
「고층대기에 의한 극제트 변화가 중위도
기후환경에 미치는 영향 규명」
기획연구 보고서



해양수산부

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “ ‘고층대기에 의한 극제트 변화가 중위도 기후환경에 미치는 영향 규명’ 기획 연구 ” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.



연구 책임자 : 김정환

참여 연구원 : 지건화, 이창섭, 김지은,
송병권, 김성중, 허순도,
홍상범, 남승일, 김정현

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2020. 11. 01. ~ 2021. 04. 30.	단계 구분	(해당단계) / (총단계)
연구사업명	중 사업명	연구·정책지원사업			
	세부사업명	정책·지원과제			
연구과제명	중 과제명				
	세부(단위)과제명	고층대기 극제트 변화가 중위도 기후환경에 미치는 영향 규명을 위한 기획연구			
연구책임자	김정한	해당단계 참여연구원수	총 : 10 명 내부 : 10 명 외부 : 명	해당단계 연구비	정부: 천원 기업: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 극지기후과학연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :	상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 :	연구책임자 :			
요약 (연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)					보고서 면수
<p>○ 산업화 이후 지구의 기후는 온실기체의 증가로 인해 지속적으로 온난화가 진행되고 있는 것으로 알려져 있으며, 그로 인한 인간생활로의 영향은 매우 심각할 수 있는 것으로 보고되고 있음</p> <p>○ 최근의 연구들로부터 중위도 지역의 기후가 극지방의 기후에 매우 민감하게 반응하는 것으로 밝혀짐에 따라 극지방 기후변화에 대해 보다 정확하고 정밀하게 이해하는 것이 매우 중요함</p> <p>○ 중위도 지역의 중장기 기후변화에 대한 예측의 신뢰도를 높이기 위해서는 일차적으로 극지방의 기후 변화를 지배하는 기작을 이해해야 하며, 이어서 극지방 기후의 변화가 중위도 지역에 영향을 미치는 과정에 대한 연구가 필수적임.</p> <p>○ 극지방의 기후 변화를 이해하기 위해서는 우선적으로 겨울철 양 극지방에서 형성되는 극제트의 변화에 대한 이해가 필요하며, 이를 위해서는 극제트 변화에 영향을 미치는 핵심 요소들의 역할에 대한 관측·수치적 연구가 필요함</p> <p>○ 최근까지 극제트의 변동성에 대한 연구들이 꾸준히 있어 왔지만, 대부분의 연구에서는 주로 대류권-성층권 등 저층대기 시스템에 의한 영향에만 초점을 맞춰왔으나, 최근의 연구들에서는 저층대기에 의한 영향에 더해 중간권 이상의 고층대기에 의한 영향도 매우 중요한 것으로 보고되고 있음</p> <p>○ 중간권 이상의 고층대기가 극제트 변화에 미치는 영향에 대한 연구는 현재 매우 부족한 실정이며, 폭넓게 사용되고 있는 기후예측을 위한 전지구 전층대기 수치모델에도 고층대기에 의한 영향력 부분은 적용되지 않고 있음</p> <p>○ 극지역 고층대기를 변화시키는 요인은 크게 태양복사의 변화, 우주로부터 유입되는 중·고에너지 입자에 의한 고층대기의 화학변화, 그리고 저층대기로부터 전파되는 대기파동에 의한 변화 등으로 요약할 수 있음</p> <p>○ 관측을 기반으로 이 세 가지 요인에 의한 고층대기의 변화와 이러한 고층대기의 변화가 극제트에 영향을 미치는 기작을 규명하는 연구와 관측적 연구 결과를 기존의 전지구 기후모델에 적용하는 연구가 필요</p> <p>○ 또한, 개선한 전지구 기후모델을 이용하여, 극지 기후의 다양한 변화 시나리오에 반응하는 중위도 지역의 기후 변화에 대해 기존 기후모델 결과와의 비교분석 및 메커니즘 연구가 필요함</p>					
색인어 (각 5개 이상)	한글	극지 고층대기, 극제트 변화, 극지 기후 변동성, 태양 복사, 고에너지 입자 유입, 행성파, 대기 중력파, 전지구 전층대기 화학-결합 기후 모델			
	영어	Polar upper atmosphere, Polar vortex variation, Polar climate variability, Solar radiation, Energetic particle precipitation, Planetary waves, Atmospheric gravity waves, Global whole-atmosphere chemistry-coupled climate model			

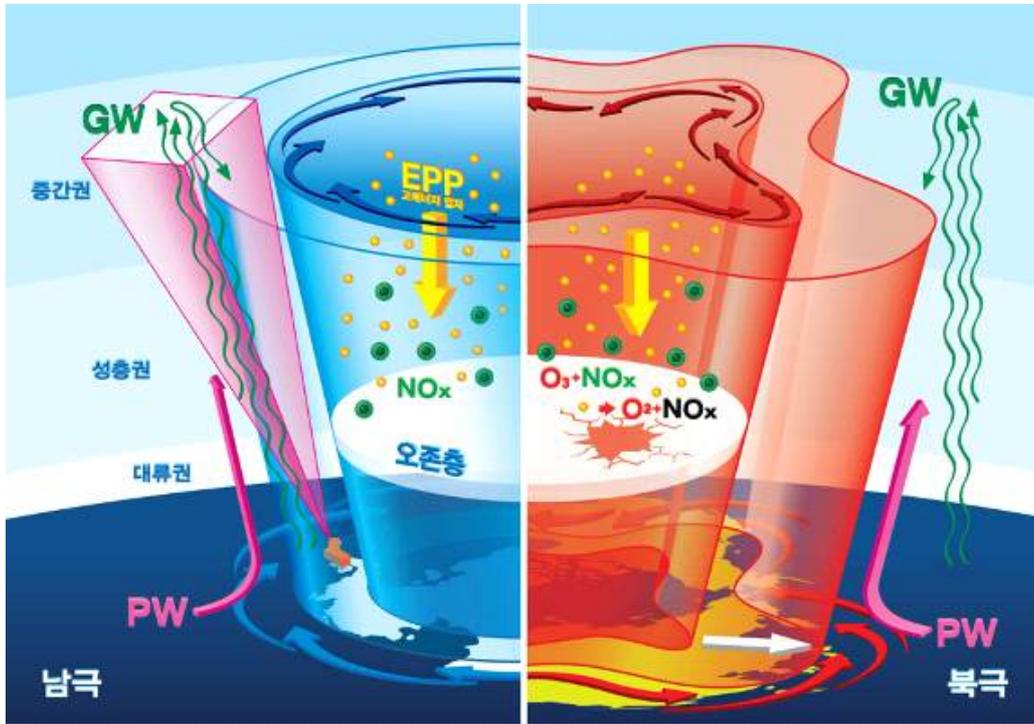
요 약 문

I. 제 목

- ‘고층대기 극제트 변화가 중위도 기후환경에 미치는 영향 규명’을 위한 기획 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 지구 대기의 기후는 산업화 이후 온실기체의 증가로 인해 지속적인 온난화가 진행되고 있으며 최근들어 중위도 지역에서의 한파 또는 열파 등의 이상 기후 빈도가 증가하고 있는 것으로 알려짐
- 최근들어 인간 활동에 매우 밀접한 영향을 미치는 중위도 지역의 기후는 극지방의 기후 변화에 민감하게 반응하는 것으로 보고되고 있음
- 특히, 극지역 겨울철에 형성되는 극제트의 변동성에 따라 중위도 지역의 기후가 변하게 되는데, 아직까지 극제트의 변동성에 핵심 역할을 하는 요인과 그 기작들이 명확하지 않음
- 최근까지 극제트 변동성에 대한 대부분의 연구는 대류권 및 성층권 시스템 내에서만 변동성의 요인을 분석해 왔으나, 최근 연구 결과들에서는 대류권 및 성층권의 저층대기 뿐만 아니라 고층대기에서의 물리·화학적 변화도 극제트 변화에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있음
- 그러나 기후변화 연구의 도구로서 널리 활용되고 있는 현재의 전지구 전층대기 수치모델에는 고층대기 변화에 의한 극지역 기후로의 영향력에 대해 고려하지 않고 있으며 이 과정에 대한 연구도 부족한 실정임
- 따라서 고층대기 변화에 있어서 핵심 요소인 태양활동 변화, 고에너지 입자 유입, 그리고 대기 파동에 의한 영향과 기작을 규명하고 전지구 전층대기 수치모델에 적용하여, 극지역의 기후변화가 중위도 지역에 미치는 영향에 대해 기존 수치모델 결과와의 비교·분석 연구가 필요함
- 나아가서, 현재의 기후모델에 매우 단순화된 과정으로 적용되고 있는 핵심 기작들을 현실적으로 개선한 기후모델을 활용하여, 태양활동 변화 등의 자연변동성에 의한 영향을 정량적으로 밝히는 연구도 필요함



