyl chloride, ethyl iodide, iodine, isoprene, methyl chloride, tetrachloroethylene, trichloroethylene)의 기후 가스 발생량을 분석하였다.

Table 3.5.2. 생물기원가스 분석에 활용한 해양 미세조류 리스트

0.Species	Class	Strain number
<i>Amphidinium carterae</i>	Dinophyceae	KMMCC-550
<i>Amphidinium carterae</i>	Dinophyceae	KMMCC-551
<i>Oxyrrhis marina</i>	Dinophyceae	LIMS-PS-2690
<i>Fragilaria cylindrus</i> (Grunow) Krieger	Bacillariophyceae	CCMP1430
<i>Porosira glacialis</i>	Mediophyceae	CCMP-664
<i>Emiliana huxleyi</i>	Prymnesiophyceae	CCMP-374
<i>Emiliana huxleyi</i>	Prymnesiophyceae	CCMP-373
<i>Prymnesium parvum</i>	Prymnesiophyceae	LIMS-PS-2122
<i>Isochrysis_cf</i> sp	Prymnesiophyceae	CCMP-355

- 자체 제작한 미세조류 기원 용존 가스 추출장치를 이온 선택형 질량분석기와 연계 활용하여 수 mL 해수에 용존해 있는 기후 가스들을 nM 수준으로 정밀하게 분석할 수 있다. 이때, 주요 대상 기후 가스별 검출한계 (해수량 10mL 기준)는 아래 표와 같다.

Table 3.5.3. 이온 선택형 질량분석기를 활용한 주요 생물 기원 가스 성분 검출한계

VOCs	Mixing ratio (pptv)	LOD (nM)
1,4-dichlorobenzene	13.6	0.2
bromoform	33.4	0.4
carbon disulfide	426.8	5.3
chlorobenzene	164.1	2.0
chloroform	413.5	5.1
dimethyl sulfide	36.0	0.4
dimethyl sulfoxide	35.4	0.4
ethyl chloride	147.1	1.8
ethyl iodide	56.3	0.7
iodine	37.0	0.5
isoprene	52.0	0.6
methyl chloride	76.7	0.9
tetrachloroethylene	121.8	1.5
trichloroethylene	94.0	1.2

○ 실험 결과 대상 종별 성장 과정에서 만들어내는 생물 기원 가스의 농도 및 주요 성분은 큰 차이를 나타내었으며, 같은 종(species)에 속하는 미세조류일지라도 성장 단계 및 strain number에 따라 성장 과정에서 만들어지는 기후 가스의 종류와 농도가 상이한 것으로 나타났다. 극지역의 대표적인 우점종 중 하나인 *Emiliana huxleyi*의 경우 성장 과정에서 methyl chloride와 dimethyl sulfide 성분을 가장 많이 배출하였다.

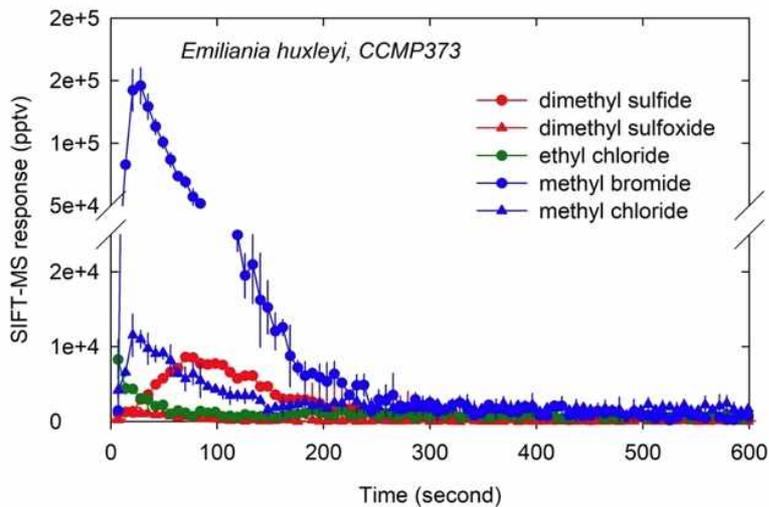


Fig. 3.5.14. *Emiliana huxleyi* CCMP 373 생물 기원 기후 가스 분석 결과

Table 3.5.4. 해양 미세조류 성장 과정에서 발생한 주요 생물 기원 기후 가스 농도

Species	Emiliana huxleyi	Amphidiniu m carterae	Prymnesium parvum	Oxyrrhis marina	Amphidiniu m carterae	Fragilaria cylindrus (Grunow) Krieger	Emiliana huxleyi 374	Isochrysis_cf sp	Porosira glacialis
Strain number	Emiliana huxleyi	KMMCC-550	LIMS-PS-2122	LIMS-PS-2690	KMMCC-551	CCMP1430	CCMP-374	CCMP-355	CCMP-664
Concentration (nmol L ⁻¹)	avg	avg	avg	avg	avg	avg	avg	avg	avg
1,4-dichlorobenzene	C6H4Cl2			0.4		0.7	1.0	1.0	1.7
2-iodopropane bromoform	2-C3H7I CHBr3			1.6		0.8	1.5	1.3	4.0
carbon disulfide	CS2		18.2	472.0	19.0	15.1	8.8	7.6	16.2
carbonyl sulfide	COS			35.8					
chlorobenzene	C6H5Cl			4.3		7.0	6.8	6.6	8.0
1,1-dichloroethane	CHCl3		7.1	9.2	13.1	6.8	36.2	23.4	51.0
dimethyl sulfide	C2H6S	34.8	60.4	260.8	53.7	223.9	1.5	43.9	47.2
dimethyl sulfoxide	C2H6OS	3.0			2.0				
ethyl chloride	C2H5Cl	17.8	23.5	29.5	37.8	24.4	28.1	24.0	24.8
ethyl iodide	C2H5I						1.7	2.5	2.2
iodine	I2								0.7
isoprene	C5H8						1.1	2.1	1.4
methyl bromide	CH3Br	275.2			20.5		16.5	16.3	
methyl chloride	CH3Cl	47.8	5.3	8.2	5.7	6.5	3.9	4.9	5.0
methyl iodide	CH3I			11.2	14.8		22.3	27.7	26.0
tetrachloroethylene	C2Cl4						2.8	2.9	2.3
trichloroethylene	C2HCl3				2.2		3.1	3.5	2.7

- 기후 변화로 인한 해양 수온 상승으로부터 야기된 해양 성층화 및 해빙 두께 감소 등의 환경변화는 해양 및 빙설 미세조류를 성장 과정에서 보다 높은 광량에 노출시킬 수 있다. 이에 따라, 자체 개발된 해양생물 장기 연속 배양 및 저농도 냉각 가스 자동 분석 시스템을 바탕으로 광량 변화에 따른 해양 미세조류의 DMS 생산 능력 변화를 살펴보았다. 여기서 미세조류가 만들어내는 DMS는 체내에서 항산화 물질로 사용되며, 외부 요인에 의한 스트레스 발생 시 발생량이 증가하는 것으로 알려져 있다. 외부 광량 증가가 해양 미세조류의 DMS, DMSP (DMS의 전구물질), 그리고 DMS 효소 활성도 (DMSP lyase activity)에 미치는 영향을 살펴보기 위해 3종류의 와편모조류 (*Heterocapsa triquetra*, *Scrippsiella trochoidea*, *Oxyrrhis marina*)를 각각 낮은 광량 (Low light (LL), 213 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 적당한 광량 (moderate light (ML), 1,050 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), 높은 광량 (high light (HL), 2,200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)에서 각각 12일, 26일, 12일 동안 성장시키며, 동시에 약 2~4일 간격으로 cell count, DMS, DMSP, DLA, chlorophyll-a, photo-protective pigment diadinoxanthin)를 분석하였다. 여기서 실험에 사용된 미세조류 중 *Heterocapsa triquetra* (H.tri)는 체내 DMSP, DLA가 모두 높은 종이며, *Scrippsiella trochoidea* (S.tro)는 체내 DMSP 농도는 H.tri와 유사하게 높지만, DLA는 H.tri에 비해 약 1,000배가량 낮다는 특징이 있다. 반면에, *Oxyrrhis marina* (O.mar)는 체내 DMSP, DLA가 모두 낮은 종으로 알려져 있다. 먼저 성장률의 경우 위 실험 기간 동안 3종 모두 광량 부족 또는 과잉으로

인한 성장 저해 현상이 관측되지는 않았지만, 적당한 광량 조건 (moderate light, ML)에서 가장 높은 성장률을 나타내었다.

