

현장 관측 및 수치적 재현을 통한 남극의
기후 변화 특성 규명 연구 기획

Survey on the Investigation for the Antarctic Climate
Characteristics from Observation and Numerical Simulation



2016. 05. 31

한 국 해 양 과 학 기 술 원
부 설 극 지 연 구 소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “현장 관측 및 수치적 재현을 통한 남극의 기후 변화 특성 규명 연구 기획” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 5. 31



연구책임자 : 김성중

참여연구원 : 윤영준

“ : 최태진

“ : 김백민

“ : 박상종

“ : 박기태

“ : 김주홍

“ : 전상윤

“ : 홍상범

“ : 이솔지

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2016.3.1.- 2016.5.31	단계 구분	1 / 1
연구사업명	중 사업명	연구소 정책지원사업			
	세부사업명				
연구과제명	중 과제명	현장 관측 및 수치적 재현을 통한 남극의 기후 변화 특성 규명 연구 기획			
	세부(단위)과제명				
연구책임자	김성중	해당단계 참여연구원수	총 : 10 명 내부 : 9 명 외부 : 1 명	해당단계 연구비	정부: 5,000 천원 계: 5,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양과학기술원 극지연구소	부설	참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명: 해당없음				
요약				보고서 면수	118
<p>◦ 연구목적 및 필요성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 목적: 남극 대기물리, 대기환경 관측 연구현황 및 남극 기후의 수치적 재현연구 현황과 문제점 파악을 통한 남극 기후환경 변화 특성 파악 연구 기획 - 필요성: 남극 해빙 면적은 10년당 1.2-1.8% 비율로 증가하였으나 지역별로는 감소 지역과 증가 지역이 존재하는 것으로 밝혀져 남극 지역별 세부적인 기후변화의 이해가 필요하고 남극 해빙면적 변화에 대해 기후모델들은 약한 감소 경향을 예측하고 있으나 관측결과는 이와 반대로 약한 증가 경향을 보이고 있어 남극 해빙에 대한 우리의 과학적 지식이 부족함을 반증하고 있어 이에 대한 이해 필요하며, 남극 지역에서 관측 부족으로 인해 빙상 및 해빙 변화의 원인에 대한 과학적 신뢰도가 매우 낮으며, 이에 따라 남극 기후변화에 대한 예측의 신뢰도가 낮아 남극 기후변화 전반에 대한 이해 필요 <p>◦ 주요연구내용 및 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> - 최근 남반구 대기 순환장 변화가 남극 해빙 및 기온의 지역차이에 미치는 영향 파악 - 남극 기후변화 이해를 위한 빙하기 남극 서풍 제트기류의 세기 및 위치 변화 파악 - 남극 중규모의 수치적 재현을 통한 저기압 발생 기작 파악 - 세종기지 및 남극장보고과학기지 주변 대기과정 특성 평가 - 남극 세종기지 대기입자 특성 및 생물기원냉각물질 변화 파악 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	기후변화, 남극, 대기환경, 현장 관측, 기후재현			
	영 어	Climate Change, Antarctica, Atmosphere Environment, Field Observation, Climate Simulation			

요 약 문

I. 제 목

- 극지 기후변화 원인 규명을 위한 극진동 구성요소 재현 및 관측 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 목적

- 남극 현장 관측 및 수치모델 재현을 통한 남극의 기후변화 연구 현황 파악
- 남반구 저위도 지역과 역학적 연계성 이해를 위한 정보 수집
- 남극의 대기 환경 및 기후 변화 특성 파악을 위한 연구 기획

○ 필요성

- 21세기 들어 남극 빙상의 감소 속도가 1990년대보다 약 5배 정도로 급격히 빨라졌으며 이러한 감소 중 상당부분은 남극반도와 아문젠해 지역 등 서남극에서 발생하고 있을 정도로 서남극의 기후변화가 급격함
- 최근 30년간 남극 해빙 면적은 10년당 1.2-1.8% 비율로 증가하였으나 지역별로는 감소 지역과 증가 지역이 존재하는 것으로 밝혀져 남극 지역별 세부적인 기후변화 이해가 필요함
- 남극 해빙면적 변화에 대해 기후모델들은 약한 감소 경향을 예측하고 있으나 관측결과는 이와 반대로 약한 증가 경향을 보이고 있어 남극 해빙에 대한 우리의 과학적 지식이 부족함을 반증하고 있어 이에 대한 이해 필요
- 남극 지역에서 관측 부족으로 인해 빙상 및 해빙 변화의 원인에 대한 과학적 신뢰도가 매우 낮으며, 이에 따라 남극 기후변화에 대한 예측의 신뢰도가 낮아 남극 기후변화 전반에 대한 이해 필요
- 남극 과학 기지 기반 빙권 변동, 우주기상, 생물 분야 연구에 활용을 위한 종합적인 기상·기후 정보 확보 필요
- 남극지역은 생물기원 냉각물질의 발생이 가장 높은 지역이지만, 생물기원냉각물질이 에어로졸 입자 및 구름형성 과정에 미치는 영향 대한 이해 및 관측 자료가 부족하여 다양한 물리·화학적 인자 및 환경요소의 복합적 관측·해석이 필요
- 장기 태평양권 기후변화연구 체제 구축을 위한 집중 연구 필요

- 장보고기지 관측 장비가 안정화에 접어들어 따라 테라노바 지역 대기특성에 대한 종합적 규명 필요
- 남극에서 온난화가 가장 심각한 것으로 발표된 서남극 지역 및 저기압 발생지역과 가까운 로스해 지역에서의 기후변화 현황 및 순환장 변화 이해를 위해 세종기지 및 장보고기지를 활용한 장기적 연구 필요
- 에어로졸 및 구름을 통한 복사강제력은 전 지구적 냉각효과에 중요한 영향을 미치지만, 기후변화에 따른 미래 예측에 대한 불확실도가 상당히 높으며 (IPCC 2013), 이를 극복하기 위해서는 대기 관측을 기반으로 한 에어로졸 및 구름형성 기작에 대한 과학적 접근이 필요함.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 최근 남반구 대기 순환장 변화가 남극 해빙 및 기온의 지역차이에 미치는 영향 파악
 - 관측 및 재분석 자료를 통한 최근 남극 기후변화 패턴 연관 기후인자 제시 및 모델 앙상블 실험 셋업
 - 서남극 빙하코어 프록시 자료 확보와 아문젠해 저기압 활동 지수 정의
- 남극 기후변화 이해를 위한 빙하기 남극 서풍 제트기류의 세기 및 위치 변화 파악
 - 세종기지의 강풍 유발원인인 칠레 남단에서 생성되어 발달해서 이동해오는 극 저기압의 발생 역학 조사
 - 장보고 및 세종 과학기지 주변의 기상특징 분석 및 중규모 수치모델을 이용한 모의
- 수치모델링을 통한 남극 과학기지 주변 중규모 기상장의 수치적 재현 및 특성 파악
- 세종기지의 대기물리적 특성 파악
 - 세종기지 기상자료 품질 향상
 - 국제공동연구 참여를 통한 세종기지 기상관측 강화
 - 서남극 대기 특성 분석
- 장보고기지 주변 대기과정 특성 평가
 - YOPP(Year Of Polar Prediction)의 국외 연구 기관 제안서 분석 및 참여 기획
 - 안정 경계층 과정에 대한 이슈 파악 및 장보고기지 기반 연구 계획 수립
 - 남극 과학기지에서의 관측중인 대기추적자 라돈 가스 활용 연구 계획 수립
- 남극 세종기지 대기입자 특성 및 생물기원냉각물질 변화 파악

- 남극 세종기지 기반 현장관측을 통한 남극 대기 에어로졸 입자의 물리·화학적 특성 변화 연구
- Nano-size 에어로졸의 크기분포변화와 수농도 변화 관측
- 해양생물기원 기후냉각물질(DMS) 및 대기 입자 화학 조성 변화 관측

IV. 연구개발결과

- 최근 남반구 대기 순환장 변화가 남극 해빙 및 기온의 지역차이에 미치는 영향 파악
 - 관측 및 재분석 자료를 통한 최근 남극 기후변화 패턴 연관 기후인자 제시 및 모델 앙상블 실험 셋업
 - 서남극 빙하코어 프록시 자료 확보와 아문젠해 저기압 활동 지수 정의
- 남극 기후변화 이해를 위한 빙하기 남극 서풍 제트기류의 세기 및 위치 변화 파악
 - 마지막 최대빙하기의 수치모델 기반 서풍 제트기류의 변화 연구 현황 파악
 - 단일모델 기반 민감도 실험용 도구 고려사항 파악
- 남극 종관규모의 수치적 재현을 통한 저기압 발생 기작 파악
 - 세종기지의 강풍 유발원인인 칠레 남단에서 생성되어 발달해서 이동해오는 극 저기압의 발생 역학 조사
 - 장보고 및 세종 과학기지 주변의 기상특징 분석 및 중규모 수치모델을 이용한 모의
- 세종기지의 대기물리적 특성 파악
 - 세종기지 30년 기상자료에 대한 품질보정된 기상관측자료(기온, 풍속, 강수량 등) 시계열 자료 생산
 - 세종기지 기상관측시스템 강화
 - 세종기지 기상 특성 및 기후변화경향 이해
 - 남극 기상·기후변화 예측 향상
- 장보고기지 주변 대기과정 특성 평가
 - YOPP-SH(Year Of Polar Prediction-Southern Hemisphere)에 대한 독일, 미국, 이태리 등 6개 기관의 참여 내용 파악
 - 남극장보고과학기지 기반의 동계 기간과 아라온 기반 하계 기간 상층 기상 강화계획 수립
 - 안정 경계층에 대한 이슈 파악 및 이태리와 말레이시아와의 국제 공동 연구를 통한 극지에서의 안정 경계층 과정 연구 계획 수립

- 남극 세종(장보고)과학기지 라돈가스의 기원지 분석 계획 수립
- 대기추적자 라돈가스 활용 남극으로 대기수송 기작 파악을 위한 연구계획 수립
 - 남극 세종기지 대기입자 특성 및 생물기원냉각물질 변화 파악
 - Nano-size 에어로졸 크기 변화 관측을 통한 에어로졸 생성과 성장 특성 파악
 - 생물기원냉각물질의 변화가 에어로졸의 생성과 성장에 미치는 영향 분석
 - 해양생물기원 기후냉각물질의 발생 요인 분석을 통한 인근 해양생물량 및 환경요인 변화와의 상관성 분석

V. 연구개발결과의 활용계획

- 남극의 기후변화에 따른 미래 기후변화 예측 기획에 활용
- 남극의 최근 기후변화에 따른 해빙분포 및 기온 변화의 지역적 차이 원인 파악을 통한 남극 해빙변화와 온난화 패턴 파악 연구 기획에 활용
- 남극 빙상 변화가 남극 및 전구 규모 대기 순환장에 미치는 영향 이해를 통해 남극의 과거 기후변화 기작 파악 연구 기획에 활용
- 남극 저기압 발생 메커니즘 이해를 통한 남극 종관규모 기상예측 향상 및 미래 남극 대기순환/기후 기획에 활용
- 우리나라의 K-Route 및 내륙기지와 아라온 운항 경로 기상 예보 및 안정 경계층 과정 모수화 개선 기획에 활용
- 남극 기후시스템간의 피드백 증거로서 해양 생물 - 대기입자 - 구름 형성의 상호 작용의 관측적 증거 제시

목 차

제 1 장 서론	9
1-1. 연구개발 목적 및 필요성	9
1-2. 연구개발 내용 및 범위	23
제 2 장 국내외 기술개발 현황	26
2-1 국내 동향	26
2-2. 국외 동향	31
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	44
3-1. 연구개발 목표 및 내용	44
3-2. 연구개발 수행 결과	52
제 4 장 연구개발결과의 활용계획	96
4-1. 향후 연구방향	97
4-2. 국·내외 공동연구 추진 계획	100
4-3. 연구개발 사업 규모	102
4-4. 총 연구기간 로드맵	102
4-5. 인프라 활용 로드맵	103
제 5 장 연구개발 과정에서 수집한 해외과학기술 정보	105
제 6 장 참고문헌	108

The image features a large, light blue watermark of the KOPRI logo in the center. The logo consists of the letters 'KOPRI' in a bold, sans-serif font, with a stylized globe or network of lines below it. The Korean text '극지연구소' (Korea Polar Research Institute) is written in a smaller font below the globe.

제 1 장 서 론

제 1 장 서론

1-1. 연구개발 목적 및 필요성

- 약 3천 4백만년 전 남미와 남극 대륙이 분리되면서 그리고 대기중 이산화탄소 농도가 감소하면서 생성된 남극의 빙하는 2160미터의 두께로 남극 대륙을 덮고 있고, 남극 빙하의 면적은 $12.3 \times 10^6 \text{ km}^2$ 이며, 부피로는 약 $24.7 \times 10^{18} \text{ kg}$ 이며 이것을 해수면으로 전환할 경우 약 58.3미터임 (그림 1.1). 하지만 육상 빙하의 기저에는 대부분 지역이 현재의 해수면 보다 더 낮기 때문에 (그림 1.2), 지구온난화에 따른 대기 및 해양의 온난화에 매우 취약하며 남극의 빙하 소멸은 전지구 해수면 상승에 기여할 수 있어 남극의 온난화는 비단 남극만의 기후변화 현상이 아니고 전지구의 경제 및 생활에 밀접히 연관되어 있음.

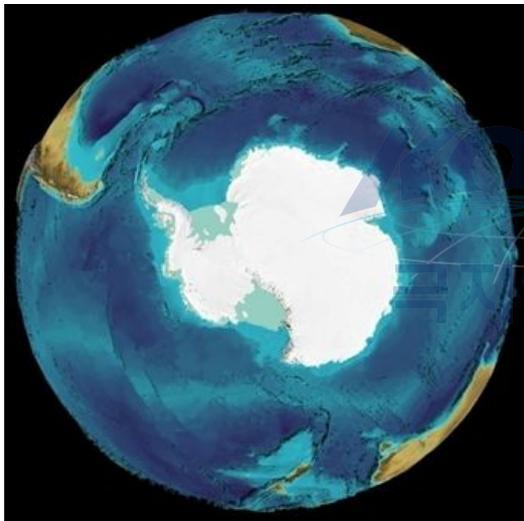


Fig. 1.1 남극의 빙하 분포

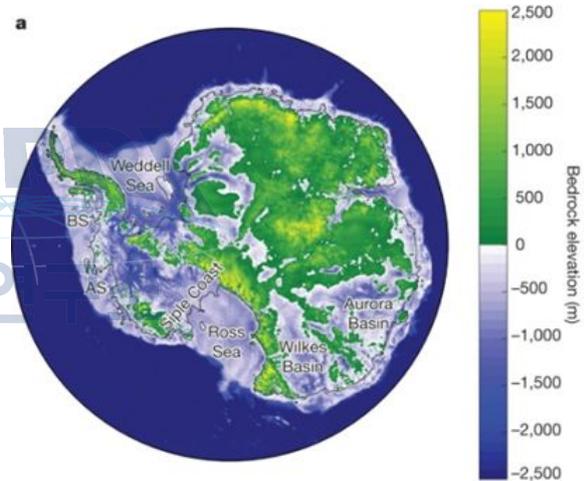


Fig. 1.2 남극의 기저암과 고도 분포
(DeConto and Pollard, 2016)

- 남극해는 겨울에 대기의 복사냉각에 의해 해수의 온도가 어는점 (약 -1.9°C)아래로 내려가면 해수의 결빙이 이루어지고 반대로 여름에는 복사열의 증가로 인해 해빙이 녹게 되는 해빙의 계절 변화가 뚜렷하게 나타남. 해빙의 면적은 여름에는 약 $5 \times 10^6 \text{ km}^2$ 로 수축하며, 겨울에는 약 $16 \times 10^6 \text{ km}^2$ 로 확장함 (그림 1.3). 이와 같은 해빙 면적의 계절적 변화는 태양 복사에너지의 변화, 장파 및 난류 열수지의 변화 그리고 열의 대류 및 확산에 의한 열역학적인 요인 뿐 아니라 바람과 해류의 유동에 의한 역학적인 요인에 의해 결정됨. 남극 해빙의 두께는 북극과 달리 남극해는 외해로 열려있기 때문에

통상 2.5미터 이하임.

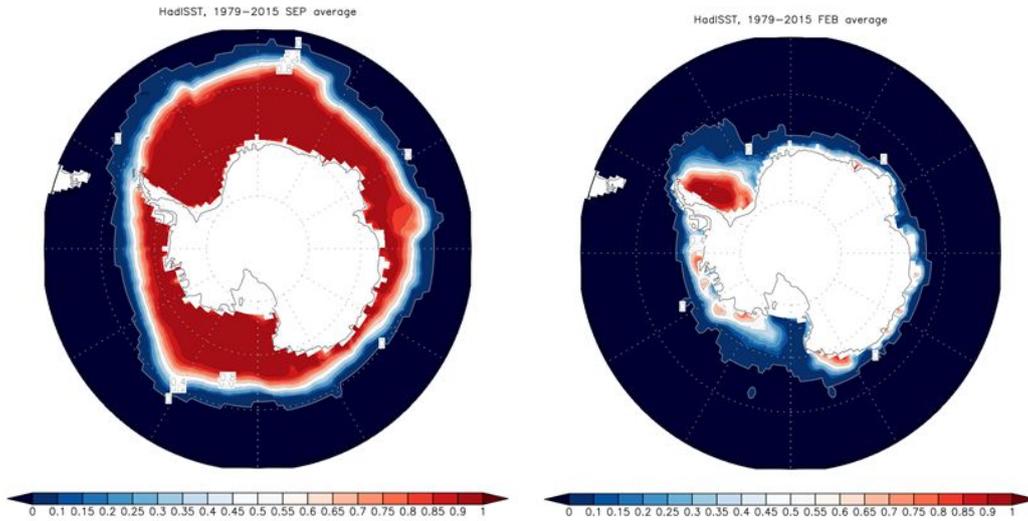


Fig. 1.3a 남극의 9월 해빙 분포

Fig. 1.3b 남극의 2월 해빙 분포

- 남극의 바람장은 겨울과 여름에 중위도 대류권 상층에 발달하는 아열대 제트류와 겨울에 성층권 상부에 강하게 발달하는 극제트로 이루어지는데 극제트의 강하서층은 표층까지 연결되어 있고 표층에서 서풍의 강한 축은 약 50°S에 위치해 있음 (그림 1.4). 통상 겨울철 성층권에 발달하는 극제트를 폴라보텍스라 통칭하며, 남반구 폴라보텍스이 세기에 의해 표층의 기온 뿐 아니라 해양 순환의 세기도 결정됨.

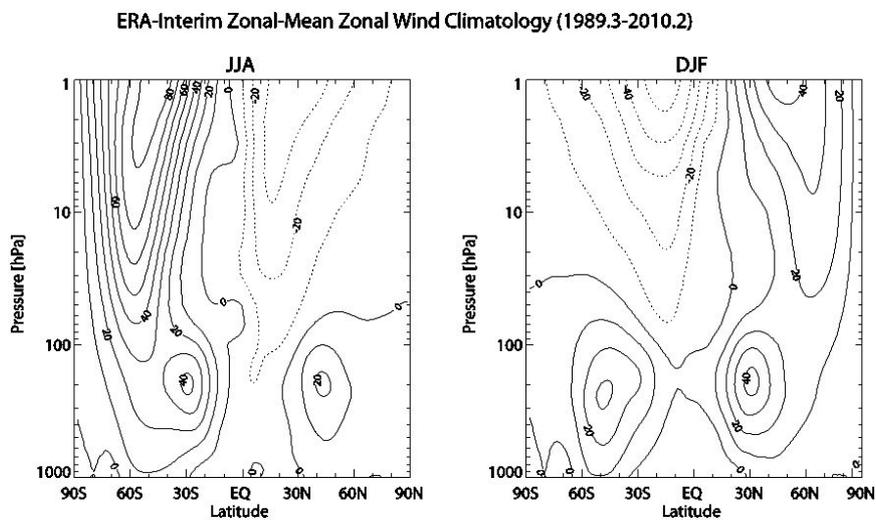


Fig. 1.4 겨울과 여름철 경도 평균 바람장 분포

- 저층에서 남극의 바람장 분포는 중위도 고기압과 남극 주변의 저기압, 그리고 남극 내륙의 약한 고기압에 의해 남극 주변에서 시계방향의 순환이 발달함 (그림 1.5a). 특히 아문젠해에서 두드러지게 나타나는 저기압이 아문젠해 저기압의 세기에 따라 서남극의 기후변화가 변동하는 경향이 있음. 대기의 순환에 의해 해양의 순환이 결정되는데, 남극해 순환의 특징은 남극대륙을 시계방향으로 순환하는 제트류와 웨델해와 로스해에 발달하는 자이어 순환임 (그림 1.5b).

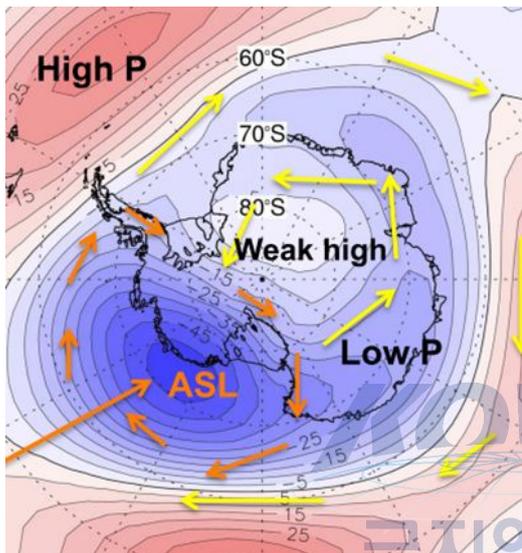


Fig 1.5a 남극의 표층 기압분포 및 대기 순환

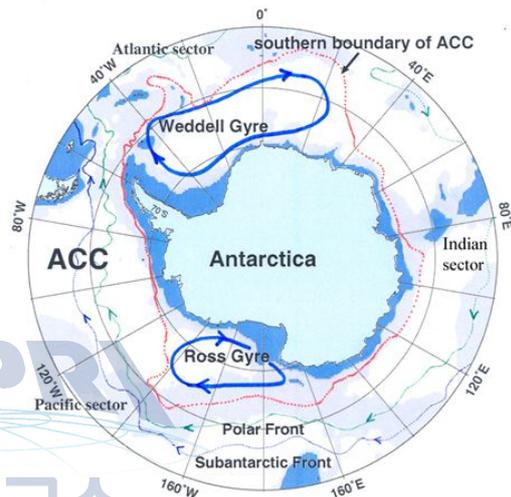


Fig 1.5b 남극해의 해양 순환

- 그림 1.6은 남극의 대기순환과 해양 순환을 동시에 보여주는데 (Thompson et al., 2011), 남반구의 아열대에서 발달한 고기압대에서 불어 나가는 바람과 남극 주변의 저기압대에서 불어 들어오는 바람장에 의해 서풍이 강하게 발달하며 특히 남위 50도 부근에서 강한 바람이 형성되어 해양에 전달되며, 이는 해양의 에크만 펌핑을 유발하여 표층에서 북서향의 해류를 만들게 되며 남극순환류의 가장 강한 제트류를 형성하는 극전선이 됨. 한편 남반구 내륙에는 약한 고기압이 발달하여 대륙에서 불어나가는 바람은 전향력에 의해 남극 주변을 따라 도는 동풍이 약하게 발달하게 됨. 남극해의 극전선을 따라 강하게 발달한 에크만 펌핑에 의해 북쪽으로 수송된 해수는 남극해의 심층에서 표층으로 용승하며, 이로 인해 남극해 심층의 오래된 해수가 표층으로 전달되어 환기되는 역할을 함. 한편 아열대에서는 해양의 아열대에서 고위도로 향하는 해수와 북향하는 해수가 만나 하강하는 구조를 보임.

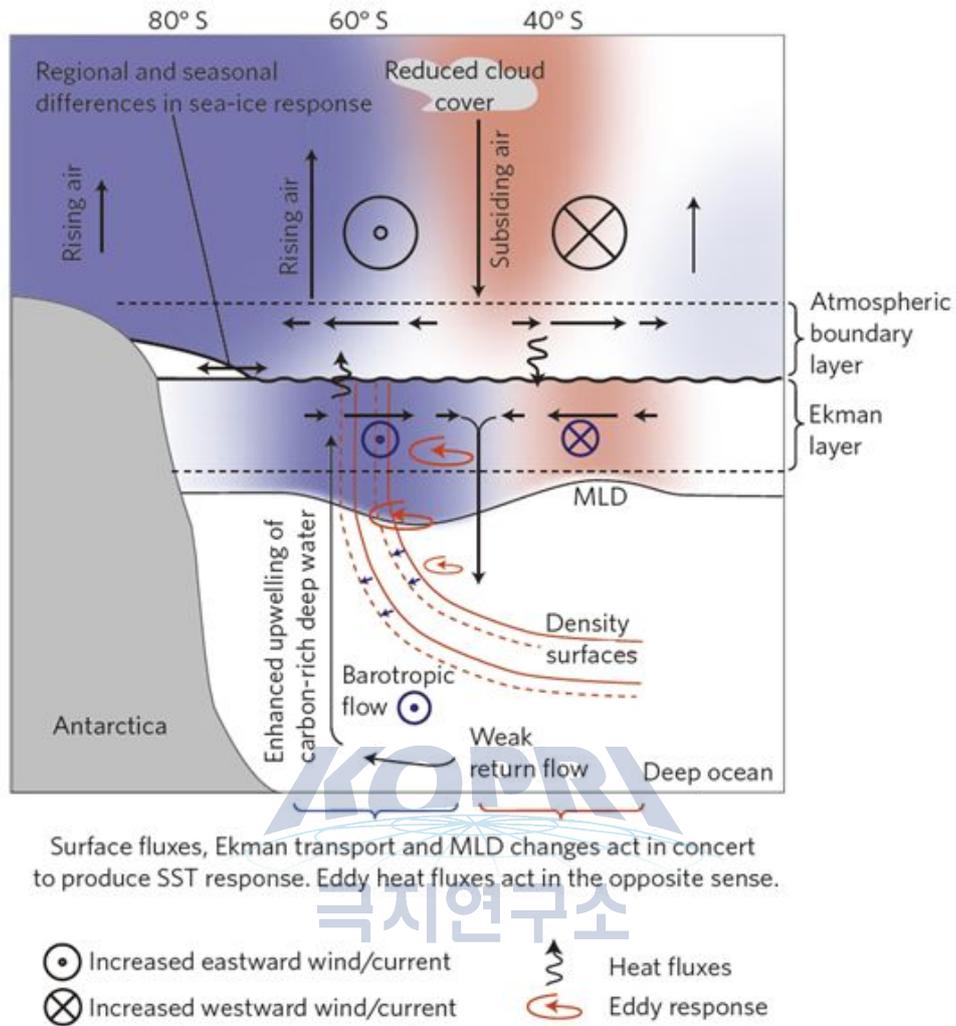


Fig 1.6 남극의 대기 및 해양 순환 연직 분포

- 북극과 달리 남극의 기후변화는 동서부분이 서로 다르게 진행 중인데, 남극반도를 포함한 서남극은 온난화가 빠르게 진행 중 인데 반해 동남극은 뚜렷한 온난화가 나타나지 않고 있음. 그림 1.7은 기지기반 30년 이상의 관측 자료를 바탕으로 분석한 계절별 기온변화 경향과 인공위성 관측 자료를 기반으로 재구성한 지난 50여 년간의 연평균 남극 기온 변화 경향을 보여주는데, 두 자료 모두 남극 반도에서는 통계적으로 유의한 수준에서 온난화가 빠르게 일어나고 있음을 알 수 있음. 아문젠해역을 포함한 서남극 전체가 온난화 경향을 보이는데 반해 동남극은 두자료 모두 통계적으로 유의한 수준의 변화를 보여주지 못하고 있음. 심지어 로스해 인근 육지와 웨델해 인근 육지에서는 냉각화 경향이 나타나고 있어 동서 남극의 기온 변화 경향의 편차가 두드러짐을 알 수 있음.

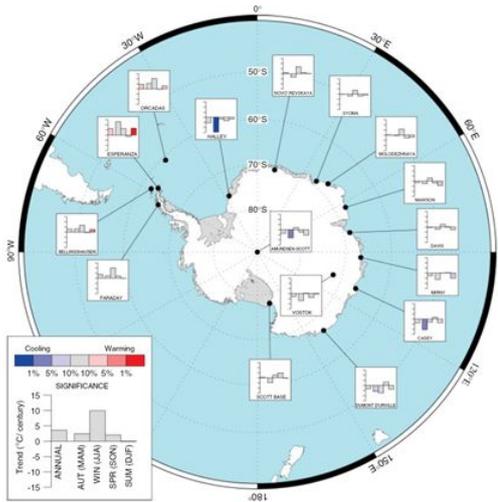


Fig 1.7a 남극의 30여년 간 연평균, 계절평균 기온 변화 경향 (Turner et al., 2005)

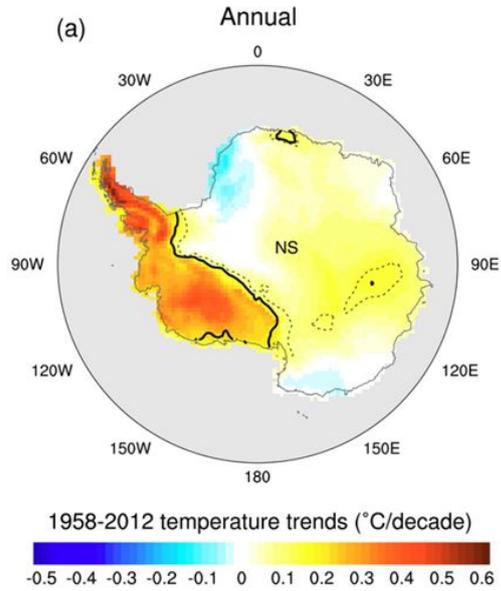


Fig 1.7b 지난 50여년 간 남극의 기온변화 경향 (Nicolas and Bromwich, 2014)



- 특히 2015년 3월 후반에는 남극반도 끝에 위치한 Marambio 기지와 Esperanza 기지에서 며칠 간격으로 섭씨 17.4도와 17.5도의 기온이 기록되어 남극 기상관측사상 최고 기온을 며칠 간격으로 경신하여 세계적인 관심을 받았으며 서남극 온난화를 나타내는 상징적인 경우로 인식되고 있음.

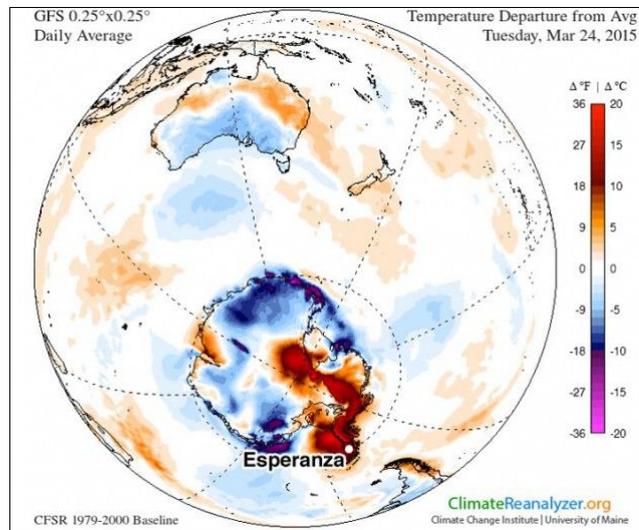


Fig. 1.8 Surface temperature anomaly

- 이와 같은 남극의 기온변화 경향은 남극 내륙의 빙하 변화 경향과도 잘 일치하는데, 서남극의 빙하는 급속도로 감소하는데 반해 동남극의 빙하는 증가 경향을 보이며, 특히 웨델해 인근의 경우 증가경향이 뚜렷함 (그림 1.9).

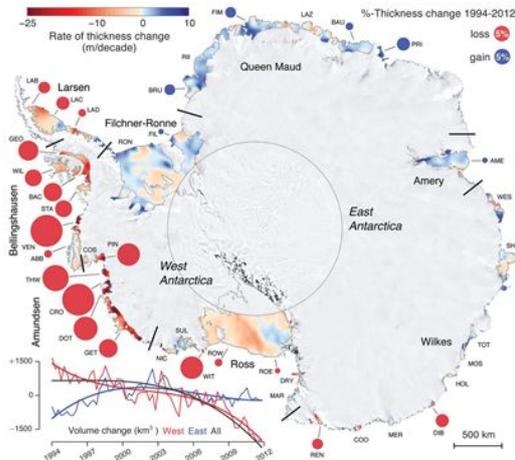


Fig 1.9a 남극의 최근 빙하변화 경향 (Paolo et al., 2015)

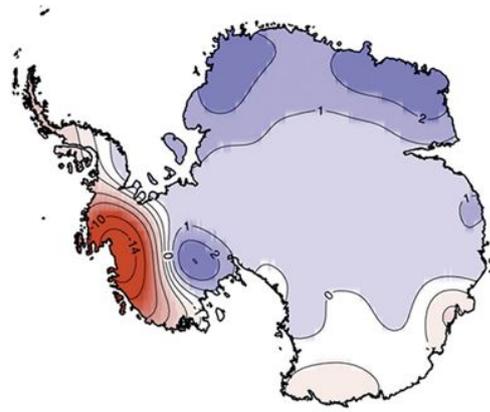


Fig 1.9b 2003년부터 2012년까지 남극의 빙상변화 경향 (IPCC, 2013)

- 남극해의 해빙변화도 동서의 편차가 뚜렷이 나타나는데, 제5차 정부간기후변화 협의체 (IPCC) 보고서에 의하면 지난 30년간 남극반도주변의 해빙은 모든 계절에 감소경향을 보이고 아문젠해와 벨링스하우젠해의 해빙은 여름과 가을에 감소경향이 뚜렷함. 반면 로스해와 웨델해는 모든 계절에 증가경향을 보임 (그림 1.10).

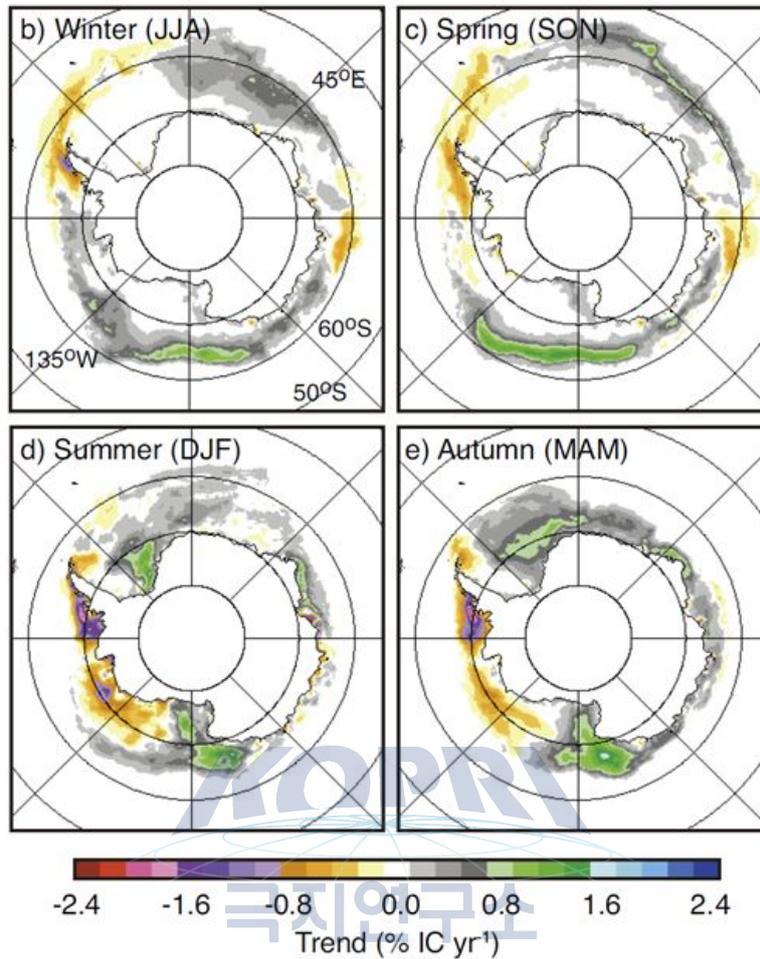


Fig 1.10 남극해의 계절별 해빙 변화 경향 (IPCC, 2013)

- 이와 같이 동서의 극명한 온도, 빙하, 해빙의 변화 경향은 남위 45도와 65도 사이의 해면기압의 변동성으로 정의되는 “남극진동”의 위상 변화와 연관된 대기의 순환장 변화에 기인하는 것으로 보고되고 있어 (Kwok and Comiso, 2002), 남극 기후변화의 원인을 이해하고 예측하기 위해서는 SAM에 영향을 미치는 구성 요소들의 변동 원인을 밝힐 필요가 있음. 그림 1.11a는 남극진동의 공간분포를 나타내는데, 남극진동이 양의 위상일 경우 중위도의 고기압과 저위도의 저기압의 차이가 평균보다 더 커지는 상태를 지칭함. 그림 1.11b는 여름철 남극진동 지수의 크기가 1표준편차만큼 클 경우 남극의 기온과 바람장의 변화를 나타내는데, 남극진동의 세기가 강해질수록 동남극에는 약간의 냉각화가 나타나고 남미의 남쪽에는 온난화가 나타나며 서풍의 세기도 커짐을 알 수 있음. 이는 적어도 남극의 여름철의 기온과 바람은 남극진동의 위상변화에 크게 좌우됨을 의미하며 남극진동의 위상변화가 다른 시기와 장소에도 어떻게 영향을

미치는지 면밀히 검토할 필요가 있음.