<남극(좌)과 북극(우)의 극제트 변동성에 대한 모식도>

- 관련 정책 근거

- ※ 제3차 남극연구활동진흥 기본계획 ('17~'21)
 - : '남극연구 지평 확대' 전략 중 '남극연구를 통한 글로벌 환경변화의 예측·대응'에 부합
- ※ 제4차 과학기술 기본계획 ('18~'22)
 - : 4대 전략 중 '미래도전을 위한 과학기술역량 확충' 전략의 중점 추진과제 '과학적 지식탐구 및 창의도전적인 연구 진흥'에 부합
- ※ 국정과제
 - : 100대 국정과제 중 3-61 '신기후체제에 대한 건설한 이행체계 구축'
- ※ 극지과학 미래발전전략
 - : 4대 추진전략 중 '극지과학연구 성과제고'의 추진과제 1-1 '국가·사회 현안 해결을 통한 국민체감형 연구 확대'에 부합
- ※ 극지연구소 R&R
 - : '극지역 온난화가 초래하는 국가 사회문제 해결'에 부합

Ⅲ. 연구 개발의 내용 및 범위

- 국내·외 연구개발 기술 동향 분석
- 연구개발 추진 세부 계획 및 마스터플랜 수립

IV. 연구 개발 결과

본 기획 연구에서 제안하는 연구사업의 최종 목표는 “고층대기에 의한 극제트 변화가 중위도 기후환경에 미치는 영향 규명”이다. 이 최종 목표를 위해서는 단계별로 접근할 필요가 있는데, 일차적으로 고층대기에서 발생하는 현상들이 극제트를 어떻게 변화시키는지에 대한 메커니즘을 밝혀야 한다. 기존의 극제트 변화에 대한 연구들에서 대부분 저층대기 (대류권 및 성층권)에 의한 원인만을 분석해 왔으나, 최근 연구들에서 고층대기에서의 현상들도 극제트에 영향을 미치는 것으로 발표되고 있다. 따라서 기존 연구에서는 조명하지 않은 극제트 변화에 있어서 고층대기 현상들의 영향력에 대한 연구가 우선적으로 이루어져야 한다. 또한, 기존 연구에서는 고층대기 현상에 의한 영향을 고려하지 않았기 때문에, 현재 기후변화 연구에 사용하고 있는 전층대기 수치모델에는 고층대기에 의한 영향력을 반영하지 않고 있다. 뿐만 아니라, 전층대기 수치모델에서 매우 중요한 역할을 하는 대기 파동에 의한 영향이 현실과 달리 매우 단순화해서 모델에 적용하기 때문에 이에 대한 개선 연구도 필수적으로 수행되어야 한다. 본 기획과제에서 제안하는 연구사업에서는 앞서 언급한 최종 목표를 달성하기 위해 크게 두 가지 핵심 연구 주제를 설정하였으며 각 연구주제의 단계별 목표는 다음과 같다.

1. 관측기반의 고층대기에 의한 극제트 변화 연구

가. 1단계 (3년)

- 극지역 중·고층대기 온도 및 바람 관측용 고해상도 지상 관측시스템 구축 및 시험 운영
- 라이다 시스템 운영 기술 확보 및 자료 검증을 위한 비교·분석 연구
- 중간·고에너지 입자 유입에 의한 극지방 중·고층대기 화학변화 연구
- ARISE & ANGWIN 등 국제 관측 네트워크에 주도적 참여 및 국제 공동연구 수행

나. 2단계 (3년)

- 남극 세종과학기지 지상 관측자료 활용 대기중력과 3차원 전파 특성 연구
- 대기 파동 및 배경 바람 사이의 상호작용과 2차 파동 (secondary wave)의 전파 특성 연구
- 지상관측으로 얻은 대기중력과 특성과 수치모델 모수화 결과와 비교 연구

2. 전지구 전층대기 기후모델 핵심요소 개선 및 활용

가. 1단계 (3년)

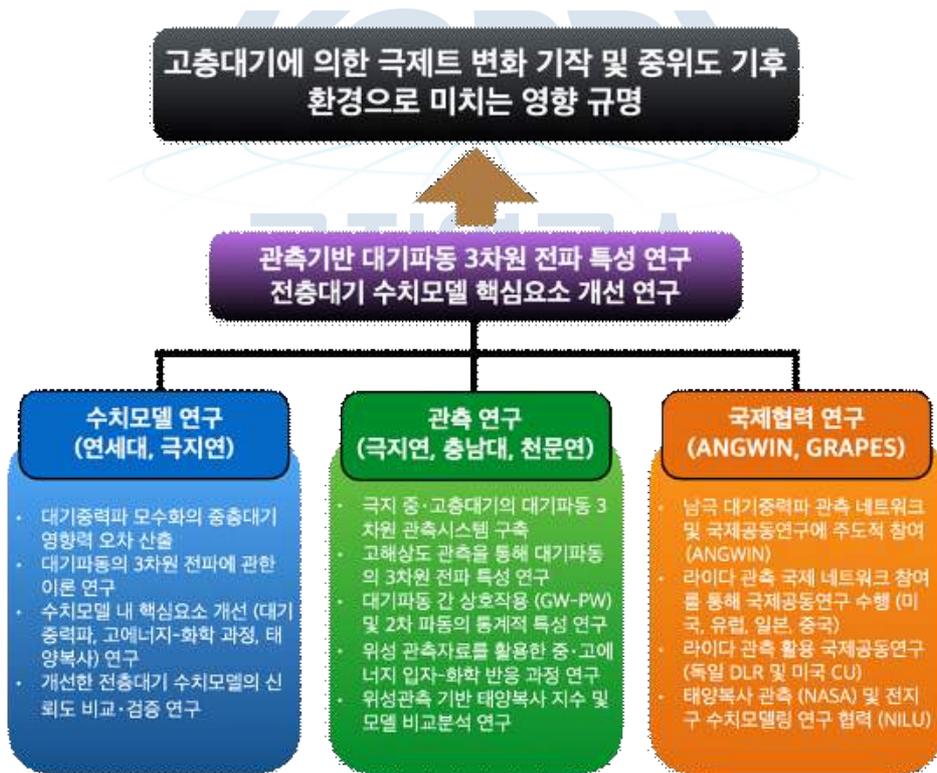
- 대기파동의 3차원 전파에 대한 이론적 연구
- 대기중력과 모수화의 중·고층대기 영향력 오차 산출
- 다양한 태양복사 모델 및 태양복사 지수 비교·분석 연구
- 태양활동에 의한 극지방 고에너지 입자 유입 변화가 중·고층대기 화학조성 및 대기 순환에 미치는 영향 수치적 연구
- 고에너지 입자유입에 의한 극지방의 대기 순환 변화가 여름반구에서 겨울반구로

형성되는 고층대기의 거대규모 순환 (Large-Scale Circulation)에 미치는 영향에 대한 수치 연구

- 고층대기의 거대규모 순환과 극지방 순환의 상호작용에 따른 대기 파동 3차원 전파 변동 및 중위도 대기 순환으로의 영향 연구
- 전지구 전층대기 화학결합 수치모델링용 서버 구축

나. 2단계 (3년)

- 전층대기 수치모델 내 핵심요소를 개선한 모델을 활용하여 과거 기후변동성 재현 연구
- 개선한 전층대기 수치모델 활용 극제트의 변화가 중위도 지역 순환에 미치는 영향 및 기작에 관한 수치적 연구
- 고층대기 변화가 극제트의 동서방향 비대칭성에 미치는 영향에 대한 수치적 연구
- 극제트의 동서방향 비대칭성과 중위도 지역 기후요소와의 지역별 상관성 연구
- 향후 다양한 태양변동성 예측에 대해 미래 극지 기후 변화 시나리오에 대한 수치적 연구