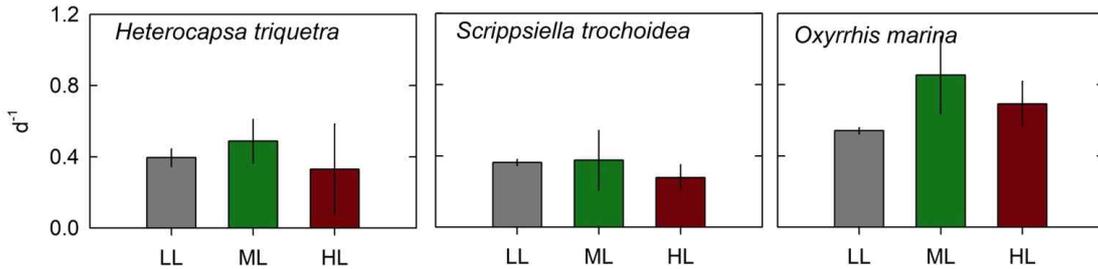


Fig. 3.5.15. 광량 차이에 따른 실험 대상 종의 성장률 (growth rate) 차이

- 다음으로, 실험 종별로 광량 차이에 따른 DMS, DMSP, DLA, photo-protective pigment의 정량적 변화를 비교하기 위하여 각 성분을 chlorophyll 농도로 정규화하였다. 그 결과 종별로 광량 변화에 따른 각 성분의 발생량이 현격한 차이를 보인다는 것을 확인할 수 있었다. 세부적으로, 체내 DMSP 성분 및 DMS 효소 활성도가 높은 H.tri는 광량 증가에 따라 체내 DMSP와 DLA가 약 10배가량 증가한 반면에 photo-protective pigment(diadinoxanthin)는 증가하지 않았다. 유사하게, S.tro는 광량이 증가함에 따라서 체내 DMSP와 DLA가 크게 증가하였으며, H.tri와는 달리 photo-protective pigment(diadinoxanthin)도 최대 30%가량 증가하였다. 이같은 현상은 H.tri와 비교하여 S.tro의 DLA 값이 약 1,000배가량 낮기 때문에, DMS 이외에 광 스트레스 저해를 위한 추가적인 diadinoxanthin의 역할이 필요했기 때문으로 사료되었다. 마지막으로, O.mar는 다른 종들과 비교하여 실험 기간 동안 가장 높은 성장률을 나타내었다. 해당 실험 종의 경우 광량 변화에 따라 DMS 발생량과 체내 DMSP 농도 및 DLA 성분의 뚜렷한 변화를 나타내지 않았으며, 다른 두 종에 비해 현격히 낮은 수준으로 확인되었다. 하지만, 높은 광량 조건 하에서 photo-protective pigment (diadinoxanthin)의 급격한 증가가 확인되었다. 다음과 같은 결과를 종합적으로 고려했을 때, DMS 생산 능력이 월등히 높은 종 (즉, H.tri)의 경우 외부의 광량 변화 자극에 대해 DMS 성분 생산 능력 강화를 통한 항산화 능력 증대를 유도한 반면, DMS 생산 능력이 상대적으로 낮은 종 (즉, O.mar)은 DMS 발생을 통한 스트레스 능력이 불가하기에 DMS를 대체할 수 있는 diadinoxanthin과 같은 photo-protective pigment 형성을 통해 광 스트레스를 극복하는 것으로 판단되었다. 특히 극지역에 주로 서식하는 미세조류들은 타 지역의 미세조류들에

비해 강한 UV 환경에 노출되기 때문에 DMS 및 DMSP 발생량이 높은 것으로 알려져 있다. 따라서, 지구온난화로 인한 지속적인 광량의 증가는 극지역에 서식하는 해양 및 빙설 미세조류로부터 기인한 DMS 발생량을 증가시킬 수 있다.

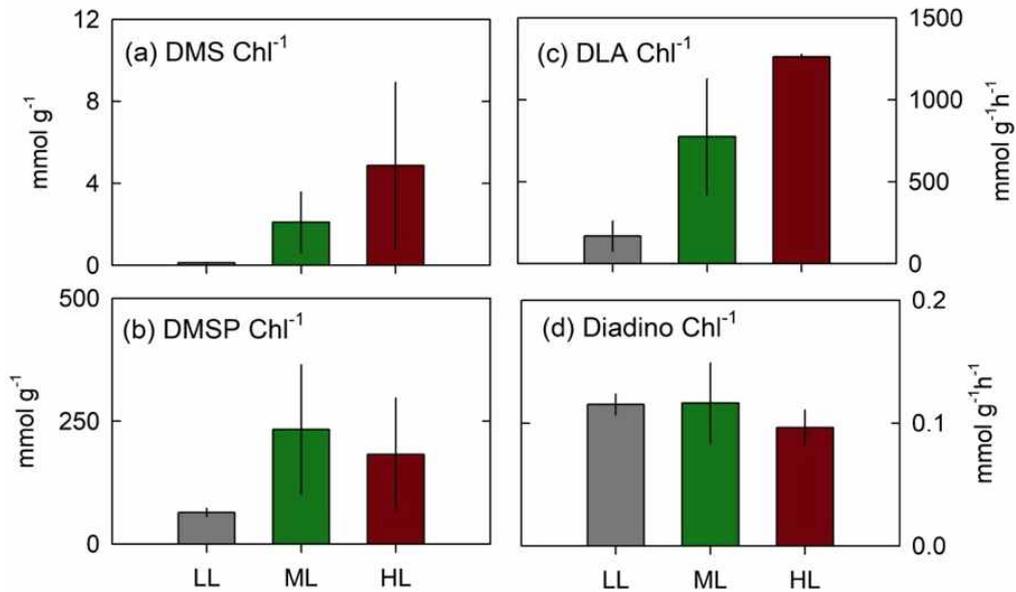


Fig. 3.5.16. 광량 변화에 따른 *Scrippsiella trochoidea*의 DMS, DMSP, DLA, diadinoxanthin 성분 변화

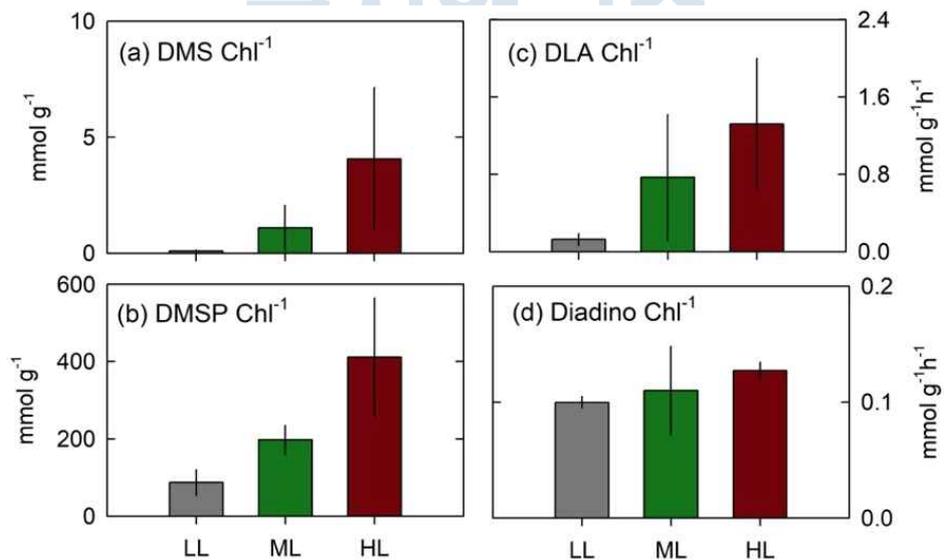


Fig. 3.5.17. 광량 변화에 따른 *Heterocapsa triquetra*의 DMS, DMSP, DLA, diadinoxanthin 성분 변화

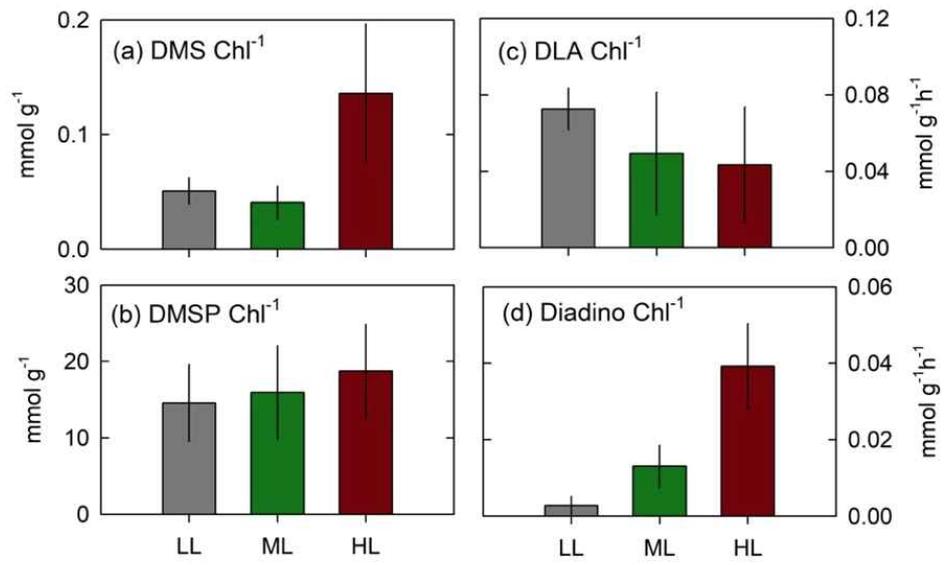


Fig. 3.5.18. 광량 변화에 따른 *Oxyrrhis marina*의 DMS, DMSP, DLA, diadinoxanthin 성분 변화





제 4 장 연구개발
목표 달성도 및
대외 기여도



제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 대외 기여도

4.1 연구개발 목표 및 달성도

4.1.1 1단계 핵심요약 및 총괄 달성도 평가

○ 1단계 성과 핵심 요약

- 남극의 강풍, 저온, 폭설 사례 분석 및 수치적 재현 완료
- 수치모델을 이용한 남극 세종기지 강풍 사례 원인 분석
- 남극 성층권 오존농도의 변동 특성 파악 및 추세 분석 (장보고기지 오존 농도 관측 자료 활용)
- 관측에서 얻어진 라돈농도의 계절 분포를 수치모델을 활용하여 원인 파악
- 남반구 고위도 기후 변동성 진단 (동서남극 기후변화에서 기후 변동성의 역할 파악)
- 남극 해빙 농도 증가 원인 규명
- 에어로졸 물리특성(입자수농도, 구름응결핵, 블랙카본 등) 시계열 변화 DB 구축
- 에어로졸 발생 모사실험을 통한 극지 해양-육상 기원 에어로졸 형성 기작 파악

○ 달성도 평가

- 1단계는 정성적으로 남극의 기후변화와 해빙증가의 원인, 그리고 세종기지 에어로졸의 기원지를 파악하였고 관련 연구결과를 Science Advances, Nature Climate Change, ERL, Science of the Total Environment 등 국외 우수 저널에 극지연구소의 연구 결과를 보고함으로써 남극 기후변화 연구에서 극지연구소의 우수성을 알리는데 선도적 역할을 했음.