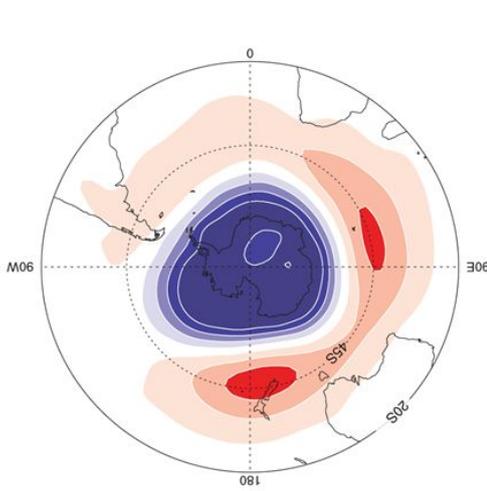


Fig 1.11a 남극진동의 수평 분포 (IPCC, 2013)

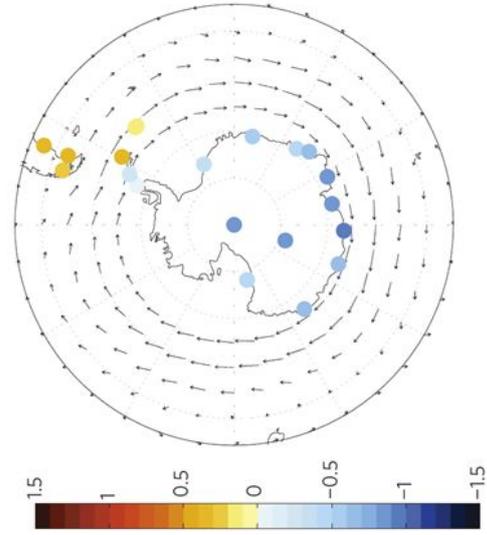


Fig 1.11b 남극진동이 양일 때 여름철 기온 및 바람장 변화 (Thompson et al., 2011)



- 서남극의 장기 기온과 대기 순환장 관측 자료도 SAM의 변동성 이해에 필수적이지만 접근성의 어려움 때문에 그동안 대부분 위성자료를 이용해 남극 및 SAM 변화 경향을 파악하고 있는데 (Steig et al., 2009), 위성자료의 불확실성이 높기 때문에, 서남극 기후변화 원인규명을 위해 필수적인 SAM의 기작을 이해하기 위하여 구성 요소들에 대한 현장 관측 자료의 획득이 요구됨. 예로 그림 1.12는 겨울과 가을의 세종기지와 장보고기지 그리고 서남극 아문젠해의 린지섬에서 획득한 기온자료와 남극진동의 관계를 보여주는데, 두계절 모두 세종지지의 경우 남극진동의 위상이 강해질수록 기온이 올라가는데 반해 장보고기지에서는 남극진동의 위상이 강해질수록 기온이 내려감을 알 수 있음. 하지만 서남극 아문젠해의 린지섬은 남극진동의 위상변화에 기온변화가 없는 것을 알 수 있는데, 이는 그림 1.12a에 보이는 바와 같이 남극진동의 위상이 커질 경우 아문젠해 저기압(ASL)이 깊어지고 이는 서남극 아문젠해를 중심으로 시계방향의 순환이 강해짐에 따라 남극반도로는 해양의 온난한 공기가 공급되는데 반해 로스해는 대륙의 찬 공기가 유입되며, 아문젠해는 중심에 있기 때문에 큰 차이가 나지 않기 때문으로 판단되어 관측 자료에서 나타나는 기온특성과 대기 순환의 관계 파악을 통해 기온의 변화를 이해할 필요가 있음.

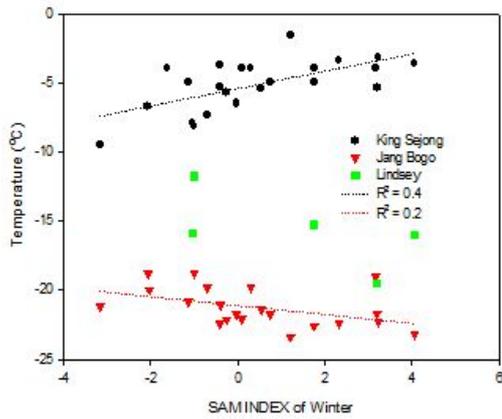


Fig. 1.12a 겨울철 남극진동의 세기변화와 세종기지, 린지섬, 장보고 기지에서 관측된기온과의 관계

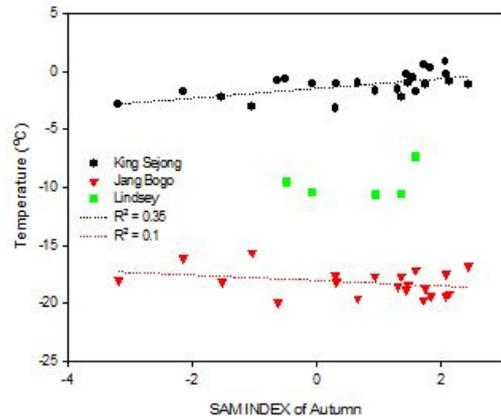


Fig. 1.12b 가을철 남극진동의 세기변화와 세종기지, 린지섬, 장보고 기지에서 관측된기온과의 관계

- 현재의 남극의 서풍의 세기는 해양의 에크만 펌핑에 중요한 역할을 하고 이는 해양의 탄소가 풍부한 심층의 해수를 표층으로 용승시키고 나아가 대기의 이산화탄소 농도 변화에도 영향을 주기 때문에 서풍의 세기 변화를 조절하는 인자를 파악할 필요가 있음.

극지연구소

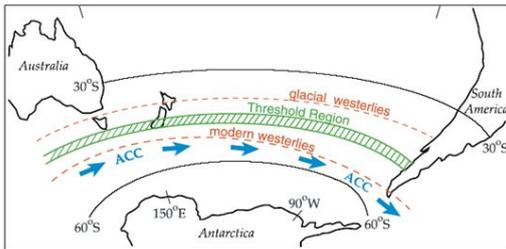


Fig. 1.13a 현재와 빙하기의 서풍의 중심 위치. 빙하기의 남극서풍이 적도로 치우쳐있음을 알 수 있다 (Toggweiler et al., 2006).

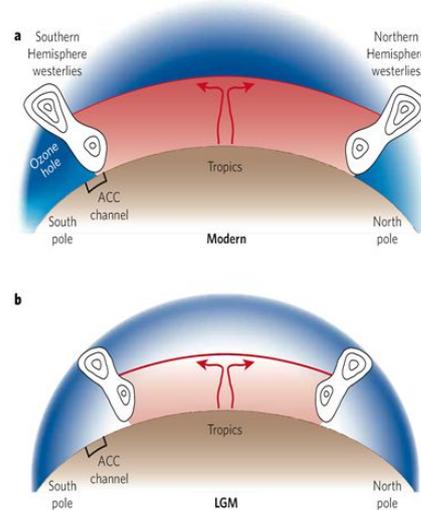


Fig. 1.13b (a)현재와 (b) 빙하기의 서풍의 세기 및 위치변화 (Toggweiler, 2008)

- 빙하기의 남극해 서풍의 위치와 세기의 변화는 빙하기 낮았었던 대기 이산화탄소의 농도 변화를 이해하는데 중요한 단서로 작용할 수 있기 때문에 기후변화 하에서 남극해 서풍 제트의 세기 변화에 영향을 주는 요소들을 파악할 필요가 있음 (그림 1.13).
- 남극세종과학기지는 1988년 운영을 시작하여 2018년이면 30주년을 맞이하게 됨. 세종기지에서는 운영 초기부터 기상관측을 지속적으로 수행하여 왔으며 관측자료를 세계기상기구에 매일 전송하여 서남극 기상예보에 기여해 왔음 (그림 1.14). 그러나 최근 서남극 온난화 등 기후변화 이슈와 관련한 연구용으로는 활발하게 활용되지 못하였음. 특히 기온변화 경향성 분석을 위해서는 정확하고 정밀한 센서관리와 자료품질관리가 필요하나 최근까지 수행되지 못한 실정임. 따라서 약 30년간 축적된 기상관측자료에 대해 정밀한 품질평가를 수행하고 결측을 최소화한 관측자료를 생산하고 대외에 공개하여 서남극 기후변화 연구에 널리 활용되도록 할 필요가 있음. 또한 지상기상관측에 머물러 있는 관측시스템을 강화하여 구름과 대류권 연직구조에 대한 관측을 추가함으로써 향후 남극 저기압, 구름, 기후변화 등 다양한 연구의 기반을 구축할 필요가 있음.

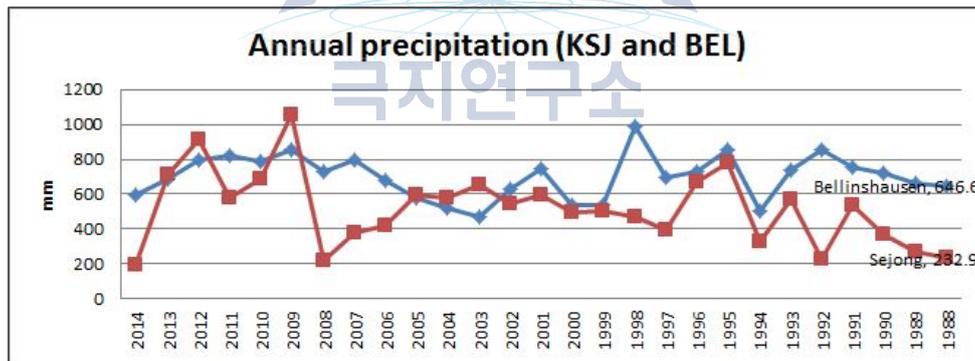


Fig. 1.14 남극 세종과학기지와 벨링스하우젠기지 연강수량 관측자료 비교 (1988-2014년)

- 최근 세계기상기구는 2013년부터 2022년까지 10년에 걸친 “극지역예측의 해(YOPP)” 프로그램을 확정하였고 특히 2017년부터 2019년까지 3년간을 극지역에서의 집중관측이 이루어지는 핵심시기로 설정하였음. 극지역에서 활발하게 활동하는 각국 기상 및 과학기관들은 자발적으로 역할 분담을 논의하여 2015년 YOPP Summit 회의에서는 주요 참여기관과 활동계획이 명시되는 단계에 이르렀음. 남극의 경우 YOPP-SH (Year Of Polar Prediction-Southern Hemisphere) 그룹 형태로 남극지역에서 YOPP 활동계획을

구체화하고 있음. 우리나라 즉 극지연구소는 2015년 YOPP Summit 참여를 시작으로 논의에 본격적으로 참여하였으며 남극의 경우 남극세종과학기지와 남극장보고과학기지를 기반으로 한 2018-2019년 남극지역 집중관측 활동에 기여할 수 있음. 세계 기상학계와 극지역 연구기관의 국제적 대형 프로젝트에 적극 참여함으로써 극지과학강국으로서의 입지를 강화하고 극지 기상기후예측 능력 향상을 통해 우리나라 기상재난 예방에도 기여할 필요가 있음.

- 세계기상기구 산하의 세계날씨연구프로젝트(World Weather Research Project)에서는 극지역 예측 능력 향상을 위해 극지역예측프로젝트(Polar Prediction Project)를 독일 AWI에 사무국을 두고 수행 중에 있으며, PPP의 일환으로 극지역예측의 핵심 수행 기간이 2017년 중반부터 2019년 중반까지 극지역에서 집중 관측, 모델 실험, 자료 동화 등을 수행될 예정임 (그림 1.15). YOPP의 일환으로 남극 지역에서는 YOPP-SH가 가동이 되며 현재 7개 프로젝트가 YOPP-SH에 참여할 예정이다. 남극장보고과학기지와 아라온에서의 집중 관측을 기반으로 YOPP-SH에 참가하면, 남극의 대기 과정에 대한 이해를 통한 남극 기후변화 이해에 기여함과 동시에 자체 모델 개선을 통해, 가까운 미래 장보고기지 주변 내륙 또는 아라온 운항 시 예보 등이 가능하여, 현장 연구 활동 지원을 할 수 있음.



Fig. 1.15 극지역예측의 해(YOPP) 3단계 실행계획 (WWRP/PPP No. 3 Implementation Plan for the YOPP, 2014)

- YOPP의 주요 목적 중으로 하나는 안정 경계층, 표면-대기 상호 작용, 급격한 경사 지형 등을 포함한 극지역 예측 향상에 걸림돌이 되는 극지 고유 과정의 결합/비결합 모델에서의 재현 향상임. 남극장보고과학기지는 이 연구를 수행하는데 이상적인 곳에 위치하기 때문에 장보고기지를 활용한 안정 경계층에 대한 연구가 필요함.
- 남극은 태평양과 인도양에 의해 중위도 대륙 지역으로부터 ~2500-4000km 거리에 위치하고 있고, 표층과 고층의 기상자료가 다른 지역에 비해 부족하기 때문에 역계적 모델 결과의 정확도가 낮은 실정임. 관측지점으로부터 5일 동안 역계적 모델을 수행할 경우 기원지의 위치에 대해 15-30% 공간적인 오차가 발생한다고 보고되고 있음 (Scarchilli et al, 2011). 따라서 남극과학기지에서 관측되는 라돈가스를 대기수송의 시험 추적자로 활용, 대순환모델(General Circulation Model) 재현결과와의 비교 연구를 통해 중, 저위도에서 남극으로의 대기수송과정에 대한 이해를 증진시킬 필요가 있음.
- 남극의 물리적인 요소 뿐 아니라 화학적인 요소의 변화에 대한 이해도 절실한데, 이는 지구온난화에 영향을 주는 외부의 복사강제력에서 에어로졸 같은 대기 화학적인 요소가 미치는 영향에 대한 과학적 근거가 매우 제한적이기 때문임. 제5차 IPCC보고서에 의하면 복사강제력의 정확도가 가장 낮은 부분이 에어로졸 관련 연구 분야이며 (그림 1.16), 특히 에어로졸에 의해 변화하는 구름의 상태에 대한 이해가 매우 초기단계여서 극지역의 에어로졸이 구름의 형성에 미치는 기작에 대한 이해가 필요함.
- 남극해는 영영염 농도가 높은 해양 저층수의 용승으로 인해 높은 일차생산량을 보임. 뿐만 아니라 양극해는 생물기원 기후냉각물질(DMS)의 발생량이 월등히 높은 식물플랑크톤(Prymnesiophytes)의 우점도가 높은 지역이기 때문에, 해양 일차생산자의 성장이 활발히 일어나는 봄, 여름철 표층해수의 DMS 농도가 전세계적으로 가장 높게 나타남(그림 1.17).

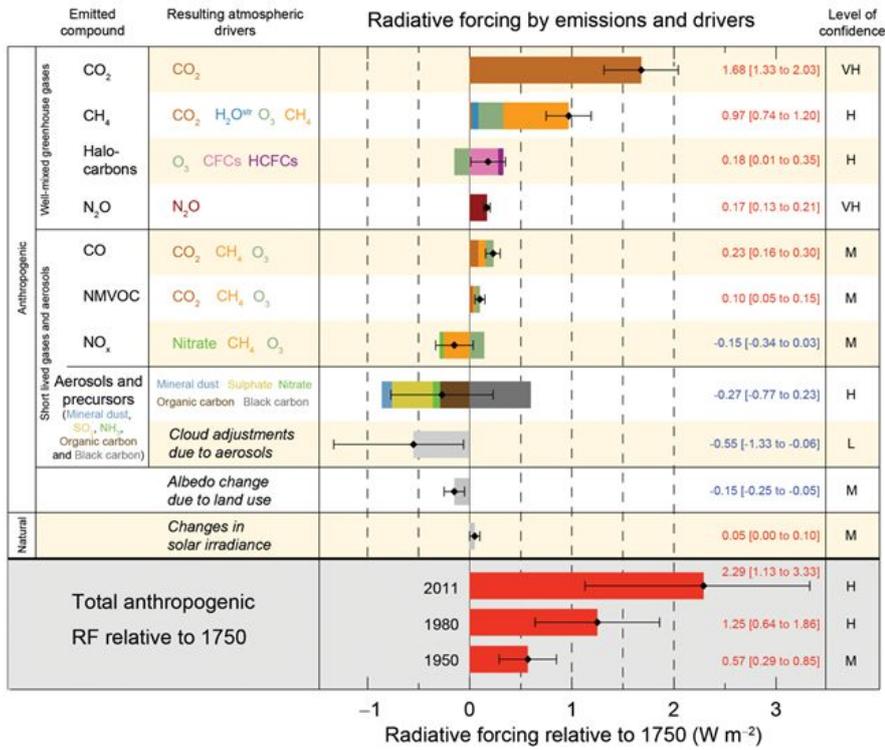


Fig. 1.16 주요 기후조절인자의 복사강제력 변화 (1750년-2011년) 및 주요 조절 인자에 대한 이해도 (IPCC 2013)

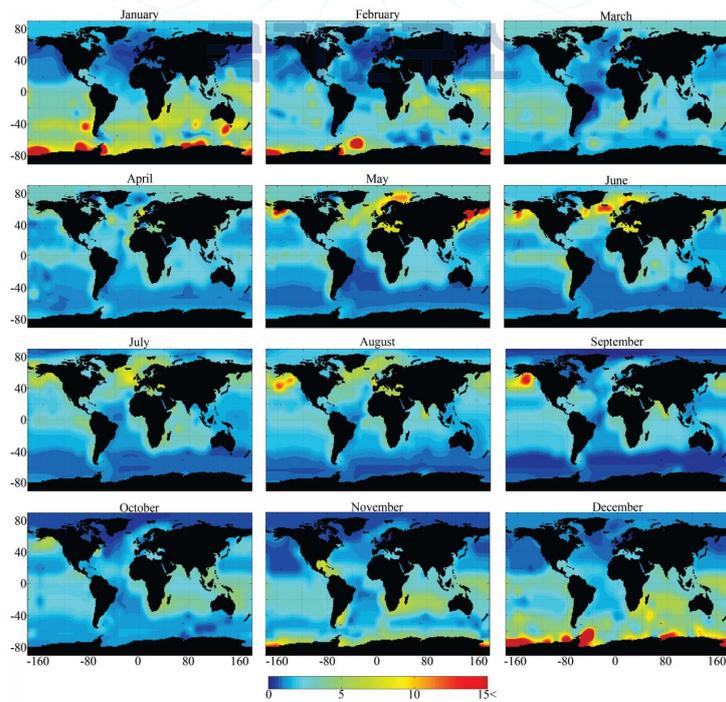


Fig. 1.17 모델연구를 기반으로 한 월평균 해양 표층 DMS 농도 분포 (Lana et al., 2011). 봄 여름철 양극지방에서 표층 해수의 DMS 농도가 높게 나타남을 확인 할 수 있음.

- 해양 표층의 복잡한 생물 반응 과정을 통해 생성된 DMS는 대기로 방출되어 산화 과정을 통해 황 에어로졸의 형성에 기여하며, 이는 구름응결핵 (cloud condensation nuclei)의 주요 성분으로 작용함 (그림 1.18). 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 가능할 것으로 예측됨 (Charlson et al., 1987). 하지만 기후 변화에 따른 DMS의 발생량 변화 및 기후변화 피드백 기작에 대한 과학적 증거는 부족한 실정이다 (Quinn and Bates, 2011).

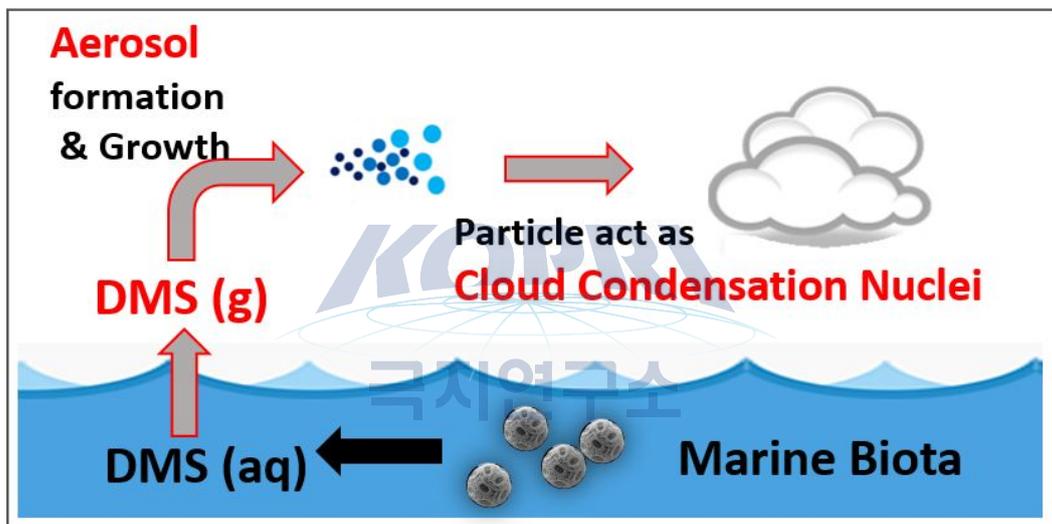


Fig. 1.18 해양생물 기원 DMS 발생과 그에 따른 대기 에어로졸 입자 형성 및 구름 응결핵 성장 과정 모식도

- 기후변화에 따른 남극 해양 환경 변화 (지역별 수온 상승, 해양 산성화, 빙하 면적 변화 등)는 인근 해양 일차생산자의 종조성 및 생산량 변화를 유발 할 수 있으며, 이는 기후냉각물질로 작용하는 DMS 발생량 변화에 직접적인 영향을 미치게 됨. 기후 변화에 의한 극지방의 환경 변화가 급격하게 일어나는 가운데, DMS 발생량이 가장 높은 남극해는 해양 생물이 발생하는 DMS 변화를 통한 전지구적 피드백 연구에 최적의 장소임.

1-2. 연구개발 내용 및 범위

- 남극 대기물리 및 대기환경 관측 연구현황 파악 및 수치모델을 이용한 남극의 기후 재현연구 현황 파악
 - 모델 실험 수행 및 기후인자의 남극 기후변화 패턴에의 영향 정량화를 위한 모델 실험 결과 분석
 - 20세기 재분석 자료의 아문젠해 저기압 활동과 빙하코어 프록시 자료 간의 연관 변동성 분석
- 빙하기 남반구 순환장의 변화 특성 연구 기획을 위한 빙하기 남극 기후 수치적 재현 연구 현황 파악
 - 마지막 최대빙하기의 남극 기후 / 남반구 순환장 수치적 재현 연구 현황 파악
 - 기존 연구에 사용된 수치재현 연구 방법, 특히 연구에서 사용 가능한 수치모델 실험결과와 수치모델 종류 및 특성 파악
- 과거 및 현재의 남극 주변 순환장 변화 수치적 재현 연구 기획
 - 가용 수치모델을 이용한 마지막 최대빙하기 사전 실험 수행을 통해 향후 수치재현 연구의 활용가능성 분석
 - 빙하기 남반구 서풍의 세기 변화 메커니즘 규명을 위한 수치 재현연구 실험 설계
 - 남반구 서풍의 이산화탄소 조절자 이론 검증을 위한 수치 재현 연구 실험 설계
- 세종기지의 대기물리적 특성 파악 (박상중)
 - 세종기지 30년 기상자료 품질관리 및 재생산
 - YOPP-SH 집중관측 준비
 - 장보고기지 및 서남극 서남극 저층 대기 관측 지속 및 특성 분석
 - YOPP-SH 참여를 위한 관측 수행
 - 장보고과학기지 라돈가스 측정 지속 및 특성 분석
- 장보고기지 주변 대기과정 특성 평가
 - YOPP-SH 참가 국외기관의 연구내용 파악 및 극지연구소의 남극장보고과학기지 및 아라온 기반의 YOPP-SH 참가 계획 수립
 - 극지역에서의 안정 대기 경계층 연구 현황 파악 및 장보고기지 기반 안정 경계층 연구를 위한 관측 계획 수립
 - 서남극 연안에서의 저층 기상 동향 파악 및 우리의 관측 관리 및 활용 계획 수립
 - 남극 과학기지에서 관측중인 대기추적자 라돈 가스 활용 연구 계획 수립
- 남극 세종기지 대기입자 특성 및 생물기원냉각물질 변화 파악

- 남극세종기지 대기 중 3-50 nm 크기를 가지는 에어로졸의 수 농도 변화를 실시간으로 측정하기 위한 Nano-SMPS (Nano-Scanning Mobility Particle Sizer)를 설치하여, 에어로졸의 크기분포와 수 농도 변화를 실시간으로 분석함으로써 남극세종기지 대기 중 에어로졸 생성과 성장 특성 분석
- 대기 중 DMS의 농도는 ~ppt 수준으로 지역과 계절에 따라 큰 농도 차이를 보이고, 해수 중 DMS 농도 역시 생물 활동 및 종 구성에 따라 연별 최대치와 최소치가 수십 배 이상의 차이를 보임. 또한 대기 중의 DMS는 빠른 산화과정을 거쳐 수일 이내에 소멸하며(life time <2 days), 인근 해양의 생물 변화 뿐 아니라 다양한 기상인자(풍속, 풍향, 고도 등)의 변화에도 큰 영향을 받기 때문에, 수십배 이상의 일변화를 보임(Park et al., 2013). 따라서 대기 중 DMS 농도 관측과 인근 환경요소와의 관계를 이해하기 위해서는, 저농도 대기 DMS의 효율적인 농측과 현장에서의 실시간 관측이 동시에 이루어져야함. 이를 위해 저농도의 DMS 농도 변화를 실시간 관측 할 수 있는 흡착-열탈착 (trap-thermal desorption) 방식의 Gas-chromatography 분석기기를 설치하여 DMS 발생이 활발히 일어나는 봄-여름철 농도 변화를 관측함.
- 대기 DMS는 산화 과정을 거치면서 sulphate (SO_4^{2-})로 변하며, sulfate는 주요한 구름 응결핵으로 작용함. 대기 중 sulfate는 해양 생물 기원 DMS 뿐 아니라, 화석연료 연소 및 sea-salt를 형태로 대기로 유입됨.
- 동위원소를 활용한 기원 물질 추적 연구는 현재 다양한 분야에서 광범위하게 연구되고 있으며, 황 동위 원소 분석은 지질 분야를 중심으로 연구·개발되었음. 최근 해양 DMS와 그 전구물질인 DMSP의 동위원소 비율에 관한 연구가 보고되었지만 (Oduro et al., 2012; Amrani et al., 2013), 현재까지 대기 중 DMS와 DMS 산화 물질들의 동위 원소에 대한 연구 사례는 희박함.
- 대기 중의 황성분은 지질 또는 해양에 비해 농도가 약 1000배 이상 낮으며, 빠르게 다른 성분으로 변화하기 때문에 타 분야에서 활용되는 분석 방식에 비해 복잡한 전처리 기술 및 정밀한 검출 방식이 요구됨. 본 연구에서는 대용량 대기 입자 시료 포집기(high volume sampler)를 활용하여 과량의 대기 입자시료를 포집하고, 이 후 전처리를 거친 대기 시료를 Elemental Analyzer-Isotope Ratio Mass Spectrometer (EA-IRMS)를 통해 황 동위원소 비율($\delta^{33}S$, $\delta^{34}S$)을 분석하고자 함.
- 남극 세종기지에서 인근 해양의 생물량이 급격히 증가하는 하계 시즌 대기 입자의 황 동위원소 비율을 분석함으로써, 주요 에어로졸 형성에 해양 생물기원 기후냉각 가스(DMS)의 기여도를 평가가 가능함.

- 에어로졸 이온 분석 전문 연구자인 이탈리아 연구팀(University of Florence, 이탈리아, 연구책임자: Professor Roberto Udisti)과의 공동연구를 통해 남극 하계기간 동안 에어로졸 화학성분 변화를 동시에 분석함으로써, 생물기원 기후냉각물질(DMS)의 에어로졸 형성에 대한 정량적, 정성적 기여도를 평가하고자 함.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

2-1 국내 동향

- 남극진동이 북서태평양의 태풍 활동에 미치는 영향을 서울대학교에서 연구한 바 있는데, 여름철 태풍의 발생 및 진로가 남반구 극진동의 변동에 따라 적도 대류 현상의 변동, 북태평양 고압대의 변동을 매개로 조절되고 있음을 제시한 바 있지만 (Ho et al., 2005), 남극진동의 상을 조절하는 인자에 대한 연구는 이루어지지 않았고 남극진동에 대한 과거의 재현 연구도 시도되지 않았고 아직 시작단계에 불과하여, 영국의 BAS에서 진행 중인 남극진동과 남극의 기후변화 연구수준에 비하면 약 20%수준임.
- 극지연구소에서는 마지막최대빙하기동안 해빙의 확장에 따라 남극해 해면기압이 증가하고 따라서 남극해의 서풍이 현재보다 약화 되었다는 연구결과를 미국 해양대기청 (NCAR)에서 개발한 수치모형을 이용하여 얻었고 (Kim and Lee, 2009), 제2차 고기후모형 비교연구 프로그램의 자료를 분석하여 마지막최대빙하기 남극해 서풍의 강도와 위치변화를 파악해 보았지만 기존의 프록시 연구 결과에서 제시하는 서풍의 축이 적도로 치우침이 나타나지 않아서 고기후모형들이 빙하기 남극해 서풍을 제대로 재현하지 못함을 밝혔음 (Kim et al., 2014).
- 남극 세종기지에서 지속적인 미기상 플릭스 특성을 연구하기 위해 2002년 12월 (남극 세종기지)에서 측정을 통해 극지 생태계를 포함한 지표면과 대기 간 교환되는 이산화탄소, 수분, 에너지 및 운동량 플릭스를 정량화하고, 그 기작을 이해하기 위해 에디 공분산 시스템을 가동하여 자료수집과 특성 파악(지면 거칠기, 토양특성, 플릭스 발자취 기후도 등) 수행하여 연구결과를 보고한 바 있지만 (Choi et al, 2008), 서남극의 기후변화의 원인 규명을 위한 연구는 본격적으로 이루어지지 않아서, 미국, 영국, 독일, 일본 등 선진국의 남극 대기 정상관측 수준에 비해 약 30% 수준임.
- 극지연구소에서는 선진국에서 채집한 빙하코어를 분석하여 주로 과거의 중금속 농도변화를 포함한 고환경 복원에 관한 연구는 활발히 진행 중에 있지만, 빙하 자료로 부터 기후 변화 프록시(온도, 수분, 바람장)를 생산해서 선진국과 같이 남극 기후변화 연구에 적용한 적은 없는 상태여서, 빙하를 직접 채집해서 과거의 기후를 복원하는 연구는 선진국에 비해 약 10%정도 수준임.
- 서울대학교에서 남극진동의 상변화에 따라서 북서 태평양의 태풍 발생 빈도와

경로가 다르게 나타남을 밝힌바 있는데, 남극진동이 양의 상태일 때 음의 상태일 때 에 비해 저위도에서 태풍의 발생 빈도가 높고 또한 태풍의 경로도 남극진동이 양의 상태일 때 동중국해를 거쳐 한반도로 접근할 확률이 높다는 연구결과가 있지만 정확한 메카니즘은 아직 잘 이해되지 않고 있음.

- 남극 기후변화 연구는 극지연구소 주요사업을 통해서 남극진동 변화와 연관된 기후변화의 메커니즘을 수치모델을 통해 재현하고 세종기지와 장보고기지의 지상 및 상층 관측을 통해 남극진동 구성 요소를 관측하는 연구가 수행된 바 있음.
- 북극 다산과학기지를 기반으로 에어로졸 입자 특성 및 DMS 발생 변화에 대한 연구를 지속적으로 수행하고 있으며 (미래부 과제), 본 연구 과제를 통해 남극에서의 생물기원냉각물질 (DMS 포함)-에어로졸-구름 형성간의 상호작용을 연구함으로써 연구 효율성 및 우수성을 제고하고자 함.
- 남극장보고과학기지에서는 2014년부터 기상 및 대기물리 분야 관측 기반 연구가 진행되고 있음 (그림 2.1, 2.2). 특히 2015년부터 본격적으로 상층기상 및 성층권 기상 그리고 성층권 오존 농도 감시를 위한 관측이 수행되고 있음. 또한, 장보고기지에서는 10 m 타워를 이용한 안전 경계층 연구의 일부가 시작되고 있음 (그림 2.3).
- 2015/16년 남극하계 시즌에 극지연구소는 하계 현장 연구 활동을 위해 북빅토리아랜드에 3조의 기상관측시스템을 각각 허큘레스 네베, 스틱스 빙하 및 엘리펀트 모레인 세 곳에 설치하였음 (그림 2.4, 2.5).



Fig. 2.1 남극장보고과학기지에 설치된 상층기상 관측용 오토 존데



Fig. 2.2 장보고기지에서 월동대원의 오존 존데 비양 모습

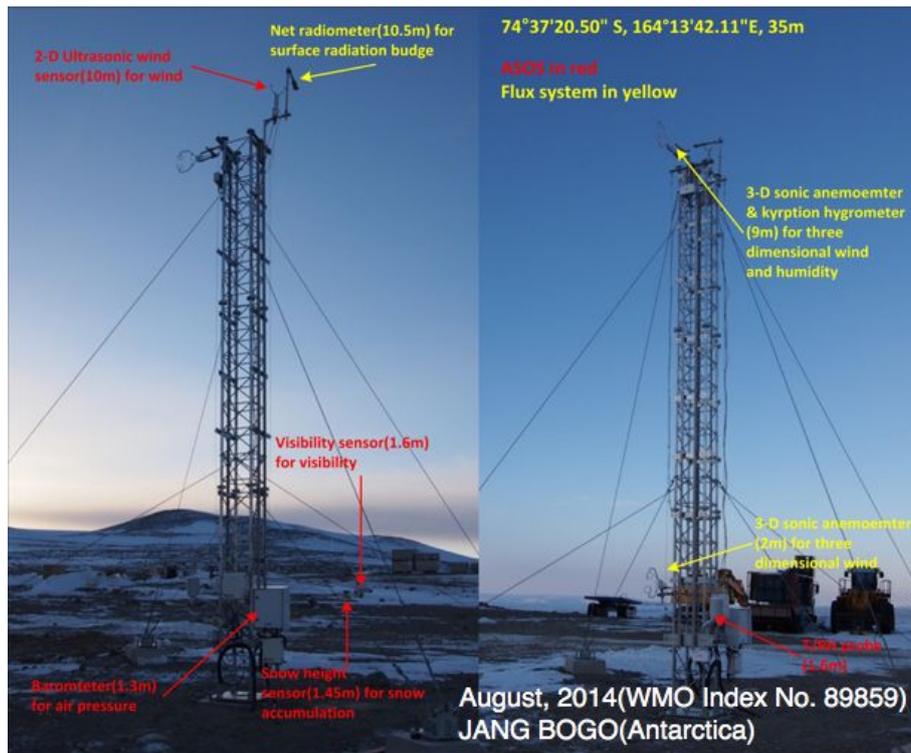


Fig. 2.3 장보고기지의 10 m 타워에서 설치된 종합기상 및 안정 경계층 변수 관측 시스템

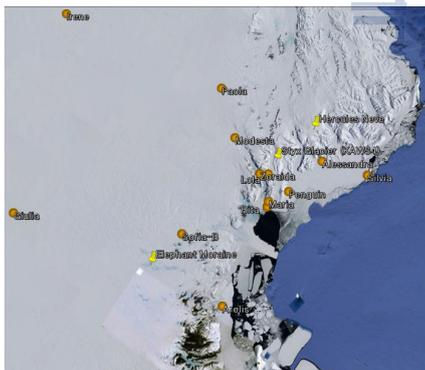


Fig. 2.4 북빅토리아랜드에 설된 극지연구소 및 이태리 AWS



Fig. 2.5 허큘레스 네에서 설치 중인 AWS

- 서남극 아문젠 해 연안 지역은 남극에서 빙하의 유실이 가장 많은 곳으로 이에 대한 원인 파악을 위해 국제적으로 많은 연구가 수행되고 있음. 극지연구소에서는 서남극 연안 기상 관측을 지속하기 위해 2016년 1월에 11 m 기상타워를 설치하여 관측을 수행해 오고 있음 (그림 2.6).