〈추진체계〉

최종목표	고층대기에 의한 극제트 변화 기작 및 중위도 기후환경으로 미치는 영향 규명	
구분	1단계 (3년)	2단계 (3년)
관측기반 고층대기에 의한 극제트 변화 연구	<ul style="list-style-type: none"> 극지역 중·고층대기 온도 및 바람 관측용 고해상도 지상 관측시스템 구축 및 시험 운영 라이다 시스템 운영 기술 확보 및 자료 검증용 위한 비교·분석 연구 중간·고에너지 입자 유입에 의한 극지방 중·고층대기 화학변화 연구 ARISE & ANGWIN 등 국제 관측 네트워크에 주도적 참여 및 국제 공동연구 수행 	<ul style="list-style-type: none"> 세종과학기지 지상 관측자료 활용 대기중력파 3차원 전파 특성 연구 대기 파동 및 배경 바람 사이의 상호작용과 2차 파동의 전파 특성 연구 지상관측으로 얻은 대기중력파 특성과 수치모델 모수화 결과 비교 연구 ARISE & ANGWIN 등 국제 관측 네트워크에 참여 및 국제 공동연구 지속 수행
전지구 전층대기 기후모델 핵심요소 개선 및 활용	<ul style="list-style-type: none"> 대기파동의 3차원 전파에 관한 이론 연구 대기중력파 모수화의 중·고층대기 영향력 오차 산출 다양한 태양복사 모델 및 지수 비교·분석 연구 태양활동에 의한 극지방 고에너지 입자 유입 변화가 중·고층대기에 미치는 영향 수치적 연구 전층대기 화학결합 수치모델링용 서버 구축 	<ul style="list-style-type: none"> 핵심요소를 개선한 수치모델을 활용하여 과거 기후변동성 재현 연구 개선한 수치모델 활용 극제트의 변화가 중위도 지역에 미치는 영향 및 기작 연구 태양변동성 예측에 관한 다양한 결과를 적용하여 미래 극지 기후 변화 시나리오에 대한 모델링 연구

<2단계 (총 6년)로 기획한 로드맵>

3. 추정 예산계획 (안)

(백만)

	1단계			2단계			합계
	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5	Y-6	
라이다 시스템	700	700	600				2,000
기존 장비 업그레이드				100	100		200
수치모델용 서버	200	100	100	100			500
위탁연구비	200	300	300	300	300	300	1,700
외부인건비	200	300	300	400	400	400	2,000
출장비	100	100	100	100	100	100	600
기타	300	400	400	400	300	300	2,100
합계	1,700	1,900	1,800	1,400	1,200	1,100	9,100

V. 기대효과 및 활용계획

- 연구사업 수행을 통해 남극 세종과학기지에 대기파동 연구를 위한 3-D 종합 관측망 구축
 - 관측 기반으로 대기 파동의 3차원 전파 및 2차 파동의 특성 규명
 - 현재 진행중인 대기 중력과 관련 국제 공동 연구에 주도적 참여 (AWE, GDC mission)

- 전층대기 수치모델 내 핵심요소의 영향력을 현실적으로 개선한 전층대기 화학결합 수치 모델 확보
 - 대기파동의 연직 전파만을 고려하는 현재의 단계에서 3차원으로 전파하는 대기 파동 적용
 - 극지방으로의 중·고에너지 입자 유입에 따른 중간권 및 성층권의 화학변화 및 대기 순환 변화 적용
 - 기존의 수치모델 결과와 비교·분석 연구를 통해 개선한 전층대기 수치모델의 신뢰도 검증

- 개선한 전층대기 수치모델을 활용한 응용 연구
 - 극제트의 변화가 중위도 기후 환경에 미치는 과정과 경도별 비대칭성 연구
 - 향후 태양활동성에 대한 다양한 예측을 고려하여 미래 극지 기후 변동성에 대한 수치 모델 연구
 - 현재보다 더 신뢰도 높은 개선 수치모델을 활용 하여 관측 자료가 없는 극지역의 기후 변화 및 예측에 대한 연구 수행

목 차

제 1 장 서론	11
제 1 절 연구 기획의 필요성 및 목적	13
제 2 절 연구의 필요성	13
1. 극지 중·고층대기 순환 및 대기 중력파의 연직 고해상도 관측 연구	15
2. 극지 고에너지 입자 유입에 의한 화학 과정과 기후 변동에의 영향	18
3. 태양 복사 변동이 지표 기후 변동성에 주는 영향과 파동 역학	22
제 2 장 국내외 연구 개발 현황	27
제 1 절 극지 중·고층대기 순환 및 대기 중력파의 연직 고해상도 관측 연구	27
1. 국내외 연구 동향	27
2. 현재 연구 개발의 문제	31
3. 대응 방안	32
제 2 절 극지 고에너지 입자유입에 의한 화학 과정과 기후 변동에의 영향	40
1. 국내외 연구 동향	40
2. 현재 연구 개발의 문제	42
3. 대응 방안	45
제 3 절 태양 복사 변화가 지표 기후 변동성에 미치는 영향과 대기 파동 역학	46
1. 국내외 연구 동향	46
2. 현재 연구 개발의 문제	59
3. 대응 방안	62

제 3 장 연구 개발 추진 방안	66
제 1 절 관측기반 극지 중·고층대기 순환 및 대기 파동 3차원 전파 연구	67
1. 연구 개발의 최종 목표	67
2. 단계별 목표	67
3. 연구 내용 및 범위	67
4. 연구 추진 전략 및 체계	68
제 2 절 극지 고에너지 입자 유입에 따른 화학 과정과 기후에 미치는 영향 연구	69
1. 연구 개발의 최종 목표	69
2. 단계별 목표	69
3. 연구 내용 및 범위	69
4. 연구 추진 전략 및 체계	70
제 3 절 태양 복사 변화가 지표 기후 변동성과 대기 파동에 미치는 영향 연구 ...	71
1. 연구 개발의 최종 목표	71
2. 단계별 목표	71
3. 연구 내용 및 범위	71
4. 연구 추진 전략 및 체계	72
제 4 절 통합 추진체계 및 로드맵	73
1. 추진체계	73
2. 로드맵	74
3. 연차별 세부 연구목표 및 연구내용	75
4. 예산계획 (안)	76
제 4 장 연구 개발의 활용방안	78
1. 핵심 요소를 개선한 전지구 전층대기 화학결합 수치모델	78
2. 고위도 중·고층대기 대기 중력과 종합 관측망 활용 연구 확대	79
제 5 장 참고문헌	80

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 기획의 필요성 및 목적

○ 산업화 이후 최근까지 지구의 기후는 인류 활동에 의한 온실기체의 증가로 인해 지속적인 온난화가 진행되어 온 것으로 알려져 있다. 대표적인 온실기체인 CO₂ 또는 CH₄ 등이 대기 중에 증가하게 되면, 대류권에서는 적외선의 형태로 우주공간으로 방출되어야 할 지열 및 지표 반사 에너지들이 온실기체에 의해 흡수되고, 흡수된 에너지들은 주변 기체들과의 충돌로 전달되며 대류권 내에 남아있게 된다. 이것은 대류권 기체들의 운동에너지 증가를 의미하고, 따라서 기온의 상승과 직결되어 온난화가 진행되는 것이다. 반면, 대기 밀도가 희박한 중간권 (고도 약 50km ~ 100km) 영역에서는 CO₂가 적외선 영역의 복사 방출을 통해 에너지를 우주로 방출하는 냉매 역할을 함으로서 대류권에 미치는 영향과는 정반대로 작용하기 때문에, 이 고도 영역에서의 지속적인 CO₂ 증가는 중간권 온도를 감소시키는데 중요한 역할을 하게 된다.

○ 한편, 최근들어 전세계 많은 지역에서 한파 또는 열파 등의 이상기후 발생 빈도가 과거에 비해 상당히 증가하는 추세인데, 많은 전문가들이 이러한 이상기후 빈도 증가의 원인이 온난화에 기인하는 것으로 보고 있으며, 앞으로도 이상기후가 계속 지속되거나 혹은 더 잦아질 수도 있다는 경고를 하고 있다. 이에 지구 온난화의 주범으로 지목되고 있는 온실기체의 농도를 줄이기 위한 노력도 물론 매우 중요하지만, 향후 기후가 어떻게 변해갈지에 대해 현재보다 좀 더 신뢰도 높은 중·장기 예측을 위해서는 최근 연구 결과로 보고된 과학적 결과들을 반영하는 수치모델을 확보하는 것이 중요하다고 볼 수 있다.