4.1.2 연차별 연구개발 목표 및 달성도

구분	연구목표 달성내용				계획대비 연구실적 달성율(B) (%)
	세부연구목표	연구내용	가중치 (A)	달성실적	
1년차 기후 (2020)	1. 남극의 극한기상 특성 진단	남극기지 관측자료 기반 극한기상 기준 결정 및 사 례 선정	0.2	- 세종기지 강풍, 저온, 강수 분포도 분석 - 세종기지 대표 강풍 사례들 선정	100
		극한기상 수치모의를 위한 수치모델 설치		- 극한기상 사례의 수치모의를 위한 수치모델 설치 및 세팅 완료 - 강풍 사례에 대한 수치모의 수행 및 모의결과 분석 완료	
		극한기상 특성 분석을 위 한 기초자료 확보		- 수치모델링결과, ERA5 등 재분석 자료, 기지 관측자료 확보	
	2. 남극 성층권 오존 및 지상 라돈 농도 시공간 변동 특성 과악	남극 기지기반 성층권 오 존 농도 변동 및 순환 특 성 분석	0.2	남극기지 오존 전망 관측 및 특징 분석 위성 자료는 하부 성층권에서 경도 방향 오존량의 차이가 가장 큼을 보여줌 장보고기지 상공 오존홀은 강도가 약해 세종기지에 비해 월평균 농도 가 낮지 않음	100
		남극 기지 라돈 농도 관측 및 세종기지 라돈농도 계 절변동성 재현 모델 민감 도 과악		- ~95%(세종)와 ~88%(장보고) 한 시간 해상도 라돈농도 관측 (2차: 72/97%, 3차: 84/97%) - CAM-Chem 모델은 세종기지 고 농도 라돈 사례의 영향을 받는 월 평균 라돈가스의 농도 변동성을 성 공적으로 모의	
3. 남극 및 남반구 고위도 기후변동성 진단	남극 지역 장기 기후자료 수집	0.3	- 대기 재분석자료, 해수면온도 자 료, 지상관측소 자료, 프록시 자료, 과거 기후 수치재현자료 조사 및 수집	100	
	남극 지역 기후변동성 등 기후 변화 요소 분석		- 남극 지면온도, 남반구 대류권 및 성층권 주요 변동모드 추출 및 특 성 조사 - 남극 지면온도 변동 모드에 기초 한 남극지면온도 변화에 대한 변동 지수 개발 - 마지막최대빙하기 대기순환 특성 조사 및 프록시 자료 분포 특성 조 사 - 마지막최대빙하기 수치재현 실험 수행 및 강수특성 조사 및 프록시 특성과 비교 - 웨델해 지역 해빙 변화와 다양한 기후변동 모드와의 관계 모식도 작 성		
4. 관련 논문	SCI(E) 논문	0.3	- mrmIF 50-80 논문 1편 - mrmIF 80이상 논문 1편	100	
	계	1.0		100	

1년차 에어 로졸 (2020)	1. 세종기지 기반 에어로졸 현장 관측 DB 구축	에어로졸 물리특성 시계열 변화	0.35	- 세종기지 기반 에어로졸 입자 수 농도, 입자크기분포, 블랙카본 농도 변화 DB 구축 - KPDC 등록 완료 (3건)	100
		에어로졸 화학특성 시계열 변화		- 세종기지 기반 대기 DMS 농도 변화 DB 구축 - KPDC 등록 완료 (1건)	
	2. 극지 해양 유기물과 에어로졸 물리특성 상관성 규명	극지해양기원 유기에어로 졸 발생 모사 실험 수행	0.25	- 남극 세종과학기지 인근 연안에서 확보한 해수시료 이용한 에어로졸 발생 모사 실험 완료 및 DB 구축 - KPDC 등록 완료 (1건)	100
	3. 해양 유기물 초정밀 화학특성 분석	남극해 해양유기물 특성 분석	0.20	- 오비트랩 질량분석기 및 현광분광 계를 활용하여 세종과학기지 인근 해수 용존 유기물 분자구조 특성 분석 완료 및 DB 구축 - KPDC 등록 완료 (10건)	100
	4. 논문	mrnIF 80 이상 논문	0.20	- mrnIF 80 이상 3건 게재 완료 1) Frontiers in Marine Science 1 건 (mrnIF: 88.785; 1저자, 교신저자) 2) Atmospheric Chemistry and Physics 1건 (mrnIF: 91.765, 1저자, 교신저자) 3) Progress in Oceanography 1 건 (mrnIF: 89.231, 2저자)	100
계		1.0		100	
2년차 (2021)	1. 남극의 극한기상 특성 진단	선정된 극한기상 사례에 대해 수치모의 수행	0.05	- 저온 사례에 대해 고해상도 수치 모델링 수행 완료 - 강풍, 저온 사례에 대해 민감도 실험 수행 완료	100
		관측 자료와 수치모의 결 과를 이용하여 남극기지 극한기상 종류별 특성 분 석	0.05	- 강풍, 저온, 폭설 사례에 대한 발 생특성 통계분석 실시 - 세종기지 관측 자료, ERA5 재분 석자료, 수치모델링 결과를 이용하 여 강풍, 저온 사례의 특성 분석 완 료	
	2. 남극 성층권 오존 및 지상 라돈 농도 시공간 변동 특성 파악	남극 기지기반 성층권 오 존 농도 변동의 수평, 수직 방향 차이에 대한 원인 규 명	0.05	- 5개 극궤도 위성 오존 전량을 지 상 자료와 비교하여 동/서남극 결 과 차이 확인 - 3개 위성의 오존연직분포 자료 활 용하여 어느 고도에서 장보고기지 오존자료와 가장 큰 차이를 보이는 지 확인	100
		남극 기지 대기 라돈 농도 시공간 변동 특성 비교	0.05	- 장보고기지에서 월별 중간 라돈 농도 값은 세종기지 보다 10배 높 음 - 장보고기지와 세종기지에서 고농도 는 하계(극지 영향) 및 동계(수송 영향)에 나타남	
3. 남극 및 남반구 고위도 기후변동성 진단	관측 자료, 수치모델 실험, 머신러닝 활용 남극지 역 지상온도 복원	0.05	- READER 관측 자료와 재분석자료 의 특성을 조사하고 Kriging 내삽 방안에 기계학습 방안을 접목한 방 안 개발	100	

				- 확보된 기지 관측 자료와 ERA - Interim 자료를 활용한 최근 40년간의 월평균 남극 지면온도 복원 자료 생산	
		장기 기후 자료와 수치모델 실험을 통한 남극 및 남반구 고위도 지역 기후 변동성간 상관성 규명 및 메커니즘 진단	0.15	- 남극 성층권 오존의 남극지면변동 모드, 남극 진동 등 다양한 기후변동 모드와의 상관선 분석을 통한 관계 분포 모식도 작성 - 로스해 지역 해빙 변화와 다양한 기후변동 모드와의 관계 분포 모식도 작성	
4. 남극 대기 에어로졸 현장 관측	- 세종기지 장기 입자 수농도 크기 분포의 구름응결핵 활성화 특성 연구 수행 - 에어로졸 유기화학 특성 정밀 분석	0.15	- 현장 관측 자료 DB 구축 - KPDC 등록 완료 (3건)	100	
	아라온 기반 남극 대기 에어로졸 물리화학 특성 관측	0.05	- 현장 관측 자료 DB 구축 - DC 등록 완료 (1건)		
5. 남극 에어로졸 발생 프로세스 파악	에어로졸 모사 챔버 실험을 통한 육상기원 유기물과 일차 에어로졸 간의 상관성 파악	0.1	- 모사실험 완료 및 실험결과 DB 구축 - KPDC 등록 완료 (1건)	100	
	초고분해능 질량분석기를 통한 극지 용설수 유기물 화학특성 분석	0.05	- 오비트랩 질량분석기를 용설수 분자구조 특성 분석 완료 및 DB 구축 - KPDC 등록 완료 (10건)	100	
	생물기원 냉각가스 분석 기술 개발	0.05	- 장치 개발 완료 - 특허 출원 완료 (1건)	100	
논문	mrnIF 80 이상 논문	0.2	- Science of the Total Environment 1건 게재 완료 (mrnIF: 91.209)	100	
계		1.0		100	
3년차 (2022)	1. 남극의 극한기상 특성 진단	관측과 수치모의의 결과를 이용하여 분석한 극한기상 종류별 특성을 선행연구 결과와 비교	0.05	- 폭설 사례에 대해 고해상도 수치모의 수행 완료 - 합성장 분석을 통해 폭설 사례의 특성 분석 완료 - 강풍, 저온, 폭설 사례의 특성을 선행연구 결과와 비교	100
		남극기지 극한기상 종류별 개념모델 제시	0.05	- SOM 클러스터링 기법에 기반한 극한기상 종류별 개념모델 제시 완료	
	2. 남극 성층권 오존 및 지상 라돈 농도 시공간 변동 특성 파악	남극 기지기반 성층권 오존 농도 변동과 대기 순환 관계 파악	0.05	- 고도에 따른 오존 농도와 기온의 상관성이 달라지며, 계절에 따라 대조가 차이가 남. - OMI와 같은 Nadir-viewing 위성 자료의 품질이 기대 이상으로 좋음. - 대류권계면 높이 추정기 사용 방법에 따라 차이가 나는 원인은 성층권 오존의 대류권 침투로 보이며, 추가적인 연구가 필요함.	100
		남극 기지 라돈가스 농도에 따른 계절별 주요 대기 수송경로 파악	0.05	- HYSPLIT 모델링 이용 고농도 사례 조사하였음. - 장보고기지에서는 가을철을 제외하면 10%이상이	