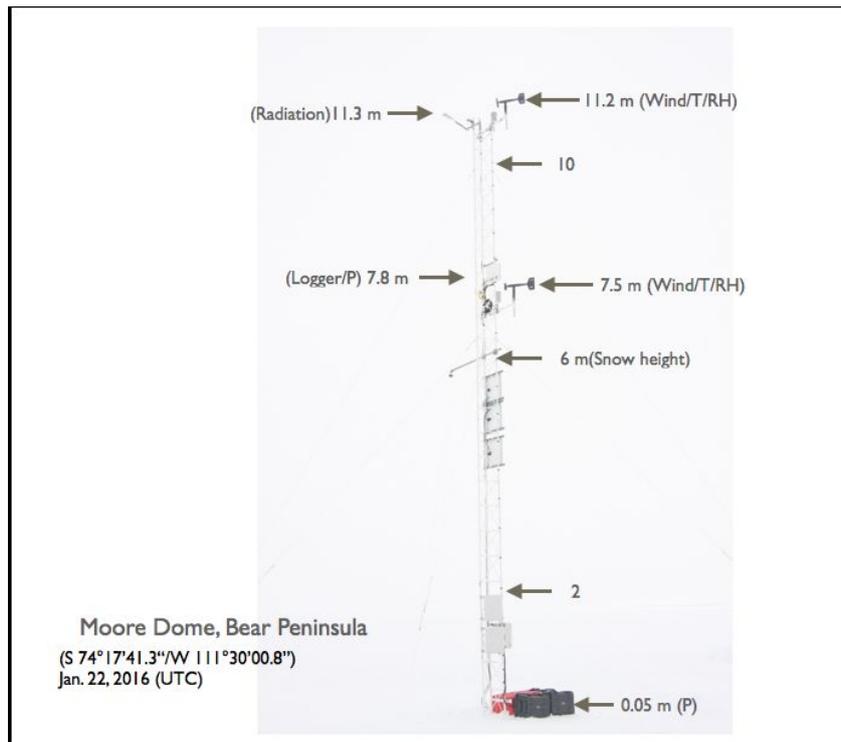


Fig. 2.6 서남극 베어 반도 무어돔에 설치된 자동기상관측시스템

- 남극세종과학기지에서 2013년 2월부터 남아메리카로부터 킹조지섬 지역으로 유입되는 대기수송 특성을 조사하기 위해 호주핵과학기술기구 (Dr. Scott Chambers)와 공동으로 대기환경 라돈 가스관측을 시작하였음. 남극장보고과학기지에서는 2015년 12월부터 주로 호주대륙으로부터 남극 북빅토리아랜드 테라노바베이 지역으로 유입되는 대기수송 특성을 조사하기 위해 라돈가스를 관측하기 시작하였음(그림 2.7, 2.8). 2013년 2월부터 2014년 1월까지 남극세종과학기지에서 관측된 라돈가스 자료를 해석하여 늦여름 시기에 겨울철 시기보다 높은 계절별 농도분포 특성을 규명하였고 남아메리카로부터 킹조지섬으로 유입되는 대기수송 특성에 대한 사례연구를 수행하였음 (Chambers et al., 2014). 장보고과학기지에서 관측중인 라돈가스 자료에 대해 2015-16년 남반구 하계시즌에 대한 예비분석을 수행함.

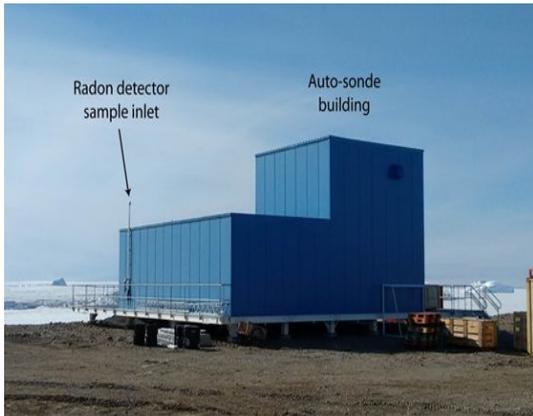


Fig. 2.7 장보고과학기지 오토존데 외벽에 설치된 대기 라돈가스 측정기 공기 유입부

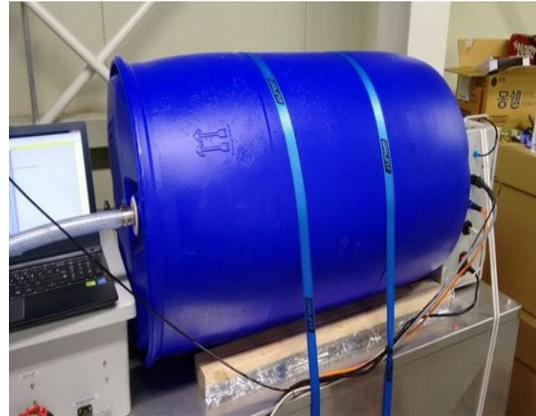


Fig. 2.8 라돈가스 검출기의 Thoron delay volume

- 극지연구소에서는 매년 세종기지 기상관측자료에 기반하여 기상예보를 작성하고 있으며 여기에는 기온, 바람, 기압, 습도, 일사량, 강수량 등 각종 기상요소의 일별/월별 통계값이 수록되어 있으나 대기순환장과의 연관 분석 등은 누락되어 있음.
- 세종기지 기상 특성에 관한 연구는 1988년 기지 운영 개시 후 수년간 자료 축적 뒤에 1990년대 초에 일부 수행되었으며 (Nam and Lee, 1991; Lee and Nam, 1991; Lee and Jang, 1992; Won et al., 1996) 이후로 1994년 12월에 이틀간 라디오존데 관측 수행결과를 이용한 상층분석 연구가 있었음 (Won et al., 1996). 세종기지의 기상특성에 대해서는 이후 2006년에 복사, 기온, 풍향에 대해 연구한 논문(Choi et al., 2006)과 태양복사, 기온과 운량의 변화에 대해 분석한 연구가 있음(Lee et al., 2006). 세종기지 외에 지역적 범위를 대상으로 한 연구로는 남극반도 주변 10개 기지의 기온자료를 통해 남극반도 동서 지역간 변화경향 차이를 분석한 연구(Lee et al., 2002) 사례가 있고, Lee et al. (2003)이 남극반도 온난화와 지역적 대기순환의 연관성을 분석한 바 있음. 2016년에는 기상관측자료와 중규모 모델(Polar WRF)을 이용해 극저기압 통과에 의한 세종기지 강풍 사례를 분석한 연구 결과가 학술지에 게재된 바 있음 (Kwon et al., 2016). 세종기지 열속 특성에 대한 연구로는 하계기간 열속과 순복사에 대한 분석을 수행한 바 있고 (Choi et al., 2005, 2008), 해빙상 열속에 대해서는 결빙기 및 해빙기 해상 열속 특성에 대해 제시하였음 (Park et al., 2013).
- 극지연구소-포항공과대학교-광주과학기술원의 공동 연구를 통해 북극 다산과학기지를 기반으로 에어로졸 입자 특성 및 기후냉각물질(DMS) 발생 변화에 대한 연구를 지속적으로 수행하고 있으며(미래부 과제), 본 연구 과제를

통해 남극에서의 기후냉각물질 (DMS 포함)-에어로졸-구름 형성간의 상호작용을 연구함으로써 연구 효율성 및 우수성을 제고하고자 함.

- 세종과학기지 대기빙하관측동내에 Aethalometer, CPC (Condensation Particle Counter), CCNC (Cloud Condensation Nuclei Counter) 등의 장비를 이용하여 대기 중 오염물질 농도 변화 및 에어로졸의 물리특성을 지속적으로 관측하고 있음.
- 기후가 매우 이질적인 서남극과 동남극에 위치한 대한민국 남극 과학기지들 주변에서 발생하는 극한 기상의 종류와 일반적인 양상에 대한 기초 연구는 기지 안전 및 남극 기후변화 이해에 있어서의 중요성에 비추어 볼 때 현재 매우 부족한 실정임. 특히, 극지역에서 빈번히 발생하는 강풍 블리자드와 규모는 국지적이거나 중심기압이 950 hPa 이하의 강력한 싸이클론인 극저기압 (polar low)에 대한 기초적인 연구조차 국내에서 거의 수행된 바 없음. 특히, 수치 모델링과 관련하여서는 최근, 극지연구소에서 남극 세종기지에서 발생한 극한 강풍 사례에 대해 극지역에 특화된 중규모 모델인 Polar-WRF를 사용하여 그 원인에 대해 기술한 국내 논문이 유일함.

2-2. 국외 동향

- 제1차 남극과학위원회 (SCAR) Antarctic and Southern Ocean Science Horizon Scan의 최종 80개 연구 주제 중 아래의 항목들이 본 연구와 긴밀하게 연관되어 있음.
 - How have teleconnections, feedbacks, and thresholds in decadal and longer term climate variability affected ice sheet response since the Last Glacial Maximum, and how can this inform future climate projections?
 - What drives change in the strength and position of Westerly winds, and what are their effects on ocean circulation, carbon uptake and global teleconnections?
 - What controls regional patterns of atmospheric and oceanic warming and cooling in the Antarctic and Southern Ocean? (Cross-cuts “Southern Ocean”)
 - How can coupling and feedbacks between the atmosphere and the surface (land ice, sea ice and ocean) be better represented in weather and climate models?
 - Will change in the Southern Ocean result in feedbacks that accelerate or

slow the pace of climate change?

- 남극 해빙과 기온 변화에 대한 외국의 연구 사례
 - 남극 성층권 오존의 감소가 성층권 냉각과 서풍 강화 경향을 유발하는 것을 입증하는 모델 실험을 통한 다양한 연구가 진행되었으나 서풍 강화 경향과 SAM의 양의 경향성에 대한 본질적 메커니즘은 아직 불확실함.
 - 서남극의 급속 온난화에 열대-아열대 기원 원격상관 패턴에 의한 아문젠-벨링스하우젠 해역 저기압의 강화 패턴에 대한 연구가 최근 활발히 연구되고 있음.
 - 남극 해빙면적의 약한 증가 경향이 알려진 후, 남극 빙상으로부터의 담수 유입, 바람 패턴의 변화, SAM의 계절내 변동, 오존홀, 해양의 온난화 등 다양한 메커니즘이 제시되고 있으나 지역적 패턴의 차이를 유발하는 메커니즘에 대해서는 상대적으로 연구가 부족한 실정임.

- CMIP5-PMIP3의 과거, 현재, 미래 기후의 수치적 재현 결과를 이용한 남극 기후 연구 경향
 - CMIP5-PMIP3에서는 과거 last glacial maximum, mid-holocene 시기 기후의 수치적 재현이 장기적분(long-term) 실험의 TIER 1 군으로 설계되어 있음 (Taylor et al., 2009).
 - CMIP5에 참여한 60개의 모델중 7개 (CNRM-CM5, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, MPI-ESM-P, MRI-CGCM3, NCAR-CCSM4)의 모델이 CMIP5-PMIP3의 last glacial maximum 실험에 참여함.
 - CMIP5-PMIP3의 과거 (last glacial maximum), 현재 (pre-industrial), 미래 (rcp4.5) 기후 실험 결과에 기반하여 남반구 제트기류의 위치가 남극 빙상고도와 해빙 면적 변화와 밀접한 연관이 있음이 제시됨 (Chavaillaz et al., 2013).
 - CMIP5-PMIP3의 과거 (last glacial maximum, mid-holocene), 현재, 미래 기후의 수치모의 결과들의 비교를 통해 미래 기후 예측 결과를 검증하려는 연구가 진행되고 있음 (Schmidt et al., 2014).

- 고기후모델링 상호비교 프로젝트 (Paleoclimate Modeling Incomparision Project)의 과거, 현재, 미래 기후의 수치적 재현 결과를 이용한 남극 기후 연구

경향

- CMIP5-PMIP3에서는 과거 마지막최대빙하기 (last glacial maximum), 홀로세중기 (mid-holocene) 시기 기후의 수치적 재현이 장기적분 (long-term) 실험의 TIER 1 군으로 설계되어 있음 (Taylor et al., 2012).
 - CMIP5에 참여한 60개의 모델중 7개 (CNRM-CM5, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM, MPI-ESM-P, MRI-CGCM3, NCAR-CCSM4)의 모델이 CMIP5-PMIP3의 마지막최대빙하기 실험에 참여함 (Taylor et al., 2012).
 - 프랑스 마리퀴리대학 연구팀은 CMIP5-PMIP3의 마지막최대빙하기, 산업혁명기이전, 미래변화 (rcp4.5) 기후 실험을 분석하여 남반구 제트기류의 위치가 남극 빙상고도와 해빙 면적 변화와 밀접한 연관이 있음을 제시함 (Chavaillaz et al., 2013).
 - 칠레 칠레대학교 연구팀은 CMIP5-PMIP3의 마지막최대빙하기와 4배중이산화탄소증가 기후 실험결과를 분석하여 마지막최대빙하기 시기에 북반구 평균자오면순환이 강화, 남쪽으로 이동하고 남반구 해들리순환이 약화됨을 제안함 (Chavaillaz et al., 2013).
 - CMIP5-PMIP3의 과거 (last glacial maximum, mid-holocene), 현재, 미래 기후의 수치모의 결과들의 비교를 통해 미래 기후 예측 결과를 검증 (Schmidt et al., 2014).
- PMIP 이외의 단일 모델 기반 마지막최대빙하기 기후의 수치적 재현 결과를 이용한 최근 남극 기후 연구 경향
- 영국 남극측량국, 캐나다 Simon Fraser 대학, 스웨덴 스톡홀름 대학 등의 국제연구팀은 마지막최대빙하기시기의 경계조건들을 적용한 수치재현 연구 결과 남반구 해빙이 남반구 서풍 강화와 북쪽으로 확장에 기여하는 것을 밝힘 (Sime et al. 2013).
 - 호주 뉴웨일즈 대학을 중심으로 하는 호주연구팀은 지구 자전축 변화에 의한 강제력이 마지막최대빙하기 남반구 기후시스템의 특성의 주요 원인임을 수치모델로 재현함 (Fogwill et al. 2015).
- 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 시작 됨. 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 미흡하였음.

- 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 있음.
- AMPS를 활용하여 미국 베이스 및 현장 캠프 주변의 연구 및 다양한 목적을 위한 인간활동 지원을 위해 실시간 기상예보시스템을 운영하고 있으며, 남극 내 긴급 상황의 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 있음.
- 장기간 축적된 AMPS 중규모 기상모델 자료를 이용하여 여러 국가의 연구기관에서 남극 대륙 주변의 다양한 기상, 기후 관련 연구가 활발하게 진행되어 오고 있음.



○ 극지 에어로졸-구름-기후간 상관관계 연구 프로그램 (영국)

- 영국의 Arctic Research Programme (<http://arp.arctic.ac.uk/>)의 일환으로 ACCACIA (Aerosol Cloud Coupling and Climate Interactions in the Arctic) 프로젝트를 수행 중 (참여 연구 기관: British Antarctic Survey, University of East Anglia, University of Leeds, University of Manchester, University of York, 연구 책임자: Dr. Ian Brooks)
- ACCACIA 프로젝트는 북극 지방의 에어로졸-구름 형성 과정 연구를 통해 보다 현실적인 미래 기후 변화 예측 모델 개발을 목표로 하여, 항공기 및 연구선을 활용한 북극 대기 에어로졸 및 기상 인자 현장 관측 연구를 수행함.
- 특히, 북극지역에서 항공기를 활용한 다양한 에어로졸 및 기상 인자 분석을 활발히 수행함으로써, 다양한 북극환경에서 계절별 극지 대기의 수직적 관측 자료를 획득함.

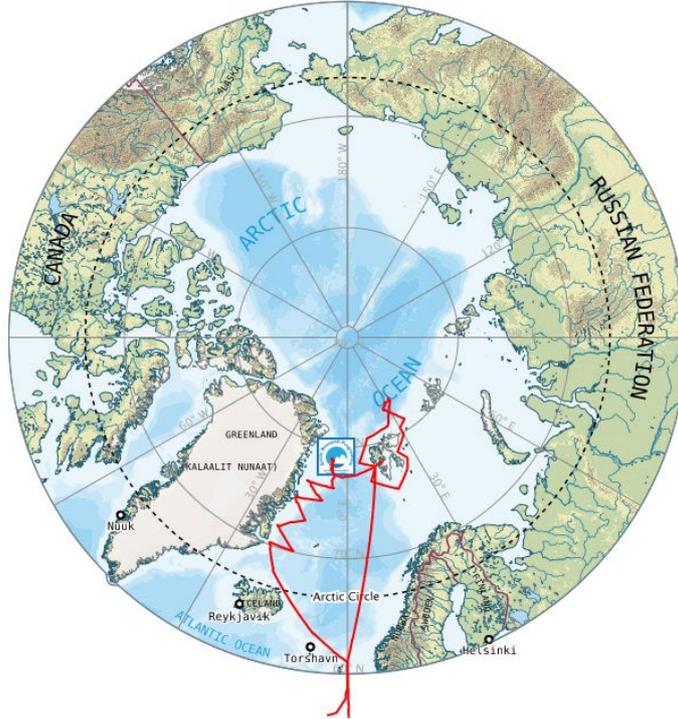


Fig. 2.9 ACCACIA 프로젝트에서 수행한 항공기를 활용한
북극 대기 연구 지역

- 해수면 변동 관련 남극 빙상 변화 규명 연구 사례
 - 미국 NSF(국립과학재단)은 2015년 발표한 “A Strategic Vision for NSF Investments in Antarctic and Southern Ocean Research” 보고서를 통해 국가차원에서 집중 연구할 시급한 연구과제 세 가지 중 첫 번째 주제로 해수면 변동의 현황과 미래 변화 예측을 선정하였음.
 - 동 보고서는 해수면 변동의 주요 인자인 남극 빙상의 변화에 대한 불확실성이 높은 이유 중 한 가지로 남극 기후변화 및 순환장 변화에 대한 관측과 이해가 부족한 것을 지목하고 있음.
 - 특히 온난화 경향이 큰 서남극에서 해빙-해양-기후 현황 및 상호작용에 대한 체계적이고 지속적인 현장관측이 필요하다고 제안하였음.
 - 또한 남극 환경을 적절히 반영하는 대기-해양-해빙-빙상 결합모델의 개발·개선을 제안하였음.

<Committee on the Development of a Strategic Vision for the U.S. Antarctic Program, “A Strategic Vision for NSF Investments in Antarctic and Southern Ocean Research”, The National Academies Press, 2015, pp. 170, ISBN: 978-0-309-37367-8>

○ 국제적인 연구기관들의 Year of Polar Prediction 참여

- 미국, 독일, 영국 등의 우수 연구기관들은 YOPP 참여를 목적으로 특별 프로젝트를 계획하고, 참여 의사를 밝히는 제안서를 제출함. 2016년 5월 현재 참여 예정인 프로젝트는 아래와 같이 요약됨.

프로젝트명 (국가)	기관	주연구자	지역
Forum for Arctic Modeling and Observational Synthesis (FAMOS) Phase 1 and 2 (미국)	WHOI	Andrey Proshutinsky	북극
The Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate (MOSAIC) (미국)	University of Colorado	Matthew Shupe	북극
Additional upper air soundings from Neumayer and RV Polarstern (독일)	AWI	Gert König-Langlo	남극
Arctic Earth Observation Impact Assessment (A+5) (독일)	The Inversion Lab	Thomas Kaminski	북극
Centre for high-latitude air-sea-ice exchanges (CHASE) (노르웨이)	University of Bergen	Ilker Fer	북극
IAMCO ("Italian Antarctic Meteorological Observatories") (이탈리아)	ENEA	Paolo Grigioni	남극
Southern Ocean Aerosol Clouds And ice Processes Experiment (SEASCAPE) (영국)	University of Leeds	Ian Brooks	남극
EXPLORING THE ROLE OF SEA ICE PHYSICS IN ARCTIC CLIMATE VARIABILITY AND PREDICTABILITY (영국)	University of Reading	Daniel Feltham,	북극
GEO Cold Regions Initiative (GEO CRI): Information Services for Cold Regions (중국)	Institute of Remote Sensing and Digital Earth	Yubao Qiu,	남북극
Arctic Climate Across Scales (스웨덴)	The Bolin Centre for Climate Research	Michael Tjernström	북극

AWARE- ARM West Antarctic Radiation Experiment (미국)	Scripps Institution of Oceanography /Byrd Polar &Climate Research Center	Dan Lubin Co-PI: David Bromwich,	남극
Southern Ocean Clouds Radiation Aerosol Transport Experimental Study (미국)	University of Illinois	Greg McFarquhar	남극
Northern Hemisphere weather and climate influenced by the changing Arctic (핀란드)	Finnish Meteorological Institute	Timo Vihma	북극
Influence of small-scale processes on the dynamics of the coupled atmosphere-cryosphere ocean system on daily to seasonal timescales in the region of Adélie Land, Antarctica (프랑스)	Université catholique de Louvain/ Université de Liège (ULg)	Thierry Fichefet/ Xavier Fettweis,	남극
Arctic-UNified Integrated Observing Network (영국)	British Antarctic Survey	Jeremy Wilkinson	북극

○ 고층 타워를 활용한 안정 경계층 과정 연구

- 남극대륙 내륙에 위치한 이태리-프랑스 공동 기지인 Dome-C 기지에서는 45 m 타워를 활용한 안정 대기 경계층 연구가 수행되어 오고 있으며 (그림 2.10), 지역 규모 모델과의 비교로도 사용됨(e.g. Gallée et al., 2015, Genthon et al., 2010).
- 미국 위스콘신 대학은 맥머도 기지에서 약 160 km 떨어진 곳에 2011년 30 m 타워를 설치하여 6 높이에서 풍향 풍속, 기온, 습도 등의 프로파일 관측을 지속적으로 수행해 오고 있음 (그림 2.11).



Fig. 2.10 Dome-C의 45 미터 타워



Fig. 2.11 로스 빙봉의 30 미터 타워

○ 미국의 서남극 아문젠 해 저층 대기과정 연구 강화

- 미국 뉴욕 대학은 Pine Island Glacier에서의 얼음의 질량 균형 이해를 위해 이 지역 대기과정에 대한 집중 연구를 2008년부터 지속적으로 수행 중이며, 이 지역이 적도 태평양과의 원격상관의 영향이 뚜렷함을 보였음(Djouman and Holland, 2015).
- 미국 위스콘신 대학은 2011년부터 서남극 아문젠해 연안에서의 저층 대기 과정 이해 향상을 위해 복수의 자동기상관측시스템(AWS)을 설치하여 운영중임 (<http://amrc.ssec.wisc.edu/>).

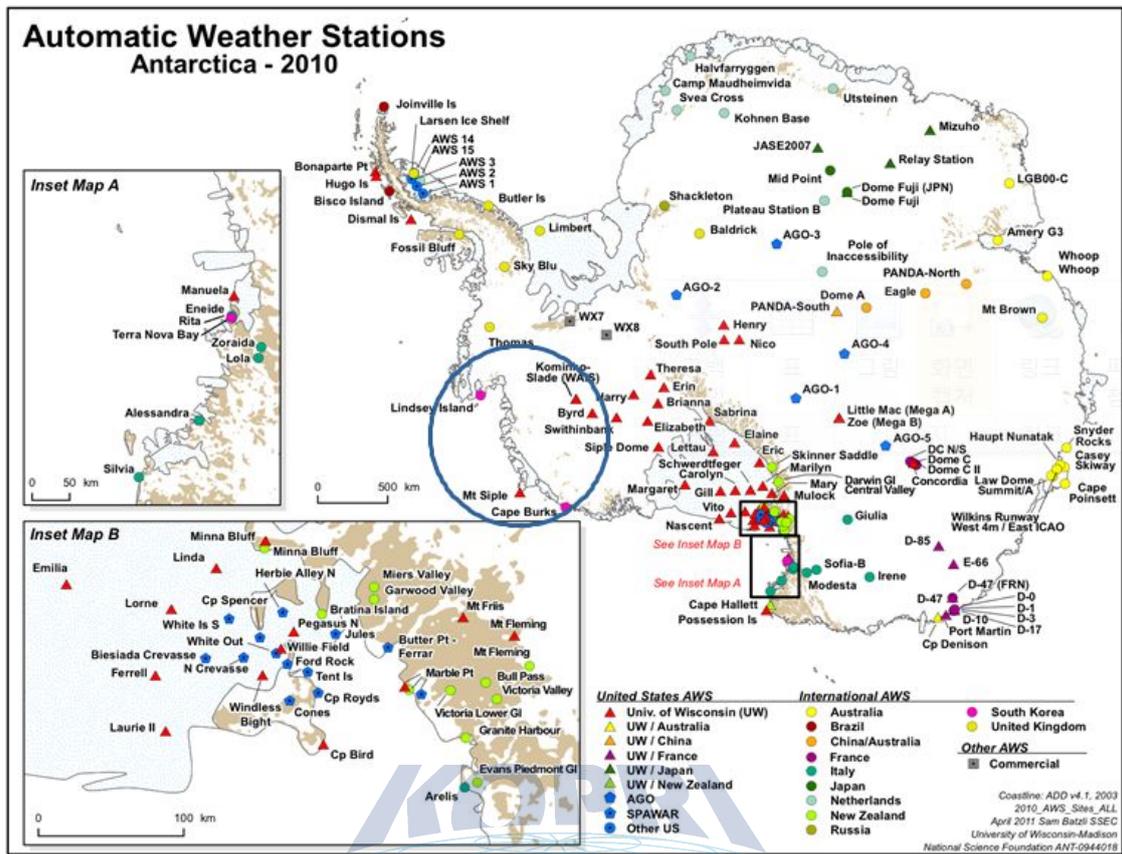


Fig. 2.12 2010년 남극 AWS의 위치

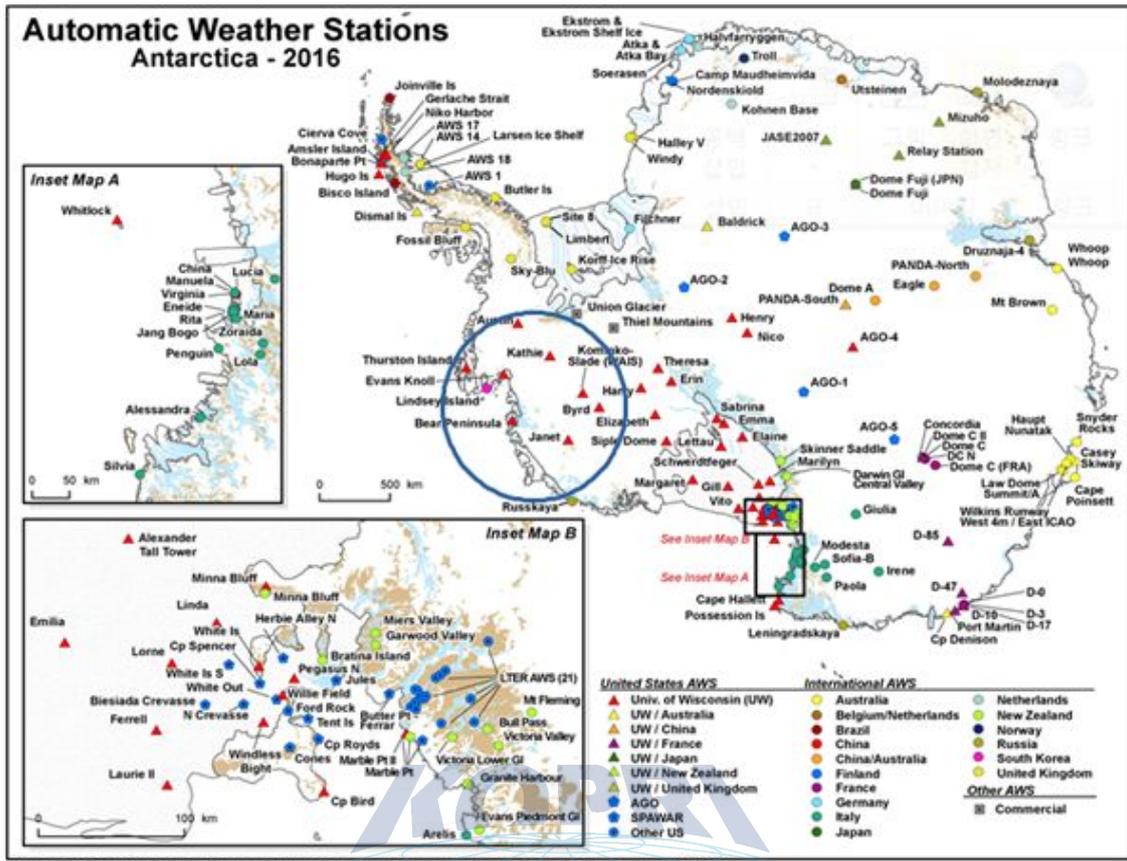


Fig. 2.13 2016년 남극 AWS의 위치. 2010년과 비교하여 동그라미 속의 서남극 지역 AWS 수가 상당히 증가하였음

- 대기 추적자 라돈가스를 활용한 남극으로의 대기수송과정 규명 연구
 - 남극 해안지역에서 관측된 라돈가스는 남반구 하계시즌에 동계시즌에 비해 농도가 높게 나타나지만 남위 50도 부근에서 관측된 라돈가스의 계절분포 특성은 동계시즌에 하계시즌보다 높게 나타나고 있음. 현재까지 GCM 모델 재현 결과는 남위 50도 부근에서 관측되는 라돈가스의 농도에 대해 과대평가하고 있지만 계절별 농도 분포 특성은 비교적 잘 재현하고 있음. 그렇지만 GCM에 의한 남극해안과 내륙의 라돈가스의 재현 결과는 하계시즌에 비해 동계시즌에 농도가 높게 나타나 측정결과가 계절분포 특성을 수치적으로 재현하지 못하고 있음 (Zhang 등., 2008). 라돈 가스외에도 남극에서 관측되는 미세입자의 BC (black carbon)농도 분포 역시 하계시즌에 동계시즌보다 농도가 높게 나타나고 있으나 GCM 모델은 동계시즌의 농도가 하계시즌에 비해 높게 재현되고 있음 (Wolff 등., 1998). 따라서 현재 남극의 대기구성 성분들의 계절별 농도 분포 특성을 수치적으로 재현함으로써 남극으로의 대기

수송과정을 이해하고 이에 미치는 대기 순환의 정확한 역할을 규명하는 것은 모델링 분야의 중요한 과제로 부각되고 있음.

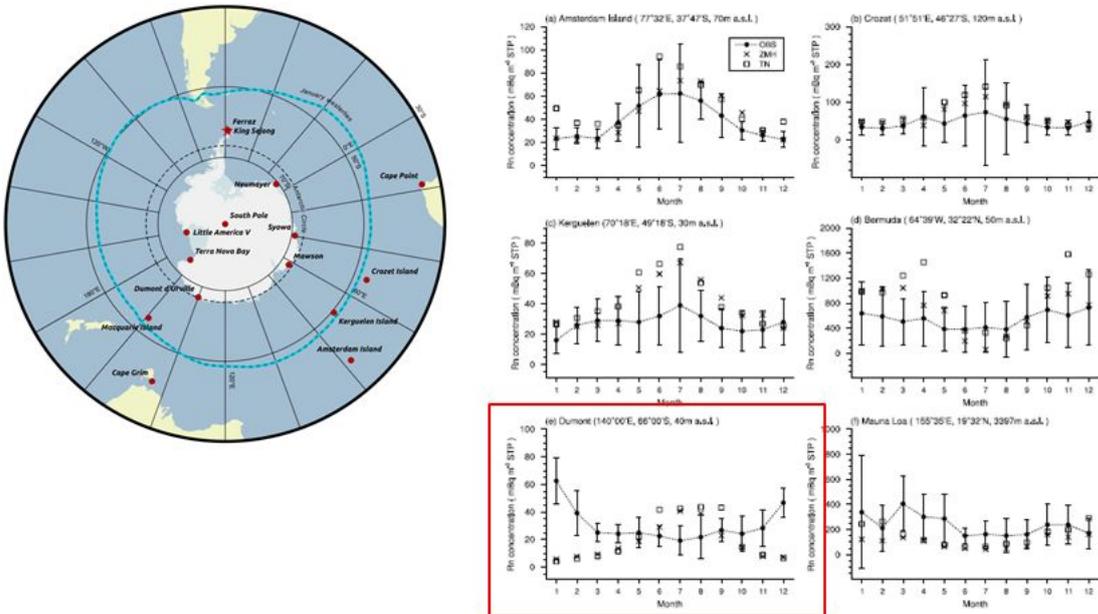


Fig. 2.14 아남극과 남극대륙에서 관측된 라돈측정결과와 GCM 모델링 수행결과 비교

- 영국 남극조사소 (British Antarctic Survey) 남극 연구 현황
 - 영국 BAS에서는 기후 및 기후변화 프로그램 아래에서 “Meteorology and Ozone Monitoring”, 등 16개 프로젝트를 진행하고 있음.
 - 프로젝트 중 “Meteorology and Ozone Monitoring”는 Halley 기지 및 Rothera 기지에서 지상기상, 상층대기 및 오존농도에 대한 장기간 모니터링 수행을 주내용으로 하고 있으며 “The role of Antarctic sea-ice in global climate” 프로젝트를 통해 남극에서 해빙과 기후의 상호작용 규명을 목표로 하고 있음. 그 외에 “Weddell Sea ice sheet and climate” 프로젝트와 “Climate and Ice during the Last Interglacial” 등을 통해 최근 간빙기 이후 기후 변동성 연구를 진행하고 있음.
- 미국 AWARE 프로젝트
 - 미국의 ARM (Atmospheric Radiation Measurement) 프로그램에서는 남극 기후 시스템에서 구름 관련 효과를 집중 연구하기 위해 AWARE (ARM West Antarctic Radiation Experiment) 프로젝트를 수행하고 있음.
 - 이 프로젝트는 온난화가 가장 급격하게 발생하고 있고 전지구 해수면 상승에도 큰 영향을 준다고 알려진 서남극지역의 빙상 및 기후변화에 대한 종합적인

관측연구가 1957년 IGY 이후 부족했다는 문제의식에서 시작되었음.

- 이 프로젝트는 2015년 11월부터 2016년 1월까지 서남극빙상(WAIS, West Antarctic Ice Sheet)에서, 2016년 1월부터 2017년 1월까지 맥머도기지에서 최첨단 관측유닛을 이용해 지상 기상, 에어로졸, 구름, 복사, 열속, 강수 등에 대한 집약적인 관측 수행 예정임.