○ 또한, 태양 극소기 (solar minimum)의 기간이 전례 없이 길었던 지난 24 태양주기 (solar cycle 24)를 보내며 인간 활동에 의한 것이 아닌 자연적인 변동성이 지구 기후에 미치는 영향에 대한 관심도가 급증하고 있다. 지구상의 생물뿐만 아니라 대기에도 가장 중요하고 근본적인 에너지원은 태양 복사에너지인데, 비교적 최근까지도 이 태양 복사에너지 변화가 지구대기의 기후변화에 미치는 영향력이 매우 미미한 것으로 인식되어 왔다. 그러나 인공위성과 관측 기술의 발달로 가능해진 정밀한 태양복사량의 변화를 관측해 온 결과, 실제로는 태양복사의 변동성이 미미하지 않고 상당한 정도로 기후에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 태양복사의 변화는 지구대기의 거대 순환에 영향을 미칠 뿐만 아니라 극지방 대기의 구성 성분에도 영향을 미치고, 극지방에서의 대기 순환을 교란시키게 되는데, 이는 저층대기에서 발생하는 대기과동들의 상향 전파에도 중요한 변화를 야기하기 때문에 그 과정을 이해하는 것이 상당히 중요하다.

○ 그러나 현재 기후변화 연구에 사용되고 있는 전층대기 기후모델의 경우, 태양복사에 의한 영향을 매우 단순화해서 적용하고 있고, 저층대기로부터의 대기파동 전파 또한 현실과 달리 수직으로만 전파한다는 가정을 하며, 극지방으로의 중·고에너지 입자 유입에 의한 영향 또한 매우 단순화해서 적용하고 있다. 이는 실제와는 매우 차이가 있는 경계조건이기 때문에, 관측적으로 밝힌 연구 결과들을 바탕으로 현실적인 경계조건으로 업그레이드 하는 노력이 필요하다. 따라서, 향후 기후변화에 대한 중장기 예측의 정확도와 신뢰도를 한 단계 더 높이기 위해서는, 최근까지 보고된 관측 또는 수치 연구의 결과를 바탕으로 수치모델 내의 핵심요소들을 현실적으로 개선하는 연구가 필요하다.

○ 이를 위해 본 기획연구에서는, 기후변화 연구에 필수적으로 사용하는 전층대기 기후모델의 신뢰도를 높이고 정확도를 향상시키기 위해, 모델 내 핵심 요소로 볼 수 있는 (1) 중·고층대기 순환 및 대기 파동에 의한 영향, (2) 극지 고에너지 입자 유입에 의한 화학 과정 변화와 기후 변동으로의 영향, 그리고 (3) 태양 복사 변동이 지표 기후 변동성에 주는 영향 및 대기 파동에 미치는 영향 등의 세 가지 핵심 주제에 대해 현주소를 분석하고, 이를 바탕으로 향후 수행할 본 과제 세부적인 내용에 대해 계획을 수립하고자 한다.

○ 관련 정책근거

- ※ 제3차 남극연구활동진흥 기본계획 ('17~'21)
 - : '남극연구 지평 확대' 전략 중 '남극연구를 통한 글로벌 환경변화의 예측·대응'에 부합
- ※ 제4차 과학기술 기본계획 ('18~'22)
 - : 4대 전략 중 '미래도전을 위한 과학기술역량 확충' 전략의 중점 추진과제 '과학적 지식탐구 및 창의도전적인 연구 진흥'에 부합
- ※ 국정과제
 - : 100대 국정과제 중 3-61 '신기후체제에 대한 건실한 이행체계 구축'
- ※ 극지과학 미래발전전략
 - : 4대 추진전략 중 '극지과학연구 성과제고'의 추진과제 1-1 '국가·사회 현안 해결을 통한 국민체감형 연구 확대'에 부합
- ※ 극지연구소 R&R
 - : '극지역 온난화가 초래하는 국가 사회문제 해결'에 부합

제 2 절 연구의 필요성

- 많은 사람이 살아가고 있는 중위도 지역의 기후는 극지방의 기후와 밀접한 연관이 있다는 것이 잘 알려져 있다. 따라서 일차적으로는 극지방의 기후가 지구 내·외부의 요인으로 인해 어떻게 변화하는지를 이해하는 것이 매우 중요하다고 볼 수 있다. 특히 겨울철 극지방에서 형성되는 거대한 소용돌이인 극제트 (또는 극소용돌이, polar vortex)의 발달과 변화를 규명하는 것이 중요한데 이는 극제트의 변동성이 중위도 지역에서 발생하는 한파와 밀접한 관계에 있기 때문이다. 극제트의 변동이 전통적으로는 주로 대류권과 성층권 등의 저층대기에 의한 것으로 인식되고 연구되어 왔지만, 최근의 연구에서는 중간권 이상의 고층대기에 의한 영향도 상당한 비중으로 중요하다는 것이 보고되고 있다. 여기에는 저층대기에서 발생 후 고층대기로 전파하며 에너지와 모멘텀을 전달하다는 대기 파동의 역할이 매우 중요한데, 특히 대기 중력과 (gravity wave)와 행성과 (planetary wave)의 상향 전파와 두 파동의 상호작용 영향에 대해서는 아직까지 제대로 밝혀지지 않은 상태이다. 따라서, 극제트 변동성에 있어서 기존에는 고려하지 않던 고층대기에 의한 영향이 어느 정도 규모로 어떻게 진행되는지에 대한 규명이 필요하고, 이를 위해서는 대기 파동들이 중·고층대기에 미치는 영향과 기작에 대한 연구가 필요하다.
- 중·저위도와는 달리 고위도 지역에는 우주에서 유입되는 고에너지 입자에 의한 영향도 상당히 중요하다. 흔히 통칭해서 고에너지 입자라고 부르긴 하지만, 중·고층대기 영역의 화학 변화에 미치는 영향을 고려했을 때 중간에너지 입자 유입과 고에너지 입자 유입을 구분해서 연구를 해 오고 있다. 이는 유입되는 입자의 에너지 레벨이 높을수록 더 낮은 고도까지 진입하여 영향을 미치기 때문이다. 최근의 연구에서, 이러한 에너지 레벨 별 입자 유입에 의한 영향이 실제로는 상당히 큰 것으로 보고되고 있으나 전층대기 수치모델에는 이러한 영향이 제대로 반영되지 않고 있다. 극지방 중·고층대기로의 중간·고에너지 입자 유입은 해당 고도의 온도를 변화시킬 뿐만 아니라 다양한 화학반응 과정을 통해 대기 조성을 변화시키기 때문에 중성대기 순환계에도 영향을 미치게 된다. 따라서 우주로부터 유입되는 중간·고에너지 입자들이 극지 고층대기의 화학조성 및 순환에 미치는 기작을 규명하여 전층대기 수치모델에 해당 기작을 적용하는 연구도 수행되어야 한다.
- 태양은 안정적으로 에너지를 방출하는 별로 흔히 인식되나 실제로는 밝기가 시간적으로 변하는 변광성으로, 태양이 지구를 향해 방출하는 복사 에너지와 입자의 양도 태양 활동의 변동에 따라 변화한다. 지금까지의 기후 연구는 주로 인간 활동에 의한 기후 변화에 관심을 두었으나, 태양에서 방출되는 자외선 영역 복사 강도의 변동성이 기존에 생각했던 것보다 수배 이상 강하다는 것이 최근 관측되면서 태양 활동의 변동이 기후 변화에 주는 영향에 대한 연구가 보다 활발히 진행되고 있다. 또한, 인간 활동에 의한 기후 변동의 징후가 기후 시스템의 자연적 변동성과 서로 상호 작용하고 있음이 알려지면서, 기후 시스템의 자연 변동성에 영향을 주는 외부적 주요 요인인 태양 변동성의 기후 변화에의 영향이 더욱

주목받고 있는 상황이다. 최근 태양 활동은 점점 약해지는 추세에 있는데, 이와 관련하여 Zharkova et al. (2015)등은 향후 태양의 활동성이 매우 약해져 1600년경의 마운더 극소기 (Maunder minimum, 1645-1715) 때와 같이 완전히 약해진 태양의 시기가 도래하여, 작은 소 빙하기 (Little Ice Age, LIA)가 올 수 있음을 주장하였다. Zharkova가 사용한 회귀 분석 모델이 장기적인 태양 활동 변동을 정말로 예측할 수 있는가에 대한 회의가 있기도 하지만 (Usoskin, 2017), 태양 활동 변동의 기후적 영향이나 인간 활동에 의한 온난화와 어떻게 상호작용 할 것인가에 관심이 점점 높아지고 있음은 분명하다. 현재 사용되고 있는 기후모델에서는 자연변동성에 해당하는 태양 변동에 대해 영향이 매우 작은 것으로 반영하고 있는데, 수치모델 내에 적용되는 핵심 요소들의 기작을 현실적으로 개선하여 기존의 수치모델 결과와 비교분석을 통해 태양복사 변화 영향에 대한 이해를 높여야 한다.