			남극중단산맥을 통과함. - 세종기지의 경우 배출 강도가 높은 남미 대륙의 영향을 받음.	
3. 남극 및 남반구 고위도 기후변동성 진단	관측 자료, 수치모델 실험, 머신러닝 활용 남극지역 지상온도 복원	0.05	- READER 관측 자료와 재분석자료의 특성을 조사하고 Kriging 내삽 방안에 기계학습 방안을 접목한 방안 개발 - 확보된 기지 관측자료와 ERA-Interim 자료를 활용하여 1961년부터 2020년까지의 지상온도 복원 완료	100
	장기 기후 자료와 수치모델 실험을 통한 남극 및 남반구 고위도 지역 기후변동성간 상관성 규명 및 메커니즘 진단	0.1	- 태양상수 변동에 따른 남극지면변동 모드, 남극 진동 등 다양한 기후변동 모드와의 상관성 분석을 통한 관계 분포 모식도 작성 - 남극 전지역 해빙 변화와 다양한 기후변동 모드와의 관계 분포 모식도 작성	
4. 남극 대기 에어로졸 현장 관측	세종기지 기반 에어로졸 물리화학 특성 관측	0.05	현장 관측 자료 DB 구축 - KPDC 등록 완료 (5건)	100
	아라온 기반 에어로졸 물리화학 특성 관측	0.05	현장 관측 자료 DB 구축 - KPDC 등록 완료 (3건)	
	국제공동연구를 통한 남극 에어로졸 흡습성 변화	0.07	에어로졸 흡습성 자료 분석 및 DB 구축 - KPDC 등록 완료 (1건)	
5. 남극 에어로졸 발생 프로세스 파악	해양 생물 배양을 통한 생물기원 가스 발생 모사 실험	0.08	- 배양실험 완료 - KPDC 등록 완료 (1건)	100
	환경요인 변화에 의한 기후 가스 발생 변화 모사 실험	0.05	- 모사실험 완료 - KPDC 등록 완료 (1건)	
	해빙 유기물 특성 분석	0.05	극지시료 분석 완료 - KPDC 등록 완료 (10건)	
관련 논문	mrnIF 80 이상 논문	0.2	- 4건 완료	100
	mrnIF 40 이상 ~ 80 미만 논문	0.05	- 1건 완료	
	mrnIF 40 이상 ~ 80 미만 논문	0.05	- 1건 완료	
계		1		100

[2020년 종합 평가]

- 동서남극 온난화 비대칭성 원인 최초 규명
 - 동남극의 빙하가 모두 녹으면 상승하는 해수면 높이는 53미터이며, 서남극의 경우 6미터로 알려
 - 미래 예측 결과, 지구의 온도가 계속 올라가면 동남극의 온난화 조절능력은 한계에 부딪히고, 동남극도 급격한 온난화를 겪는 것으로 예상됨
 - 관련 연구결과 Science Advances 게재 (2020년 6월 13일, IF 13.1 MrnIF 95)

- 남극 성층권 폴라보텍스 약화에 의한 세종기지 주변의 냉각화 기작 최초 규명
 - 기존연구에서는 남극 반도의 냉각화 경향만 제시하였으나 본 연구에서 남극 반도의 냉각화 원인이 성층권 폴라보텍스 약화에 의한 것임을 최초로 제시하였음
 - 관련 연구결과 Environmental Research Letters 게재 (2020년 8월 27일, IF 6.09, MrnIF 90)
- 남극해 용존유기물 분자 구조 특성 규명
 - 남극해의 용존 유기물 특성 (광학적 특성 및 분자 구조 분석)에 대한 정밀한 분석을 통해 남극 반도 지역은 타 지역에 비해 온난화 속도가 빠르게 일어나고 있기 때문에, 이에 따른 남극 moss 기원 유기물의 남극해 유입이 더욱 가속화 될 수 있음 파악
 - 관련 연구결과 Frontiers in Marine Science 게재 (2020년 6월, mrmIF 88.75)
- 세종과학기지 신규 대기구성물질 관측동 구축
 - 신규 대기 관측동을 활용한 향후 남극 대기 관측 프로그램 확장 및 강화

[2020년 세부 도출 내용]

- 1988년 이후 세종기지 기상관측자료에 30년 DB 기반으로 저온 사례의 특성을 통계적으로 분석하였고, 대표적인 저온 사례들에 대해 고해상도 수치모의실험의 검증 자료로 활용해 모델의 저온 사례 모의성능 평가 및 개선방향 도출에 기여하였음
- 세종기지에서 발생한 저온 사례의 특성을 관측자료와 수치모델링결과를 이용하여 분석하고, 저온 사례 재현 분포도를 제시함
- 세종기지에서의 저온 현상은 온도 이류에 의해 남극 내륙의 차가운 공기가 유입된 결과이며, WRF 모형에서 음의 온도 편차가 나타나는 것을 확인함
- 남극 성층권 오존 및 지상 라돈 농도 시공간 변동 특성 파악
 - 성층권 오존이 대류권과 상관성이 높음에 비해 대류권계면과의 상관성이 낮으며, 이는 대류권계면으로의 오존 유입으로 분석됨.
 - 향후 대류권계면 높이에 대한 다양한 방법 적용을 통해 대류권계면 오존 유입에 대한 추가 분석이 필요함을 확인함.
 - 남극과학기지 기반 라돈 농도에 대한 계절별, 지역별 특성을 평가한 결과 서로 다르며(장보고기지에서의 농도가 10배 높음), 농도 분포의 계절 특성 또한 다름.
 - 모델을 활용한 라돈 농도 재현(남극대륙 및 그린란드에서의 라돈 방출 없음)에서

남극대륙 연안의 라돈 방출에 대해 고려가 필요함.

- 남극 대기 에어로졸 물리화학 특성 현장 관측
 - 남극 세종과학기지 기반 에어로졸 물리화학특성(구름응결핵수농도, 블랙카본, 입자수농도 등) 시계열 변화 DB를 구축 (DB 건수 3건)
 - 아라온 기반 에어로졸 물리화학특성(입자수농도) 관측 DB를 구축 (DB 건수 1건)
 - (의의) COVID 19 확산으로 세종과학기지 현장 활동이 제한됨에 따라 월동대원의 도움으로 세종기지 현장 관측 장비 운영을 최적화 하였으며, 아라온 기반 에어로졸 관측 프로그램을 구축
- 남극 에어로졸 발생 프로세스 파악
 - 남극 현장관측자료를 활용한 해양생물기원 나노입자 형성 기작 분석
 - 초고분해능 질량분석기를 활용한 용설수 유기물 분자 특성 분석 완료
 - 생물기원 에어로졸 전구물질 분석기술 개발 및 특허출원(1건) 완료
 - 용설수 유기물 특성 분석자료 (DB 건수 10건)
 - (의의) 세종기지 현장 관측 자료를 활용하여 일년빙 분포와 해양미세조류 기원 DMS 유래 에어로졸 입자 형성의 상관성을 최초로 규명함.