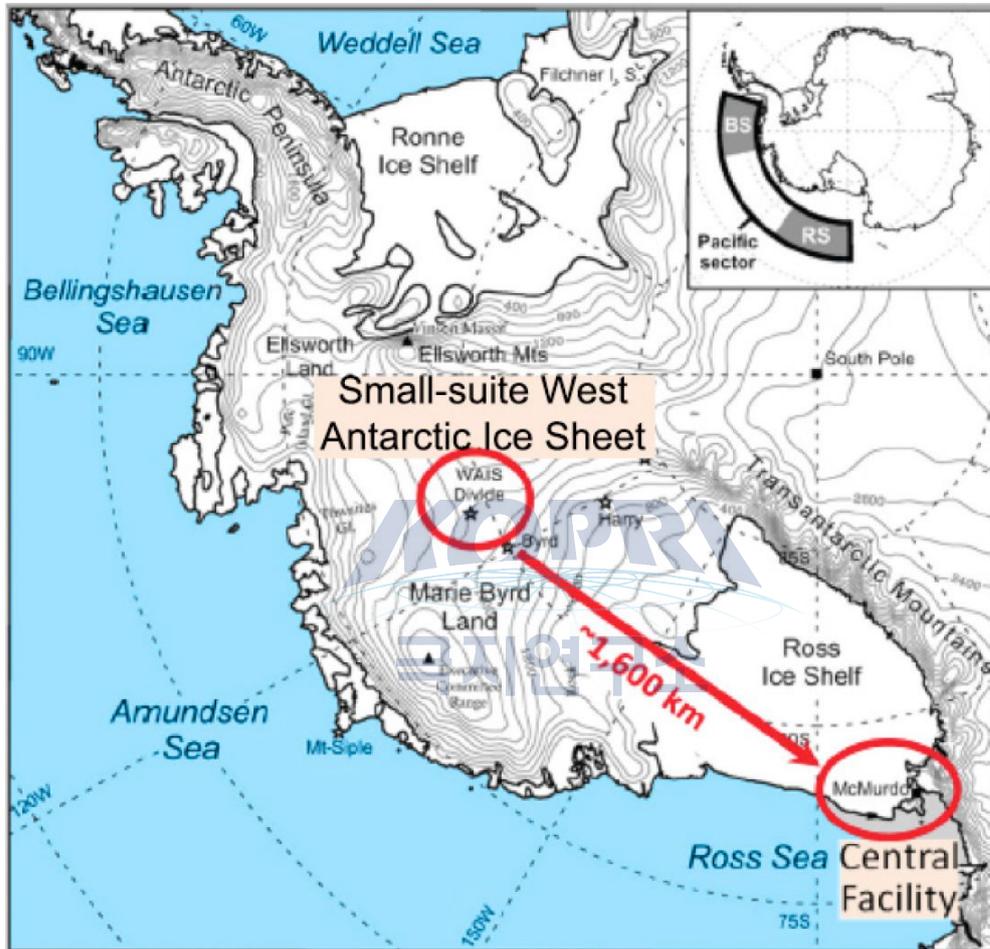


Fig. 2.15 미국 ARM의 AWARE 프로젝트 수행 지점 (2015.11-2017.1)

제 3 장 연구개발 수행
내용 및 결과

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

3-1. 연구개발 목표 및 내용

연구개발 목표	내용
<p>외부강제력 변화에 대한 남극의 기후변화 요소 반응 기작 파악</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 최근 남반구 대기 순환장 변화가 남극 해빙 및 기온의 지역차이에 미치는 영향 파악 ○ 남극 기후변화 이해를 위한 빙하기 남극 서풍 제트기류의 세기 및 위치 변화 파악
<p>서남극의 대기물리 특성 파악을 위한 중관규모 관측 및 수치적 재현</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수치모델링을 통한 남극 과학기지 주변 중규모 기상장의 수치적 재현 및 특성 파악 ○ 세종기지의 대기물리적 특성 파악 ○ 장보고과학기지 고층 타워 및 상층기상관측을 활용한 안정 대기 경계층 특성 평가 및 모수화 개선 ○ 서남극 및 장보고기지 연안 기상관측 활용을 통한 지면 과정과 큰 규모 대기의 역할 이해 ○ 대기추적자 라돈가스 활용 남극으로 대기수송 기작 파악
<p>남극 세종기지 대기입자 특성 및 생물기원냉각물질 변화 파악</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 남극 세종기지 기반 현장 관측을 통한 남극 대기 에어로졸 입자의 물리·화학적 특성 변화 연구 ○ Nano-size 에어로졸의 크기분포변화와 수농도 변화 관측 ○ 해양생물기원 기후냉각물질 (DMS) 및 대기 입자 화학 조성 변화 관측

1. 최근 남반구 대기 순환장 변화가 남극 해빙 및 기온의 지역차이에 미치는 영향 파악

- 최근 계절별 남극대륙과 주변 해양의 기후를 조절하는 인자 분석과 서남극과 동남극 간의 기후변화 패턴 형성 메커니즘 이해
 - 전지구 해수면 온도 변화 패턴이 유발하는 원격상관의 역할 이해
 - 오존 등이 유발하는 복사강제력 추세 변화의 역할 이해
- 빙하코어 프록시 자료를 통한 아문젠해 저기압과 해빙면적의 장기변동성 해석
 - 빙하코어의 화학 추적자의 농도 복원 자료를 통한 아문젠해 저기압 장기변동 추정
 - 20세기 재분석 자료의 아문젠해 저기압 변동과의 비교 검증

2. 남극 기후변화 이해를 위한 빙하기 남극 서풍 제트기류의 세기 및 위치 변화 파악

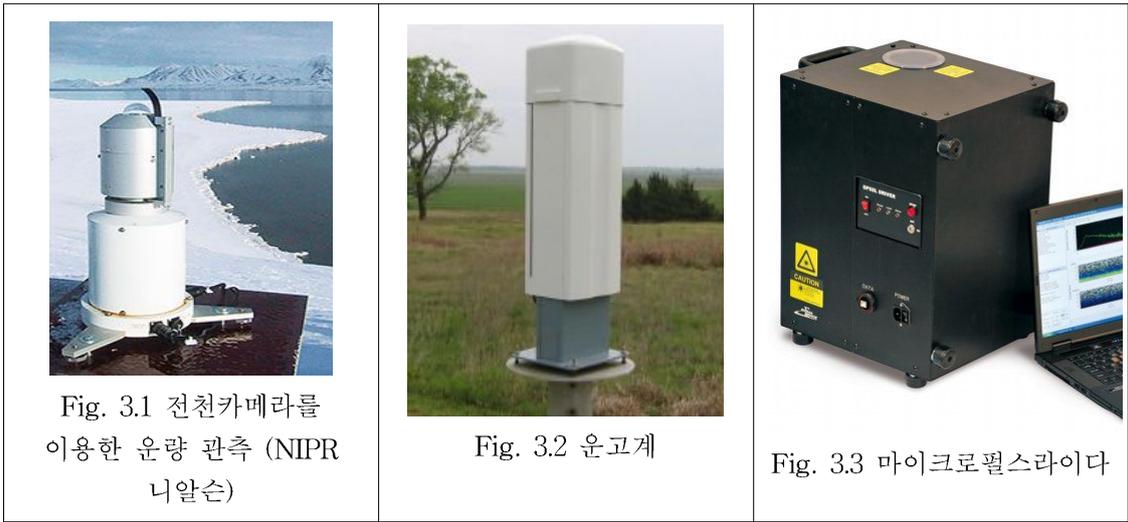
- 빙하기 남반구 순환장의 변화 특성 연구 기획을 위한 빙하기 남극 기후 수치적 재현 연구 현황 파악
 - 마지막 최대빙하기의 남극 기후 / 남반구 순환장 수치적 재현 연구 현황 파악
 - 기존 연구에 사용된 수치재현 연구 방법, 특히 사용가능한 수치모델 실험결과와 수치모델 종류 및 특성 파악
- 과거 및 현재의 남극 주변 순환장 변화 수치적 재현 연구 기획
 - 가용 수치모델을 이용한 마지막 최대빙하기 사전 실험 수행을 통해 향후 수치재현 연구의 활용가능성 분석
 - 빙하기 남반구 서풍의 세기 변화 메커니즘 규명을 위한 수치 재현연구 실험 설계
 - 남반구 서풍의 이산화탄소 조절자 이론 검증을 위한 수치 재현 연구 실험 설계

3. 수치모델링을 통한 남극 과학기지 주변 중규모 기상장의 수치적 재현 및 특성 파악

- 극 지역 중심 중규모 기상수치모델 도입 및 남극 기상모의시스템 구축
- 남극 중심 기상수치모델 수행에 필요한 기초자료(경계조건, 초기조건, 분석자료) 확보 및 입력자료 생산
- 남극 과학기지(장보고, 세종기지) 중심 중규모 기상장의 수치적 재현을 위한 최적 영역설정 및 물리과정 설계
- 남극 과학기지의 기상관측자료를 이용한 수치모델 결과 검증
- 모델결과 분석을 통한 남극 과학기지 주변 중규모 기상장 분석

4. 세종기지의 대기특성 및 변화 원인 연구

- 남극세종과학기지 30년 기상관측자료 품질관리
 - 세종기지 1988년 이래 기상관측자료 품질평가: 각 연도별 기상대원의 월동보고서 기상장비 관련 이슈를 확인하고 킹조지섬 내 장기간 기상관측자료(예: 벨링스하우젠 기지)와 비교 분석을 통해 자료의 신뢰성 수준 평가
 - 파일 형태로 보관중인 기상관측자료의 활용성을 최대화하고 내외부와 공유하기 위해 온라인 데이터베이스 구축
 - 높은 정확도가 필요한 장기 기온변화 경향성 분석 등을 위해 매년 하계 정기적인 기상센서 검보정을 수행: 일반 기상센서보다 정확도가 높고 안정성이 높은 레퍼런스 센서를 이용해 남극 하계기간마다 AMOS 장착 기상센서와 며칠간 비교관측 수행해 기록 남기고 레퍼런스 센서를 다시 매년 1회씩 국내 기상검정기관에서 검정을 수행해 기록을 남겨 세종기지 기상센서의 정확도를 장기간에 걸쳐 추적할 수 있는 체계를 구축함.
- 남극세종과학기지 기상관측 강화
 - 기존에 세종기지 기상관측이 지상 기상요소 관측에 머물러 있는 한계가 있음. 따라서 기존에 목측만 수행되던 구름관측을 정량적 관측으로 확대하고자 함. 전천카메라를 이용한 운량관측, 운고계를 이용한 운량/운저/층구조 관측, 마이크로펄스라이다를 이용한 운량/운저/층구조/상분포/광학효과 관측이 가능함.



- 킹조지섬에서의 상층관측은 벨링스하우젠 기지에서 1999년까지 수행되었으며 그 이후 상층관측이 중단된 상태임. 남극반도 동편의 Marambio 기지에서 일 1회 상층관측이 수행되고 있으나 거리상으로 약 250km 떨어진 곳이며 특히 킹조지섬과는 남극반도 반대쪽에 있어 지형효과에 의한 대기구조 차이가 발생할 수 있음. 따라서 라디오존데를 이용한 정기적인 상층관측 또는 마이크로파 라디오미터 같은 원격탐사장비를 이용한 대류권(지상 약 10km 범위 고도) 기온 및 수분 연직분포 관측이 수행되면 큰 가치가 있을 것임.



- 복사에너지는 지면 및 지표층의 일변화/계절변화를 발생시키는 가장 근본적인 요소임. 세종기지에서 기존에 하향 단파복사량과 장파복사량, 자외선복사량을 관측하고 있음. 이에 더해 지면에서 반사 및 방출되는 단파복사량과 장파복사량을 관측하고, 하향 일사량을 직달과 산란 성분으로 구분하여

관측하면 구름의 복사강제력 산출과 기후모델의 구름 모의성능을 검증하고 향상하는데 활용할 수 있음.



Fig. 3.6 산란 일사계



Fig. 3.7 Sunphotometer

- 현재 세종기지 앞 마리안소만 해변에서 에디공분산 장비를 이용한 대기난류 및 열속 관측이 수행되고 있으나 주변이 대부분 산 또는 빙하로 둘러싸인 환경에 있어 목적으로 하는 해상 및 해빙상 열속 특성 관측이 상당히 제한되고 있음 (Fig. 3.8). 또한 해상이 부분적으로 유빙에 덮힌 경우 관측된 열속자료 해석이 매우 난해함. 이러한 단점을 극복하고 해상/해빙상 열속의 대표성을 향상시키기 위해 수 km 범위내의 열속을 측정하는 scintillometer 장비가 사용될 수 있음 (Fig. 3.9).



Fig. 3.8 세종기지 에디공분산 장비
(플릭스타워 상단)

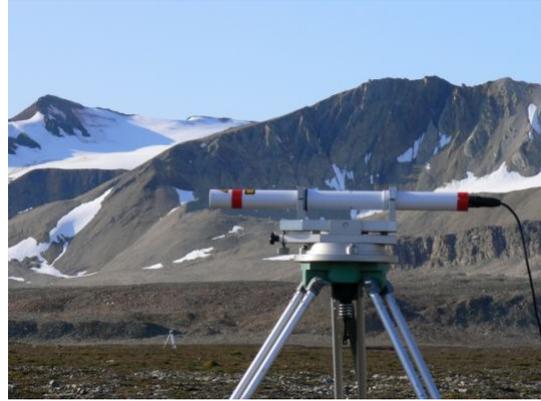


Fig. 3.9 지역규모의 열속 측정에 사용되는
scintillometer
(북극 니알슨, Univ. of Bayreuth)

- 현재까지 세종기지 기상관측의 기준으로는 AMOS-1 관측값을 사용하고 있으나 2010년 생활관 증축 및 2016-2018년 예정된 증축공사로 인해 기존 노장 위치의 관측값이 건물의 영향을 받을 가능성이 높음. 따라서 2010년부터 관측자료를 생산해온 AMOS-3를 기준 관측으로 변경하고 세계기상기구에 신고하는 것이 타당하며 센서의 오류로 인한 결측을 방지하기 위해 AMOS-3 타워의 기상센서들을 중복 설치하는 것을 제안함. 물론 기존에도 AMOS-1과 AMOS-3 관계처럼 한 쪽의 결측시 다른 쪽의 자료를 대안으로 사용할 수 있으나 동일한 환경에 있지 않으므로 하나의 관측위치에서 중복 관측자료를 생산하도록 구축하는 것이 좋음.

○ 서남극 대기 분석

- 세종기지의 30년 기상관측자료에 대한 품질평가와 보정 및 결측보완을 완료한 후 이 자료에 기반하여 세종기지 기후특성 분석 및 장단기 변동성 연구
- 서남극은 남극 온난화의 대표지역으로 꼽히고, 세종기지가 위치한 킹조지섬의 경우 남극 과학기지의 초창기부터의 기록을 보유하고 있어 장기 기후변화를 연구하기에 적합한 조건을 갖추었음.
- 또한 킹조지섬은 남극 해빙의 계절적 변동성 관점에서 볼 때 해빙경계의 경년변동에 따라 결빙 여부와 지속기간이 해마다 뚜렷한 변동성을 보이는 지역임.

- 따라서 세종기지에서의 기압, 풍속, 기온, 맥스웰만/마리안소만 해빙의 변동성은 지역적인 변동성 영향 뿐만 아니라 지역규모의 극저기압 활동성 변화, 대규모 대기순환장 변동성과의 연관성을 보여주는 좋은 관측자료가 될 가능성이 높음.
- 세종기지에서 라디오존데 관측이 수행되는 경우 남극반도 끝 부분 서쪽 지역 대기의 연직구조를 분석할 수 있음. 또한 과거 벨링스하우젠 기지에서 생산된 1969-1999년 상층 관측자료를 러시아 극지연구소(AARI) 또는 영국 남극조사소(BAS)를 통해 획득하여 분석할 경우 이 지역 대류권의 기온 변화 및 안정도 변화 등을 분석 가능함.
- 앞서 제안한 scintillometer 관측이 수행되는 경우 맥스웰만 등 넓은 지역에 해빙이 형성된 경우 열속자료를 획득하여 에디공분산관측에 비행 지역적 대표성을 개선하여 수치모델 모수화 적용에 더욱 적합함.

○ 국제협력

- 세계기상기구의 YOPP-SH 집중관측기간(2018-2019년)에 세종기지에서도 라디오존데 관측을 수행하고 그 자료를 실시간 GTS 전송함으로써 남극지역 기상예보모델의 입력 자료로 활용되도록 기여할 수 있음.
- 극지연구소에서 쇠빙연구선 아라온호를 이용해 수행예정인 남극 연구항해 영역 중 벨링스하우젠해와 브랜스필드해협은 남극반도 주변이므로 해당 연구항해 기간 중 라디오존데 관측을 수행하고 GTS 전송하여 기여할 수 있음. 또한 라디오존데 관측과 더불어 전천카메라, 마이크로펄스 라이더 관측을 수행하면 남극반도 주변 해상에서의 대류권 연직구조 특성 및 구름분포 특성을 연구할 수 있음.
- 남극반도 동쪽에 위치한 Marambio 기지에서는 상층관측을 비롯해 기상관측, 복사량 관측 등 다양한 관측연구가 수행되고 있음. 특히 체코 Masaryk 대학의 연구팀에서는 세종기지와 Marambio 기지에서의 구름 관측자료와 자외선 관측자료를 공동활용해 남극반도 동서 지역간 기후특성 및 변동성에 대한 공동연구를 제안하여 자료공유를 통한 공동연구가 진행되고 있음. 본 과제 연구기간(2017-2019년) 중 공동 집중관측 캠페인 등 방안을 협의해 선도적 연구 수행이 가능함.

5. 남극장보고과학기지 주변 대기과정 특성 평가

- 국외 기관의 YOPP-SH 참가 내용 분석 및 4기 주요사업에서의 참여 방향 제시
- 안정 대기경계층 과정에 대한 주요 이슈 파악 및 장보고기지에서의 경계층 연구

계획 수립

- 장보고기지 및 세종기지에서의 저층 대기과정 비교를 위한 서남극 아문젠해 연구 계획 수립
- 대기추적자 라돈가스 활용 남극으로 대기수송 기작 파악

6. 남극 세종기지 대기입자 특성 및 생물기원냉각물질 변화 파악

- 남극 세종기지 기반 현장 관측을 통한 남극 대기 에어로졸 입자의 물리·화학적 특성 변화 연구
- Nano-size 에어로졸의 크기분포변화와 수농도 변화 관측
- 해양생물기원 기후냉각물질 (DMS) 및 대기 입자 화학 조성 변화 관측



3-2. 연구개발 수행 결과

1. 최근 남반구 대기 순환장 변화가 남극 해빙 및 기온의 지역차이에 미치는 영향 파악

○ 최근 계절별 남극대륙과 주변 해양의 기후 조절 인자 조사

- 성층권 오존과 남극진동: 1950년대 후반부터 현재까지 남극 관측 지점별 장기 기온변화 경향을 보면 남극반도에서 봄(9-11월)의 온도 경향이 가장 약하고 나머지 계절은 온도 증가 경향이 큼. 인도양 섹터의 동남극 해안가 지역은 여름과 가을에 약하지만 음의 경향이 있는데 (그림 3.10), 이는 양의 남극진동 경향성과 합치하며 70년대부터 2000년까지 이어져온 성층권 오존 감소와 연관되어 있음이 보고되어 (Thompson and Solomon 2002) 남극의 기후 조절 인자로 온실가스 강제력에 더해 성층권 오존과 연관된 남극진동의 위상 변화가 제기되었음 (그림 3.12).

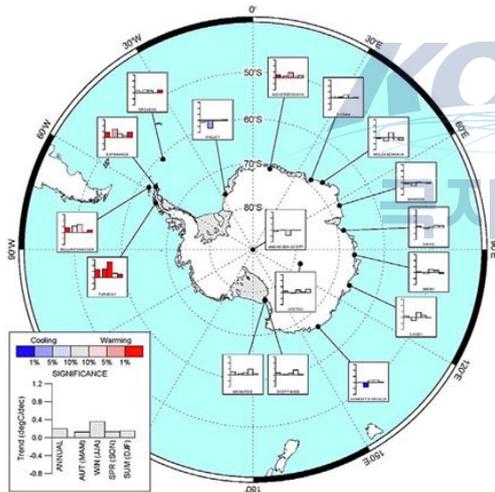


Fig. 3.10 연간, 계절별 남극 관측 지점에서의 장기 기온변화 경향 (Courtesy of Gareth Marshall)

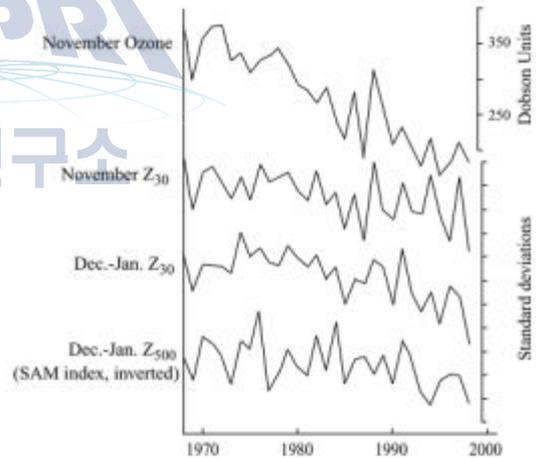


Fig. 3.11 남반구 봄철 오존 농도 변화

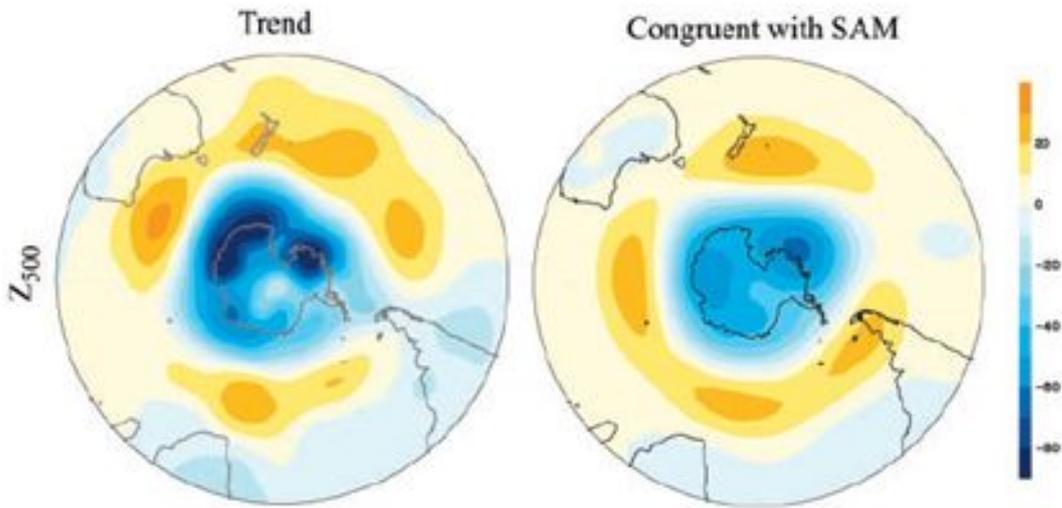


Fig. 3.12 1979-2000년 동안 남극의 여름과 가을(12월-5월)의 양의 남극진동 형태로의 경향성이 나타남을 보임 (Thompson and Solomon 2002)

- 성층권 오존 농도 장기 경향의 둔화: 남극의 성층권 오존 감소 경향은 최근 90년대 이후 둔화되어 최근 20년간은 감소된 수준으로 안정화 상태임 (그림 3.13). 급격한 오존 감소시기에 나타났던 남극 여름과 가을(12-5월)의 양의 남극진동으로의 경향도 최근에 급격히 둔화되었는데, 이에 반해 겨울(6-8월)의 남극진동은 과거 상대적으로 약했던 양의 경향성이 강화되었음 (그림 3.14). 남극 성층권 오존은 특히 남반구 여름철의 기후에 영향이 큰 것으로 파악되고 있는데 (Thomposon et al. 2011), 최근 평탄화된 오존 농도 변화와 급격히 변한 계절별 남극진동 위상 경향 간의 인과 관계를 기후모델 실험을 통해 파악해야 함.

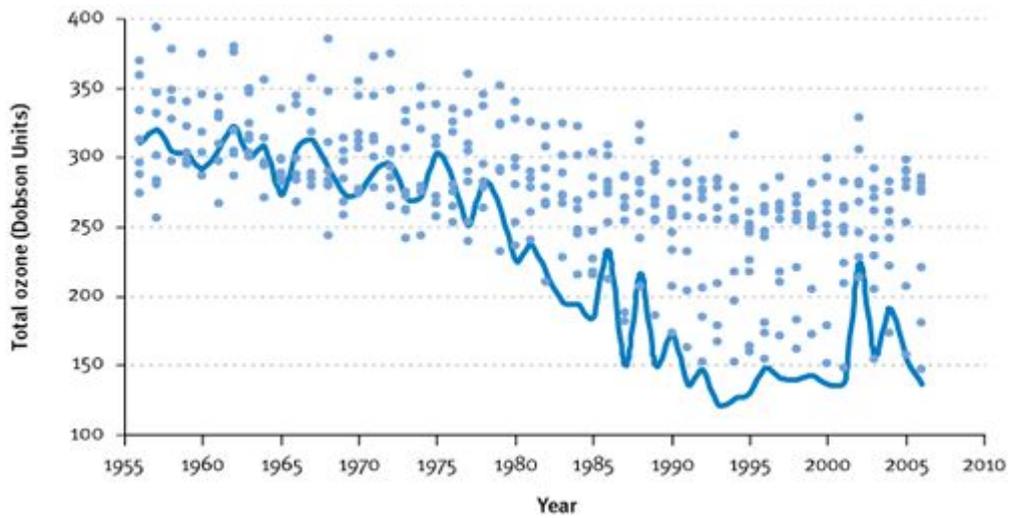


Fig. 3.13 1955-2006년 동안 남극 Halley 관측소에서 관측된 8월-4월 간 오존 농도 계절 변화(점)와 평균 10월 오존 농도(선) (출처: BAS 2007)

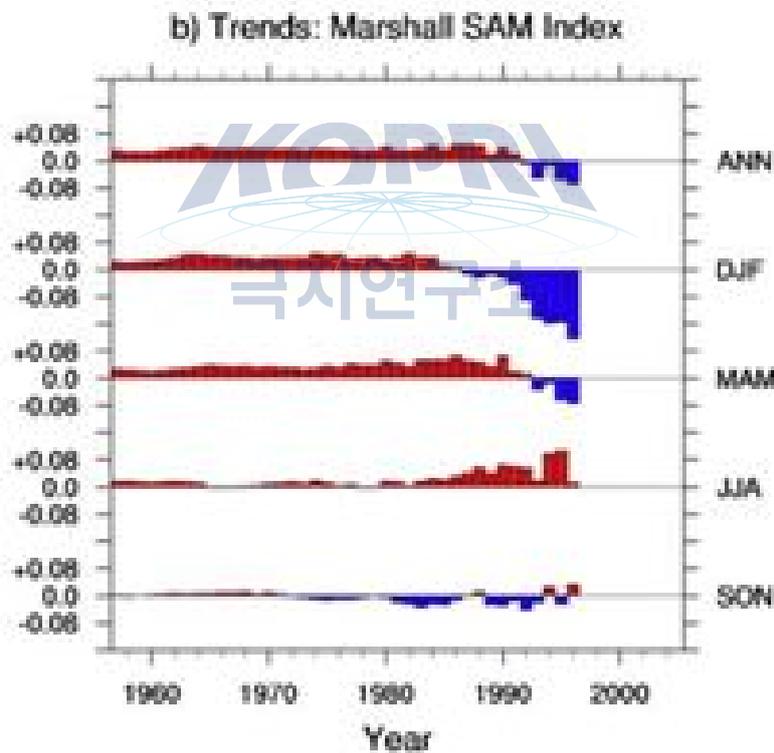


Fig. 3.14 각 시작년도(1978부터 1996까지)부터 2005년까지 계산된 남극진동 지수의 경향을 연속적으로 그린 그림 (Monaghan et al. 2008)

- 엘니뇨-남방진동(ENSO): ENSO와 같은 열대-글로벌 규모의 기후 현상은 대기 원격상관 패턴을 통해 남극의 기후에 영향을 주는데, 엘니뇨-라니냐 위상

변화는 주로 서남극의 아문젠해 저기압 지역에 큰 영향을 줌 (그림 3.15). 하지만 환남극 전체 기후 패턴을 볼 때 엘니뇨와 남극의 기후 패턴은 장기변동성이 큰 것으로 파악되어 이는 엘니뇨와 남극진동 간의 상호작용, 즉, 열대 태평양과 남반구 중-고위도 간의 상호작용에는 시기에 따라서 큰 변화가 있다는 것을 반증함 (그림 3.16).

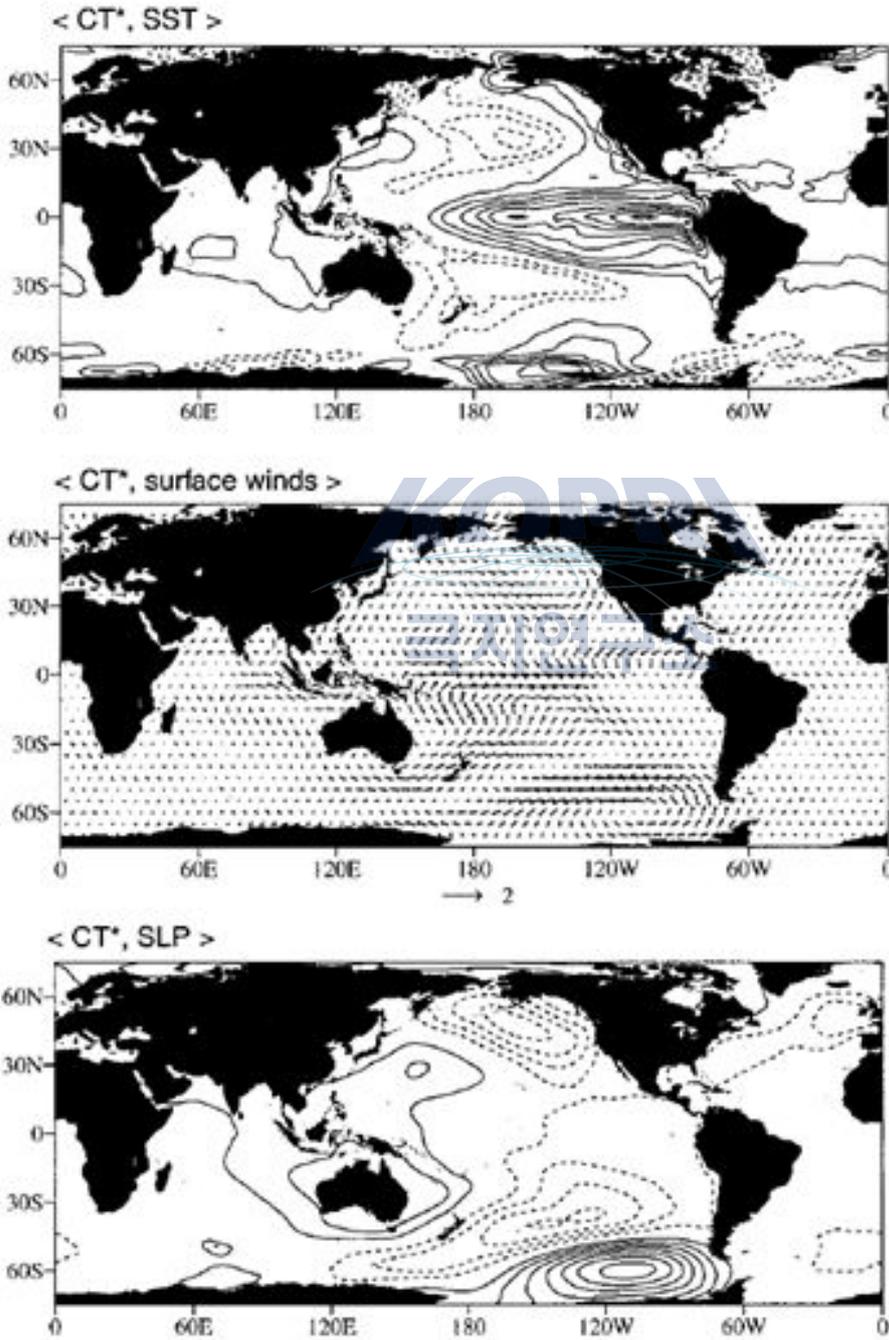


Fig. 3.15 엘니뇨 연관된 해수면온도 변화, 해면 바람, 해면 기압의 회귀 분석 패턴 (Garreaud and Battisti 1999)

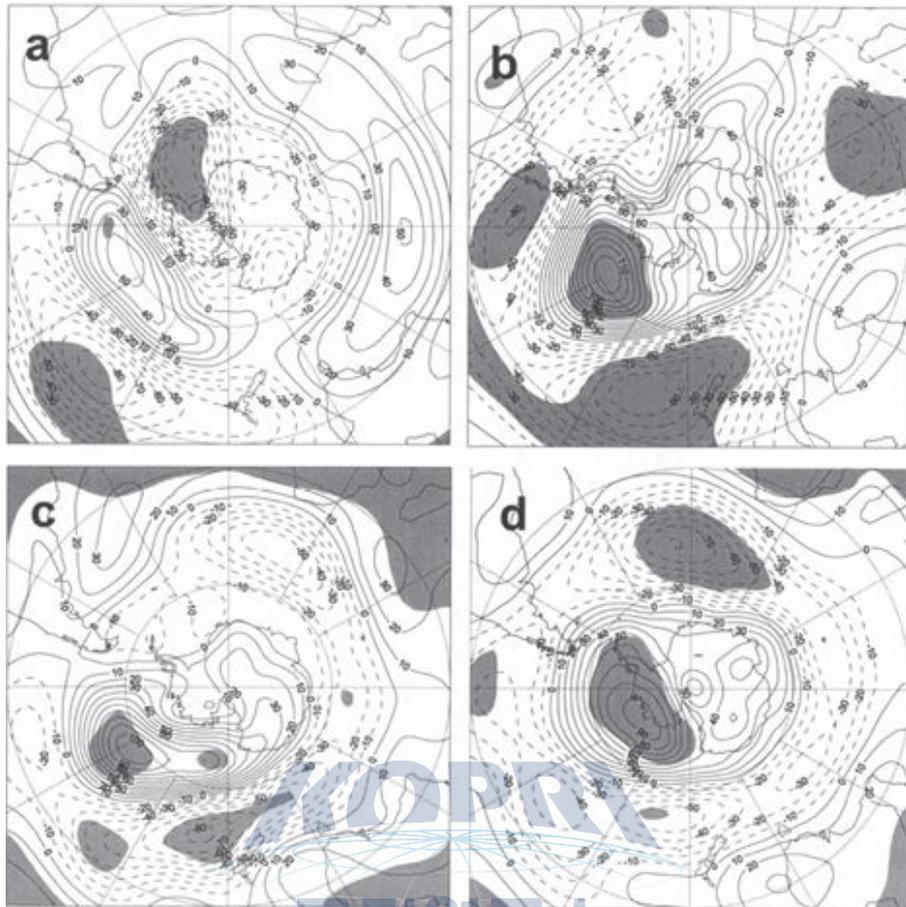


FIG. 5. ERA-40 500-hPa geopotential height anomaly ENSO composites (El Niño minus La Niña) for the events listed in Table 1: (a) SON 1980s, (b) SON 1990s, (c) DJF 1980s, and (d) DJF 1990s. Contour interval is 10 gpm. Shaded regions denote differences significant at >95% confidence level.

Fig. 3.16 80년대(a, c)와 90년대(b, d)의 (상단) 남반구 봄철(9-11월)과 여름철(12-2월)의 500 hPa 지위고도장의 엘니뇨와 라니냐 간 조합 차이 분석 결과 (Fogt and Bromwich 2006)

- 엘니뇨 유형 및 중태평양 온난화 패턴: 통상적으로 엘니뇨는 그 발달기와 최성기인 남반구 봄과 여름(9-2월)에 남반구 고위도에 영향이 나타남이 알려 생각되었는데, 최근 엘니뇨의 형태(동태평양 타입 vs. 중태평양 타입)에 따른 열대 대류의 위치 차이가 계절적으로 열대 태평양과 남극 간의 상호작용을 크게 바꿀 수 있다는 연구가 수행된 바 있음 (그림 3.17; Song et al. 2011). 중태평양 타입의 엘니뇨가 있을 때, 남반구 겨울(6-8월)에 서남극 아문젠해 저기압 지역의 기압에 영향력이 생기는데 이는 중태평양 엘니뇨 연관 대류 위치가 동태평양 엘니뇨보다 서쪽에 위치한 것, 동태평양 엘니뇨와 다르게 열대 서태평양에 보상 냉각이 없는 것이 남반구로의 정체 로스비파가 강하게 형성되는 기작으로 생각됨. Ding et al. (2011)은 중태평양 온난화 모드가

서남극으로의 정체 로스비파를 동태평양 엘니뇨 모드보다 크게 강화시키는 관련성을 보여 서남극의 급격한 온난화가 열대의 온난화 패턴의 영향이라고 판단하였음 (그림 3. 18). 중태평양 엘니뇨는 90년대 이후 그 빈도가 증가하는데 중태평양 온난화 모드와 연관되어 있음.

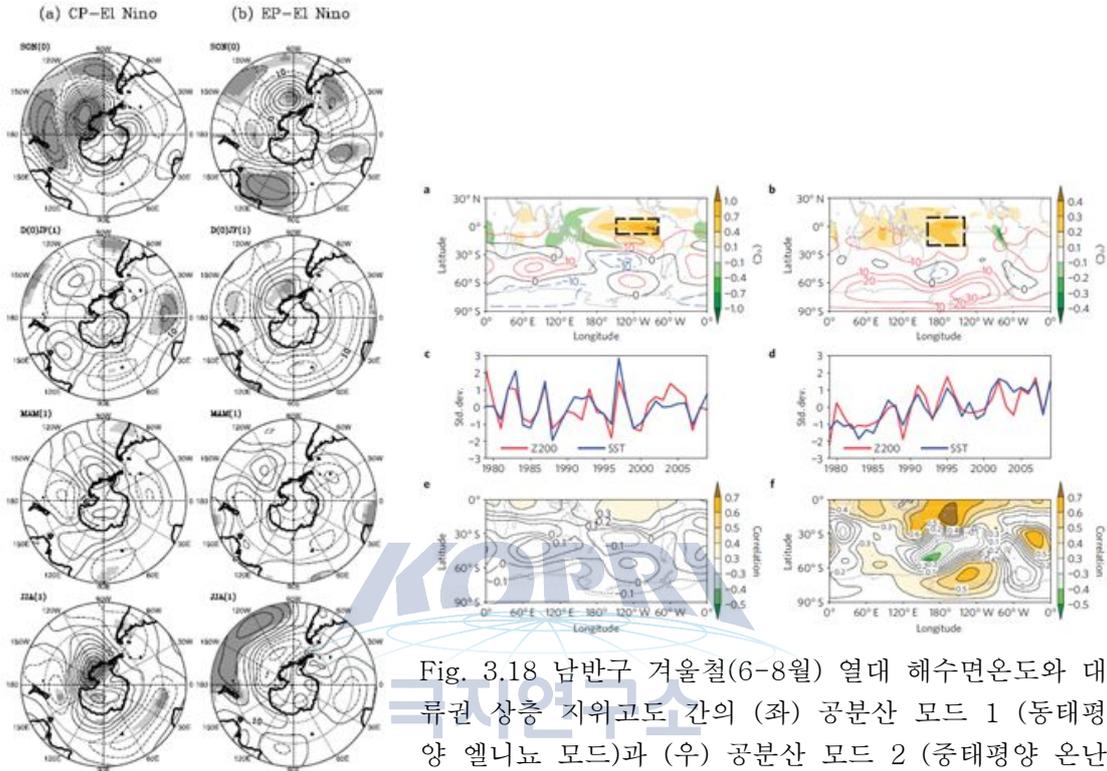


Fig. 3.17 중태평양 엘니뇨(왼쪽) 또는 동태평양 엘니뇨(오른쪽)와 연관된 계절별 남반구 기압 배치 패턴 (Song et al. 2011)

Fig. 3.18 남반구 겨울철(6-8월) 열대 해수면온도와 대류권 상층 지위고도 간의 (좌) 공분산 모드 1 (동태평양 엘니뇨 모드)과 (우) 공분산 모드 2 (중태평양 온난화 모드) (Ding et al. 2011)

- 인도양 해수면온도의 영향: 열대 인도양 해수면온도의 기후적 변동 모드인 쌍극자 패턴(IOD: Indian Ocean Dipole, Saji et al., 1999)이 남반구 봄철(9-11월) 로스해 서안 해빙면적에 영향이 최근 연구되었음 (Nuncio and Yuan 2015). IOD는 보통 엘니뇨 발달과 결합되어 나타나기 때문에 강한 엘니뇨 시그널로 인해 독립적 영향을 평가하기 어려웠으나 통계적으로 ENSO의 영향을 제거했을 때 원격상관 패턴은 동남극(60°E)과 서로스해의 해빙을 증가시키고 그 사이 90°E의 해빙을 감소시키는 역할을 하는 것으로 판단됨. 이에 앞서 Ding et al. (2011)은 기후모델 실험을 통해 남반구 겨울철(6-8월)

열대 인도양의 대양 규모(basin-wide) 해수면온도 아노말리에 의한 남반구로의 정체 로스비파 전파는 남극에 유의한 영향을 주지 못한다고 결론내림.