1. 극지 중·고층대기 순환 및 대기 중력파의 연직 고해상도 관측 연구

가. 지구 대기에는 다양한 형태의 대기 파동들 (대기 중력파: Atmospheric gravity waves, 행성파: Planetary waves, 조석파: Tidal waves)이 존재하며, 이 파동들은 각기 다른 범위의 파장과 주기를 가지고 있다. 이러한 대기 파동들이 중요한 이유는 다양한 원인으로 발생한 대기 파동들이 상향 전파를 하다가 특정 조건이 되어 깨지게 될 경우 해당 고도의 대기에 파동들이 수송하는 에너지 (energy)와 운동량 (momentum)을 대기 순환에 전달하기 때문이다. 파동들에 의해 전달된 에너지와 운동량은 해당 고도에서의 온도 및 대기 순환에도 중요하게 영향을 미치기 때문에 이 과정을 정확하게 파악해야 중·고층대기에서 발생하는 동역학적 변화를 이해할 수 있다. 대기 파동은 상향 혹은 하향 전파되는 대기 파동의 경로 상에 있는 매질 또는 물리량의 변화를 관측하는 방식으로 관측을 수행해 오고 있다.

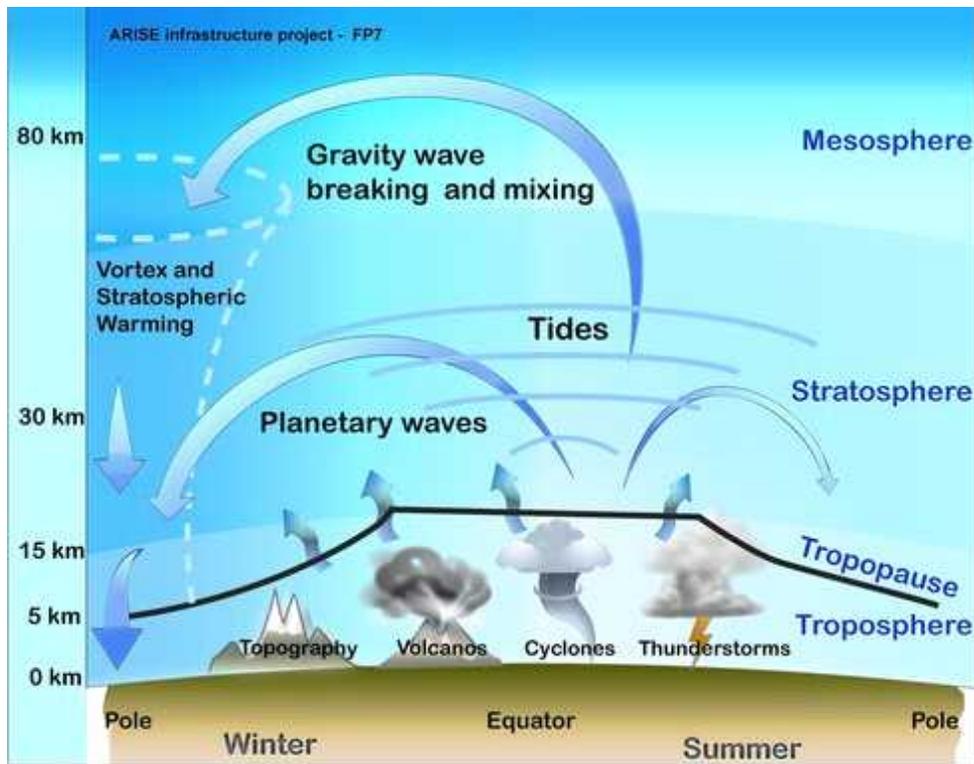


그림 1: 저층대기에서 다양한 원인으로 발생하는 대기 파동 (대기 중력파, 행성파, 조석파)을 보여주는 모식도 (출처: <http://arise-project.eu/atmospheric-dynamics.php>).

나. 대기 중력파가 에너지와 운동량을 중·고층대기에 전달하며 미치는 영향에 대해서 정확히 이해하기 위해 오랫동안 연구해 왔지만, 발생 원천이 매우 다양하고 직접 관측이 어렵다는 점, 그리고 배경 바람과의 상호작용 등과 같은 여러 복잡한 과정이 관여하기 때문에 여전히 중·고층대기에 미치는 영향을 규명하지 못하고 있다. 더구나, 현재 수행되는 관측의 방법으로 대기 중력파의 전파, 배경 바람과의 상호작용, 발생 원천 등을 연구하기 위해서는 파동이 지나가는 중·고층대기의 바람과 온도에 대한 수직 분포

자료가 필수적이다. 남극 세종과학기지는 지리적 특징으로 인해 전세계에서 대기 중력과 활동이 가장 강한 곳으로 알려져 있기 때문에, 세종과학기지에 중·고층대기 바람과 온도를 고해상도 (고도 단위 약 500m)로 관측하는 라이다 (LIDAR; Light Detection And Ranging) 시스템을 구축할 경우 남극에서의 대기 중력과 국제 공동연구를 주도할 발판이 마련되고 대기 중력과의 전파 및 영향에 관한 특성을 규명하는데도 획기적인 기여를 할 것으로 예상된다.

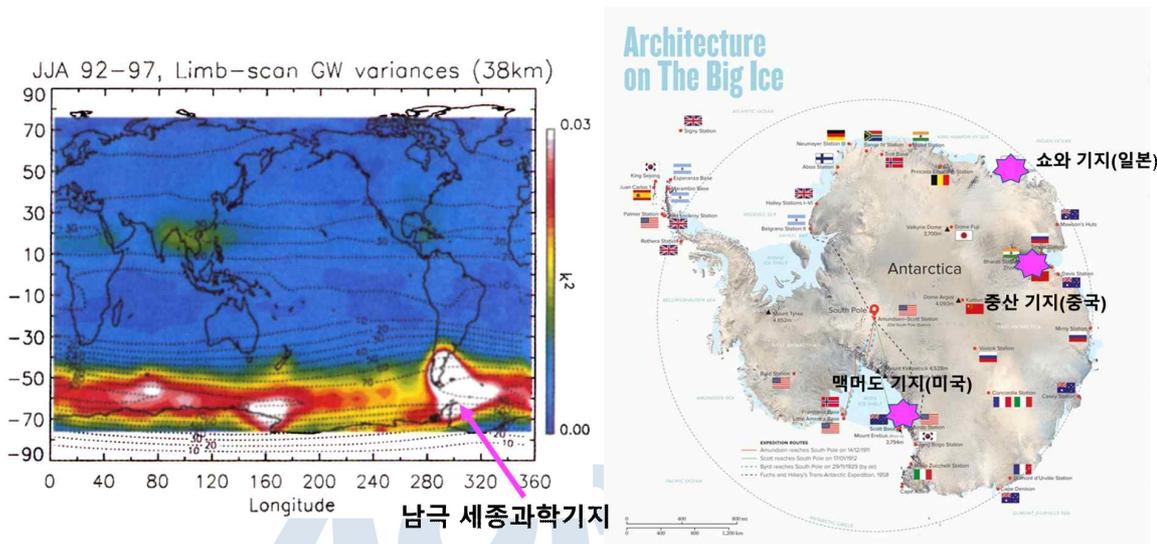


그림 2: (좌) UARS (Upper Atmosphere Research Satellite) 위성의 MLS (Microwave Limb Sounder) 장비로 관측한 성층권 고도 약 38 km에서의 대기 중력과 세기. (우) 남극에서 운영되고 있는 타 기지의 라이다 시스템 현황.