[2021년 종합 평가]

- 미래에 동서남극 기후편차 더욱 가중 될 것으로 전망
 - 남극기온 관측자료 (READR)와 재분석 자료 (ERA-Interim)의 분석결과 현재의 기온변화를 보면 남극반도에서는 온난화가 나타나지만 동남극에서는 냉각화가 나타남.
 - 관련 논문 Geophysical Research Letters 게재 (2021년 6월 29일 게재승인, mrmIF 91.96)
- 장보고기지 지상 브루어 분광광도계 오존전량 관측자료 발표
 - 세종 및 장보고 기지 지상 브루어 분광광도계 오존전량을 이용한 5개 극궤도 위성 오존전량 자료 비교 검증
 - 장보고 기지가 위치한 동남극 지역은 미국 Mcmurdo 기지 이외에 상시 운영 과학기지가 없는 지역이며 특히 오존전량의 상시 관측이 거의 이루어지지 않은 곳이기에 이 지역에서의 실측자료와 위성자료를 비교하는 연구는 높은 가치를 가짐
 - 관련 논문 Remote Sensing 게재 (2021sus 4월, IF 5.349)

- 일년빙과 DMS기원 에어로졸 입자 형성 상관성 규명
 - '18-19, '19-20 남극 하계연구 기간 동안 대기 DMS, 황 화합물, 입자 크기별 수농도 분포에 대한 현장 관측 성공적 수행
 - 남극대기 중 황 에어로졸의 형성원과 관련하여 그동안 간과되어져온 일년빙의 중요성을 제시
 - 관련 논문 Science of The Total Environment 게재 (2021 8월 31일, mrmIF 91.06)

[2021년 세부 도출 내용]

- 1988년 이후 세종기지 기상관측자료에 30년 DB 기반으로 저온 사례의 특성을 통계적으로 분석하였고, 대표적인 저온 사례들에 대해 고해상도 수치모의실험의 검증 자료로 활용해 모델의 저온 사례 모의성능 평가 및 개선방향 도출에 기여하였음
- 세종기지에서 발생한 저온 사례의 특성을 관측자료와 수치모델링결과를 이용하여 분석하고, 저온 사례 재현 분포도를 제시함
- 세종기지에서의 저온 현상은 온도 이류에 의해 남극 내륙의 차가운 공기가 유입된 결과이며, WRF 모형에서 음의 온도 편차가 나타나는 것을 확인함
- 남극 성층권 오존 및 지상 라돈 농도 시공간 변동 특성 파악
 - 성층권 오존이 대류권과 상관성이 높음에 비해 대류권계면과의 상관성이 낮으며, 이는 대류권계면으로의 오존 유입으로 분석됨.
 - 향후 대류권계면 높이에 대한 다양한 방법 적용을 통해 대류권계면 오존 유입에 대한 추가 분석이 필요함을 확인함.
 - 남극과학기지 기반 라돈 농도에 대한 계절별, 지역별 특성을 평가한 결과 서로 다르며(장보고기지에서의 농도가 10배 높음), 농도 분포의 계절 특성 또한 다름.
 - 모델을 활용한 라돈 농도 재현(남극대륙 및 그린란드에서의 라돈 방출 없음)에서 남극대륙 연안의 라돈 방출에 대해 고려가 필요함.
- 남극 대기 에어로졸 물리화학 특성 현장 관측
 - 남극 세종과학기지 기반 에어로졸 물리화학특성(구름응결핵수농도, 블랙카본, 입자수농도 등) 시계열 변화 DB를 구축 (DB 건수 3건)
 - 아라온 기반 에어로졸 물리화학특성(입자수농도) 관측 DB를 구축 (DB 건수 1건)
 - (의의) COVID 19 확산으로 세종과학기지 현장 활동이 제한됨에 따라 월동대원의

도움으로 세종기지 현장 관측 장비 운영을 최적화 하였으며, 아라운 기반 에어로졸 관측 프로그램을 구축

○ 남극 에어로졸 발생 프로세스 파악

- 남극 현장관측자료를 활용한 해양생물기원 나노입자 형성 기작 분석
- 초고분해능 질량분석기를 활용한 용설수 유기물 분자 특성 분석 완료
- 생물기원 에어로졸 전구물질 분석기술 개발 및 특허출원(1건) 완료
- 용설수 유기물 특성 분석자료 (DB 건수 10건)
- (의의) 세종기지 현장 관측 자료를 활용하여 일년빙 분포와 해양미세조류 기원 DMS 유래 에어로졸 입자 형성의 상관성을 최초로 규명함

[2022년 종합 평가]

○ 남극 해빙 증가원인 최초 제시

- 북극 해빙은 이산화탄소 증가에 의해 지속적으로 모든 계절 감소 추세에 있는데 반해 남극의 해빙은 증가하는 경향을 보였음.
- 기존에 남극 해빙 증가 원인을 설명하고자 하는 몇가지 가설들이 있었는데, 추가로 적도태평양과 북대서양의 상태에 의해 남극 해빙이 증가함을 밝힘.
- 관련 연구 내용 Nature Climate Change 게재 (2022년 6월, mrrIF 99)

○ 세종기지 라돈의 계절 분포 원인 수치적으로 재현

- 2013년부터 2016년까지 세종기지에서 관측한 라돈 농도의 월별 변동을 보면 5월에 최대치를 보이는데, 대기 순환-화학 수송 결합 수치모델을 이용하여 라돈 농도의 증가 원인을 밝힘.
- 관련 연구 내용 Environmental Research게재 (2022년 8월, IF 8.4)

○ 장보고기지 오존농도 관측 자료 활용 위성 관측 오존농도 검증

- 장보고기지에서 오존 존대를 이용하녀 2015년부터 2018년까지 측정된 오존 프로파일을 활용하여 위성에서 관측한 오존 농도를 검증하는데 활용 함
- 관련 연구 내용 Environmental Research게재 (2022년 8월, IF 8.4)

[2022년 세부 도출 내용]

- 1988년 이후 세종기지 기상관측자료에 대한 30년 데이터베이스를 이용해 폭설 사례의 특성을 통계적으로 분석하였고, 대표적인 폭설 사례들에 대해 고해상도

수치모의실험의 검증 자료로 활용해 모델의 폭설 사례 모의성능 평가 및 개선방향 도출에 기여하였음.

- 세종기지에서 발생한 폭설 사례의 특성을 관측자료와 수치모델링결과를 이용하여 분석하고, 폭설 사례 재현 분포도를 제시함.
- 세종기지 폭설 현상에서 저기압 (대기불안정), (저기압성 순환에 의한) 수증기 유입, 그리고 (사례에 따라) 지형에 의한 상승 기류 강화가 중요한 역할을 함을 확인함.
- 세종기지 극한기상 (강풍, 저온, 폭설) 현상에 대해, SOM (Self Organizing Map) clustering method를 이용하여 개념모형을 제시함.
- 남극 성층권 오존 및 지상 라돈 농도 시공간 변동 특성 파악
 - 남극 상공에서 기온과 오존의 관계는 고도에 따라 (하부 성층권 대 상부 성층권) 완전히 다른 관점에서 해석할 필요를 확인함. 또한 계절에 따라 관계가 달라짐.
 - 남극 전역에 대한 오존 농도와 대기 순환 간의 상관성에 대한 연구 시작
 - 대기역학적 모델을 활용한 남극기지로의 라돈 유입 경로를 확인함
 - 라돈 유입에 대한 여러 메카니즘(해양경계층 경로, 대류권 침강 경로, 대기경계층 경로, 국지적 효과 등)에 대한 우선 순위 확인 등 향후 연구 방향 제시
- 남극 대기 에어로졸 물리화학 특성 현장 관측
 - 남극 세종과학기지 기반 에어로졸 물리화학특성(구름응결핵수농도, 2.5nm이상 입자수농도, 10nm이상 입자수농도, 블랙카본, 입자크기별수농도 등) 시계열 변화 DB를 구축 (DB 건수 5건)
 - 아라온 기반 에어로졸 물리화학특성(2.5nm이상 입자수농도, 10nm이상 입자수농도, 블랙카본) 등) 관측 DB를 구축 (DB 건수 3건)
 - 국제공동연구를 통한 남극 에어로졸 흡습성 변화 DB 구축 (DB 건수 1건)
 - 해양 유기물 특성 분석자료(DB 건수 10건)
 - (의의) 유기 에어로졸과 해양/해빙 유기물의 물리화학적 특성 확인 및 해양, 해빙 및 대기 사이의 긴밀한 유기물 상호 작용에 대한 글로벌 모니터링의 중요성을 강조
- 남극 에어로졸 발생 프로세스 파악
 - 해양생물 배양을 통한 생물기원 가스 발생 모사 실험 수행
 - 환경요인(광량) 변화에 의한 기후가스 발생 변화 모사 실험 수행

- 초고분해능 질량분석기를 활용한 해빙 유기물 특성
- (의의) 해양미세조류 종특성에 따른 기후가스 발생량 차이 확인 및 해양환경의 변화가 종특성에 따라 DMS 발생량에 큰 차이를 보임을 규명