- 열대와 북대서양의 해수면온도의 영향: Ding et al. (2011)에 대한 비판으로 Li et al. (2014)은 중태평양 온난화 모드 남반구 겨울철 남극반도의 온난화를 설명하지 못하는 것을 제기하였음. 남극반도 온난화 패턴과 주변 해빙면적 공간 패턴은 열대와 북대서양의 대서양 수십년 주기 진동(Atlantic Multidecadal Oscillation)의 영향을 관측적 증거와 모델 실험 결과를 통해 제시함 (그림 3.19). 저자들의 논의에 따르면 중태평양의 해수면 온도 변동은 열대 대서양에 필적하나 온난화 경향은 약 0.2K로 대서양의 절반 수준이고, 하물며 중태평양 온난화는 남극반도에 냉각효과를 주고 해빙농도 분포도 관측과 반대로 나타남. 따라서, 중태평양 온난화보다 대서양 온난화의 영향이 더 큰 것으로 판단함.

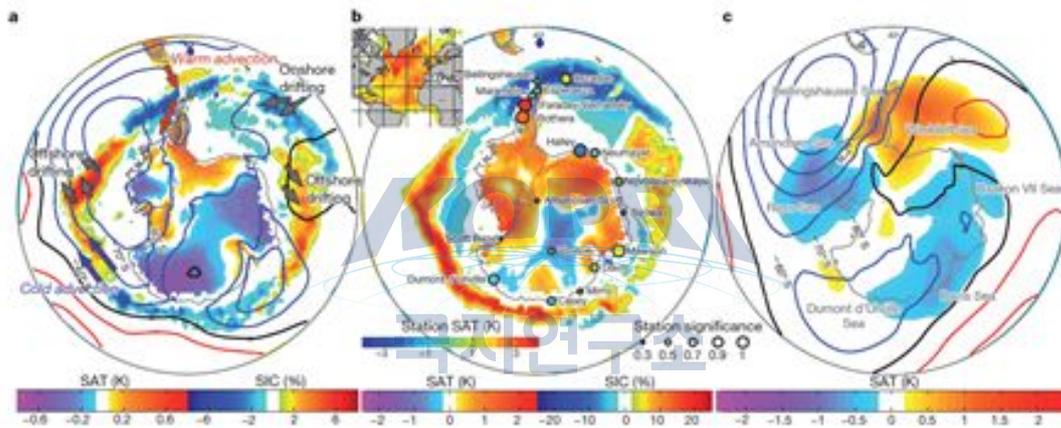


Fig. 3.19 (a) 대서양 해수면온도 증가와 연관된 남반구 겨울철 해면기압, 육상 기온, 해빙농도, (b) 육상 기온과 해빙농도의 장기 변화 (1996-2012에서 1979-1995를 뺀 패턴), (c) 열대 대서양 해수면온도 강제력을 준 기후모델 실험이 모의한 해면기압과 지상/해상 기온 패턴 (Li et al. 2014)

○ 서남극과 동남극 간의 기후변화 패턴 형성 메커니즘 이해

- 온실가스 강제력, 성층권 오존 변화와 같은 화학 지시자의 변화로 인한 기후변화는 남극 뿐만 아니라 전지구에의 영향을 통해 글로벌 기후변화 패턴을 형성함. 그림 3.20은 가장 최근 약 30년간의 글로벌 기후변화 패턴을 보여주고 있는데, 태평양 열대와 아열대 지역의 무역풍(동풍)과 남빙양의 서풍이 동시에 강화되고 있고, 대서양과 인도양의 온난화, 말발굽 형태의 서태평양부터 중위도 중태평양 온난화, 적도 중, 동태평양과 남빙양의 냉각화 패턴이 형성되어 있음.

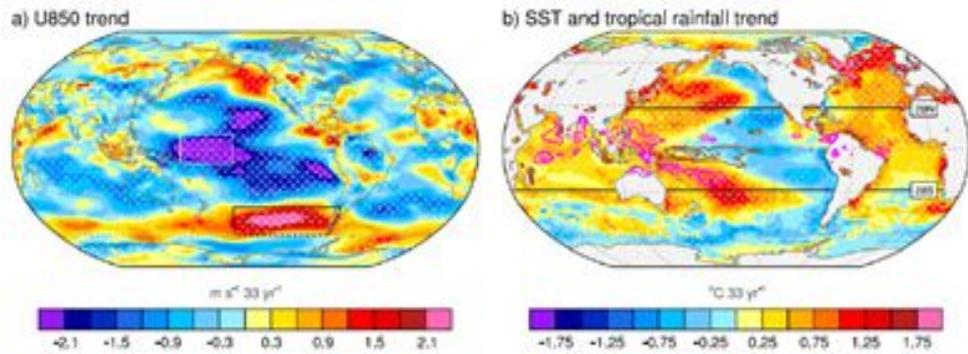


Fig. 3.20 1979-2011 동안의 전지구 (a) 850 hPa 동서류, (b) 해수면온도와 열대강수의 선형 경향 (Schneider et al., 2015)의 그림2에서 발췌)

- Monaghan et al. (2008)에 나타난 바와 같이 시작 시점에 따라 남극진동의 장기 경향은 바뀔 수 있음. 80-90년대를 시작 시점으로 하면 경향성의 급격한 반전이 있는데 (그림 3.21), 이는 남극 지상기온의 경향에도 그 흔적이 나타나 있음. 그림 11에 시작 시점을 다르게 하여 CRUTEM4 지상기온 자료에 나타난 장기 경향을 나타내었음. 남극반도의 장기 온난화 경향은 남극반도 끝자락 지점을 제외하고 4계절 내내 대체로 유지되고 있음. 동남극 해안 인도양 섹터 지점은 여름(DJF)과 가을(MAM)에 감소 경향이 약간 우세하다 최근 기간에는 증가 경향이 강해지고 있고, 봄(SON)에도 증가 경향이 지속적으로 우세한 반면, 겨울(JJA)에는 증가 경향에서 감소 경향을 보이는 지점(동부 인도양 섹터)이 증가함.

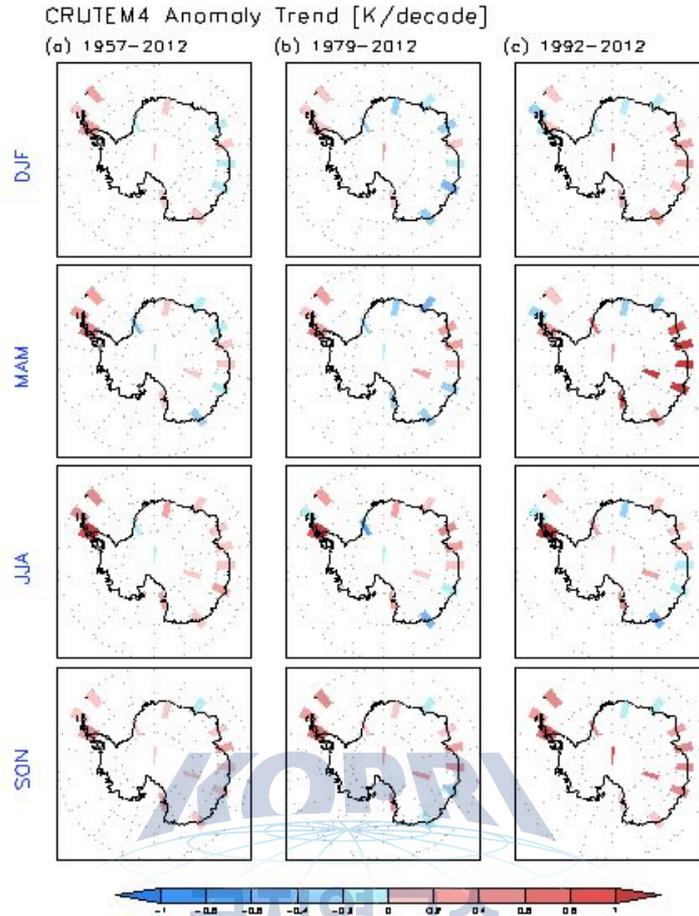


Fig. 3.21 CRUTEM4 지상기온 자료에 나타난 남극 지점별 기온변화 경향 (단위: K/10년)

- 기획 연구과제에서는 이러한 환남극 전체의 기후변화 패턴에 보이는 시기에 따른 변화를 일으킬 수 있는 남극 기후조절 요인들을 선행 연구를 통해 조사하였고, 본 연구과제에서는 성층권 오존, 전지구 해수면 온도 (인도양, 태평양, 대서양) 등의 역할을 기존 연구와 다르게 환남극 전체적 시각에서 관측 자료 분석과 기후모델 실험을 통해 다루어보고자 함. 단, 연구가 활발히 진행된 서남극 지역보다 동남극 지역의 기후조절 요소에 좀 더 집중하여 남극 기후조절 요인들의 개별적 역할과 결합된 역할을 정리할 것임.
- 물론 많은 선행 연구가 있지만 성층권 오존 농도 감소 둔화를 고려하여 남극진동 경향을 시기에 따라 해석한 실험이나 최근 해수면온도 변화 패턴을 기반으로 한 각 대양별 해수면 온도 편차가 개별적으로 또는 결합되어 유발한 남극으로의 원격상관 패턴에 대한 심화된 기후모델 실험 연구는 아직 없음.
- 실험 계획: 극지연구소에서 활용중인 CAM5-UNICON (Community

Atmospheric Model ver. 5 with the Unified Convection Scheme) 기후모델은 최근 개발된 규모 적응 대류 스킴 (Park, 2014)이 결합된 기후모델로 대류 모의 성능과 열대 대류 원격상관 모의 능력이 획기적으로 향상되었음 (Yoo et al. 2015). CAM5-UNICON을 활용하여 성층권 오존 농도 변화 실험과 해수면온도 강제력을 다양한 방식으로 처방한 실험을 병행하여 서남극과 동남극을 모두 아우르는 기후변화 패턴 형성 메커니즘을 이해함 (그림 3.22). 인도양, 태평양, 대서양 해수면 온도 경향 패턴 중 하나만 변화시킨 실험, 인도양+태평양, 태평양+대서양, 대서양+인도양 형태로 하나의 대양의 변화만 제외시킨 실험 등을 통해 동남극과 서남극으로의 원격상관 패턴의 변화를 모의하고, 성층권 오존의 역할을 더하여 오존의 역할이 결합된 변화 경향도 산출함.

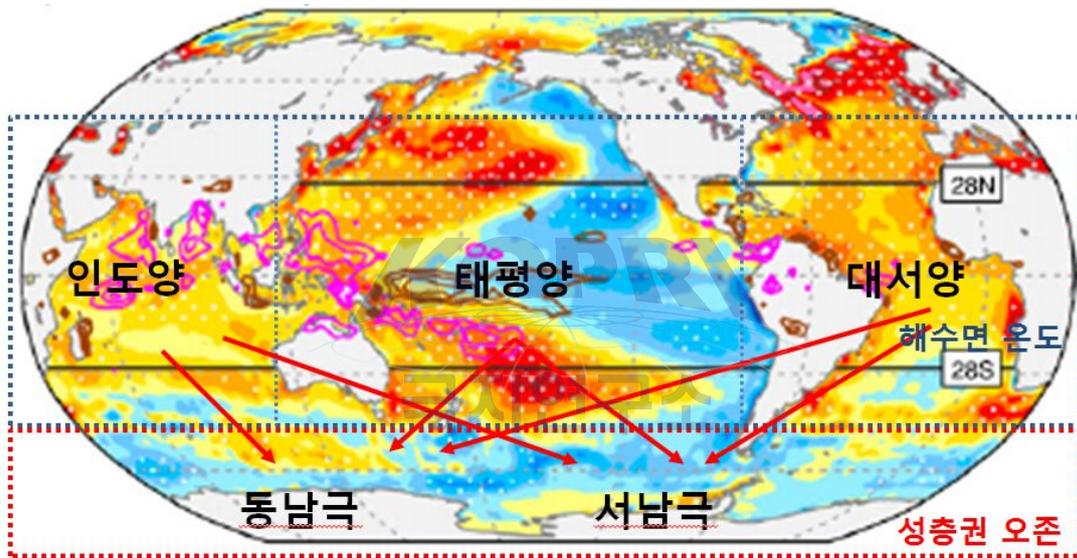


Fig. 3.22 기후모델 실험의 외부 강제력 실험 대상 지역에 대한 모식도

- 아문젠해 저기압의 100년 이상 장기변동 분석
 - 빙하코어의 해염 에어로솔(sea salt sodium)이나 MSA(methane sulphonic acid) 등 화학 추적자의 농도 복원 시계열 자료는 아문젠해 저기압의 변동이나 해빙 면적의 100년 이상의 변화를 이해하는데 활용될 수 있음 (Abram et al. 2013; Raphael et al. 2016). 그림 3.23은 서남극 빙하코어에 퇴적된 해염 에어로솔 기록이 아문젠해 저기압 활동의 프록시임을 보여주고 있음. 우측 그림의 해면기압은 양의 남극진동 패턴과 유사한데 이는 서남극 돛에 해염 에어로솔이 많은 해에 아문젠해 저기압의 강화(양의 남극진동 위상)가 보였음을 의미함.

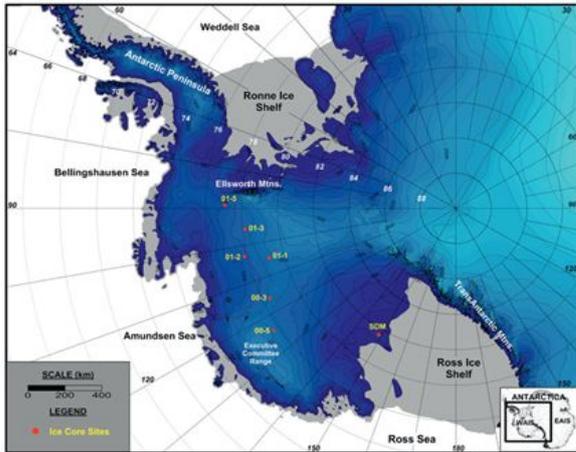


Fig. 4. (a) Locations of the seven West Antarctic ice cores used to provide a regional Na concentration, which was compared with MSLP and ASL parameters.

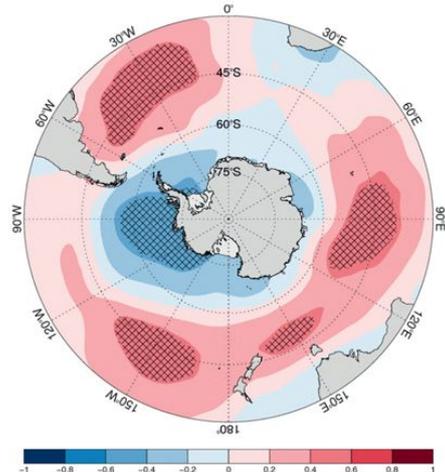


Fig. 4. (b) Correlation between mean annual Na concentrations in the stacked ice core record from West Antarctica and annual MSLP for the 1979-2001 period. Correlations when $p < 0.05$ are highlighted with cross hatching.

Fig 3.23 (좌) 서남극 빙하코어 7 지점, (우) 빙하코어 기록과 해면기압 간의 상관도 (1979-2001) (Raphael et al. 2016)

- 남극의 해염 에어로솔은 보통 해빙 표면이 주요한 근원이라고 알려져 있어 해염 나트륨 플럭스는 해빙면적의 프록시로 사용되었음 (Wolff et al., 2006). 남극 해염 에어로솔 기록의 두 가지 특징이 이를 뒷받침하는데 해염 에어로솔은 해빙이 넓게 덮여있는 겨울에 농도가 가장 높게 관측된 것이 첫 번째 이유이고 해양에서 기원한 것에서는 보이지 않는 뚜렷한 황산염 퇴적을 보여주기 때문임.
- 해빙 지역에서 주로 서식하는 식물플랑크톤으로부터 주로 생성되는 DMS(Dimethylsulphide; $(CH_3)_2S$)는 해수로부터 대기로 방출되고 산화되면 MSA나 황산염(SO_4^{2-})이 되어 이러한 최종 산물은 빙하코어에서 측정될 수 있음. 해염이나 화산 활동 같은 비생물 활동에 기원한 것도 많은 황산염과 달리 MSA는 많은 양이 해빙 지역의 해양생물 활동에서 기인함. 남극 MSA 퇴적의 해빙면적에 대한 민감도가 화학수송모델을 이용하여 연구되었음 (Hezel et al., 2011).

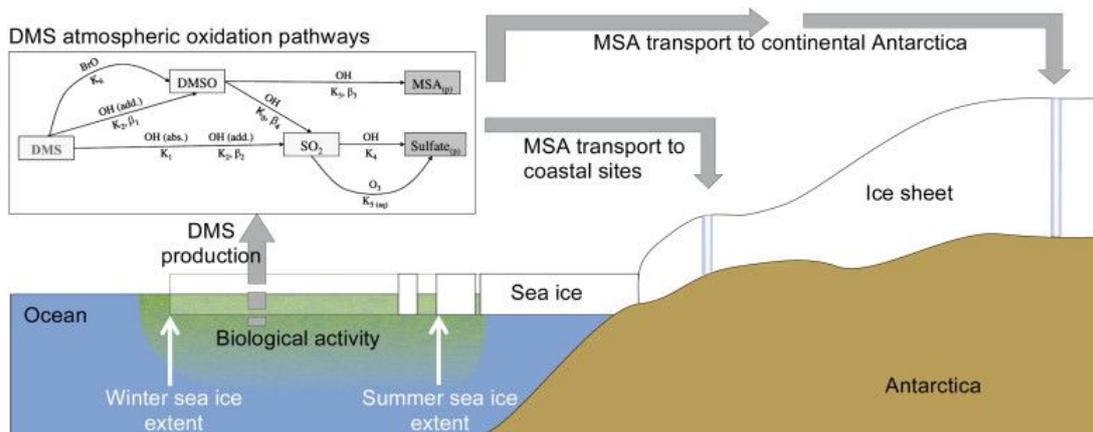


Fig. 3.24 해빙 지역에서의 MSA 생산과 남극 빙상에서의 퇴적에 영향을 주는 해빙 근원, 대기 산화, 수송, 퇴적 과정에 대한 모식도 (Abram et al., 2013)

- 미국 환경정보센터(National Centers for Environmental Information)의 빙하코어 자료 저장소(Webpage: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/paleoclimatology-data/datasets/ice-core>)에서 확보한 WAISCORES A-J Cores 자료를 통해 관련 화학 지시자를 확보 예정
- 빙하코어 기반 화학 지시자 자료를 해빙면적 프록시자료로 간주하고 20세기 재분석 자료 - NCEP 20C 재분석 v2 (Compo et al. 2011) & ERA-20C 재분석 (<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-20c>)을 통해 확보한 대기 환경장(해면기압, 바람, 기온 등)을 통해 아문젠해 저기압 활동 지수(강도, 면적, 변위)와 남극진동 지수를 정의함. 두 자료에서 해빙과 아문젠해 저기압 활동 간의 의미있는 관련성 유무 분석함. 추가로 아문젠해 저기압 상류 지역의 로스해 지역의 스톱 강도와 빈도를 추출하여 아문젠해 저기압 활동과의 관련성을 분석함.

2. 남극 기후변화 이해를 위한 빙하기 남극 서풍 제트기류의 세기 및 위치 변화 파악

- 마지막최대빙하기의 수치모델 기반 서풍 제트기류의 변화 연구 현황
 - 마지막최대빙하기의 남극 순환장 연구의 경우 제한적인 대리자료 (proxy data)로 인하여 많은 수치모델을 이용한 수치적 재현 연구가 이루어지고 있음.
 - 대리자료의 기반 연구의 경우 마지막최대빙하기의 남반구 먼지 기록 등의 직접 대리자료 (direct proxy data)와 꽃가루의 해안분포 등 간접 대리자료 (indirect

- proxy data) 분석 결과 호주 지역의 남위 36도에서 43도 사이의 서풍이 강화된 것으로 나타남 (Shulmeister et al., 2004).
- 남반구 중위도 강수는 서풍의 강화와 연관된 전선과 저기압 시스템에 의해 강화되는 것으로 나타남 (Garreaud, 2007).
 - 대리자료 기반 연구를 통해 제시된 남반구 서풍의 강화와 이에 따른 중위도 기압계의 변화에 기반한 여러 빙하기-간빙기 전환 개념모델이 제안됨 (Toggweiler et al., 2006; Williams and Bryan, 2006).
 - 고기후 모델링 상호비교 프로젝트는 마지막최대빙하기의 남반구 대기순환장 변화 특성 연구를 위한 중요한 수치 재현 도구로 활용되어 왔음.
 - 1차 고기후 모델링 상호비교 프로젝트 (PMIP1)에서는 CLIMAP에서 제공된 해수면온도를 처방하는 실험과 해양혼합층모델 (slab ocean mode)을 이용하는 두 종류의 마지막최대빙하기 실험이 진행되었고 각 9개의 모델, 4개의 모델이 참여함 (Joussaume et al., 1999).
 - 2차 고기후 모델링 상호비교 프로젝트 (PMIP2)에서는 대기-해양 접합 실험과 대기-해양-식생 접합 실험의 두 종류의 마지막최대빙하기 실험이 진행되었고 각 6종, 1종의 모델이 이 실험들에 참여함 (Braconnot et al., 2007).
 - PMIP2의 마지막최대빙하기 실험 모의 결과 참여 모델들간 남반구 서풍 위치와 세기의 편차가 존재함 (Rojas et al. 2009) (그림 3.25).

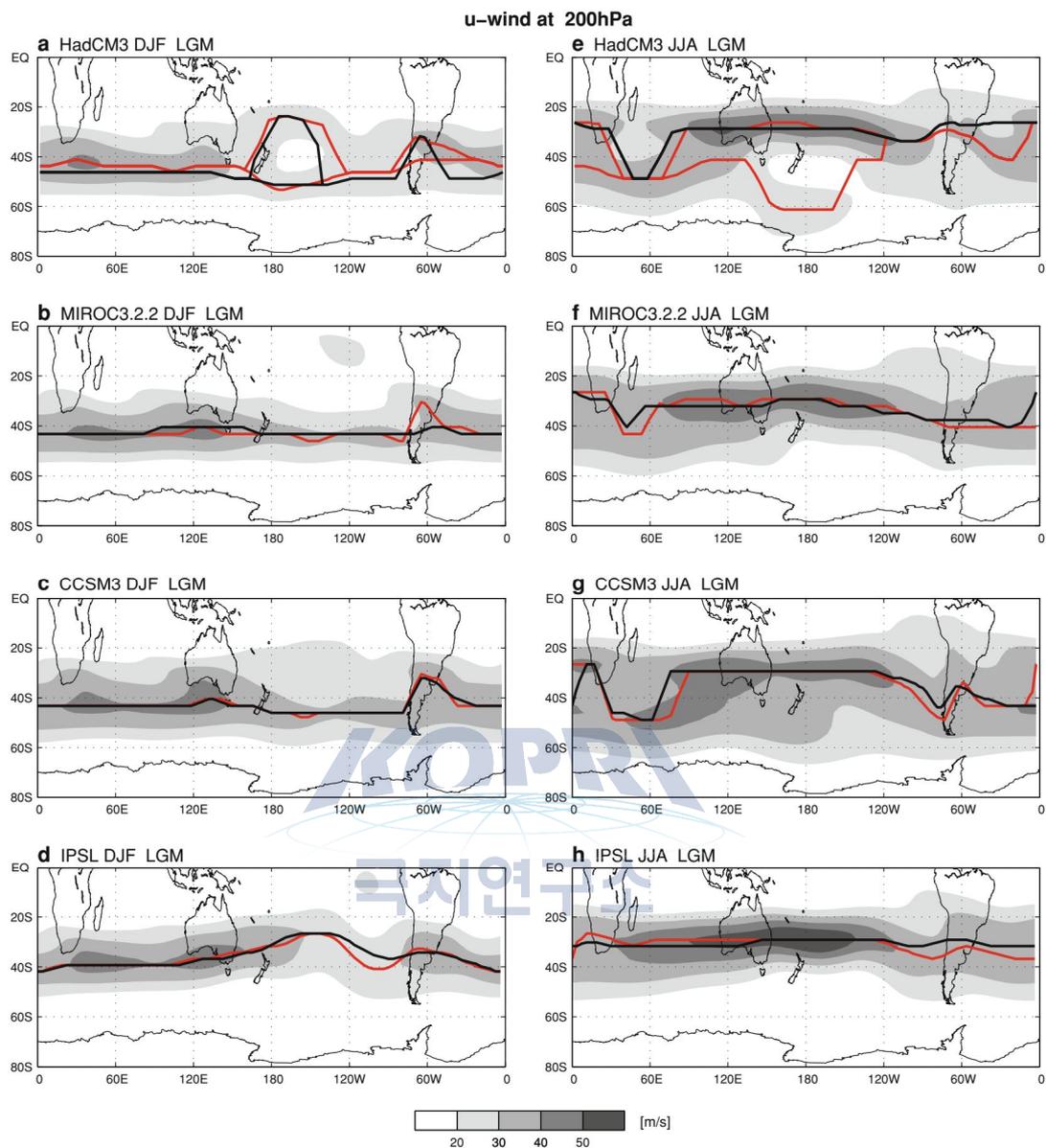


Fig. 3.25 PMIP2의 마지막최대빙하기 실험 참여 모델들의 200 hPa 최대 서풍 지역 모의 결과 (Rojas et al. 2009)

- 3차 고기후 모델링 상호비교 프로젝트 (PMIP3)는 5차 접합모델간 상호비교 프로젝트 (Coupled Model Intercomparison Project phase 5; CMIP5)의 고기후 실험군으로 진행되었고 (Taylor et al. 2012), 총 8종의 모델이 이 CMIP5의 마지막최대빙하기 실험에 참여함 (Rojas 2013).
- PMIP3의 마지막최대빙하기 실험 모의 결과 역시 참여모델들간 남반구 서풍 위치와 강도의 편차가 존재함 (Rojas 2013; Chavaillaz et al. 2013).

b PMIP3 zonal mean zonal wind at 850hPa

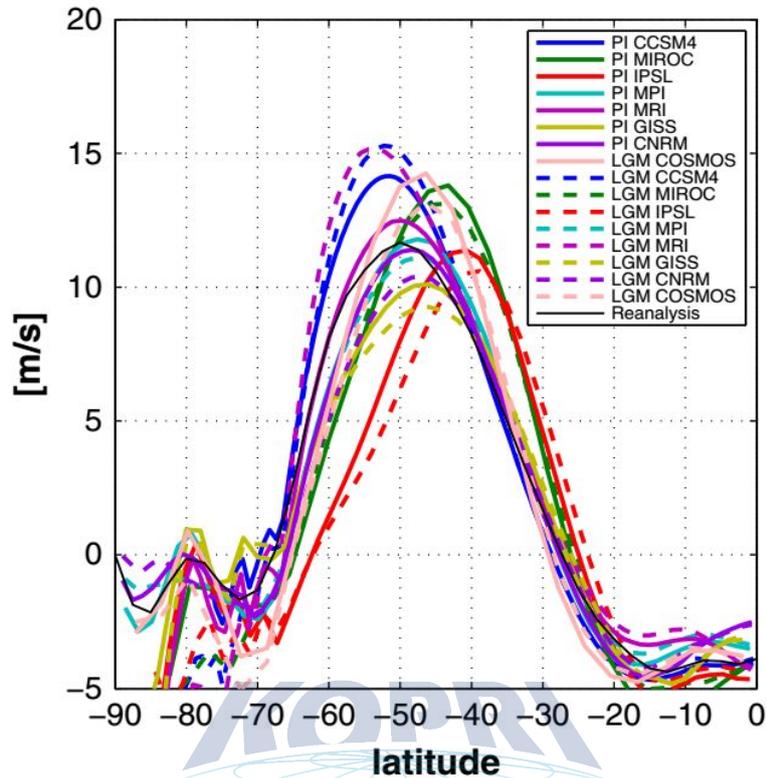


Fig. 3.26 PMIP3의 PI와 LGM 실험에서 나타난 남반구 지역의 850 hPa 동서방향 평균 바람 분포 (Rojas 2013)

- 다양한 수치모델에서 수행된 마지막최대빙하기 재현 결과에서 나타나는 남극 서풍의 위치 변화와 원인은 여전히 명확하지 않음 (Valdes 2000; Rojas et al. 2009; Rojas 2013).
- 단일 모델 기반 외부 강제력 등의 기후 요인에 대한 민감도 실험은 마지막최대빙하기 남반구 순환장 변화 원인 연구의 주요 방법의 하나로 활용되어 왔음 (Toggweiler et al. 2006; Justino et al. 2008; Sime et al. 2013; Fogwill et al. 2015).
- 지구시스템의 구성요소를 정교하게 모의하는 지구시스템모델 (Earth System Model; ESM)과 이 ESM에 비하여 간결한 해상도와 물리과정을 갖는 중간복잡도 지구시스템 모델 (Earth System Models of Intermediate Complexity; EMIC)이 이러한 단일 모델 기반 마지막최대빙하기 시기 남반구 서풍 변화의 수치적 재현 연구에 널리 활용되고 있음.
- 이중 EMIC의 경우 PMIP1에 많은 모델들이 참여하였으며, PMIP2의 경우 LOVECLIM (Goosse et al., 2010)이 참여하였음.

- PMIP3의 경우 참여모델은 ESM만으로 구성되며, EMIC의 경우 EMIC간 상호비교 (Intercomparison of EMIC) 연구가 별도로 진행됨 (Eby et al. 2013).

○ 단일모델 기반 민감도 실험용 도구 고려사항

- 남반구 서풍 위치와 세기는 전구 에너지수지 균형, 대기-해양 상호작용, 대기-지면 상호작용 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으며 따라서 빙하기 시기 남반구 서풍 위치와 세기 변화를 살펴보기 위해서는 공전궤도 인자, 빙상, 지형 조건, 해수면 온도 조건 등의 다양한 요인의 영향을 살펴봐야 함.
- PMIP 등의 다양한 모델이 참여한 단일실험군 자료를 이용한 다중모델간 회귀 분석을 통해 순환장 변화에 미치는 요소의 영향을 추정할 수 있으나, 공전궤도 인자, 빙상, 지형 조건 등 마지막최대빙하기 실험에서 공통적으로 제공되는 경계조건 요인에 대한 영향은 분석이 어려움.
- 앞서 언급한 바와 같이 단일모델 기반 민감도 실험은 이러한 다중모델 기반 연구를 보완할 수 있는 수치재현 연구 방안이며 EMIC과 ESM 모두 이러한 마지막최대빙하기 시기 남극순환장 민감도 실험 연구에 활용되어 왔음 (Goosse et al. 2010; Sime et al., 2013; Fogwill et al. 2015).
- EMIC의 경우 장기 적분에 최적화된 모델의 특성상 대부분 모델이 많은 과정을 생략하고 낮은 해상도를 채용하였으며 특히 대기구성모델의 경우 에너지균형모델 (Energy Balance Model; EBM) 이나 통계역학모델 (Statistical Dynamics Model) 등 단순한 모델을 사용하고 있음 (Eby et al. 2013). EMIC을 이용하여 남극순환장 변화를 살펴보기 위해서는 준지구근사방정식계 모델 (Quasi-Gestrophic approximation equation set)이나 원시방정식계 (Primitive equation set)를 채용한 모델을 고려하여야 함.
- ESM의 경우 충분한 해상도와 다양하고 정교한 물리과정을 채택하여 남극순환장의 변화 특성을 살펴보기에는 충분하나 마지막최대빙하기 실험시 이러한 다양한 물리과정의 마지막최대빙하기 시기 고해상도 경계자료를 준비하여야 함. 한편 PMIP3의 마지막최대빙하기 실험에 참여한 ESM의 경우, 이 시기의 경계조건 및 실험결과가 제공되므로 실험 준비과정과 결과 검증에 유리함.

Model name		Atmos	Ocean	Land Surface	Sea Ice	Coupling	Biosphere	Ice Sheets	Sediment & Weathering
Bern3D	Switzerland								
CLIMBER2	Germany								
CLIMBER3	Germany								
DCESS	Denmark								
FAMOUS	UK								
GENIE	UK								
IAP RAS CM	Russia								
IGSM2	USA								
LOVECLIM1.2	Netherlands								
MESMO	USA								
MIROC-lite	Japan								
MIROC-lite-LCM	Japan								
SPEEDO	Netherlands								
UMD	USA								
Uvic	Canada								

Increasing Complexity (light to dark)			
EMBM	2-Box	NST/NSM	None
SD	Q-flux ML	LST/NSM	BO
QG	FG	LST/BSM	BO,BT
PE	PE	LST/CSM	BO,BT,BV

Fig. 3.27 주요 EMIC 모델들의 구성. EMBM은 Energy Balance Model, SD는 statistical dynamics model, QG는 준지균근사모델, PE는 원시방정식계 모델을 나타냄 (IPCC AR5, 2013).



- 단일모델 기반 민감도 실험용 모델 선정 및 사전 실험
 - 네덜란드에서 개발된 LOVECLIM은 대기-해양-해빙-지면-식생을 포함하는 EMIC으로, 여러 마지막최대빙하기 연구에서 사용되어 왔음. 특히 이 모델은 준지균근사 기반 연직 3층 모델을 대기구성모델로 활용하여, 여러 고기후시기의 대기순환장 연구에 사용되고 있음.
 - 미국 국립대기연구소 (National Center for Atmospheric Research; NCAR)에서 개발된 Community Earth System Model (CESM)은 이전 버전 모델인 CCSM3와 CCSM4가 각각 PMIP2, PMIP3에 참여하였으며, 고기후연구에 널리 활용되는 모델임.
 - 이 두 모델은 소스코드가 공개된 모델로 다양한 마지막최대빙하기 시기 연구에 활용되고 있음. 따라서 마지막최대빙하기 서풍 변화 연구에 활용되기에 적합할 것으로 판단됨.
 - 이 두 모델을 이용한 산업혁명기 이전 기후 모의 실험 (Preindustrial)과 마지막최대빙하기 기후 모의 실험을 수행하고 향후 단일모델기반 민감도 실험을 이용한 남반구 서풍 연구에의 활용 가능성을 판단하였음.
 - 산업혁명기 이전 기후 실험은 CMIP5, 마지막최대빙하기 실험은 PMIP3에서

제시한 실험 가이드라인에 따라 수행함.

○ LOVECLIM 산업혁명기 이전 / 마지막최대빙하기 실험 결과

- 사용한 LOVECLIM의 버전은 1.3으로 많은 연구에서 활용되었던 이전 버전인 1.2에 비하여 운량모의 등 대기모텔의 과정이 개선되었음.
- 두 실험은 육빙모텔과 탄소순환모텔을 제외한 대기모텔 (ECBLIT), 해양/해빙모텔 (CLIO), 지면/식생모텔 (VECODE)을 집합하여 수행하였으며 이때 대기모텔의 수평해상도는 약 5.6도, 해양모텔의 수평해상도는 3도로 설정됨.
- LOVECLIM은 단일 CPU에서 수행되도록 작성되어 있고 최신 CPU를 가진 리눅스 PC 머신에서 총 1000년 적분에 20시간 정도가 소요되었음.
- 산업혁명기이전 기후실험의 지면온도의 계절별 분포와 200 hPa 동서방향의 계절별 분포를 살펴보았을 때, 두 변수의 계절별 전구분포의 특성은 잘 모의하는 것으로 판단되나, 200 hPa 동서방향 바람의 평균분포에서 적도 동태평양 지역에서는 강한 동풍이 나타남.