다. 수치 모델 내 대기 중력과 과정의 개선이 물리적으로 의미 있는 방식이기 위해서는 관측에서 나타나는 다양한 현상을 반영해야 하며, 이를 위해서는 중·고층대기 연직 고해상도 온도 및 바람 프로파일 관측이 필요하다. 대기 중력과의 공간적인 규모, 발생원의 다양성으로 인해 현재 남극의 제한적인 관측 자료만으로는 수치 모델 개선에 필요한 중고층대기 고해상도 물리 자료 확보가 불가능하다. 이러한 남극에서의 대기 중력과 관측 확대를 위해 ANGWIN 과 같은 국제 공동관측 연구 그룹이 결성되어 운영 중이기도 하다. 극지연구소에서 운영하는 남극 세종과학기지는 대기 중력과의 핫스팟이라고 불리는 지구물리학적으로 매우 중요한 곳에 위치하고 있어, 관측 시스템을 세종기지에 세울 수 있다면, 모델 개선뿐만 아니라 중·고층대기 연구에 있어 세계적인 수준과 겨룰 수 있게 된다.

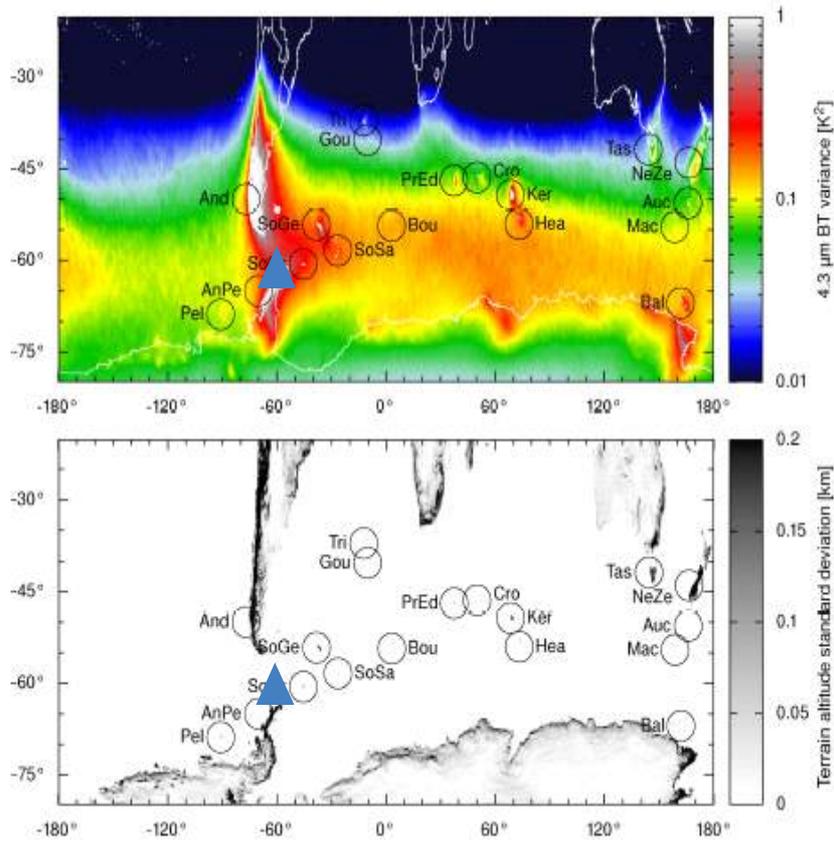


그림 3: 남극 반도와 그 주변 남대양에서 관측되는 강한 대기 중력파 핫스팟 지역 (Hoffman et al., 2016). 남극 세종기지 (파란 삼각형으로 표시)는 남극 반도 끝 쪽에 자리 잡고 있다.

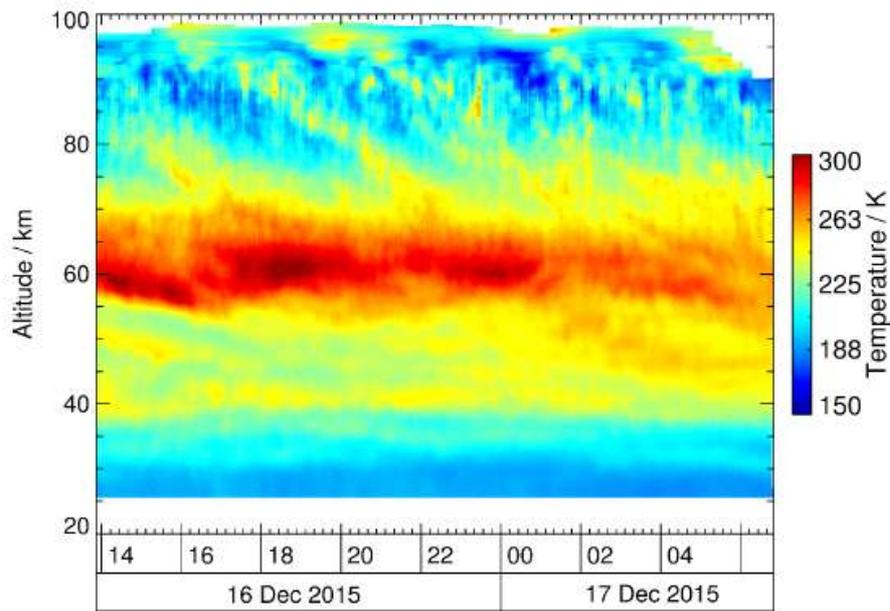


그림 4: 2015년 12월 16-17일 핀란드 소단켈라에 설치된 라일라이 라이다를 통해서 관측된 연직 고해상도 온도 프로파일의 시간 분포 (Reichert et al., 2019). 고도 92 km 위에서는 시간 분해능이 10 분에서 2 시간으로 변화한다.

2. 극지 고에너지 입자 유입에 의한 화학 과정과 기후 변동에의 영향

가. 태양 및 은하에서 생성되어 지구에 도달하는 우주선(Cosmic ray)은 대기 중 이온화 과정을 통해 구름 응결핵을 생성시키는 역할을 한다고 알려져 있다. 구름량의 변화는 기후변화와 밀접하게 관련되어 있기 때문에 우주선과 기후변화는 일정 정도의 관련성을 갖게 된다 (Carslaw et al., 2002; Pierce, 2017). 또한 은하 우주선이 지구에 도달하는 양의 변화는 태양활동과 밀접한 관련을 갖고 있는 것으로 알려져 있다. 즉 태양활동이 약할 때 지구에 도달하는 우주선의 양은 최대가 되고, 태양활동이 강할 때 우주선의 양은 감소한다.

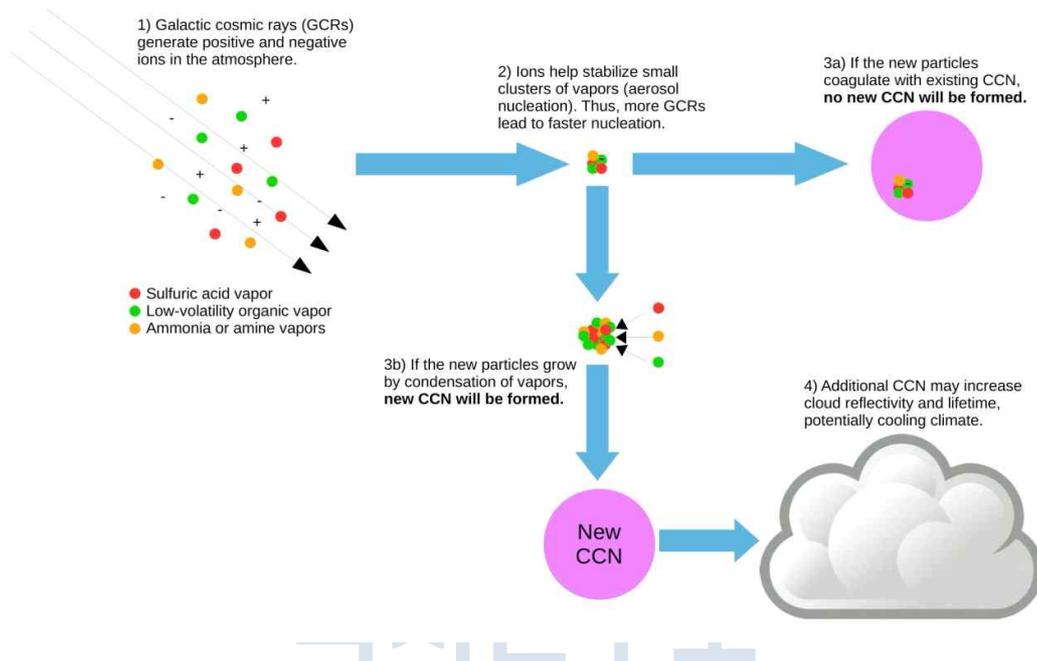


그림 5. 우주선에 의한 구름 응결핵 생성과 구름 형성에 관한 모식도 (Pierce, 2017).