4.2 대외 기여도

- 세종기지 관측자료에 대한 높은 수준의 품질관리 및 목적자료와 결합을 통해 30년 데이터베이스를 생산하고, 기지 환경 및 안전과 직결되는 극한기상 현상의 발생 사례를 분석하였음. 강풍, 저온, 폭설 등 종류별 극한기상 발생 대표사례들을 분석하여 극한기상 발생 기작 이해에 기여하였음
- 세종기지 주변 극한기상 (강풍, 저온, 폭설) 대표사례에 대한 고해상도 수치모의 결과를 관측자료와 함께 분석하고, 자기조직화지도 군집분석 결과를 이용해 극한기상 현상에 대한 개념모델을 제시함으로써, 남극 기지 주변 극한기상 현상에 대한 이해를 높이고 향후 예측성 향상 방법 도출을 위한 토대를 마련함.
- 세계 기상 기구(WMO)의 산하 프로그램인 지구대기감시(Global Atmosphere Watch)의 데이터 센터 중의 하나인 WOUDC(World Ozone and Ultraviolet Detect Centre)에 세종기지 브루어 분광광도계 오존 전량 자료를 제출하여 남극 성층권 오존 연구에 기여하고 있음
- 호주핵과학연구소와 협력 연구를 통해 남극세종과학기지와 장보고과학기지에서 라돈 검출기를 운영 및 자료 분석을 통한 남빙양 대기순환 이해 제고
- 남극의 기후를 조절하는 모드들의 역할을 규명하였고, 최근 북극의 해빙 감소에도 불구하고 남극의 해빙이 증가하는 원인규명을 통해 극지연구소의 위상을 높이는데 기여하였음
- 남극의 기온이 동남극과 서남극이 다르게 반응하는 원인을 파악하였는데, 온실가스증가보다는 남극의 경우 아직은 내부변동성의 역할이 기후변화 더 크 s 역할을 함을 밝혀냄
- 인공신경망 기법을 이용하여 남극의 기온을 복원하는데 성공하였고 이는 남극 기온의 관측이 없는 곳에서 남극 기온을 추정하는 데 큰 기여를 할 것으로 판단 됨
- 남극 세종과학기지, 아라온 기반 남극 대기 에어로졸 현장 관측자료를 KPDC에 등록하여 외부 연구자들의 관측 자료 활용도 제고
- 남극 세종과학기지 기반 에어로졸 관측 자료를 활용하여 남극 반도 지역의 일년빙 분포가 자연유래 에어로졸 발생에 중요한 기원지로 작용하고 있음에 대한 관측적 증거 제시



The image features a large, light blue watermark of the KOPRI logo in the background. The logo consists of the letters 'KOPRI' in a bold, sans-serif font, with a stylized globe or network diagram below it. The text '제 5 장 연구개발' is positioned on the top line, and '결과활용계획' is on the bottom line, both in a black, sans-serif font. The watermark is semi-transparent and centered behind the text.

제 5 장 연구개발
결과활용계획



제 5 장 연구개발 결과 활용계획

5.1 향후 연구 방향

○ 극한기상 장기 변동성 연구

- 세종기지 35년 자료 범위를 넘어 과거 100년 재분석자료 및 미래 100년 기후 예측자료를 이용해 남극에서 발생하는 극한기상 발생의 장기적 변동성을 분석
- 남극 극한기상이 발생하는 중관장 특성 연구결과를 바탕으로 미래 기후 예측 시나리오에 따른 남극 극한기상 발생 특성을 예측
- 지구온난화에 따라 최근 발생 빈도가 증가하고 있는 고온 사례를 대상으로 하여 강한 고온 사례가 남극 환경변화에 미치는 영향을 평가

○ 남극 성층권 오존 및 라돈 관측

- 1단계 사업의 연구결과는 2단계 사업에서 성층권 오존 변동에 따른 남극 및 남반구 기후변화 과정 이해 제고를 위해 활용될 예정임.
- 라돈 농도의 지속 관측 및 분석을 통해 남극기지 기반 기후변화에 대한 저층 대기 순환 변화에 대한 이해 제고

○ 남극 기후변동성 원인 규명 및 평가

- 남극 기후변동성의 지역적 영향 파악을 위해 재분석자료에서 나타나는 남극진동 (Southern Annular Mode)의 남반구 표층/대류권/성층권 대기순환장 영향 분석과 대기넷징 실험을 이용한 중위도 대기순환장이 대기-해양 기후변동성 및 기후 요소에 미치는 영향 분석
- 남극 기후조절 모드의 해양-대기 기후 인자 파악을 위한 여름철 최종승온 사례시 남극진동과 성층권 대기순환의 상관 메커니즘 분석, 성층권 오존 농도 변화에 따른 남극진동의 특성 차이 비교 분석

○ 남극 에어로졸 현장 관측 프로그램 고도화

- 국제협력 연구 강화 및 관측 인프라 확장을 통한 세종과학기지 기반 에어로졸 물리화학 특성 현장 관측 고도화
- 장보고 과학기지 및 아라온 기반 에어로졸 관측 강화를 통한 남극 에어로졸 특성 관측 범위 확장

5.2 성과 활용 계획

○ 과학 분야

- 구축된 고해상도 기상예측시스템을, 남극기지에서의 현장 활동시 예측결과를 제공할 수 있는 실시간 예측시스템 개발을 위한 프로토타입으로 활용
- 고해상도 기상예측시스템의 예측성 평가 결과를 바탕으로, 수치모델의 물리과정, 남극지역에서의 자료동화방법 개선에 활용
- 남극 극한기상의 성능분석 결과를 바탕으로 기지주변 관측망 구성의 참고자료 및 남극 재분석 자료의 불확실성 평가에 활용
- 전지구 기후변화에 따른 남극 지면온도, 남반구 대기순환장 등 남극 기후요소의 변화 특성분석 자료는 남극 빙상 연구, 남극해 특성 변화 연구 등 남극 지역 타 분야 연구에서 기초자료로 활용
- 복원된 남극 지면온도 격자 자료는 과거 남극 기후변화의 특성 파악과 남극 지면온도의 미래 변화 전망 생산에 활용
- 남극대륙 기반 에어로졸 연속관측 DB 연속성 확보 및 국제공동연구 네트워크 강화
- 세종과학기지 기반 세계 유일의 남극 해양생물기원 전구물질, 구름응결핵 연속 관측자료 DB 구축 및 활용도 제고
- 남극 및 전지구 기후 예측 모델의 취약부분인 에어로졸 장기 현장관측 자료를 제시함으로써 기후예측 불확실성 감소에 기여

○ (사회/경제적 분야)

- 과거와 미래 약 100년씩 총 200년에 걸쳐 발생하는 극한기상 현상의 변동성 분석 결과를 이용해 남극의 기후시스템에 대한 이해도를 제고하고 미래 남극의 환경변화를 예상하기 위한 과학적 기반정보로 활용할 수 있음
- 극한 기상 특성 파악 및 예측시스템 구축을 통한 향후 기지주변의 안전한 탐사에 기여
- 남극 기후변화의 지역적 추이 파악을 통한 빙하 남극 빙하 용빙의 지역적 판단 자료로 활용
- 극지 자연 유래 에어로졸 발생에 의한 기후적 피드백 기능 평가
- 극지 에어로졸 분석 개발 기술 활용을 통한 국내 미세먼지 연구 활용

○ (정책 분야)

- 남극 기후변화의 추세 파악 자료는 지구온난화의 단서로 활용
- 남극 인프라 운영 및 연구활동을 위한 장기적 대응책 마련에 기반정보로 활용
- 기후변화 미래 예측에 관한 과학적 데이터 제공
- 전지구 기후변화에 대한 극지 연구의 중요성 제고
- 기지 주변 기상예측 자료 제공으로 남극 극지과학 공동체 내 위상 강화에 기여







제 6 장 참고문헌



제 6 장 참고문헌

- Añel, J.A., Allen, D.R., Sáenz G., Gimeno, L., de la Torre, L., 2013, Equivalent Latitude Computation Using Regions of Interest (ROI). PLoS ONE, 8(9), e72970. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.00729703>
- Armour, K.C., and Bitz, C.M., 2015, Observed and projected trends in Antarctic sea ice. US CLIVAR Var., 13, 12–19.
- Armour, K.C., Marshall, J., Scott, J.R., Donohoe, A., and Newsom, E.R., 2016, Southern Ocean warming delayed by circumpolar upwelling and equatorward transport. Nat. Geosci., 9(7), 549–554.
- Bae, H.-J., Kim, S.J., Kim, B.M., and Kwon H.T., 2022, Causes of the Extreme Hot Event on February 9, 2020, in Seymour Island, Antarctic Peninsula. Front. Environ. Sci., 10. doi:10.3389/fenvs.2022.865775
- Bais, A.F., Lucas, R.M., Bornman, J.F., et al., 2018, Environmental effects of ozone depletion, UV radiation and interactions with climate change: UNEP Environmental Effects Assessment Panel, update 2017, Photochem. Photobiol. Sci., 2018, 17, 127–179. DOI: 10.1039/C7PP90043K
- Bak, J., Liu, X., Kim, J.H., Chance, K., and Haffner, D.P., 2015, Validation of OMI total ozone retrievals from the SAO ozone profile algorithm and three operational algorithms with Brewer measurements. Atmos. Chem. Phys., 15, 667 - 683. <https://doi.org/10.5194/acp-15-667-2015>.
- Ball, W.T., Alsing, J., Mortlock, D.J., Staehelin, J., Haigh, J.D., Peter, T., Tummon, F., Stübi, R., Stenke, A., Anderson, J., Bourassa, A., Davis, S.M., Degenstein, D., Frith, S., Froidevaux, L., Roth, C., ofieva, V., Wang, R., Wild, J., Yu, P., Ziemke, J.R., and Rozanov, E.V., 2018, Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery. Atmos. Chem. Phys. 18, 379 - 1394. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1379-2018>.
- Bethan, S., Vaughan, G., and Reid, S.J., 1996, A comparison of ozone and thermal tropopause heights and the impact of tropopause definition on quantifying the ozone content of the troposphere. Quarterly J. Royal Meteorol. Soc., 122, 929–944.
- Brewer, A.W., 1949, Evidence for a world circulation provided by the