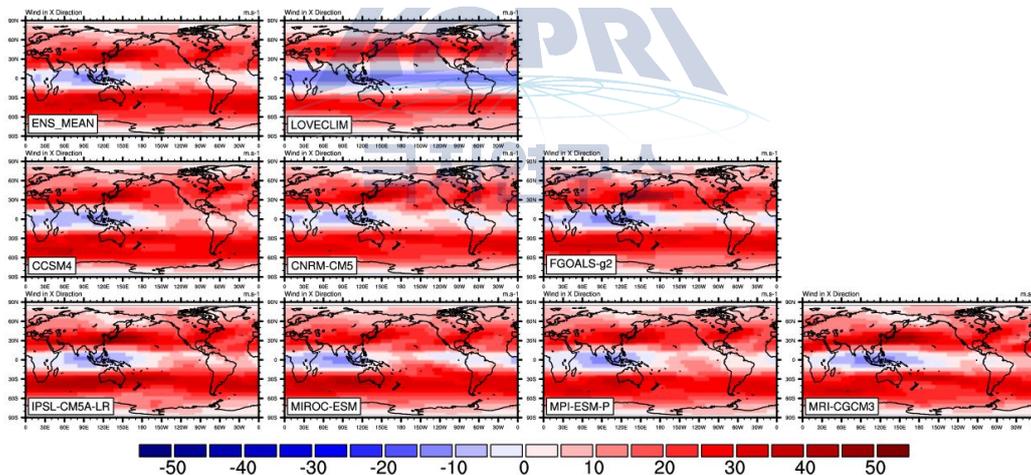


Fig. 3.28 LOVECLIM과 PMIP3의 마지막최대빙하기 실험에 참여한 모델들의 산업혁명기이전 기후 실험의 연평균 200 hPa 동서방향 바람 분포

- 산업혁명기이전 기후실험의 지면온도와 강수량의 전구 계절별 분포를 PMIP3에 참여한 7종의 ESM의 앙상블 평균값을 이용한 테일러다이아그램을 통해 살펴보았을 때 ESM에 비하여 모의 정확도가 떨어지는 것으로 나타남.
- 마지막최대빙하기 기후실험의 지면온도와 200 hPa 동서방향의 계절별 분포 역시 전구 분포 특성은 잘 모의하는 것으로 판단되나, PMIP3의 7종 ESM의 결과와 비교하였을 때 북극의 지면온도에는 큰 저온 경향을 보임.

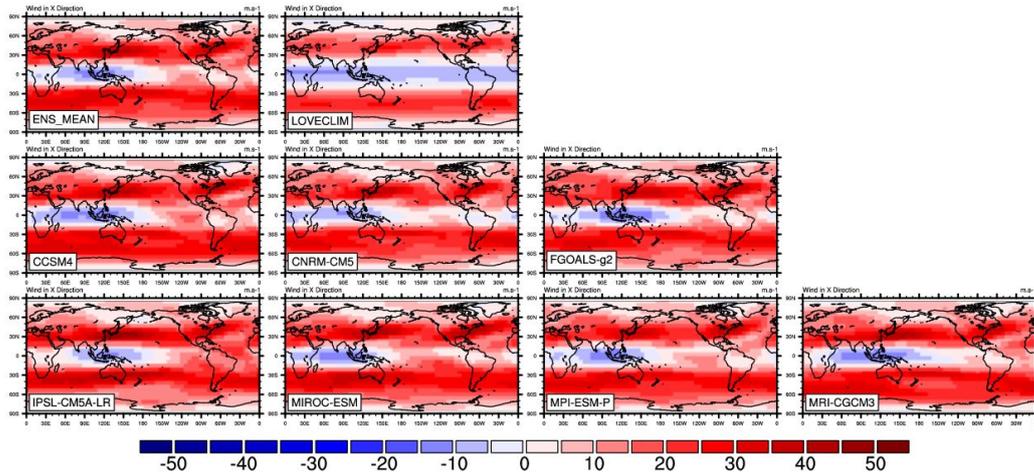


Fig. 3.29 LOVECLIM과 PMIP3의 마지막최대빙하기 실험에 참여한 모델들의 마지막 최대빙하기 실험의 연평균 200 hPa 동서방향 바람 분포

- 마지막 최대빙하기 기후실험 결과의 테일러 다이어그램 분포 특성에서도 PMIP3에 참여한 다른 ESM들에 비하여 모의정확도가 떨어지는 것으로 나타남.
- LOVECLIM의 경우 기존 연구의 언급과 모델 구성에서 예상된 바와 같이 전구 대기순환과 온도 분포 특성은 모의하지만 다른 ESM에 비하여 모의 정확도가 부족함. 그러나 대기-해양-해빙-지면/식생 등 과거기후를 살펴볼 수 있는 시스템모델을 모두 갖추었음에도 적분 시간이 짧음과 상대적으로 실험조건 구성이 용이한 점은 여러 과학적 가설들을 검증하는데 유용하게 사용할 수 있을 것으로 판단됨.

○ CESM의 산업혁명기 이전 / 마지막최대빙하기 실험 결과

- 실험에 사용한 CESM의 버전은 1.2.1로 PMIP3에 참여한 CCSM4의 구성모델들이 모두 개선된 버전임.
- 실험은 대기모델-지면모델만으로 구성하여 진행하였고, 사용한 초기 및 경계조건은 PMIP3의 자료저장소와 CESM의 조건 저장소에서 제공받음. 또한 대기모델의 경우 PMIP3에 참여한 CCSM4와 동일한 역학코어와 물리과정으로 설정하여 실험을 진행함.
- 실험의 해상도는 PMIP3에 참여한 CCSM4의 해상도와 동일하게 대기/지면모델 모두 약 1도 (0.9도×1.25도)의 해상도를 갖도록 설정됨.
- 실험에는 144개의 CPU가 사용되었고 총 50년 적분에 약 240시간이 소요됨.
- 산업혁명기이전과 마지막최대빙하기 실험 결과 지면온도와 해면기압의 계절별 변화와 공간분포는 물리적 모의된 것으로 판단됨.

- 산업혁명기이전 기후 실험과 마지막최대빙하기 기후 실험의 차이를 PMIP3의 CCSM4의 기존 모의 결과와 비교하였을 때 공간적으로 거의 유사한 분포를 보이나 최대세기 변화가 나타나는 지역은 다르게 나타남. 이러한 차이는 대기-해양 접합모델로 구성된 PMIP3 실험과 대기모델로만 구성된 사전실험의 실험 구성의 차이이거나 결과분석 기간의 차이일 수 있음으로 보임.

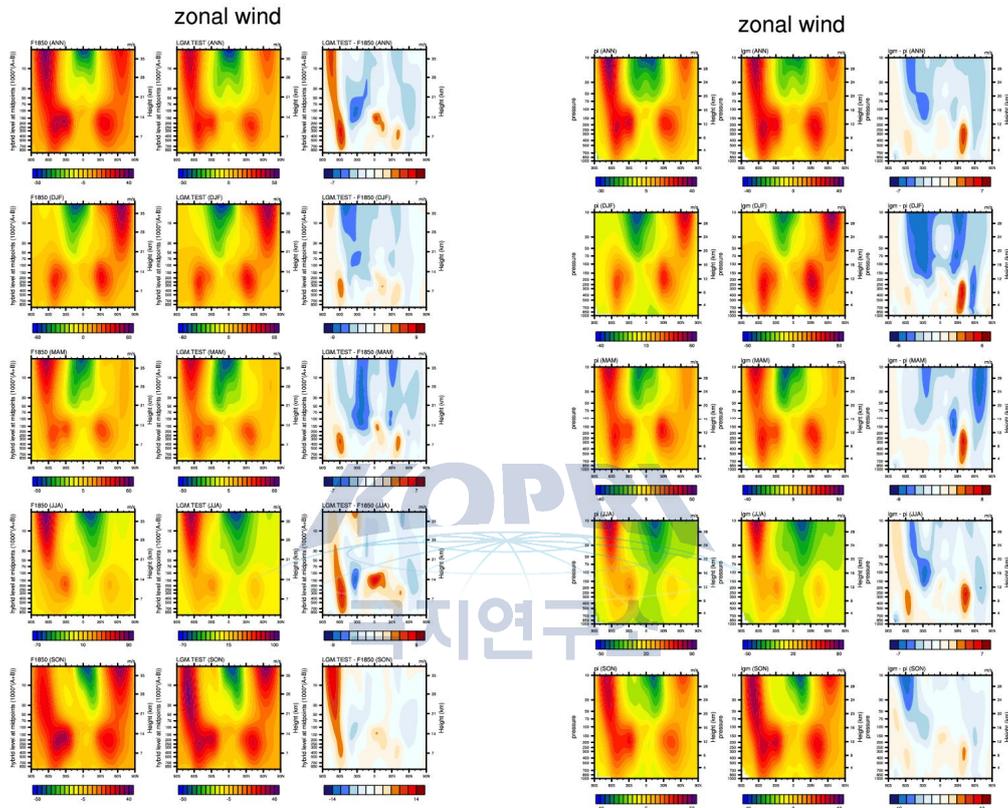


Fig. 3.30 (좌) CESM1의 대기모델로 수행된 마지막최대빙하기 실험과 산업혁명기이전 실험의 동서방향으로 평균된 동서방향 바람의 차이 분포 (우) PMIP3의 CCSM4의 마지막최대빙하기 실험과 산업혁명기이전 실험의 동서방향으로 평균된 동서방향 바람의 차이 분포

- CESM의 산업혁명이전 기후 모의 결과와 마지막최대빙하기 기후 모의 결과는 PMIP3에 참여한 다른 ESM들의 평균 결과와 유사한 통계적 특성을 보임. 또한 CESM의 경우 다양한 물리과정과 다양한 경계조건의 영향을 고려할 수 있기에 빙하기 시기의 남극서풍 변화 특성 연구의 주 수치재현 도구로 사용될 수 있을 것으로 판단됨.
- CESM의 현재 적분시간을 살펴봤을 때 민감도 실험 연구에 활용하기 위해서는 충분한 연산자원의 확보가 필요함. 연산자원이 부족한 경우를 대비하여 낮은

해상도의 활용, 실험 구성의 단순화 등이 필요할 것으로 판단됨. 향후 충분한 연산자원이 확보되는 경우 대기-해양-해빙-지면-육빙 모델로 구성된 지구시스템모델로의 확장하여 다양한 고기후 연구에 활용할 수 있을 것으로 판단됨.

- 마지막최대빙하기시기의 남반구 서풍 위치와 세기 변화 연구를 위한 수치재현 실험 기획
 - 마지막최대빙하기 시기 남극해 서풍의 위치와 세기의 변화와 대기 이산화탄소의 농도 변화의 관계를 이해하기 위해서는 마지막최대빙하기 시기의 남극해 서풍의 위치 변화에 대한 이해가 선행되어야 함.
 - 공전궤도 이심율, 지구 자전축기울기, 근일점 위치 등의 공전궤도 인자, 온실기체 농도, 해수면온도, 남극 빙상, 지형 조건 등의 현재와 다른 마지막최대빙하기 시기의 조건들이 남극 주변 순환장 변화에 미치는 영향 및 메커니즘을 단일 대기 모델 기반 민감도 실험을 통해 규명함.
 - 대기모델 기반 민감도 실험에서 대기-해양 접합모델 기반 민감도 실험 연구로 확장하여 남반구 서풍과 해양과의 상호작용과 그에 따른 해양순환의 변화를 살펴봄으로써 빙하기 시기 남반구 서풍의 대기 이산화탄소 농도 조절자 메커니즘을 검증함.

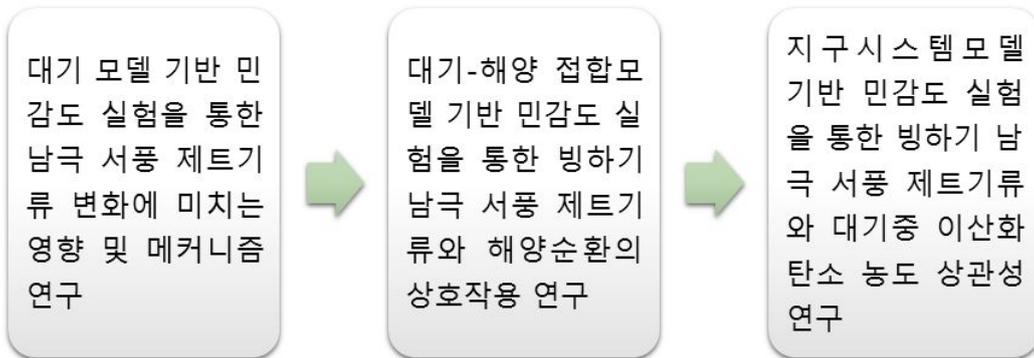


Fig. 3.31 마지막최대빙하기시기의 남반구 서풍 위치와 세기 변화 연구를 위한 수치재현 실험 기획

3. 남극 과학기지(장보고, 세종기지) 중심의 수치적 재현을 통한 남극과학기지 주변의 중규모 기상 특성 파악

- 극지역 중심 기상장 모의를 위한 고해상도 (3km 수평해상도) 중규모 기상 수치모델의 성공적 도입
 - 극지역에 과학기지를 운영 중인 기상 선진국에서 활용중인 중규모 기상수치모델인 NCAR (National Center for Atmospheric Research)와 Byrd Polar and Climate Research Center에서 개발된 Polar WRF의 최신 소스코드 입수 및 극지연구소 서버에 설치, 모델 실험수행 완료

- 남극과학기지 주변 기상장의 수치적 재현을 위한 최적의 모델수행 영역 설계 완료 및 적용
 - 가장 큰 영역(27km)은 남극 대륙 및 해양 주변의 큰 규모의 대기현상 모의를 위해 남극대륙과 그 주변 해양을 포함하여 남반구 중위도 일부까지 설정
 - 남극과학기지 주변 중규모 기상장 모의를 위해 9km 영역과 3km 수평 해상도를 갖는 고해상도 영역 설계

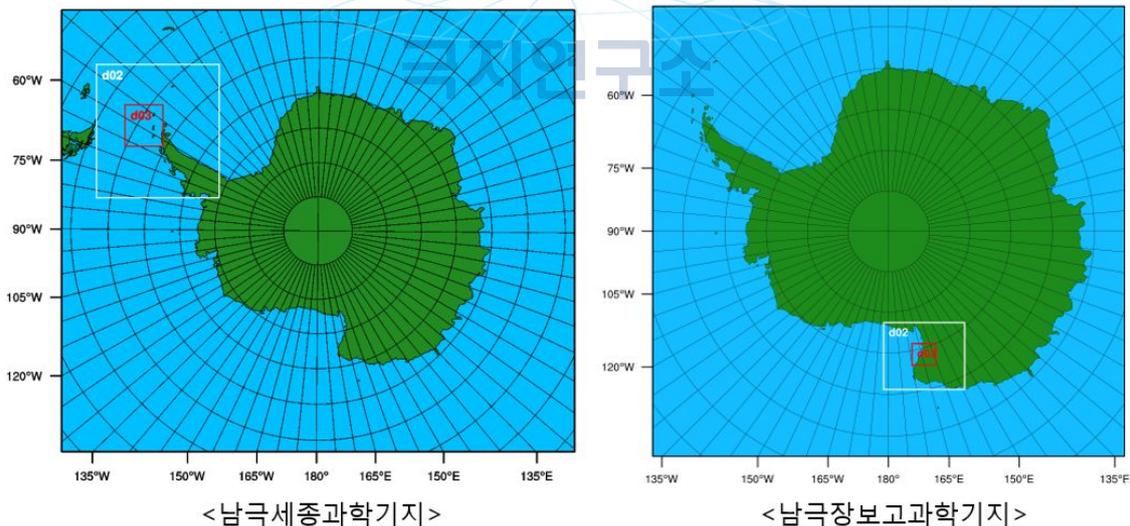


Fig. 3.32 중규모기상모델 수행영역, domain1(27km), domain2(9km), domain3(3km)

- 모델 수행에 필요한 기초자료(경계조건, 초기조건, 분석자료) 확보 및 입력자료 생산
 - 모델의 초기, 경계조건 생산을 위해 ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecast)에서 생산된 6시간 간격의 ERA-Interim 재분석 자료(수평 해상도: ~80km) 확보
 - 고해상도 모델링 수행을 위해 저해상도 초기자료를 각각 27km, 9km, 3km의 수평해상도를 갖는 3중 영역의 양방향 등지격자(two-way nesting)체계에 맞는 입력자료 생산
 - 모델수행 결과검증을 위한 남극과학기지(세종, 장보고기지)의 기상관측자료 (Automatic Weather Station) 확보

- 극 지역 기상장 최적화 모의를 위한 물리 모수화 및 시간적분 방안 설계
 - 일반적인 지역과 달리 극한 기상 특성을 지니고 있는 극 지역 모의를 위해 최적화된 물리 모수화 방안 및 시간적분 방안 설계를 위한 관련 선행 연구 및 문헌 조사
 - 수치모델을 이용한 남극대륙 연구를 활발하게 수행하고 있는 “Byrd Polar and Climate Research Center”의 AMPS(Antarctic Mesoscale Prediction System) 시스템의 물리모수화 및 시간적분 방안 도입

구 분	Domain1	Domain2	Domain3
Microphysics	WRF Single-Moment 5-class		
Longwave rad.	RRTMG scheme		
Shortwave rad.	RRTMG Shortwave		
Land surface	Noah Land Surface Model		
Surface layer	Monin-Obukhov		
PBL	Mellor Yamada-Janjic TKE		
Cumulus Param.	Grell-Devenyi ensemble	×	×

Fig 3.33 물리모수화 방안

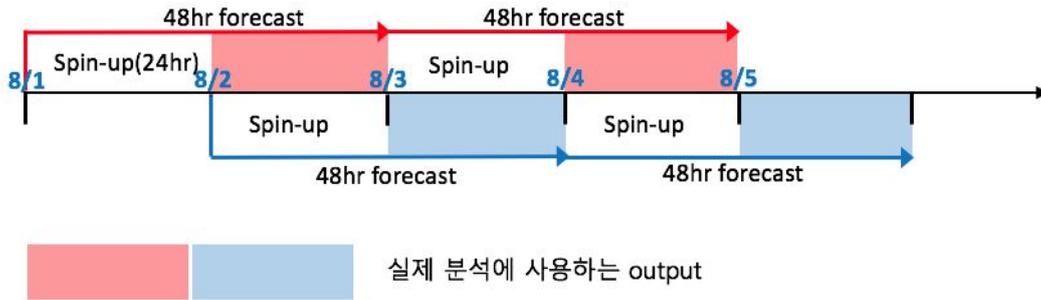


Fig. 3.34 시간 적분 방안

- 세종과학기지에서 발생하는 강풍사례의 수치적 재현을 위한 지상관측자료 분석 및 이를 통한 사례 선정
 - 1994~2013년 기간의 지상풍속의 기후값 생산 및 기후적 특성 분석, 관측 풍속의 크기 별 발생빈도 특성 분석

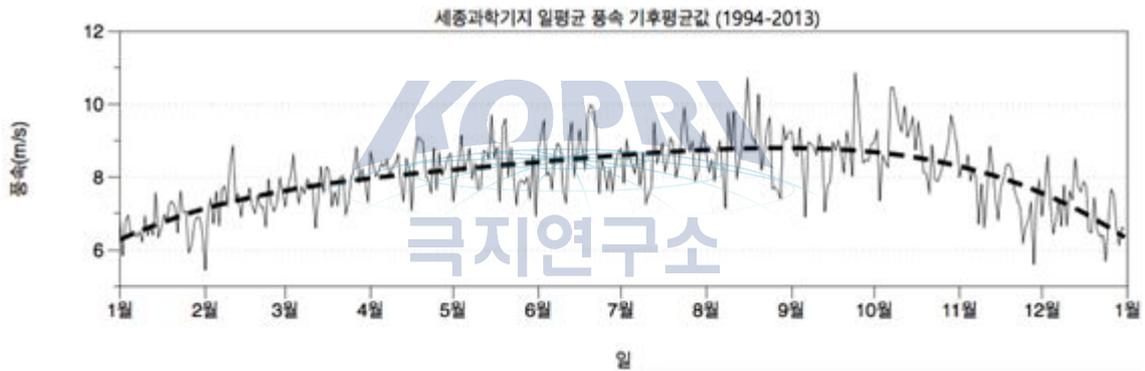


Fig. 3.35 Daily Climatology of wind speed at King Sejong station for 1994-2013. Dashed line represents 5th degree polinomial fitting.

- 9년(2005~2013) 기간의 풍속 크기별 발생분포도에서 약 3.92% 이내에 포함되는 매우 강한 풍속(순간평균 풍속 ~ 40m/s)을 보인 2013년 1월 7일 사례 선정 및 사례 기간의 기상관측자료 분석

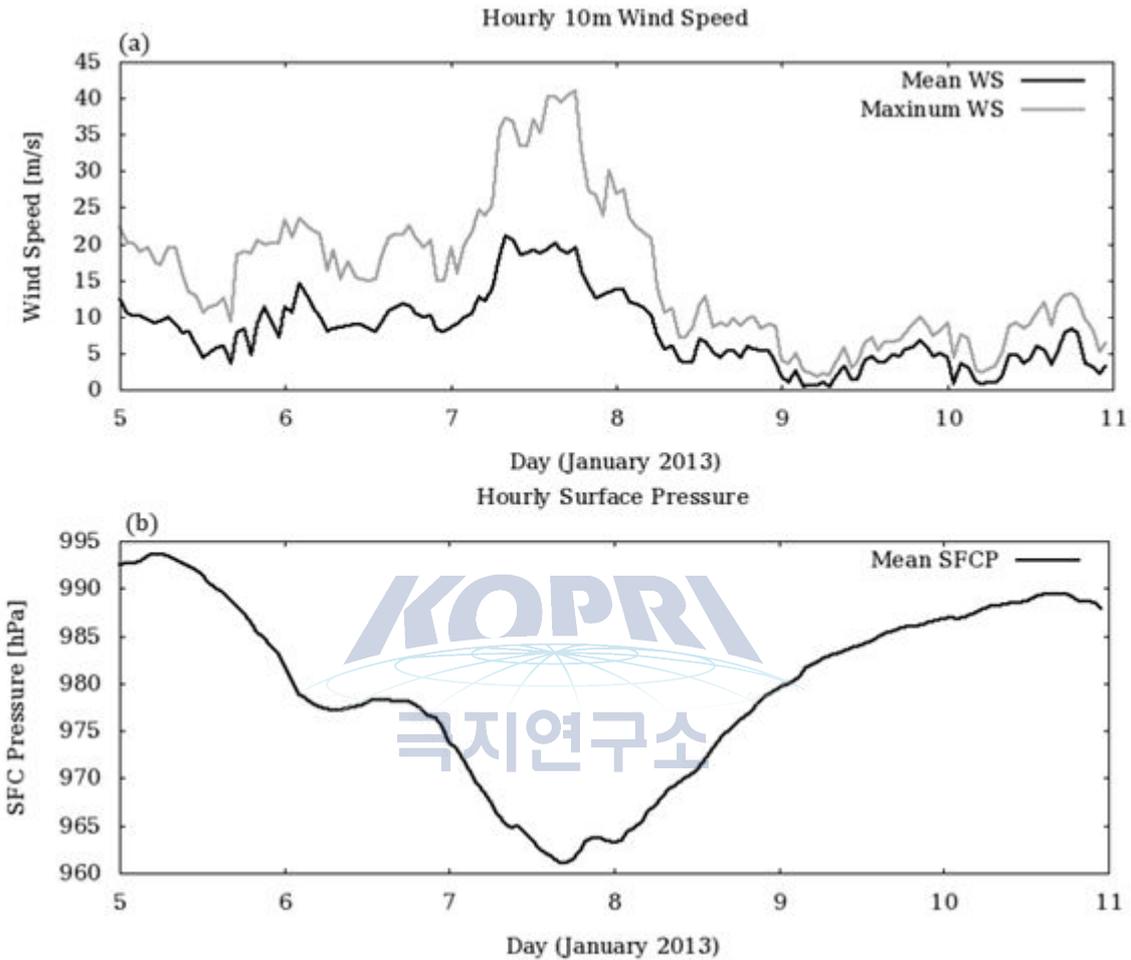


Fig. 3.36 Time series of a) hourly averaged 10m wind speed (m/s; black line) and maximum wind speed (gray line), and b) hourly averaged surface pressure (hPa) at AMOS station during 5 - 10 January 2013.

- 남극중심 중규모수치모델 이용한 선정된 세종기지 강풍사례 모의 및 강풍유발 원인 분석
 - 사례 기간의 27km 해상도의 해면기압 모의 결과 분석: 강풍 발생일 6시간 간격의 해면기압을 살펴보면, 칠레남단에서 발생한 작은 규모의 극저기압(polar low)이 시간이 지남에 따라 세력이 발달하며 세종기지 주변으로 이동하며 세종기지 주변에 강풍을 유발함을 확인

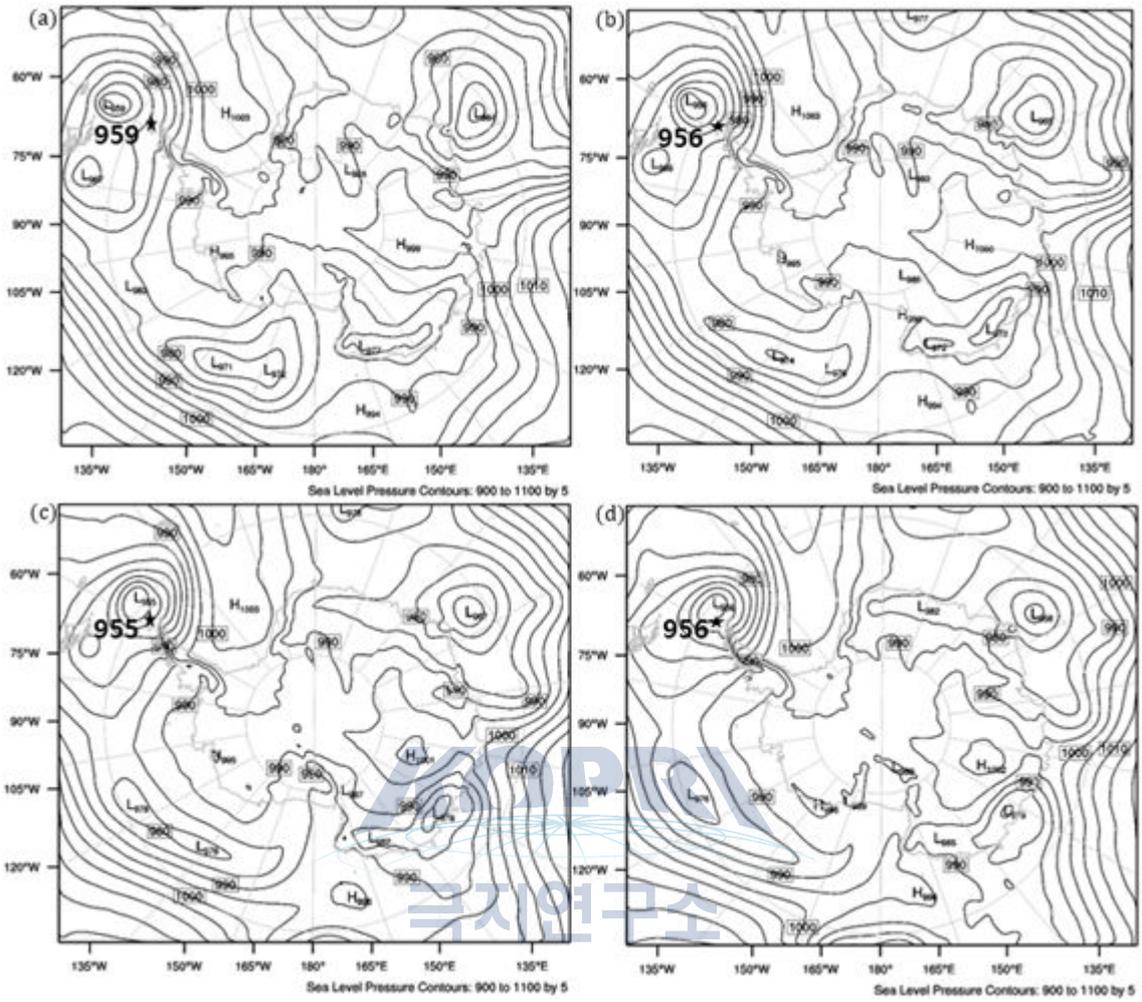


Fig. 3.37 Sea-level pressure at a) 00, b) 06, c) 12, and d) 18 UTC 07 January 2013 in domain 1 (27 km resolution) from Polar WRF simulation. Countour interval is 10 hPa.

- 고해상도(3km)의 상세 바람장 모의 결과 분석:

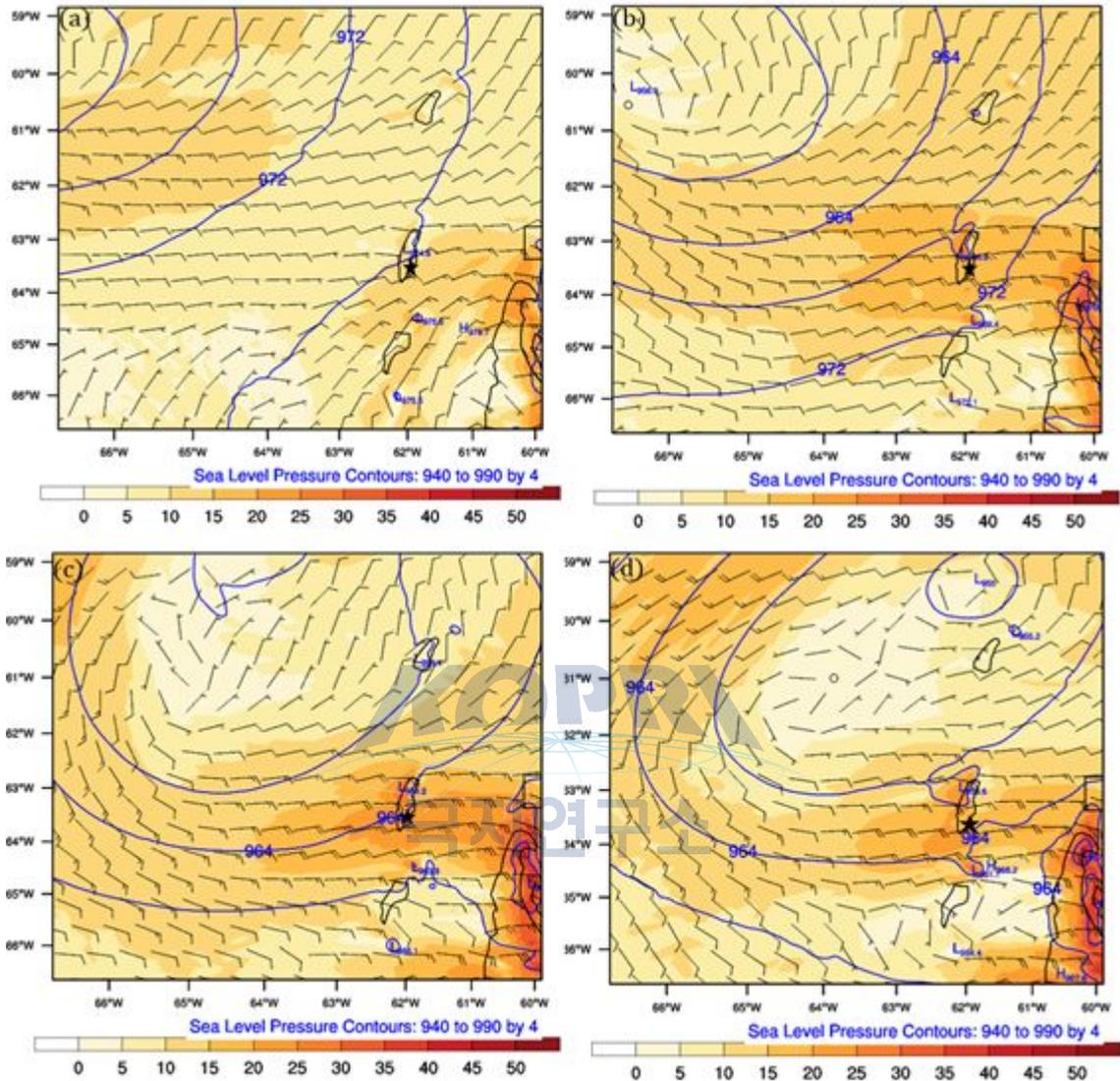


Fig. 3.38 Sea-level pressure (contour) and wind (bar) at a) 00, b) 06, c) 12, and d) 18 UTC 07 January 2013 from Polar WRF simulation with 3km grid resolution. Countour interval is 4 hPa. Shading represents wind speed (m/s).

- 모델의 중규모 기상장 모의 성능 평가를 위한 재분석 자료(약 80km 수평해상도) 및 세종기지의 관측 값과 시계열 비교
 - 풍속: 관측 값과 비교 결과 재분석 자료에 비해 풍속 및 경향성이 잘 모의되었음을 확인. 특히 최대풍속 값의 경우 재분석 자료는 모델결과 및 관측 값과 큰 차이를 보임을 확인
 - 지상기압: 관측 값과 비교 결과에 재분석 자료에 비해 지상기압 값이 유사하게 모의 되었음을 확인

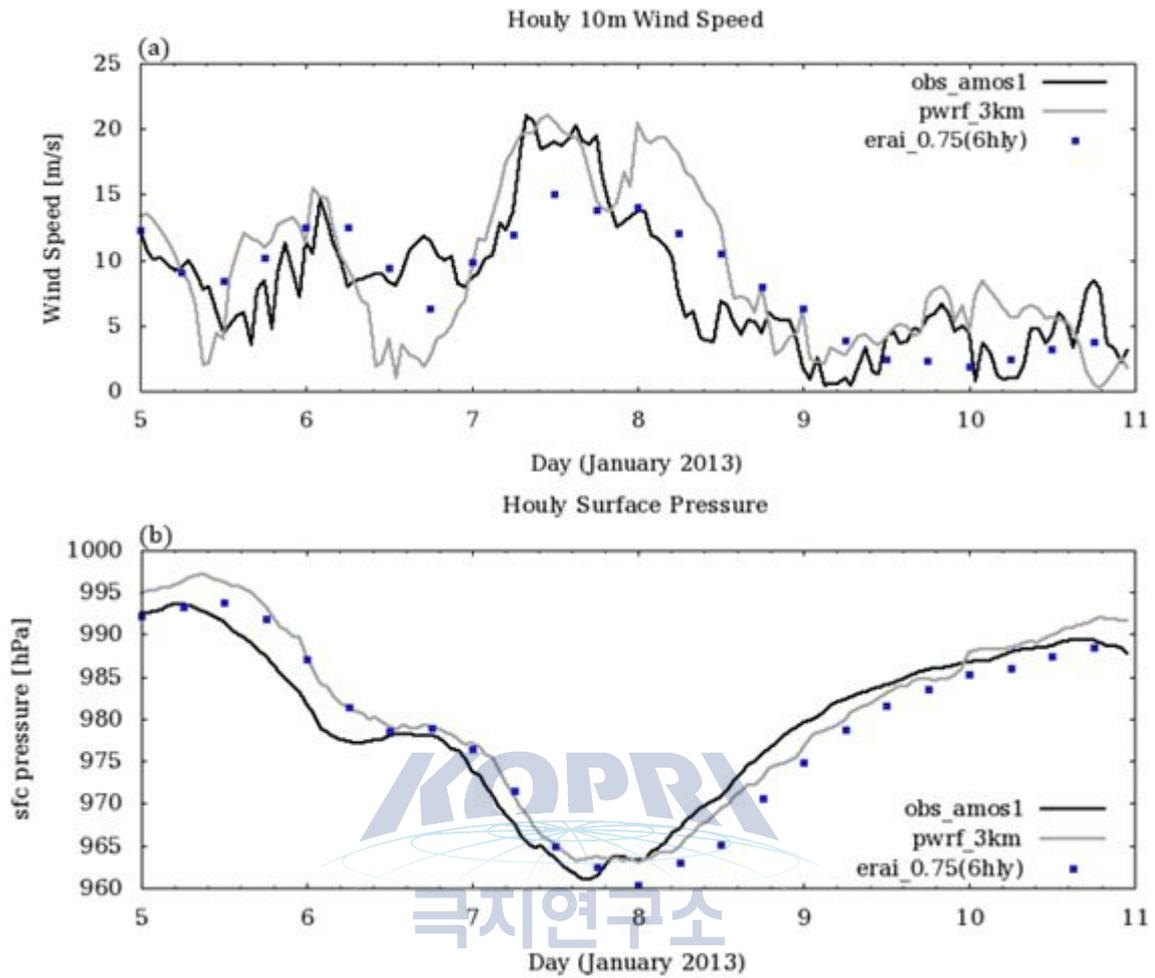


Fig. 3.39 Time-series of hourly a) 10 m wind speed (m/s) and b) surface pressure (hPa) from AMOS (black), polar WRF (gray), and ERA-Interim reanalysis (filled square) obtained from the nearest grid point during the 5-11, January 2013.