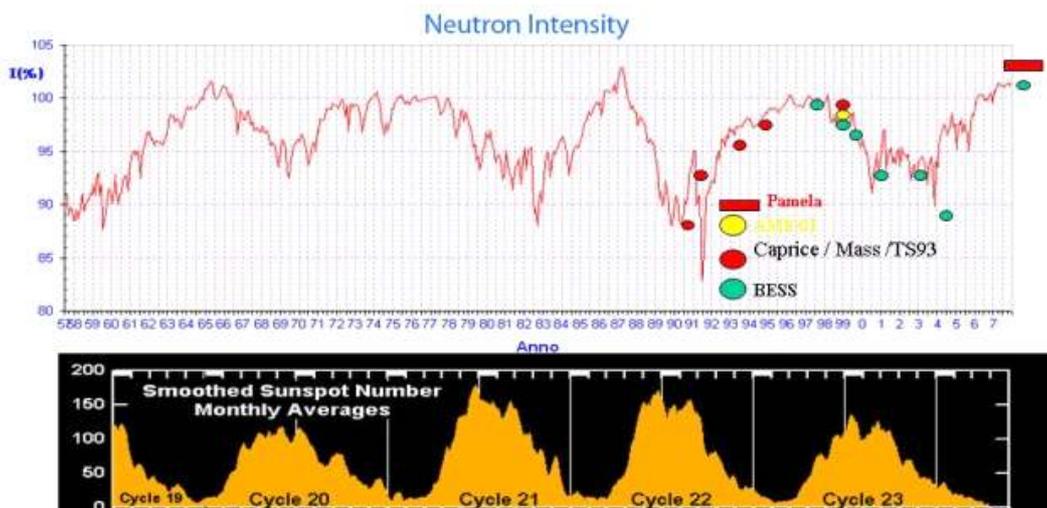


그림 6: 우주선(위)과 태양활동(아래)의 상관관계. 거의 반비례의 관계를 보여준다. (<http://ceses.roma2.infn.it/node/47>)

나. 태양에서는 빛 에너지 이외에도 다양한 형태의 에너지가 태양계로 방출되고 있는데, 그 중에서는 태양풍을 구성하고 있는 플라즈마 입자(주로 전자와 양성자)가 있다. 태양 표면에서 어떤 폭발적인 자기장 이벤트가 발생하면 평소보다 에너지가 대단히 큰 양성자나 전자들이 태양풍과 함께 방출된다. 이때 태양 활동의 변동에 따라 SPE (Solar proton event)가 간헐적으로 일어나는데, 극지 대기로 질량이 큰, 즉 고에너지의 양성자가 유입되면서 성층권까지 투과하여 대기 구성 물질을 이온화시켜 질소 산화물을 만들어내고, 이를 통해 오존 양과 분포의 변화를 일으킬 수 있다. 이러한 고에너지 입자의 유입은 대기 화학 물질의 변화를 일으킬 뿐만 아니라, 복사 과정을 통해서 온도 변화를 일으켜 대기 순환까지 영향을 줄 수 있다.

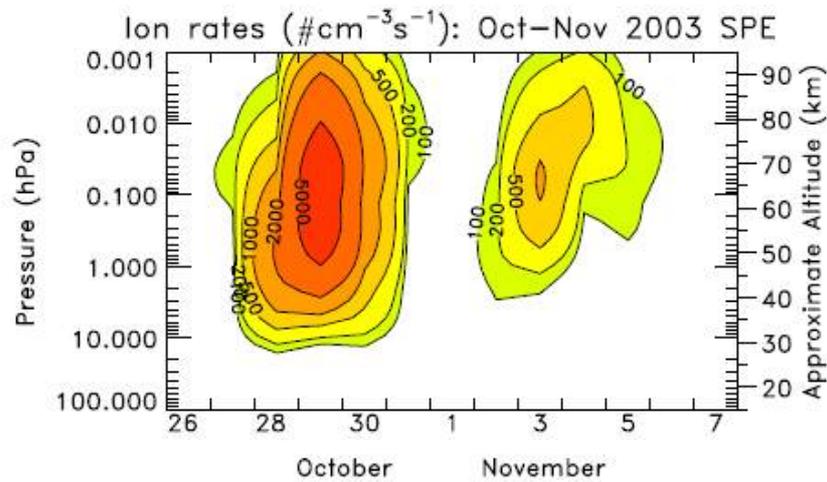


그림 7. GOES11 위성에서 계산된 태양 양성자 이벤트가 야기하는 일평균 이온화율의 시간 고도 분포 (Jackman et al., 2009).

다. 간헐적으로 일어나는 SPE 외에도 저에너지 및 중-고에너지 전자 (중에너지: 30-300 keV, 고에너지: 1 MeV 이상)에 의해서도 오존 파괴 과정에 관여하는 질소 및 수소 산화물을 생성된다. 이 전자들은 태양에서 직접 유입되는 것이 아니라 태양풍과 자기권의 상호작용에서 에너지를 얻은 전자들이 극지 자기력선을 따라 극지 대기로 유입되는 것이다. 이 전자들에 의한 직접적인 영향은 에너지가 훨씬 큰 양성자에 비해서 상대적으로 높은 고도에서 일어나지만, 고에너지 전자에 의해 생성된 질소 화합물은 대기 중력파가 야기하는 상부 중간권의 자오면 순환에 의해서 극지 제트 내부로 유입되어 하강하면서, 극지 제트 내부의 화학 조성 변화 및 온도 변화를 일으킬 수 있다. 또한, 낮 시간에 아주 제한적인 영역에서 수소 발생하는 양성자 유입에 비해 극지에서 전자 유입은 오로라대 주변의 광범위한 영역에서 지속적으로 일어나는 특성이 있으며, 특히 밤 시간대에 광범위하게 발생한다. 따라서 전자는 양성자에 비해 더욱 중요한 대기 변화를 일으킬 수 있다.