- measurements of helium and water vapour distribution in the stratosphere. Quarterly J. Royal. Meteorol. Soc., 75, 351–363.
<https://doi.org/10.1002/qj.49707532603>
- Carslaw, K.S., Lee, L.A., Reddington, C.L., Pringle, K.J., Rap, A., Forster, P.M., Mann, G.W., Spracklen, D.V., Woodhouse, M.T., Regayre, L.A. and Pierce, J.R., 2013, Large contribution of natural aerosols to uncertainty in indirect forcing. *Nature*, 503(7474), 67–71.
- Chambers, S.D., Choi, T., Park, S.J., Williams, A.G., Hong, S.B., Tositti, L., Griffiths, A.D., Crawford, J., and Pereira, E., 2017, Investigating local and remote terrestrial influence on air masses at contrasting antarctic sites using radon-222 and back trajectories. *J. Geophys. Res. Atmos.* 122, 13,525–13,544. <https://doi.org/10.1002/2017JD026833>
- Chambers, S.D., Hong, S.B., Williams, A.G., Crawford, J., Griffiths, A.D., and Park, S.J., 2014. Characterising terrestrial influences on Antarctic air masses using Radon-222 measurements at King George Island. *Atmos. Chem. Phys.* 14, 9903 - 9916. <https://doi.org/10.5194/acp-14-9903-2014>
- Charlson, R.J., Lovelock, J.E., Andreae, M.O., and Warren, S.G., 1987, Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature* 326, 655–661. doi:10.1038/326655a0.
- Comiso, J.C., et al., 2017, Positive trends in the Antarctic sea ice cover and associated changes in surface temperature. *J. Clim.*, 30(6), 2251–2267.
- Davis, C.A., and Emanuel, K.A., 1991, Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis. *Mon. Wea. Rev.*, 119, 1929 - 1953
- Fan, T., Deser, C., and Schneider, D. P., 2014, Recent Antarctic sea ice trends in the context of Southern Ocean surface climate variations since 1950. *Geophys. Res. Lett.*, 41(7), 2419–2426.
- Galí, M., Devred, E., Babin, M., and Levasseur, M., 2019, Decadal increase in Arctic dimethylsulfide emission. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 116, 19311–19317. doi:10.1073/pnas.1904378116.
- Gorodetskaya I., Tsukernik, M., C., K., Ralph, M.F., William, D.N., and Van Lipzig, P.M., 2014, The role of atmospheric rivers in anomalous snow accumulation in East Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 41(17), 6199–6206, doi:10.1002/2014GL060881
- Grell, G.A., and Devenyi, D., 2002, A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophys. Res. Lett.*, **29(14)**.

- Greenslade, J.W., Alexander, S.P., Schofield, R., Fisher, J.A., and Klekociuk, A.K., 2017, Stratospheric ozone intrusion events and their impacts on tropospheric ozone in the Southern Hemisphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(17), 10269–10290. doi:10.5194/acp-17-10269-2017
- Guo, J., Zhang, J., Yang, K., Liao, H., Zhang, S., Huang, K., Lv, Y., Shao, J., Yu, T., Tong, B., Li, J., Su, T., Yim, S.H.L., Stoffelen, A., Zhai, P., and Xu, X., 2021. Investigation of near-global daytime boundary layer height using high-resolution radiosondes: first results and comparison with ERA5, MERRA-2, JRA-55, and NCEP-2 reanalyses. *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 17079 - 17097. <https://doi.org/10.5194/acp-21-17079-2021>.
- Herring S.C., Martin P. Hoerling, James P. Kossin, Thomas C. Peterson, and Peter A. Stott, 2015, Explaining Extreme Events of 2014 from a Climate Perspective. *Bulletin of American Meteorological Society*, 96(12), S1–S72. doi:10.1175/BAMS-ExplainingExtremeEvents2014.1
- Hobbs, W.R., Massom, R., Stammerjohn, S., Reid, P., Williams, G., and Meier, W., 2016, A review of recent changes in Southern Ocean sea ice, their drivers and forcings. *Glob. Planet. Change*, 143, 228–250.
- Holton, J.R., Haynes, P. H., McIntyre, M.E., Douglass, A.R., Rood, R.B., and Pfister, L., 1995, Stratosphere-troposphere exchange, *Rev. Geophys.*, 33(4), 403 - 439. doi:10.1029/95RG02097.
- Hong, S.Y., Jimy, D., and Chen, S.H., 2004, A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103 - 120.
- Hosking, J.S., Orr, A., Marshall, G.J., Turner, J., and Phillips, T., 2013, The influence of the Amundsen-Bellinghshausen seas low on the climate of west Antarctica and its representation in coupled climate model simulations. *J. Clim.*, 26(17), 6633–6647.
- Huang, G., Liu, X., Chance, K., Yang, K., Bhartia, P.K., co-authors, 2017, Validation of 10-year SAO OMI Ozone Profile (PROFOZ) product using ozonesonde observations. *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 2455 - 2475. <https://doi.org/10.5194/amt-10-2455-2017>.
- Iacono, M.J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S.A., and Collins, W.D., 2008, Radiative forcing by long-lived greenhouse gases:

- Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.*, 113, D13103.
- IPCC (2013). 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change in Climate change, edited by T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P. M. Midgley (Cambridge, United Kingdom and New York, NY: Cambridge University Press), 1217–1308.
- Koo, J.-H. Choi, T., Lee, H., Kim, J., Ahn, D.H., Kim, J., Kim, Y.-H., Yoo, C. Hong, H., Moon, K.-J., and Lee, Y.G., 2018, Total ozone characteristics associated with regional meteorology in West Antarctica. *Atmospheric Environment*, 195, 78–88.
- Janjic, Z.I., 1994, The Step - Mountain Eta Coordinate Model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927 - 945.
- Jun S.-Y., Choi, ., Chambers, S. D., Oh, M., Park, S. -J., Choi, T., Kim, S. -J., Williams, A.G., and Hong, S.-H., 2022, Seasonality of Radon-222 near the surface at King Sejong Station (62°S), Antarctic Peninsula, and the role of atmospheric circulation based on observations and CAM-Chem model. *Environmental Research*, 214 (2022) 113998.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113998>
- Jun, S.-Y., Kim, J.-H., Choi, J., Kim, S.-J., Kim, B.-M., and An, S.-I., 2020, The internal origin of the west-east asymmetry of Antarctic climate change. *Science Advances*, 6 (24), eaaz1490.
<https://doi.org/10.1126/sciadv.aaz1490>
- Komhyr, W.D., Air Resources Laboratory (U.S.), 1986. Operations Handbook-OzoneMeasurements to 40-km Altitude with Model 4A Electrochemical Concentration Cell(ECC) Ozonesondes (Used with 1680-MHz Radiosondes). NOAA technical memorandum ERL ARL.
- Komhyr, W.D., Barnes, R.A., Brothers, G.B., Lathrop, J.A., and Opperman, D.P., 1995, Electrochemical concentration cell ozonesonde performance evaluation during STOIC 1989. *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 100, 9231-9244.
<https://doi.org/10.1029/94JD02175>.
- Kwon, H.T., Park, S.-J., Lee, S., Kim, B.M., Choi, T., and Kim, S.-J., 2019, A

- numerical simulation of a strong wind event in January 2013 at King Sejong Station, Antarctica. *Quart. J. Royal Meteorol. Soc.*, 145, 1267–1280. doi:10.1002/qj.3496
- Kwon, H.T., Kim, Kim, S.W., and Kim, S., 2021, Topographical effect of the Antarctic Peninsula on a strong wind event. *Antarctic Sciences*, 33, 6, 674–684. <https://doi.org/10.1017/S0954102021000444>,
- Krzyścin, J. W. and Baranowski, D. B., 2019, Signs of the ozone recovery based on multi sensor reanalysis of total ozone for the period 1979–2017. *Atmospheric Environment*, 199, 334 - 344. doi:10.1016/j.atmosenv.2018.11.050.
- Kuttippurath, J., Kumar, P., Nair, P.J. et al., 2018, Emergence of ozone recovery evidenced by reduction in the occurrence of Antarctic ozone loss saturation. *npj Clim Atmos Sci*, 1, 42. <https://doi.org/10.1038/s41612-018-0052-6>
- Kuttippurath, J., Godin-Beekmann, S., Lef'evre, F., Santee, M.L., Froidevaux, L., and Hauchecorne, A., 2015, Variability in Antarctic ozone loss in the last decade (2004–2013): high-resolution simulations compared to Aura MLS observations. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 10385 - 10397. <https://doi.org/10.5194/acp-15-10385-2015>.
- Kuttippurath, J., and Nair, P.J., 2017, The signs of Antarctic ozone hole recovery. *Sci. Rep.*, 7, 585. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00722-7>
- Li, X., Holland, D.M., Gerber, E.P., and Yoo, C., 2014, Impacts of the north and tropical Atlantic Ocean on the Antarctic Peninsula and sea ice. *Nature*, 505, 538–542.
- Locatelli, R., Bousquet, P., Hourdin, F., Saunois, M., Cozic, A., Couvreux, F., Grandpeix, J.Y., Lefebvre, M.P., Rio, C., Bergamaschi, P., Chambers, S.D., Karstens, U., Kazan, V., Van Der Laan, S., Meijer, H.A.J., Moncrieff, J., Ramonet, M., Scheeren, H.A., Schlosser, C., Schmidt, M., Vermeulen, A., and Williams, A.G., 2015. Atmospheric transport and chemistry of trace gases in LMDz5B: evaluation and implications for inverse modelling. *Geosci. Model Dev. (GMD)* 8, 129 - 150. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-129-2015>.
- Marshall, G.J., Orr, A., van Lipzig, N.P. M., and King, J.C., 2006, The Impact of a Changing Southern Hemisphere Annular Mode on Antarctic Peninsula Summer Temperatures. *Journal of Climate*, 19(20), 5388–5404. <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/19/20/jcli3844.1.xml>