- 모델 수평해상도에 따른 강풍 모의 결과분석: 고해상도 모델결과가 풍속 및 지상기압 모의에 있어 관측과 보다 유사한 값을 보임을 확인

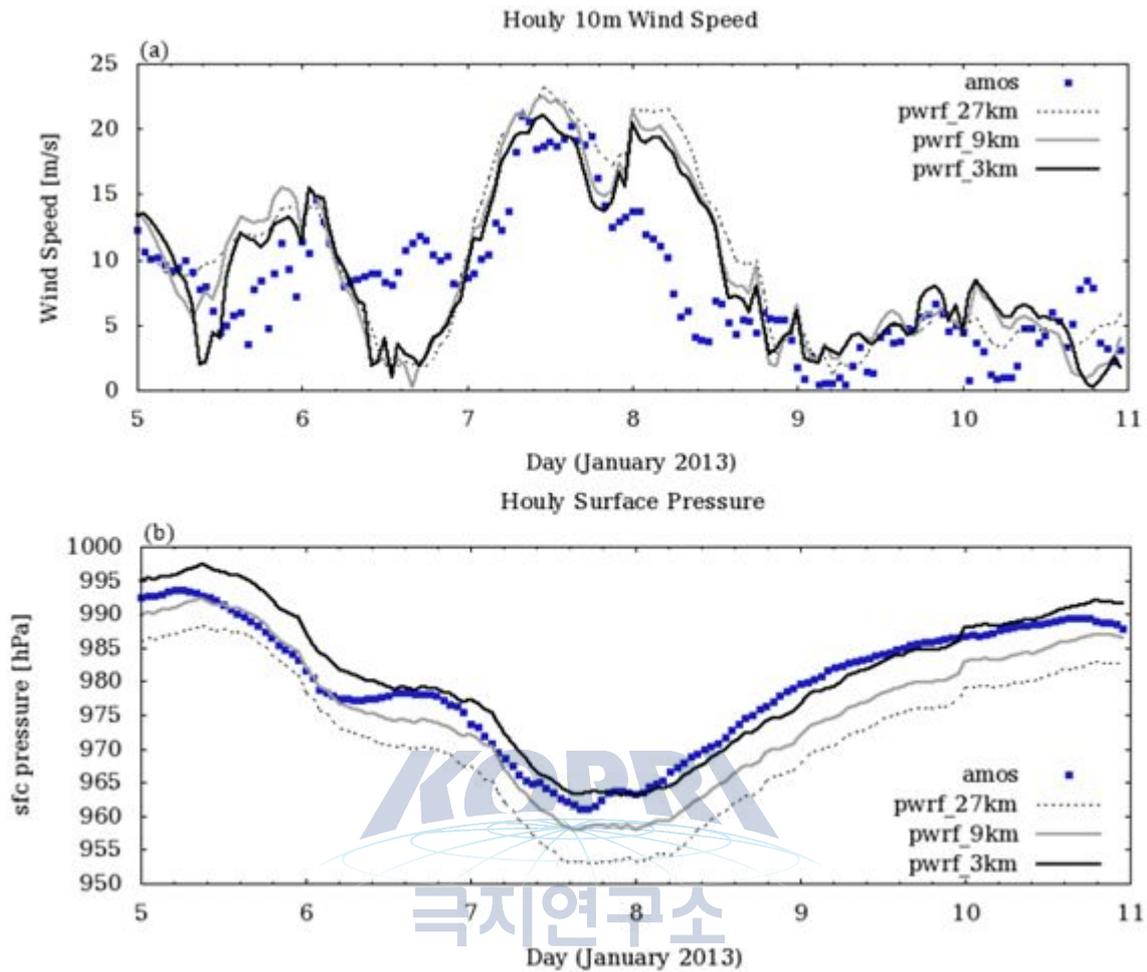


Fig. 3.40 Same as in Fig. 30, except for time series from AMOS (filled square) and polar WRF simulation with 27 (thin dotted line), 9 (thick gray line), 3 km (thick black line) grid resolutions.

- 분석 결과 구축된 남극 대륙 중심 기상 장 수치모의 시스템을 이용한 모의 결과가 재분석 자료보다 관측과 유사한 값을 모의함으로써 향후 구축된 시스템을 이용하여 세종기지 주변 뿐만 아닌 극지역 상세 기상 장 모의에 적극 활용할 수 있을 것으로 기대

4. 세종기지의 대기물리적 특성 파악

- 세종기지 30년 기상자료
 - 1988년 관측개시 이후 약 30년 기간 기상관측자료(기온, 풍속, 강수량 등) 시계열 자료를 품질평가 후 가능한 보정을 수행하고 결측을 최소화하여 개선된

시계열 자료를 생산함.

- 극지연구소 내 연구자가 온라인에서 직접 기간과 변수를 선택해 원하는 자료를 활용할 수 있는 온라인 데이터베이스 구축

○ 남극 기후변화 분석을 위한 종합적인 기상관측 인프라 구축

- 기지 영향이 미미한 AMOS-3 위치에서의 중복 관측시스템 구성으로 결측률 0%의 기상관측시스템 운영
- 극저기압대에 해당되는 킹조지섬에서의 운량, 운고, 운형 등 구름특성 정량관측시스템 구축
- 직달 및 산란 일사량, 주요 파장대별 대기광학두께 등 대기 중 복사강제력 주요인자 획득
- 맥스웰만 또는 마리안소만 해상의 대표적 열속자료 획득 및 고해상도 수치모델 열속 모수화 인자 개발

○ 세종기지 기상 특성 및 기후변화경향 이해

- 일반적으로 기후값 산출의 기준 기간이 되는 30년 기상자료를 이용해 세종기지 기후값 분석 및 특성분석 논문/보고서 작성
- 해당분야 기상관측장비 운영되는 경우, 킹조지섬 대기연직구조 특성 및 해빙상 열속 변동성 파악

○ 남극 기상·기후변화 예측 향상

- YOPP-SH 진행과 같은 시기 특정기간 집중관측을 통해 대류권 내 바람, 기온, 습도 등 연직구조 특성 자료 획득
- 남극 지역에서의 관측자료와 모델링 연구를 통해 남극지역 기상 특성이 더 잘 반영된 기상/기후 모델 개발

5. 남극장보고과학기지 주변 대기과정 특성 평가

○ 남극에서의 상층 기상 관측 현황

- 상층기상 관측 자료는 재분석 자료, 위성 자료, 모델 결과를 평가하는 기준 자료이며, 특히 대류권 상부 및 성층권 기온 변동 평가에 중요하게 사용될 수 있음.
- 남극에서 운영되는 104개의 기지 대부분에서 지상 기상관측이 이루어지고 있지만 상층 기상 관측은 상대적으로 매우 드물게 이루어짐. 1957/8년의 지구물리의 해부터 관측이 시작되었으며, SCAR READER 프로젝트를 통해 이 자료들이 한 곳에 모임 (Turner et al., 2004). 점차적인 관측의 증가로 16개 하계 및 상주 기지에서 상층 기상 관측이 정기적으로 이루어졌지만 1999년 남극반도 끝단에 위치한 벨링스하우젠 러시아 기지에서 더 이상 관측이 수행되지 않고 있음. 또한 상층기상 관측을 수행하는 이태리의 마리오 주켈리 기지의 경우 하계 기지로 남극 하계 시즌에만 관측하기 때문에 연중 상층 기상을 관측하는 곳은 14개소에 지나지 않음.

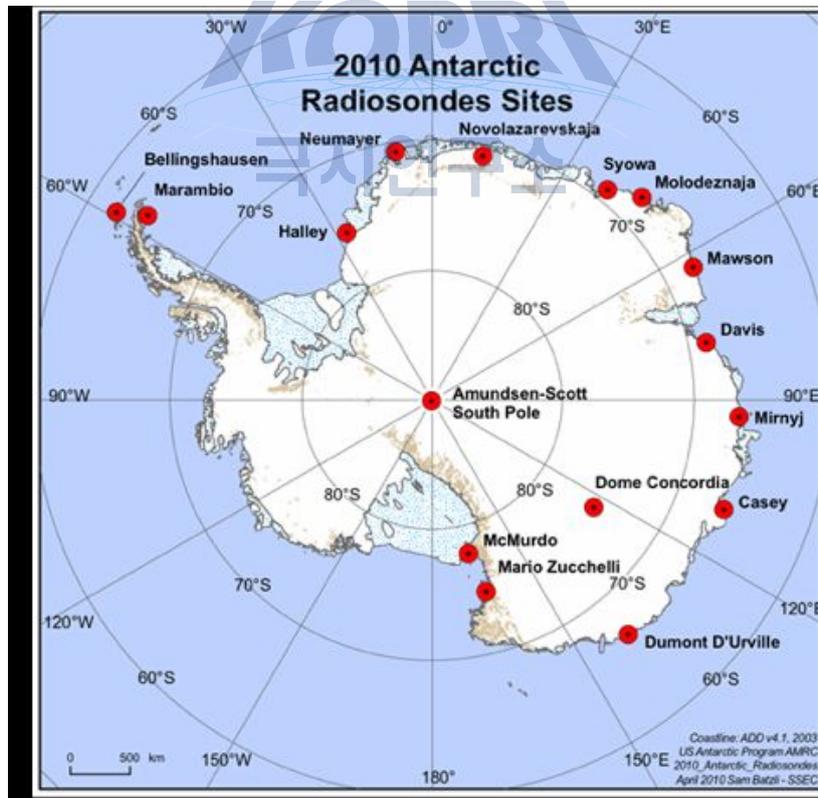


Fig. 3.41 남극대륙에서의 상층 기상 관측 분포. 벨링스하우젠기 지에서는 1999년 2월까지만 관측 수행

○ YOPP-SH 참여

- 국외 기관의 YOPP-SH 참여 분석: 2016년 5월 현재 6개국 기관에서 YOPP-SH 참여 계획서를 제출하여 승인 받음. 특히, 독일 AWI의 경우 자국의 기지와 쇠빙연구선을 활용한 상층 기상 관측에 집중하여, 이태리의 경우 마리오 주켈리 하계기지와 Dome-C 기지 두 곳을 활용한 기상 관측을 수행함. 독일과 이태리는 모두 하계 기간 현재의 일 2회 존데 관측을 최대 일 4회로 관측 횟수를 늘일 계획임.

Institute	AWI (독일)
Project	Upper air soundings from Neumayer and RV Polarstern
Methods	Measurements/Upper air soundings
Key Deliveries	<ul style="list-style-type: none"> - The upper air data will be available in near real time in the GTS as TEMP as well as BUFR messages. Additionally, they will be archived in PANGAEA. As example see: http://www.pangaea.de/search?q=Radiosonde+POLARSTERN. - Hourly AWS data will be available in near real time in the GTS as FM12 messages. Additional, near real time minutely data will get transmitted via IRIDIUM to AWI and archived in PANGAEA.
Period	During the austral summer seasons 2017/18 and 2018/19 we plan to launch extra radiosondes (up to 4 daily)
Region	East Antarctica/ Neumayer and from our research vessel Polarstern

Institute	ENEA (이태리)
Project	IAMCO ("Italian Antarctic Meteo-Climatological Observatories")
Methods	Measurements/Upper air soundings
Key Deliveries	<ul style="list-style-type: none"> - Distribution of synoptic data in real time on the international meteorological network throughout the year - Validation and storage on database each year within two months from the end of the campaign. - Hardware and software updating of the meteorological instrumentation - Maintenance of instrumentation. - Database and website (www.climantartide.it) updating: continuous activity for the duration of the Project.
Period	YOPP special campaign in 2016-2019. Radiosondes at Mario Zucchelli Station (up to 4 daily)
Region	East Antarctica/ Mario Zucchelli Station/Concordia station

Institute	Scripps Institution of Oceanography (미국)
Project	AWARE- ARM West Antarctic Radiation Experiment
Methods	Measurements/Aerosol-Cloud-Radiation-Atmospheric state
Key Deliveries	1. Surface energy balance measurements. 2. Surface radiation measurements. 3. Complete characterization of clouds 4. Complete characterization of aerosols. 5. Atmospheric state measurements.
Period	November 2015 to January 2017
Region	East Antarctica/ McMurdo station West Antarctica/ WAIS Divide Ice Camp

Institute	Université de Liège (프랑스)
Project	Influence of small-scale processes on the dynamics of the coupled atmosphere-cryosphere ocean system on daily to seasonal timescales in the region of Adélie Land, Antarctica
Methods	High resolution modeling
Key Deliveries	i) Improved version of NEMO-LIM3, which can be used by the NEMO community. (ii) High-resolution model of the coupled atmosphere-cryosphere-ocean model in the Adélie Land area, Antarctica. (iii) Improved understanding of the physical processes responsible for the Antarctic climate system variability and predictability. (iv) Assessment of the influence of initial conditions on coupled model prediction skill at the local scale in Antarctica.
Period	1-Oct-2016 through 30-Sep-2020
Region	East Antarctica/Adélie Land

Institute	Institute of Remote Sensing and Digital Earth, China (중국)
Project	IGEO Cold Regions Initiative (GEO CRI): Information Services for Cold Regions
Methods	Measurements/In-situ & Remote sensing
Key Deliveries	<ul style="list-style-type: none"> - Polar data sets available on the GEOSS portal (satellite, airborne, in situ, and assimilation). - Leveraging the use of Cold Regions data, especially YOPP-related results and products. - Advocate improved availability of relevant datasets with funding agencies and operational agencies, and emphasise the importance of funding support for YOPP relevant observations and free and open access to data.
Period	1-Dec-2015 ~
Region	South Hemisphere

- 주요사업 중 수행할 YOPP-SH 참여 제안서 요약
- 주요사업에서는 남극장보고과학기지 및 아라온을 활용하여 남극에서 가장 자료가 적은 상층기상관측에 주력하고자 함.
- 남극장보고과학기지에서는 2015년부터 2월부터 11월까지 1회/일 상층기상관측을 수행 중에 있으며, 아라온에서는 상층기상관측이 북극항해 시 단기간 수행된 적이 있음.
- YOPP-SH 기간 중 장보고기지에서는 2018년 2회/일로 상층기상관측 횟수를 늘리고, 아라온에서는 남극 하계 시즌(12월-2월) 2회/일 상층기상관측을 수행하고자 함.
- 이를 수행하기 위해서는 별도의 인력 및 연구비 지원이 요구됨.
- 이태리의 마리오 주켈리기지의 경우 하계 기간 상층기상 관측을 2회/일에서 4회/일로 늘일 계획이며, 만약 장보고기지에서 2018년 2회/일 관측이 수행된다면 북빅토리아랜드 지역에서 하계 4회, 동계 2회의 관측 자료가 확보되어 향후 다양한 연구 활동에 활용될 수 있음.

Institute	KOREA POLAR RESEARCH INSTITUTE
Project	Enhanced upper air observation at Jang Bogo station and RV Araon for YOPP-SH
Methods	Measurements/Upper air sounding-radiation-atmospheric state
Key deliveries	1. Upper air sounding 2. Surface energy balance measurements. 3. Surface radiation measurements. 4. Profile of temperature/wind/turbulence 5. Atmospheric state measurements
Period	February 2018 to November 2018 at Jang Bogo station 2017/18 and 2018/19 summer season at Araon
Region	East Antarctica/ Jang Bogo station Southern Ocean/Araon



- YOPP-SH 참여를 위한 상층 기상 관측 계획

<장보고기지에서 상층기상관측 일정, 소요 비용 및 필요 인력>

연도/월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2017	1회/일(300회, 소요 금액: 2억/운영 인력: 2인)											
2018	2회/일(600회, 소요 금액: 4억/운영 인력: 3인, 월동대 추가 인원)											
2019	1회/일(300회, 소요 금액: 2억/운영 인력: 2인)											

<아라온에서의 상층기상관측 일정, 소요 비용 및 운영 인력>

연도/월	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2017 -2018	2회/일(400회, 소요 금액: 3억/ 운영 인력: 2인)											
2018 -2019												

<이태리 Mario Zuccelli Station에서의 상층기상관측 일정>

연도/월	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2016 -2017	4회/일 계획 (현재: 2회/일)											
2017 -2018												
2018 -2019												

○ 안정 대기 경계층 과정 연구 주요 이슈

- 남극장보고과학기지를 포함한 극지역 대부분은 안정 대기경계층이 지배적인 기간이 연중 대부분을 차지함. 불안정한 대기경계층보다 안정 대기경계층을 이해하고 예측하는 것은 도전적인 과제인데 아래와 같이 많은 물리과정들이 안정 경계층에서 관계되기 때문이며, 이로인데 대기과정 중 가장 이해가 되지 않은 분야 중 하나임.
- 난류: 안정 경계층의 난류의 영역은 수송과정에서 난류가 지배적인 약한 안정 경계층(weakly stable boundary layer, WSBL)과 난류의 역할이 다른 물리과정에 비해 상대적으로 약한 강한 안정 경계층(very stable boundary layer, VSBL)으로 구분. WSBL에서는 국지 플릭스가 국지 바람과 온도 경도에 의해 잘 규모화됨(e.g., Nieuwstadt, 1984). 하지만, VSBL에서는 일반적인 규모화가 되지 않는데 보다 큰 규모의 대기 과정을 포함한 다양한 대기 과정이 관려되어 있기 때문임.
- 복사: 지표 복사수지와 장파복사의 발산이 주된 이슈임. 모델에서는 지표 순복사가 가장 작은 경우 그 재현에 문제를 보임. 장파복사의 발산은 경계층 내에서의 기온 및 수분 프로파일의 변화로 인해 발생하는데 바람이 불지 않은 날 지표면 근처에서 매우 클수 있으며, 수치 모델에서 복사 냉각을 과소평가함. 복사 모델의 스킴 등에 대한 연구가 필요
- 파동: 성층화된 대기의 흐름이 산이나 지면 거칠기가 큰 경우를 만나면 중력파가 발생할 수 있음. 안정 경계층에서 중력파의 역할에 대해서는 논쟁 중임. Nappo (2002)와 Chimonas and Nappo (1989)는 바람이 약한 경우 안정 경계층의 파에 의한 스트레스와 난류에 의한 스트레스의 크기가 같음을 선형 이론을 통해 보임. 보다 큰 규모의 대기 과정에 대한 이해를 위해서는 파동에 의한 스트레스에 대한 연구가 더 필요함.
- 지면 결합: 바람이 약할 경우 난류 플릭스는 매우 작아져 순복사는 지중열

플릭스와 균형을 이루기 때문에 경계층과 지면과의 결합은 모델에서 중요하며, 잘 재현되어야 함. 하지만, 이 결합에 필요한 모수화는 다른 대기 과정 모수화 만큼 복잡한데 지면과의 결합이 잘 이루어지지 못할 경우 모델은 지표면 근처 온도를 과대 평가할 수 있음.

- 상호작용: 안정경계층 내의 다양한 물리 과정들은 서로 양의 또는 음의 피드백을 주고 받음. 피드백 과정에 관계되는 요소에 대한 보다 자세한 연구를 통해 각 물리 과정들 간의 상호작용이 재현될 수 있어야 함.
- 수평 확산: 대기가 매우 안정하면 meandering motion이 관측되어 왔으나 모델에서의 재현이 매우 제한되어 있음. 모델은 수평 확산 모수화 정도에 민감하며, 더 연구가 필요함.
- 장보고기지에서의 안전 경계층 연구: 남극장보고과학기지에서의 안정 경계층 연구를 위해서는 10 m 타워, 30 m 타워, 존데 관측, 그리고 소다 관측이 활용될 수 있음. 특히, 30 m 타워에서 복수의 높이에서의 바람과 온습도, 그리고 두 높이에서의 복사 관측, 복수 높이에서의 난류 관측을 소다 관측 동시 수행하면 다양한 중관기상 조건 하에서 안정 경계층 내의 복잡한 과정에 대한 보다 나은 이해가 가능함. 이 연구는 안정 경계층 내의 플릭스에 대한 모수화 개선이 가능하며, 이는 YOPP의 목적에 부합함.

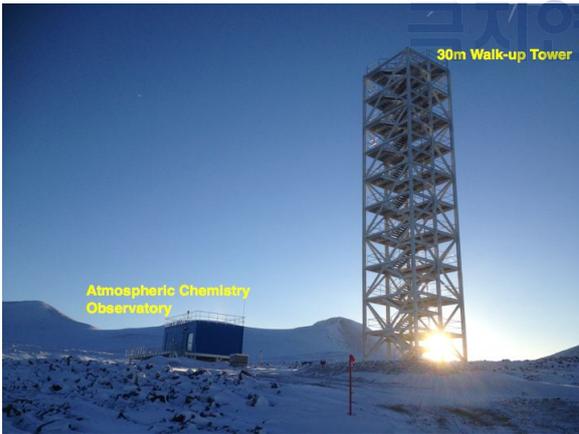


Fig. 3.42 장보고기지의 30 m 타워



Fig. 3.43 말레이시아 국립남극연구 센터에서 장보고기지에 설치예정인 소다

○ 서남극 아문젠 해 관측

- Choi et al.(2015)은 2008년 린지섬에 설치되어 운영된 자동기상관측시스템(AWS) 자료를 분석하여 겨울철 기온 변동에 아문젠 해 저기압의 위치가 중요하며, 린지섬 기상이 최근 설치된 미국의 AWS 기상 자료와 잘 일치함을 보고 하였음. 하지만, 2008년 서남극 아문젠해 린지섬에

설치된 AWS는 2016년 방문 결과 파손된 것으로 확인됨.



Fig. 3.44 서남극 린지 섬에서 측정된 풍향과 아문젠 해 저기압의 위치 간의 관계

- 2016년 2월 아문젠 해 베어 반도의 무어 돔에 11 m 높이의 기상 타워가 설치되었으며, 이곳의 기상 특성은 향후 연안 돔에서의 빙하 코어 연구 및 서남극 저층 대기과정 연구에 중요하기 때문에 지속적인 운영 및 관리가 요구됨.
- 여기서 측정된 관측 자료는 미국에 의해 운영되는 AWS 자료와의 비교 및 재분석, 모델 자료와 함께 지역 규모 대기과정 이해에도 활용되어 우리나라의 서남극 기후변화 연구가 린지 섬 연구에 이어 계속 유지될 수 있음.
- 다만, 이 지역은 강설이 많은 것으로 예상되기 때문에 2017/18년 남극 하계 기간 방문 및 관측 장비의 보완이 필요하며, 또한 10분 단위의 짧은 시간 동안의 자료 확보가 이 방문을 통해서만 가능하기 때문에 주요 사업을 통해 지속적으로 유지 및 관리되어야 함.

○ 대기추적자 라돈가스 활용 남극으로 대기수송 기작 파악

- 남극과학기지 라돈가스의 측정: 현재 남극과학기지에서 호주 핵과학기술기구 (Dr. Scott Chambers)와 공동으로 운영 중인 고감도 라돈검출기를 이용하여 극미량 라돈농도 관측 (측정간격: 30분)을 주요 사업 기간 동안 지속적으로 진행
- 남극 북빅토리아랜드 테라노바베이 지역에서 대기환경 라돈가스의 관측은

이태리의 마리오 주켈리 하계기지에서 1995-96, 1996-97, 1997-98 시즌에 측정된 사례가 있으나 동계시즌을 포함한 지속적인 관측 결과는 없음.

- 남극 세종(장보고)과학기지 라돈가스의 기원지 분석
 - 주요사업기간 동안 남극 세종과학기지과 장보고과학기지에서 관측된 라돈가스의 기원지 분석을 위해 미국 해양기상청에서 개발된 HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory)모델 활용
 - 라돈가스의 배경농도와 고농도 사례에 대한 역궤적 모델 수행, 역궤적 모델 결과의 빈도 분석 및 군집분석 수행을 통한 기원지 분석 수행

- 대기추적자 라돈가스 활용 남극으로 대기수송 기작 파악
 - 남극 과학기지에서 극지연구소에서 관측중인 라돈가스 자료와 호주핵과학기술기구에서 관측중인 라돈가스 자료를 종합하여 GCM을 활용한 비교연구에 활용
 - GCM 모델의 입력자료 개선, 모의 수행 및 평가 : 현재까지 수행된 GCM을 통한 남극대륙의 라돈가스 농도에 대한 수치적 재현 연구과정에서 남극 대륙의 배출량 정보를 과소평가한 측면이 있음. 장보고과학기지에서 관측중인 라돈가스 자료는 북빅토리아랜드 남극종단 산맥의 노출지각으로부터 배출되는 라돈가스를 반영할 수 있으므로 남극의 라돈가스 배출량 세기 개선에 활용
 - 극지연구소 기후모델링팀과 공동으로 GCM 모델링을 통한 아남극과 남극지역의 라돈가스 농도 수치적 재현 및 측정결과와 비교, 대기수송 과정 이해

6. 남극 세종기지 대기입자 특성 및 생물기원냉각물질 변화 파악

- 대기 중 3-50 nm 크기를 가지는 에어로졸의 크기분포와 수 농도 변화 실시간 분석
 - 세종기지를 기반으로 한 에어로졸 관측 선행 연구를 통하여 계절별 입자 수농도 변화 양상을 확인하였으며, 본 연구를 통해 대기 중 에어로졸의 생성과 성장이 활발한 여름철 (DJF) nano-size 입자의 크기 분포 및 수농도 분석이 가능한 Nano-SMPS를 대기빙하 관측동에 설치하여 에어로졸의 생성과 성장특성 파악할 예정이다.

- 세종과학기지에 (그림 3.45) 설치하여 현장 관측에 이용할 Nano-SMPS는 Nano-DMA (Nano-Differential Mobility Analyzer)와 CPC (Condensation Particle Counter)로 구성됨. DMA의 측정원리는 입자의 크기에 따라 전기장내의 이동성의 차이를 이용하여 입자들의 크기를 순차적으로 분류하는 역할을 하고 분류된 단일크기의 입자들은 CPC를 이용하여 입자의 수 농도를 실시간으로 관측함. DMA 와 CPC의 측정원리를 동시에 이용하여 Nano-SMPS를 구성하고 이를 통해서 3-50 nm 크기의 에어로졸의 크기변화와 수 농도 변화 정보를 얻음.

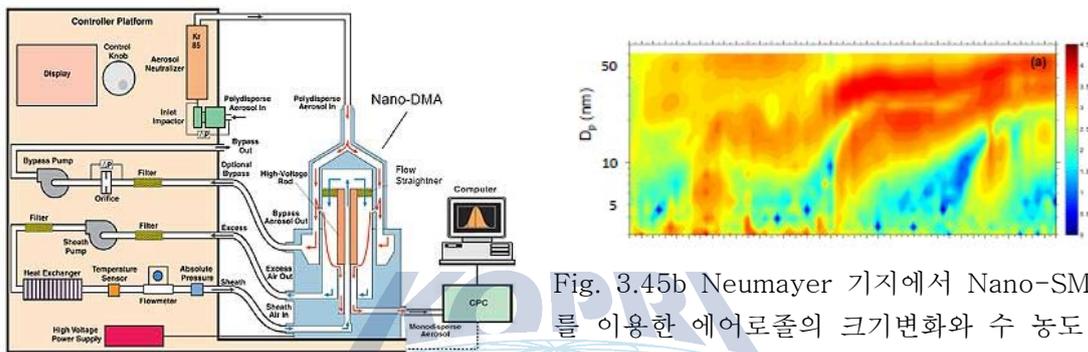


Fig. 3.45a Nano-SMPS 개략도
(출처 TSI webpage)

Fig. 3.45b Neumayer 기지에서 Nano-SMPS를 이용한 에어로졸의 크기변화와 수 농도 변화 관측 예 (Well et al., 2015)

극지연구소

- 에어로졸의 크기분포와 수농도 변화를 분석하여 남극세종과학기지 대기 중 에어로졸의 생성과 성장 특성 파악을 파악하고, 에어로졸이 구름응결핵에 미치는 영향을 분석하여 에어로졸과 구름사이의 상호작용에 대한 이해를 증진
- 세종과학기지 에어로졸의 물리특성 연구에서는 CPC를 이용하여 대기 중 전체 에어로졸 중 구름응결핵의 역할을 하는 입자의 비를 계산해서 에어로졸과 구름사이의 상호작용 연구
- 3-50 nm 생성과 성장된 에어로졸의 수 농도와 구름응결핵의 수 농도 비교를 통해서 생성되고 성장한 에어로졸과 구름사이 상호관계 연구

○ Nano-size 입자 수농도 변화와 기후냉각물질의 발생의 관계

- 세종기지에서 관측된 장기간의 계절별 nano-size 입자 변화를 확인 한 결과, 분석 당시의 공기괴(air-mass)가 베링하우젠, 아문젠 해 (Pacific sector)에서 유입된 경우에는 남극의 여름철인 2월에 nano-size 입자의 수농도가 최대치를 보인 반면, 공기괴가 웨델해에서 유입된 경우에는 남극의 봄철인 11월에 최대치를 보임 (그림 3.46a).

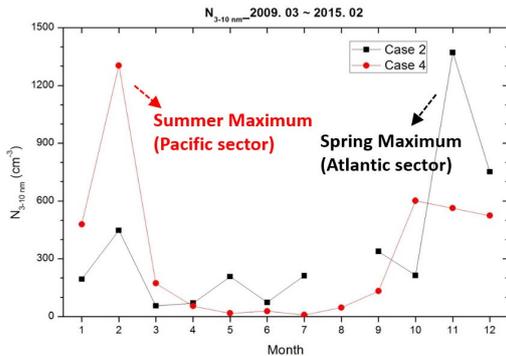


Fig. 3.46a 세종기지에서 관측된 월별 대기 nano-size 입자 수농도 변화 (2009~2015)

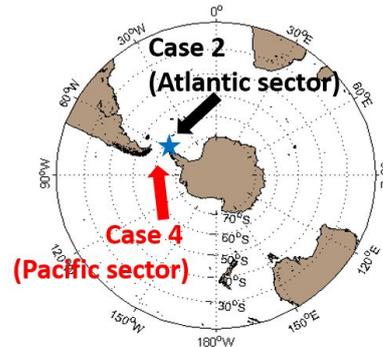


Fig. 3.46b 세종기지(별표)로 유입되는 주요 공기 공급지역 (Pacific sector는 베링하우젠, 아문젠 해역을 포함하며, Atlantic sector는 웨델해역을 포함)

- 대기 중 nano-size 입자는 대부분 가스 형태의 전구물질 (기후냉각물질인 DMS 포함)이 입자로 성장하여 형성되며, 이와 같은 계절별 nano-size 입자 발생의 차이는 전구물질(precursor)의 공급원 차이에 기인할 것으로 유추 할 수 있음.
- 해양 생물에 의해 발생하는 기후냉각물질(DMS)의 해역별 발생량 및 발생시기의 차이가 주요원인 일수 있으며, 또한 비생물학적 요인에 의해 발생하는 아이오딘 (I) 계열의 가스 형태 전구물질의 발생이 지역별, 계절별 nano-size 입자 발생 차이의 주요 원인이 될 수 있음. 영국 Halley 과학기지(75.35°S, 26.39°W)에서의 연구결과에 따르면 DMS 및 iodine oxide(IO)의 발생량이 계절별 상이한 양상을 보이는 것을 확인 할 수 있음 (그림 3.47; Read et al., 2008, Saiz-Lopez et al., 2007).

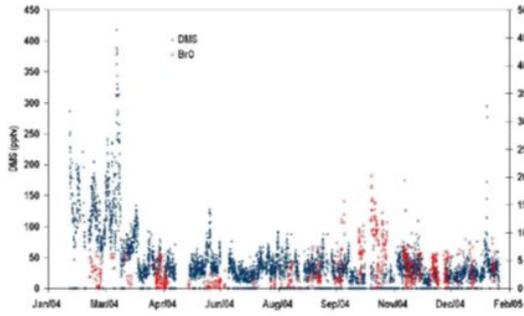


Fig. 3.47a 2004년 1월~ 2005년 1월까지 남극 Halley 기지에서 관측된 생물기원냉가스 (DMS) 및 BrO의 농도 변화. 남극의 봄인 2~3월사이 DMS 농도가 가장 높게 타남. (Read et al., 2008)

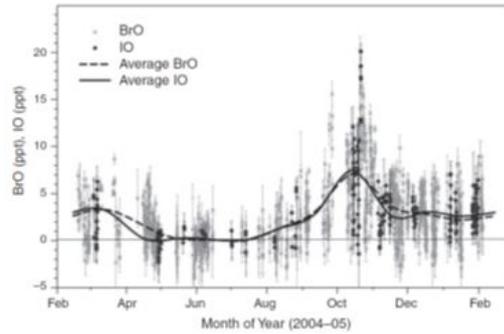


Fig. 3.47b 2004년 2월~ 2005년 2월까지 남극 Halley 기지에서 관측된 IO 및 BrO 농도 변화 (Read et al., 2008). IO 및 BrO의 농도는 남극의 봄인 11월 가장 높게 나타남 (Saiz-Lopez et al., 2007)

- 인공위성 자료 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer: Aqua MODIS)를 기반으로 한 Aerosol Optical Thickness (AOT 또는 AOD) 분석 결과, 10~12월 사이는 웨델해 (Atlantic sector) 인근에서 Aerosol Optical Thickness가 높게 나타나는 반면, 1~3월 사이는 베링하우젠, 아문젠 해 인근에서 Aerosol Optical Thickness가 상대적으로 높음 (그림 3.48).

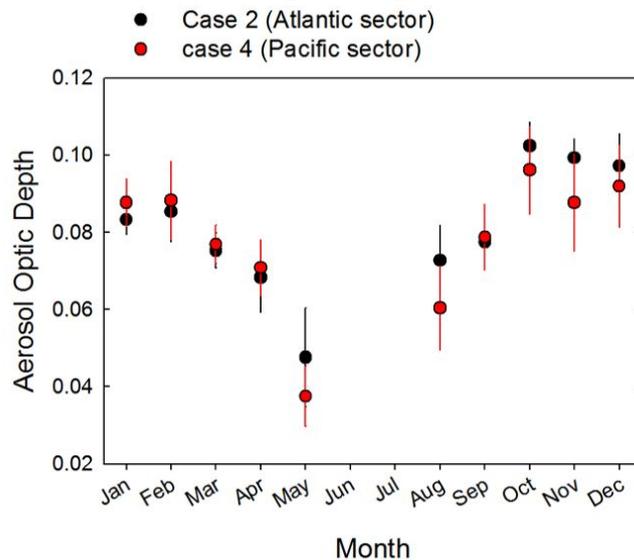


Fig. 3.48 Aqua MODIS 위성 자료를 활용한 세종기지 인근 베링하우젠, 아문젠 해 (Pacific sector, case 4), 웨델해 (Atlantic sector)의 Aerosol Optical Thickness (또는 Depth) 월별 변화 (2009년~2015년)

- 여러 연구를 통해 알려진 바와 같이 지난 수십 년 동안 베링하우젠, 아문젠해를 포함하는 서남극은 급격한 기온상승 및 그로 인한 해빙의 감소 현상이 뚜렷하게 나타나는 반면, 웨델해를 포함하는 동남극 지역은 냉각화 경향이 나타남. 현재까지 축적된 대기 입자 및 기후냉각물질 분석 노하우를 바탕으로, 향후 대기 입자의 물리 화학적 특성 및 대기 에어로졸 입자의 전구물질로 작용하는 기후냉각물질(DMS)의 세종기지 기반 남극 현장 분석을 통하여, 이 지역의 환경 요인 변화가 기후피드백 요소로 작용하는 “기후냉각물질-에어로졸-구름응결핵”의 형성에 어떠한 영향을 미칠 것인지를 연구하고자 함.