- Marshall, G.J., and Thompson, D.W. J., 2016, The signatures of large-scale patterns of atmospheric variability in Antarctic surface temperatures. *J. Geophys. Res. - Atmos.*, 121(7), 3276–3289.
- Meehl, G.A., Arblaster, J.M., Bitz, C.M., Chung, C.T., and Teng, H., 2016, Antarctic sea-ice expansion between 2000 and 2014 driven by tropical Pacific decadal climate variability. *Nat. Geosci.*, 9(8), 590–595.
- Morgan, M.C., and Nielsen Gammon, J.W., 1998, Using tropopause maps to diagnose midlatitude weather systems. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 2555–2579.
- Munneke P.K., Luckman, A. J., Bevan, S. L., Smeets, C. J., Gilbert, E., van den Broeke, M. R., Wang, W., Zender, C., Hubbard, B., Ashmore, D., Orr, A., King, J.C., and Kulessa, B., 2018, Intense Winter Surface Melt on an Antarctic Ice Shelf. *Geophysical Research Letters*, 45(15), 7615–7623. doi:10.1029/2018GL07789
- Nicolas, J.P., and Bromwich, D.H., 2014, New Reconstruction of Antarctic Near-Surface Temperatures: Multidecadal Trends and Reliability of Global Reanalyses. *J. Clim.* 27, 8070–8093.
- O'Dowd, C.D., Facchini, M.C., Cavalli, F., Ceburnis, D., Mircea, M., Decesari, S., Fuzzi, S., Yoon, Y.J. and Putaud, J.P., 2004. Biogenically driven organic contribution to marine aerosol. *Nature*, 431(7009), pp.676–680.
- Parkinson, C.L., 2019, A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 116(29), 14414–14423.
- Polvani, L. M., and Smith, K., L., 2013, Can natural variability explain observed Antarctic sea ice trends? New modeling evidence from CMIP5. *Geophys. Res. Lett.*, 40(12), 3195–3199.
- Purich, A., et al., 2016, Tropical Pacific SST drivers of recent Antarctic sea ice trends. *J. Clim.*, 29(24), 8931–8948.
- Quinn, P.K., and Bates, T.S., 2011, The case against climate regulation via oceanic phytoplankton sulphur emissions. *Nature* 480, 51–56. doi:10.1038/nature10580.
- Roach, L., A., et al., 2020, Antarctic sea ice area in CMIP6. *Geophys. Res. Lett.*, 47(9), e2019GL086729.
- Rye, C. D., et al., 2020, Antarctic glacial melt as a driver of recent Southern Ocean climate trends. *Geophys. Res. Lett.*, 47(11), e2019GL086829.
- Salby, M., Titova, E., and Deschamps, L. (2011). Rebound of antarctic ozone. *Geophysical Research Letters*, 38(9), 1–4. [L09702].
<https://doi.org/10.1029/2011GL047266>

- Scambos T.A., Campbell, G. G., Pope, A., Haran, T., Muto, A., Lazzara, M., Reijmer, C.H., van den Broeke, M.R., 2018, Ultralow Surface Temperatures in East Antarctica From Satellite Thermal Infrared Mapping: The Coldest Places on Earth. *Geophysical Research Letters*, 45(12), 6124–6133. doi:10.1029/2018GL078133
- Schneider, D.P., Deser, C., and Fan, T., 2015, Comparing the impacts of tropical SST variability and polar stratospheric ozone loss on the Southern Ocean westerly winds. *J. Clim.*, 28(23), 9350–9372
- Schoeberl, M.R., and Hartmann, D.L., 1991, The dynamics of the stratospheric polar vortex and its relation to springtime ozone depletions. *Science*, 251(4989), 46–52. doi: 10.1126/science.251.4989.46.
- Sivakumar, V., Baray, J.-L., Baldy, S., and Bencherif, H., 2006, Tropopause characteristics over a southern subtropical site, Reunion Island (21°S, 55°E): Using radiosonde–ozonesonde data. *J. Geophys. Res.*, 111, D19111. doi:10.1029/2005JD006430
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J. Wang, W., Powers, J. G., Duda, M. G., Barker, D.M., and Huang, X.-Y., 2019, A Description of the Advanced Research WRF Version 4. NCAR Tech. Note NCAR/TN-556+STR, 145 pp.
- Solomon, S., Garcia, R., Rowland, F. et al., 1986, On the depletion of Antarctic ozone. *Nature* 321, 755 - 758. <https://doi.org/10.1038/321755a0>
- Solomon, S., Diane, J., Doug, K., Michael, J., Rayan, R., Neely, I., and Anja, S., 2016, Emergence of healing in the Antarctic ozone layer. *Science*, 1353, 269–274. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aae0061>
- Steinbrecht, W., Froidevaux, L., Fuller, R., Wang, R., Anderson, J., Roth, C., Bourassa, A., Degenstein, D., Damadeo, R., Zawodny, J., Frith, S., McPeters, R., Bhartia, P., Wild, J., Long, C., Davis, S., Rosenlof, K., Sofieva, V., Walker, K., Rahpoe, N., Rozanov, A., Weber, M., Laeng, A., von Clarmann, T., Stiller, G., Kramarova, N., Godin-Beekmann, S., Leblanc, T., Querel, R., Swart, D., Boyd, I., Hocke, K., Kämpfer, N., Maillard Barras, E., Moreira, L., Nedoluha, G., Vigouroux, C., Blumenstock, T., Schneider, M., Garcia, O., Jones, N., Mahieu, E., Smale, D., Kotkamp, M., Robinson, J., Petropavlovskikh, I., Harris, N., Hassler, B., Hubert, D., Tummon, F., 2017,

- An update on ozone profile trends for the period 2000 to 2016. *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 10675 - 10690. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10675-2017>.
- Strahan, S.E., Douglass, A.R., and Damon, M.R., 2019, Why Do Antarctic Ozone Recovery Trends Vary? *J Geophys Res Atmos.*, 124(15), 8837–8850. doi: 10.1029/2019jd030996. PMID: 32071827; PMCID: PMC7027592.
- Stuecker, M.F., Bitz, C.M., and Armour, K.C., 2017, Conditions leading to the unprecedented low Antarctic sea ice extent during the 2016 austral spring season. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 9008–9019.
- Szelag, M.E., Sofieva, V.F., Degenstein, D., Roth, C., Davis, S., and Froidevaux, L., 2020, Seasonal stratospheric ozone trends over 2000–2018. *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 7035 - 7047. <https://doi.org/10.5194/acp-20-7035-2020>
- Tewari, M., Chen, F., Wang, W., Dudhia, J., LeMone, M. A., Mitchell, K., Ek, M., Gayno, G., Wegiel, J., and Cuenca, R. H., 2004, Implementation and verification of the unified NOAA land surface model in the WRF model. 20th conference on weather analysis and forecasting/16th conference on numerical weather prediction, pp. 11 - 15.
- Thompson, A.M., Witte, J.C., Smit, H.G.J., Oltmans, S.J., Johnson, B.J., Kirchhoff, V.W.J.H., and Schmidlin, F.J., 2007. Southern Hemisphere Additional Ozonesondes (SHADOZ) 1998–2004 tropical ozone climatology: 3. Instrumentation, station-to-station variability, and evaluation with simulated flight profiles. *J. Geophys. Res.*, 112, D03304. <https://doi.org/10.1029/2005JD007042>.
- Tuck, A.F. et al., 1985, Strat-trop exchange. *Atmospheric Ozone 1985 - WMO Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 16*. World Meteorological Organization. 1: 151 - 240.
- Turner, J., et al., 2009, Record low surface air temperature at Vostok station, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, 114, D24102.
- Turner, J., Phillips, T., Marshall, G. J., Hosking, J. S., Pope, J. O., Bracegirdle, T. J., and Deb, P., 2017, Unprecedented springtime retreat of Antarctic sea ice in 2016. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 6868–6875.
- Wang, B., and An, S. I., 2005, A method for detecting season-dependent modes of climate variability: S-EOF analysis. *Geophys. Res. Lett.*, 32(15), L15710.
- Waugh, D.W., Sobel, A.H., and Polvani, L.M., 2017, What is the polar vortex

- and how does it influence weather?, Bull. Am. Meteorol. Soc., 98(1), 37-44.
<https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/98/1/bams-d-15-00212.1.xml>
- Welker, C., Martius, O., Froidevaux, P., Reijmer, C., and Fischer, H., 2014, A climatological analysis of high-precipitation events in Dronning Maud Land, Antarctica, and associated large-scale atmospheric conditions. J. Geophys. Res. Atmos., 119, 11,932 - 11,954.
- Zahorowski, W., Griffiths, A.D., Chambers, S.D., Williams, A.G., Law, R.M., Crawford, J., and Werczynski, S., 2013, Constraining annual and seasonal radon-222 flux density from the Southern Ocean using radon-222 concentrations in the boundary layer at Cape Grim. Tellus Ser. B Chem. Phys. Meteorol., 65, 19622.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.19622>



KOPRI

주 의

극지연구소

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.