제 4 장
연구개발결과의
활용계획

제 4 장 연구개발결과의 활용계획

- 향후 연구에서 진행될 여러 과거 외부강제력 요인들의 남극 및 전구 규모 대기 순환장에 미치는 영향 연구들은 남극의 과거 기후변화 기작 파악 연구 기획에 활용 예정
- 연구 수행과정에서 조사된 중간복잡도 지구시스템모델과 지구시스템모델들의 목록, 또한 이들의 사전실험 과정에서 구성된 마지막최대빙하기 실험 결과와 고기후 모델링 테스트베드는 향후 극지연구소에서 수행하는 고기후 연구에 활용 예정
- 남극 생물기원냉각물질의 발생 변화가 대기 에어로졸 입자 형성 및 복사강제력에 미치는 영향 이해를 통한 미래 남극 기후변화 예측 가능성 기획에 기여
- 남극 제2기 지 대기과정에 대한 종합적인 이해 및 타 연구 분야 참고 가능한 정보 제공
- 활강풍, 폴리냐 등 기후연구에 중요한 테라 노바만 대기과정 이해에 활용
- 수치모델 개발에 필수적인 안정 대기경계층 과정 모수화 이해에 활용
- 장보고기지의 GAW 지구급 관측소 운영의 전단계로 BSRN(Baseline surface radiation network) 공식 관측지 등록
- 남극의 최근 기후변화에 따른 해빙분포 및 기온 변화의 지역적 차이 원인 파악을 통한 남극 해빙변화와 온난화 패턴 파악 연구 기획에 활용
- 남극 빙상 변화가 남극 및 전구 규모 대기 순환장에 미치는 영향 이해를 통해 남극의 과거 기후변화 기작 파악 연구 기획에 활용
- 남극 저기압 발생 메커니즘 이해를 통한 남극 중관규모 기상예측 향상 및 미래 남극 대기순환/기후 기획에 활용
- 남극 기지들에서 생산되는 관측 자료들을 수치 모델링에 입력 및 검증 자료로 활용하여 우수한 연구성과들을 도출함으로써 대한민국 극지과학 연구 역량 강화
- YOPP 참여를 통한 수치 모델 개선 및 검증 자료 제공
- 극지 안정 대기 경계층 과정 모수화 개선
- 대기중력과 과정 평가 자료 제공
- 성층권 대기 역학 이해를 위한 자료 제공
- K-Route 및 내륙 기지 건설을 위한 기상 예보 정보 제공
- 남극 기후시스템 중 해양 생물권-빙권-대기권사이의 황성분 순환이 에어로졸 생성과정을 통해 상호 영향을 주고받는 관측적 증거 제시로, 기후시스템간의

피드백 이해

- 남극 생물기원냉각물질의 발생 변화와 대기 에어로졸 입자 형성이 복사강제력에 미치는 영향 이해를 통한 미래 남극 기후변화 예측 가능성 기획에 기여

4-1. 향후 연구방향

1. 정성적 목표

구분	년도	세부연구목표	연구내용
1차년도	2017	외부강제력 변화에 대한 남극의 기후변화 요소 반응 기작 파악	<ul style="list-style-type: none"> ○ 최근 남반구 대기 순환장 변화가 남극 해빙 및 기온의 지역차이에 미치는 영향 파악 <ul style="list-style-type: none"> - 관측 및 재분석 자료를 통한 최근 남극 기후변화 패턴 연관 기후인자 제시 및 모델 앙상블 실험 셋업 - 서남극 빙하코어 프록시 자료 확보와 아문젠해 저기압 활동 지수 정의 ○ 남극 기후변화 이해를 위한 빙하기 남극 서풍 제트기류의 세기 및 위치 변화 파악
		서남극의 대기물리 특성 파악을 위한 종관규모 관측 및 수치적 재현	<ul style="list-style-type: none"> ○ 남극 종관규모의 수치적 재현을 통한 저기압 발생 기작 파악 <ul style="list-style-type: none"> - 세종기지의 강풍 유발원인인 칠레 남단에서 생성되어 발달해서 이동해오는 극 저기압의 발생 역학 조사 - 남극 과학기지에서 생산된 기상장의 기후값 변동 특성 분석 및 극한기상 사례분석 ○ 세종기지의 대기물리적 특성 파악 <ul style="list-style-type: none"> - 세종기지 30년 기상자료 품질관리 및 재생산 - YOPP-SH 집중관측 준비 ○ 장보고기지 및 서남극 서남극 저층 대기 관측 지속 및 특성 분석 <ul style="list-style-type: none"> - YOPP-SH 참여를 위한 관측 수행 - 장보고과학기지 라돈가스 측정 지속 및 특성 분석
		남극 세종기지 대기입자 특성 및 생물기원냉각물질 변화 파악	<ul style="list-style-type: none"> ○ 하계 세종기지 nano-SMPS 운영으로 나노입자 생성증거 확보 ○ 하계 에어로졸 입자의 화학 특성 및 황 동위원소 비율 변화 분석을 위한 시료 확보

2차년도	2018	외부강제력 변화에 대한 남극의 기후변화 요소 반응 기작 파악	<ul style="list-style-type: none"> ○ 최근 남반구 대기 순환장 변화가 남극 해빙 및 기온의 지역차이에 미치는 영향 파악 - 모델 실험 수행 및 기후인자의 남극 기후변화 패턴에의 영향 정량화를 위한 모델 실험 결과 분석 - 20세기 재분석 자료의 아문젠해 저기압 활동과 빙하코어 프록시 자료 간의 연관 변동성 분석 ○ 빙하기 남극 서풍 제트기류와 해양순환의 상호작용 연구
		서남극의 대기물리 특성 파악을 위한 종관규모 관측 및 수치적 재현	<ul style="list-style-type: none"> ○ 남극 종관규모의 수치적 재현을 통한 저기압 발생 기작 파악 - 극저기아 주요 발생위치, 경로, 강도에 대한 통계분석 수행 - 현장기상관측자료활용 중규모 극한 기상 사례모델링 및 검증 ○ 세종기지의 대기물리적 특성 파악 - 세종기지 구름 및 상층 관측 구축 - 세종기지 30년 기후특성 분석 - YOPP-SH 집중관측 참여 ○ 장보고기지 및 서남극 서남극 저층 대기 관측 지속 및 특성 분석 계속 - YOPP-SH 참여를 위한 관측 수행 계속 - 남극과학기지 라돈 가스 지속 및 특성 분석
		남극 세종기지 대기입자 특성 및 생물기원냉각물질 변화 파악	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대기 에어로졸 입자의 물리 특성 변화 현장 관측 ○ 생물기원냉각물질(DMS) 분석기기 신규 설치를 통한 하계 농도 변화 분석 및 황동위원소 비율 변화 분석

3차년도	2019	외부강제력 변화에 대한 남극의 기후변화 요소 반응 기작 파악	<ul style="list-style-type: none"> ○ 최근 남반구 대기 순환장 변화가 남극 해빙 및 기온의 지역차이에 미치는 영향 파악 - 남극 기후변화의 지역적 차이 메커니즘 제시 - 아문젠해와 로스해 지역 스톱 강도 및 빈도와의 관련성 분석을 통해 빙하코어 자료를 통한 스톱 활동 유추 가능성 제시 ○ 빙하기 남극 서풍 제트기류와 대기중 이산화탄소 농도 상관성 연구
		서남극의 대기물리 특성 파악을 위한 종관규모 관측 및 수치적 재현	<ul style="list-style-type: none"> ○ 남극 종관규모의 수치적 재현을 통한 저기압 발생 기작 파악 - 통계분석을 통한 남극의 극한기상 개념모델 제시 - 현장 관측 자료 및 위성자료를 통한 중규모 극한기상 사례 예측성 검증 ○ 세종기지의 대기물리적 특성 파악 - 세종기지 기상자료 온라인DB 구축 - 세종기지 구름, 상층대기 특성 분석 ○ 서남극 경계층 과정 및 저층 대기 관측 자료를 활용한 수치 모델 모수화 개선 - 상층 관측 자료의 수치 모델과의 비교를 통한 모델 수행 특성 평가 및 지역 규모 대기 과정 이해 - GCM을 통한 남극 라돈가스 농도 재현 및 측정결과와 비교, 남극으로의 수송과정 이해
		남극 세종기지 대기입자 특성 및 생물기원냉각물질 변화 파악	<ul style="list-style-type: none"> ○ 주변 환경요인(해양생물 및 빙권) 및 대기 입자 특성의 통합적 분석을 통한 기후냉각물질 변화 요인 파악 ○ 해양 생물 기원 기후냉각물질 발생이 대기 에어로졸 입자 형성에 미치는 영향 파악

2. 정량적 목표

구분	국외논문		국내논문		특허출원		기술이전
	SCI* (1저자/공동)	기타	SCI (1저자/공동)	기타	국외	국내	
1차년도 (2017)	4 (2/2)	-					
2차년도 (2018)	5 (3/2)	-					
3차년도 (2019)	6 (4/2)	-					
합계	15 (9/6)	-					

* 제1저자 및 공동저자(제2저자까지) 기재

4-2. 국·내외 공동연구 추진 계획

- 세종기지 관측 활성화를 위한 세계기상기구 YOPP-SH 참여
 - 남반구 집중관측시기로 예정된 2018년 남반구 봄부터 2019년 남반구 가을 중 세종기지에서 라디오존데 관측을 일 1회 수행하고 관측결과를 GTS 실시간 전송 추진
 - 이를 위해 대량의 헬륨가스 및 존데센서, 라디오존데 수신기 등을 구비하고 상층관측 수행인력을 투입
 - 킹조지섬 내 타국 기지에서 상층관측이 추진되는 경우 상호 시각을 달리하여 일 2회 등으로 관측회수를 증가시키는 효과를 내도록 협력방안을 논의할 예정임.
- 세종기지와 체코 마사릭대 기지 비교연구 (체코 마사릭대)
 - 체코 마사릭 대학교 Kamil Laska 교수 연구팀과 공동연구계획을 협의하고 구름, 복사 자료에 대한 예비분석이 진행중임.
 - 마사릭 대학팀은 남극반도 동쪽의 Marambio 기지를 기반으로 연구활동을 수행하고 있어서 남극반도 서쪽에 위치한 세종기지 기반 자료와 비교하면 남극반도 동·서 지역에서의 기상/기후 차이를 파악할 수 있음. 특히 구름분포 및 특성 차이와 그에 따른 자외선 복사량 차이 등에 주안점을 두고 공동연구 예정
- 남극 장보고기지 YOPP-SH에 참여방안
 - YOPP-SH는 자발적 참여하는 국제 공동 연구 프로그램이지만, 이 프로그램에 참여함으로써, 극지연구소뿐만 아니라 장보고기지 주변 대기과정에 대한 국외 우수 기관의 대기과정에 대한 분석 연구가 수행될 수 있음. 또한 다른 지역에서의 관측 자료를 확보할 수 있으므로 극지연구소에서 연구할 다양한 남극에서의 대기 과정에 대한 자체 연구가 가능하며, 특히 장보고기지를 기반으로 하는 내륙 지역에 대한 기상 예보를 할 수 있는 기반이 마련될 수 있음.
 - 주로 상층 기상 관측을 위주로 YOPP-SH에 참여할 예정이며, 남극장보고과학지지의 경우

2018년 2-11월에 집중 관측(2회/일)을, 아라온에서는 남극항해 기간 중 매 시즌 100 - 200 회 관측을 수행할 예정이다.

○ 장보고기지와 이태리 국제공동연구 계획

- 이태리의 CNR과는 다산기지가 위치한 니알슨에서 극지연구소와 CNR의 30 m 타워를 활용한 공동 연구를 이미 수행 중에 있으며, 안정 경계층에 대한 측정, 분석 경험이 풍부함. 같은 높이의 고층 타워를 활용한 장보고기지에서의 안정 경계층 과정에 대한 공동연구를 수행함으로써, 남북극 안정 경계층 나아가 내륙에 위치한 이태리-프랑스의 Dome-C 기지에서의 연구와의 비교를 통해 다양한 환경하의 안정 경계층에 대한 보다 심도 깊은 연구가 가능함. 뿐만 아니라 CNR 연구자들은 대기 복사 및 에어로졸 분야 연구 전문가도 확보하고 있기 때문에 장보고기지에서의 지표 복사 및 대기 에어로졸 분야 연구에 기여할 수 있음.
- 이태리 측과의 공동연구는 남극 하계 기간 부분적으로 수행될 예정이며, 이태리의 PNRA에 제출된 CNR의 제안서 채택 여부에 따라 보다 구체화될 것임.

○ 말레이시아와 공동 연구 계획

- University Of Malaya의 국립남극연구센터에서는 최근 대기경계층 내에서의 바람의 연직 분포를 측정할 수 있는 SODAR(SONic Detection and Ranging)을 구매 후 장보고기지에 설치를 희망함. 남극에서의 안정대기경계층 및 카타바틱 바람의 연직 높이는 장보고기지에서 보유한 30 m 타워보다 훨씬 높기 때문에 경계층 구조 평가를 위해서는 경계층 안과 밖에서의 바람, 온습도에 대한 연속적인 관측이 필요한데 SODAR는 바람의 연직 구조에 대한 평가를 위한 활용도가 대단히 높아 말레이시아와의 공동연구가 요구됨.
- 주요 사업 1차년도에 SODAR 설치 및 시험 관측을 통해 운영을 시작한 후 2차년도에 고층 타워에서의 관측 자료 및 상층 기상 자료와의 비교도 수행하여 경계층 과정의 특성 규명에 활용할 예정

○ 오스트레일리아와 라돈 관측 공동연구

- 호주핵과학기술기구의 라돈가스 연구팀은 남극 모슨 기지에서 측정경험이 있고, WMO/GAW의 라돈가스 모니터링 네트워크에서 지속적으로 대기환경의 라돈가스 관측을 진행 중임. 남극과학기지 라돈검출기의 유지 관리 및 라돈가스 자료를 활용한 공동연구를 위해 호주핵과학기술기구의 라돈 가스 측정팀과의 공동연구가 요구됨.
- 주요 사업 1차년도에 SODAR 설치 및 시험 관측을 통해 운영을 시작한 후 2차년도에 고층 타워에서의 관측 자료 및 상층 기상 자료와의 비교도 수행하여 경계층 과정의 특성 규명에 활용할 예정

○ 세종기지 기반 대기 입자 화학 성분 분석을 위한 공동 연구 수행

- 에어로졸 이온 분석 전문 연구자인 이탈리아 연구팀(University of Florence, PI: Professor Roberto Udisti)과의 공동연구 수행
- 이탈리아 연구팀은 남극 및 북극 지역에서 다년간 대기 에어로졸 화학조성(주요 이온 성분 및 organic carbon, metal 등) 분석을 전문적으로 수행하였음.
- 공동 연구를 통하여 '기후냉각물질-에어로졸 화학적 특성-물리적 특성'에 대한 정확한 정성적·정량적 관계를 확인함으로써, 연구적 시너지 효과를 얻을 수 있음.

4-3. 연구개발 사업 규모

연구기간(년)	연구개발비(백만원)		
	2017	2018	2019
2017~2019 (3년간)	950	970	1000

4-4. 총 연구기간 로드맵

현장 관측과 수치적 재현을 통한 남극의 기후변화 특성 규명



4-5. 인프라 활용 로드맵

인프라명	연도	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
남극 세종과학 기지	2017	30	15									15	30
	2018	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	2019	30	30	30	30	30						15	30
남극 장보고과 학기지	2017	30											
	2018	30											
	2019	30											
북극 다산과학 기지	2017												
	2018												
	2019												
쇄빙연구 선 아라온	2017	1		20	20								
	2018	3											
	2019	1		20	20								

* 활용 시기에 음영표시 및 활용일수 작성

* 아라온의 경우 기본적으로 정선 시 존재 관측을 수행하며, 필요 시 별도의 용선 계획



제 5 장 연구개발
과정에서 수집한
해외과학기술 정보

제 5 장 연구개발 과정에서 수집한 해외과학기술 정보

- MET-READER : 남극과학위원회(Scientific Committee on Antarctic Research) 프로젝트인 READER (REference Antarctic Data for Environmental Research) 중 기상자료에 관한 프로젝트로서 고품질의 장기간 남극 기상관측자료 구축을 목적으로 함. 주된 자료 제공처는 남극의 연구기지와 자동기상관측시스템이며 단기간의 이동형 플랫폼에서 생산된 자료를 포함하지 않고 25년 이상 장기간 운영된 관측시스템을 우선으로 함.
- 핵심 기상변수 위주로 운영되고 있으며 지상기온, 해수면기압, 풍속, 상층 기온, 지위고도, 표준고도에서 풍속 자료를 대상으로 함. 자료수집 및 품질관리는 영국 BAS에서 담당하고 있음.



Fig. 5.1 Met READER 프로젝트 홈페이지 <https://legacy.bas.ac.uk/met/READER/>

- AWARE: AWARE (ARM West Antarctica Radiation Experiment) 프로젝트는 미국 에너지부(DOE)의 ARM(Atmospheric Radiation Measurement) 프로그램의 서남극 프로그램으로서 미국과학재단(NSF)와 DOE의 공동 지원으로 수행되고 있음. 특히 복사/구름/에어로졸/상층대기/플릭스/기상 등 대기 전 분야의 첨단 관측기기로 구성된 컨테이너 약 7대로 구성된 ARM Mobile Facility를 서남극빙상(2015.11-2016.1) 및 맥머도기지(2016.1-2017.1)에서 각각 1년여

기간씩 운영하여 기존에 남극 관측에서 획득하지 못했던 고품질 데이터를 획득할 것으로 예상됨.



Fig. 5.2 알래스카 Oliktok Point 지역에 배치된 ARM Mobile Facility (2013-2018)

- 핀란드 Aboa 과학기지에서는 여름철 기지주변에서 생기는 연못에서 존재하는 박테리아 활동이 에어로졸 생성에 미치는 영향을 분석 (Kyrö et al. 2013)
- 독일 Neumayer 과학기지에서는 DMS, H₂O, NH₃, organic vapor, iodine oxide 등이 남극대륙의 해안지역에서 발생하는 에어로졸의 생성에 미치는 영향을 분석 (Weller et al., 2015)

제 6 장 참고 문헌

제 6 장 참고문헌

- Abram, N.J., Wolff, E.W., and Curran, M.A.J., 2013, A review of sea ice proxy information from polar ice cores. *Quater. Sci. Rev.*, 79, 168-183.
- BAS 2007, British Antarctic Survey, Natural Environment Research Council.
- Amrani, A., Said-Ahmad, W., Shaked, Y., Kiene, R., 2013, Sulfur isotope homogeneity of oceanic DMSP and DMS. *Proc. Nat'l. Acad. Sci. U.S.A.*, 110, 18413-18414.
- Braconnot, P., Otto-Bliesner, B., Harrison, S., Joussaume, S., Peterchmitt, J.-Y., Abe-Ouchi, A., ... Zhao, Y., 2007, Results of PMIP2 coupled simulations of the Mid-Holocene and Last Glacial Maximum – Part 1: experiments and large-scale features. *Clim. Past*, 3(2), 261 - 277. <http://doi.org/10.5194/cp-3-261-2007>.
- Chambers, S.D., Hong, S.B., Williams, A.G., Crawford, J., Griffiths, A.D., 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.
- Charlson, R.J., Lovelock, J. E., Andreae, M. O., Warren, S. G., 1987, Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo, and climate. *Nature*, 326(6114), 655 - 661.
- Chavaillaz, Y., Codron, F., & Kageyama, M., 2013, Southern westerlies in LGM and future (RCP4.5) climates. *Clim. Past*, 9(2), 517 - 524. <http://doi.org/10.5194/cp-9-517-2013>
- Chimonas, G. and C.J. Nappo, 1989, Wave drag in the planetary boundary layer over complex terrain. *Bound.-Layer Meteor.*, 47, 217-232.
- Choi, Taejin, Bang Yong Lee, Hee Choon Lee, and Jae-Seol Shim, 2004, Surface Flux Measurements at King Sejong Station in West Antarctica: I. Turbulent Characteristics and Sensible Heat Flux. *Ocean and Polar Res.*, 26(3), 453-463.
- Choi, Taejin, Bang Yong Lee, Hee Choon Lee, Seong-Joong Kim, Sungmin Hong, 2005, Surface Flux Measurements at King Sejong Station in West

- Antarctica: II. Turbulent Exchanges of Sensible Heat and Latent Heat in the Austral Summer of 2002–2003. *Journal of Korean Geophysical Society*, 8(3), 159–167.
- Choi, Taejin, Bang-Yong Lee, Seong-Joong Kim, Yoo-Min Park and Young Jun Yoon, 2006, The Characteristics of Radiation, Temperature and Wind Direction around King Sejong Station, Antarctica. *Journal of Korean Geophysical Society*, 9(4), 397–408.
- Choi, Taejin, Bang-Yong Lee, Seong-Joong Kim, Young-Jun Yoon, and Hee-Choon Lee, 2008, Net radiation and turbulent energy exchanges over a non-glaciated coastal area on King George island during four summer seasons. *Antarctic Science*, 20(1), 99–111.
- Choi, T., S. Kim, J. Kim and M. Lazzara, 2016, Characteristics of surface meteorology at Lindsey Island, Amundsen Sea, West Antarctica from 2008 to 2014. *J. Geophys. Res.*, Submitted.
- Compo, G.P., and 26 co-authors, 2011, The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137, 1–28.
- Ding, Q., Steig, E.J., Battisti, D.S., and Kuttel, M., 2011, Winter warming in West Antarctica caused by central tropical Pacific warming. *Nat. Geosci.*, 4, 398–403.
- DeConto, R.M., and D. Pollard., 2016, Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, 531, 591–597.
- Ding, Q., Steig, E.J., Battisti, D.S., and Wallace, J.M., 2012, Influence of the Tropics on the Southern Annular Mode. *J. Clim.*, DOI:10.1175/JCLI-D-11-00523.1
- Djouman, G, Holland D.M., 2015, Surface radiation balance, surface layer climate and turbulent exchange in the ablation zone of Pine Island Glacier, The 10th Antarctic Meteorological Observation. Modeling and Forecasting Workshop
- Eby, M., Weaver, A. J., Alexander, K., Zickfeld, K., Abe-Ouchi, A., Cimadoribus, A. A., Zhao, F., 2013, Historical and idealized climate model experiments:

- an intercomparison of Earth system models of intermediate complexity. *Clim. Past*, 9(3), 1111 - 1140. <http://doi.org/10.5194/cp-9-1111-2013>
- Fogt, R.L., and Bromwich, D.H., 2006, Decadal variability of the ENSO teleconnection to the high-latitude South Pacific governed by coupling with the Southern Annular Mode. *J. Clim.*, 19, 979-997.
- Fogt, R.L., and Co-authors, 2009, Historical SAM variability. Part II: Twentieth-century variability and trends from reconstructions, observations, and the IPCC AR4 Models. *J. Clim.*, 22(20), 5346 - 5365.
- Fogwill, C. J., Turney, C. S. M., Hutchinson, D. K., Taschetto, A. S., & England, M. H., 2015, Obliquity Control On Southern Hemisphere Climate During The Last Glacial. *Scientific Reports*, 5, 11673. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1038/srep11673>.
- Gallée H., S. Preunkert, S. Argentini, M. M. Frey, C. Genthon, B. Jourdain, I. Pietroni, G. Casasanta, H. Barral, E. Vignon, C. Amory, and M. Legrand, 2015, Characterization of the boundary layer at Dome C (East Antarctica) during the OPALE summer campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 6225 - 6236.
- Garreaud, R.D., and Battisti, D.S., 1999, Interannual (ENSO) and interdecadal (ENSO-like) variability in the southern hemisphere tropospheric circulation. *J. Clim.*, 12, 2113-2123.
- Garreaud, R., 2007, Precipitation and Circulation Covariability in the Extratropics. *J. Clim.*, 20(18), 4789 - 4797. <http://doi.org/10.1175/JCLI4257.1>
- Genthon, C., M. S. Town, D. Six, V. Favier, S. Argentini, and A. Pellegrini, 2010, Meteorological atmospheric boundary layer measurements and ECMWF analyses during summer at Dome C, Antarctica. *J. Geophys. Res.*, 115, D05104, doi:10.1029/2009JD012741.
- Goosse, H., Brovkin, V., Fichefet, T., Haarsma, R., Huybrechts, P., Jongma, J., Weber, S. L., 2010, Description of the Earth system model of intermediate complexity LOVECLIM version 1.2. *Geosci. Model Dev.*, 3(2), 603 - 633. <http://doi.org/10.5194/gmd-3-603-2010>

- Hezel, P.J., Alexander, B., Bitz, C.M., Steig, E.J., Holmes, C.D., Yang, X., and Sciare, J., 2011, Modeled methanesulfonic acid (MSA) deposition in Antarctica and its relationship to sea ice. *J. Geophys. Res.*, 116, D23214, doi: 10.1029/2011JD016383.
- Ho, C.-H., Kim, J.-H., Kim, H.-S., Sui, C.-H., and Gong, D.-Y., 2005, Possible influence of the Antarctic Oscillation on tropical cyclone activity in the western North Pacific. *J. Geophys. Res.*, 110(D19104), doi:10.1029/2005JD005766.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Joussaume, S., Taylor, K. E., Braconnot, P., Mitchell, J. F. B., Kutzbach, J. E., Harrison, S. P., Wyputta, U., 1999, Monsoon changes for 6000 years ago: Results of 18 simulations from the Paleoclimate Modeling Intercomparison Project (PMIP). *Geophys. Res. Lett.*, 26(7), 859 - 862. <http://doi.org/10.1029/1999GL900126>.
- Justino, F., Souza, E., Amorim, M. C., Dias, P. L. S., & Lemos, C. F., 2008, Influence of boundary conditions on the Southern Hemisphere atmospheric circulation during the last glacial maximum. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 23, 490 - 500.
- Kim, S.-J., and Lee, B.-Y., 2009, Westerly winds in the Southern Ocean during the Last Glacial Maximum Simulated in CCM3. *Ocean and Polar Res.*, 31(4), 297-304.
- Kim, S.-J., Lu, J., and Kim, B.-M., 2014, Southern Annular Mode (SAM) for the

- Last Glacial Maximum derived from PMIP2 coupled model simulations. *Adv. Atmos. Sci.*, 31, 863-878.
- Kwok, R., and Comiso, J.C., 2002, Spatial patterns of variability in Antarctic surface temperature: Connections to the Southern Hemisphere Annular Mode and the Southern Oscillation. *Geophys. Res. Lett.*, 29(14), 1705, doi:10.1029/2002GL015415.
- Kwon, Hataek, Sang-Jong Park, Solji Lee, Seong-Joong Kim and Baek-Min Kim, 2016, A Numerical Simulation of Blizzard caused by Polar Low at King Sejong Station, Antarctica. *Atmosphere*, 26(2).
- Kyrö, E. M., Kerminen, V. M., Virkkula, A., Dal Maso, M., Parshintsev, J., Ruíz-Jimenez, J., Forsström, L., Manninen, H. E., Riekkola, M. L., Heinonen, P., and Kulmala, M., 2013, Antarctic new particle formation from continental biogenic precursors. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 3527-3546, 10.5194/acp-13-3527-2013.
- L'Heureux, M.L., and Thompson, D.W.J., 2006, Observed Relationships between the El Niño - Southern Oscillation and the Extratropical Zonal-Mean Circulation. *J. Clim.*, 19, 276 - 287.
- Lana, A., et al., 2011, An updated climatology of surface dimethylsulfide concentrations and emission fluxes in the global ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, 25, GB1004, doi:10.1029/2010GB003850.
- Lazzara, Matthew A., Jonathan E. Thom, Lee J. Welhouse, Linda M. Keller, and George A. Weidner, 2011, USAP ANTARCTIC AUTOMATIC WEATHER STATION PROGRAM STATUS AND FIELD REPORT, The 6th Antarctic Meteorological Observation, Modeling and Forecasting Workshop
- Lee, Bang-Yong, and Ik Soon Jang, 1992, Studies on the Characteristics of Meteorological Phenomena and Cold Wave at King Sejong Station, Antarctica. *Korean J. Polar Res.*, 3(1/2), 1-16.
- Lee, Bang-Yong and Jae-Cheol Nam, 1991, Studies on the Characteristics of Meteorological Elements at King Sejong Station. *Korean J. Polar Res.*, 2(2), 3-27.

- Lee, Bang-Yong, Tae-Yong Kwon, Jeong-Soon Lee, and Young-In Won, 2002, Surface Air Temperature Variations around the Antarctic Peninsula: Comparison of the West and East Sides of the Peninsula. *Ocean and Polar Res.*, 24(3), 267-278.
- Lee, Bang-Yong, Hi Ku Cho, Jhoon Kim, Yeon Jin Jung and Yun Gon Lee, 2006, Recent Changes in Solar Irradiance, Air Temperature and Cloudness at King Sejong Station, Antarctica. *Atmosphere*, 16(4), 333-342.
- Lee, Jeong-Soon, Tae-Yong Kwon, Bang-Yong Lee, Ho-Il Yoon, and Jeong-Woo Kim, 2003, Change of Regional Atmospheric Circulation Related with Recent Warming in the Antarctic Peninsula. *Ocean and Polar Res.*, 25(4), 503-518.
- Li, X., Holland, D.M., Gerber, E.P., Yoo, C.H., 2014, Impacts of the north and tropical Atlantic Ocean on the Antarctic Peninsula and sea ice. *Nature*, 505, 538-542.
- Marshall, G.J., 2003, Trends in the southern annular mode from observations and reanalyses. *J. Clim.*, 16(24), 4134 - 4143.
- 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. *J. Clim.*, 19, 5388-5404.
- Meredith, M.P., Woodworth, P.L., Hughes, C.W., and Stepanov, V., 2004, Changes in the ocean transport through Drake Passage during the 1980s and 1990s, forced by changes in the Southern Annular Mode. *Geophys. Res. Lett.*, 31(21), L21305, doi:10.1029/2004GL021169.
- Monaghan, A.J., Bromwich, D.H., Chapman, W., and Comiso, J.C., 2008, Recent variability and trends of Antarctic near-surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 113(D04105), doi:10.1029/2007JD009094.
- Nam, Jae-Cheol and Bang-Yong Lee, 1991, A Case Study of Blizzard at King Sejong Station, Antarctica. *Korean J. Meteor. Soc.*, 27(3).
- Nappo, C.J., 2002, *An Introduction to Atmospheric Gravity Waves*, Academic Press, London, 276pp.

- Nicolas, J. P., and D. H. Bromwich, 2014, New reconstruction of Antarctic near-surface temperatures: Multidecadal trends and reliability of global reanalyses. *J. Clim.*, 27, 8070–8093, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00733.1
- Nieuwstadt, F.T.M., 1984, The turbulent structure of the stable, nocturnal boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 41, 2202–2216.
- Nuncio, M., Yuan, X., 2015, The influence of the Indian Ocean dipole on Antarctic sea ice. *J. Clim.*, 28, 2682–2690.
- Oduro H., Alstyne, K.L., Farquhar, J., 2012, Sulfur isotope variability of oceanic DMSP generation and its contributions to marine biogenic sulfur emissions. *Proc. Nat'l. Acad. Sci. U.S.A.*, 109, 9012–9016.
- Paolo, F. S., Fricker, H. A., Padman, L., 2015, Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, 348, 327–331.
- Park, K.-T., Lee, K., Yoon, Y.-J., Lee, H.-W., Kim, H.-C., Lee, B.-Y., Hermansen, O., Kim, T.-W. and Holmen, K., 2013, Linking atmospheric dimethyl sulfide and the Arctic Ocean spring bloom. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 155–160.
- Park, S.-J., Choi, T.-J., Kim, S.-J., 2013, Heat Flux Variations over Sea Ice Observed at the Coastal Area of the Sejong Station, Antarctica. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 49(4), 443–450.
- Park, S., 2014, A Unified Convection Scheme (UNICON). Part I: Formulation. *J. Atmos. Sci.*, 71, 3902–3930.
- Powers, J., K. W. Manning, D. H. Bromwich, J. J. Cassano, and A. M. Cayette, 2012, A decade of Antarctic science support through AMPS. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 1699–1712, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00186.1.
- Quinn, P. K.; Bates, T. S., 2011, The case against climate regulation via oceanic phytoplankton sulphur emissions. *Nature*, 480(7375), 51 - 56.
- Read, K.A., Lewis, A.C., Bauguitte, S., Rankin, A.M., Salmon, R.A., Wolff, E.W., Saiz-Lopez, A., Bloss, W. J., Heard, D.E., Lee, J.D., Plane, J.M.C., 2008, DMS and MSA measurements in the Antarctic boundary layer: impact of BrO on MSA production, *Atmos. Chem. Phys.*, 8, 2985 - 2997.

- Raphael, M.N., Marshall, G.J., Turner, J., Fogt, R.L., Schneider, D., Dixon, D.A., Hosking, J.S., Jones, J.M., and Hobbs, W.R., 2016, The Amundsen Sea Low. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 97, 111-121.
- Rojas, M., 2013, Sensitivity of Southern Hemisphere circulation to LGM and $4 \times \text{CO}_2$ climates. *Geophys. Res. Lett.*, 40(5), 965 - 970. <http://doi.org/10.1002/grl.50195>
- Rojas, M., Moreno, P., Kageyama, M., Crucifix, M., Hewitt, C., Abe-Ouchi, A., Hope, P., 2009, The Southern Westerlies during the last glacial maximum in PMIP2 simulations. *Clim. Dyn.*, 32(4), 525 - 548. <http://doi.org/10.1007/s00382-008-0421-7>
- Saiz-Lopez, A., Mahajan, A. S., Salmon, R. A., Bauguitte, S. J. B., Jones, A. E., Roscoe, H. K., and Plane, J. M. C., 2007, Boundary Layer Halogens in Coastal Antarctica. *Science*, 317, 348 - 351.
- Saji, N. H., Goswami, B. N., Vinayachandran, P. N., Yamagata, T., 1999, A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401, 360-363.
- 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, 9350-9372.
- Schmidt, G. A., Annan, J. D., Bartlein, P. J., Cook, B. I., Guilyardi, E., Hargreaves, J. C., You, P., 2014, Using palaeo-climate comparisons to constrain future projections in CMIP5. *Clim. Past*, 10(1), 221 - 250. <http://doi.org/10.5194/cp-10-221-2014>
- Shulmeister, J., Goodwin, I., Renwick, J., Harle, K., Armand, L., McGlone, M. S., Curran, M., 2004, The Southern Hemisphere westerlies in the Australasian sector over the last glacial cycle: a synthesis. *Quater. Int'l.*, 118 - 119, 23-53. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1040-6182\(03\)00129-0](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1040-6182(03)00129-0)
- Sime, L. C., Kohfeld, K. E., Quéré, C. Le, Wolff, E. W., de Boer, A. M., Graham, R. M., & Bopp, L., 2013, Southern Hemisphere westerly wind changes during the Last Glacial Maximum: model-data comparison. *Quater. Sci.*

Rev., 64, 104 - 120.

- Song, H.J., Choi, E., Lim, G.H., Kim, Y.H., Kug, J.S., and Yeh, S.W., 2011, The central Pacific as the export region of the El Niño Southern Oscillation sea surface temperature anomaly to Antarctic sea ice. *J. Geophys. Res.*, 116, D21113, doi:10.1029/2011JD015645.
- Steig, E., Schneider, D. P., Rutherford, S. D., Mann, M.E., Comiso, J. C., Shindell, D. T., 2009, Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 International Geophysical Year. *Nature*, 457, 459-462.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A., 2012, An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93(4), 485 - 498. <http://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Thompson, D., and Solomon, S., 2002, Interpretation of recent southern hemisphere climate change. *Science*, 296(5569), 895-899.
- David W. J. Thompson, Susan Solomon, Paul J. Kushner, Matthew H. England, Kevin M. Grise, and David J. Karoly, 2011, Signatures of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nat. Geosci.*, 4, 741-749.
- Toggweiler, J. R., Russell, J. L., & Carson, S. R., 2006, Midlatitude westerlies, atmospheric CO₂, and climate change during the ice ages. *Paleoceanogr.*, 21(2), n/a - n/a. <http://doi.org/10.1029/2005PA001154>
- Toggweiler, J.R., Russell, J.L., and Carson, S.R., 2006, Midlatitude westerlies atmospheric CO₂ and climate change during the ice ages. *Paleoceanogr.*, 21.
- Turner, J., Bindshadler, R., Convey, P., di Prisco, G., Fahrbach, E., Gutt, J., Hodgson, D., Mayewski, P., and Summerhayes, C., 2009, Antarctic climate change and the environment. Scientific Committee on Antarctic Research. Cambridge, UK.
- Turner, J., et al., 2004, The SCAR READER project: Toward a high-quality database of mean Antarctic meteorological observations. *J. Climate*, 17, 2890-2898.
- Valdes, P. J., 2000, South American palaeoclimate model simulations: how

- reliable are the models? *J. Quatern. Sci.*, 15(4), 357 - 368.
[http://doi.org/10.1002/1099-1417\(200005\)15:4<357::AID-JQS547>3.0.CO;2-8](http://doi.org/10.1002/1099-1417(200005)15:4<357::AID-JQS547>3.0.CO;2-8)
- Weller, R., Schmidt, K., Teinilä, K., and Hillamo, R., 2015, Natural new particle formation at the coastal Antarctic site Neumayer. *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 11399-11410, 10.5194/acp-15-11399-2015.
- Williams, G. P., & Bryan, K., 2006, Ice Age Winds: An Aquaplanet Model. *J. Clim.*, 19(9), 1706 - 1715. <http://doi.org/10.1175/JCLI3766.1>
- Wolff, E.W., and 27 co-authors, 2006, Southern Ocean sea-ice extent, productivity and iron flux over the past eight glacial cycles. *Nature*, 440, 491-496.
- Won, Y., Bang-Yong Lee, Yeadong Kim, Soon-Ung Park, and Chul-Hee Kim, 1996, A Preliminary Meteorological Observation on the Upper Atmosphere using a Radiosonde System at King Sejong Station. *Ocean Res.*, 18(2), 165-171.
- Wu, Z., Li, J., Wang, B., and Liu, X., 2009, Can the Southern Hemisphere annular mode affect China winter monsoon. *J. Geophys. Res.*, 114(D11107), doi:10.1029/2008JD011501.
- Yoo, C., Park, S., Kim, D., Yoon, J.-H., and Kim, H.-M., 2015, Boreal Winter MJO Teleconnection in the Community Atmosphere Model Version 5 with the Unified Convection Parameterization. *J. Clim.*, 28, 8135-8150.

주 의

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.