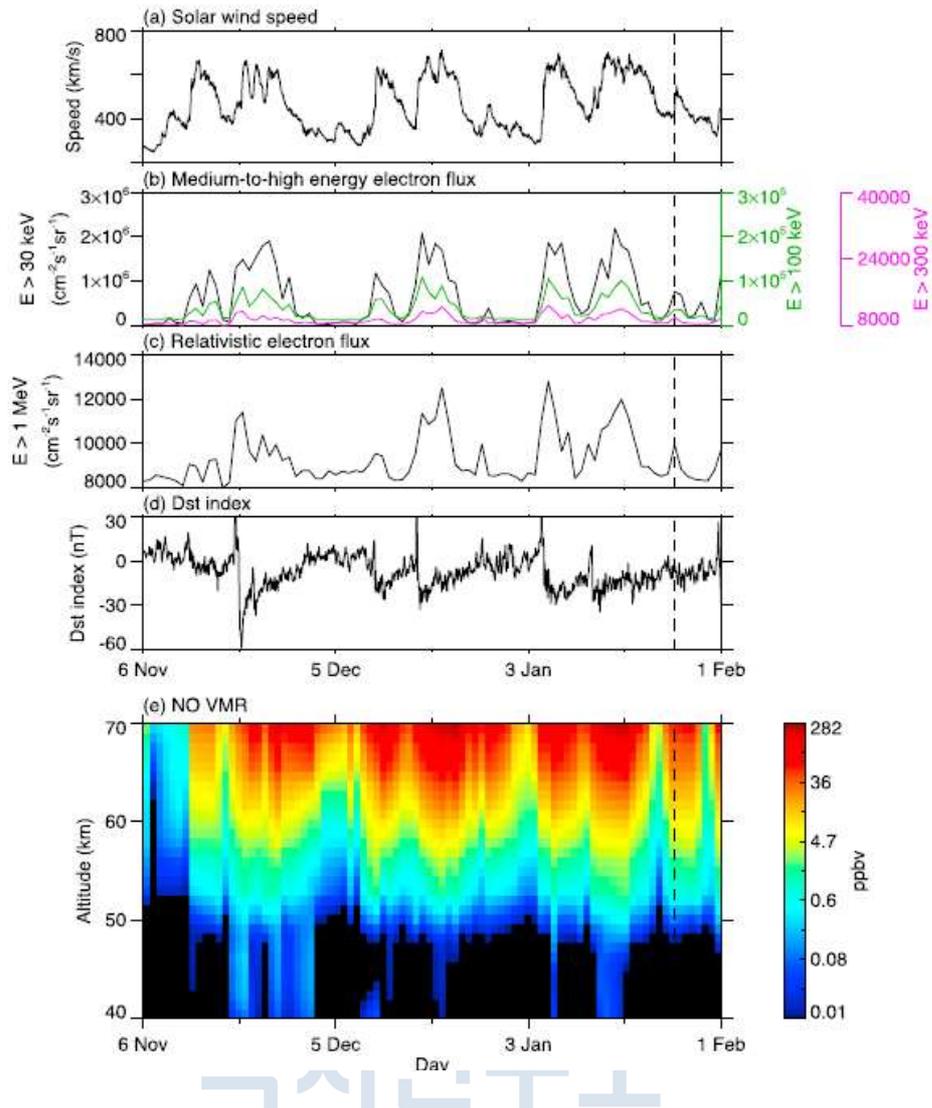


그림 8: 중-고에너지 전자와 연관된 고속태양풍에 의해서 야기되는 중성대기의 이온화와 이에 따른 질소 화합물의 시간-고도 분포 (Lee et al., 2018).

라. 다양한 태양 기원 고에너지 입자에 대한 이온화 과정 등의 화학적 기작에 대해서 대부분의 기후모델에는 아직 정확한 과정이 포함되어 있지 않으며, 고에너지 입자와 연관된 중간권 상부나 열권 하부에서의 화학 과정도 최근에서야 반영되기 시작한 것으로 보인다. 또한 이온화를 통해 만들어진 질소 및 수소 산화물의 자오면 수송에 기여하는 중력과 과정이 여전히 상당한 오차를 포함하고 있어, 이 부분에 대한 개선이 필요한 실정이다. 관측 자료나 재분석 자료 분석을 통해서 태양 기원 고에너지 입자들이 극지 제트의 변화나 지면 부근 제트의 변화를 일으킬 수 있음을 잘 알려져 있으나, 제대로 된 정량화는 아직 부족한 상황이다.

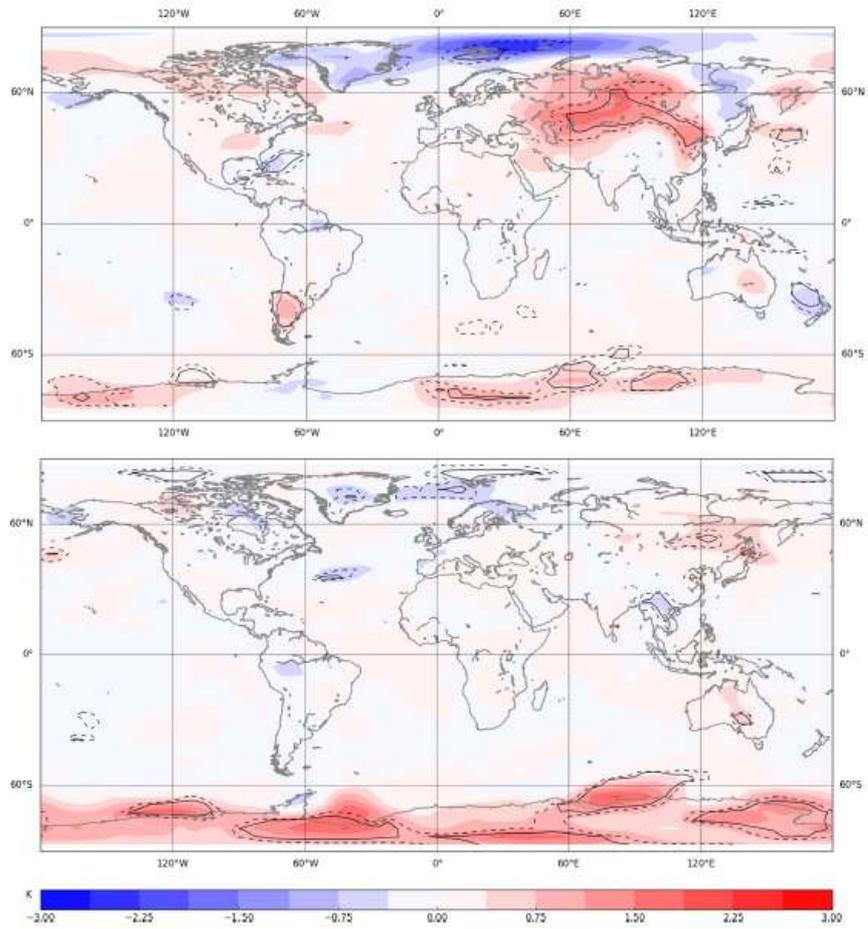


그림 9: MEE의 효과가 포함된 전지구 기후 모델에서 나타난 DJF (12월-2월) (위)와 JJA (6월-8월) (아래)에서 지면 2m 위에서의 온도 분포의 차이 (Arsenovic et al., 2016).

3. 태양 복사 변동이 지표 기후 변동성에 주는 영향과 파동 역학

가. 태양 활동에 따라 지구 대기 상단에 도달하는 태양 복사 총량과 스펙트럼도 변화한다. 2003년 NASA가 발사한 SORCE 위성에서 탑재된 TIM (Total Irradiance Monitor), SIM

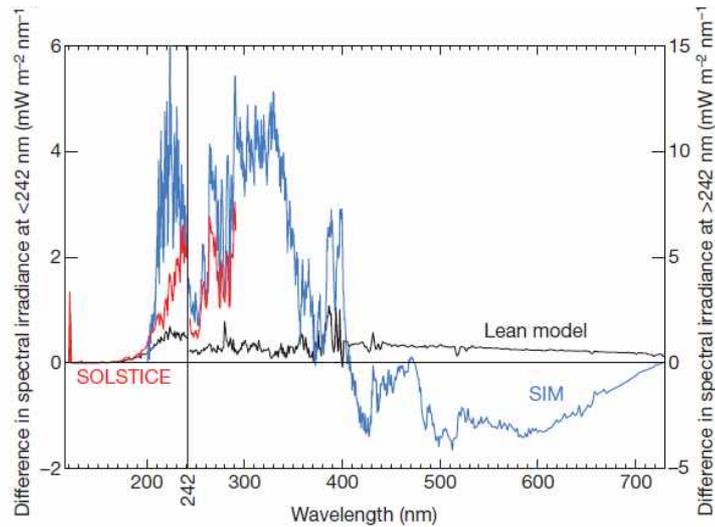


그림 10: SORCE 위성에서 관측된 자외선 영역의 태양 복사 스펙트럼 (Haigh, 2010). 기존의 경험 모델 (Lean model) 등과 비교하여 강한 자외선 영역의 태양 복사 변동이 4-6배까지도 차이가 난다.

(Spectral Irradiance Monitor), 및 SOLSTICE (The Solar Stellar Irradiance Comparison Experiment) 장비를 통한 태양 복사 스펙트럼 관측 이후, 태양 복사 총량은 줄어들고 자외선 영역 복사량은 이전 관측보다 수배 이상 변동성이 강함이 밝혀지고 있다.

나. 관측을 기반으로 태양 복사 총량 (Total Solar Irradiance, TSI) 및 스펙트럼 (Spectral Solar Irradiance, SSI)에 대한 경험적 모델에 대한 연구가 진행되고 있으나, 관측 자료의 오차에 대한 정확한 정보의 부족, 관측 자료의 불연속성, 자료를 처리하는 방법이나 서로 다른 자료들을 결합하는 방식 등의 차이로 연구 결과간의 차이점 및 불확실성이 여전히 존재하는 상황이다. 특히, 과거 태양 활동을 반영할 수 있는 태양 복사 경험 모델은 아직 훨씬 많은 불확실성을 갖고 있다.

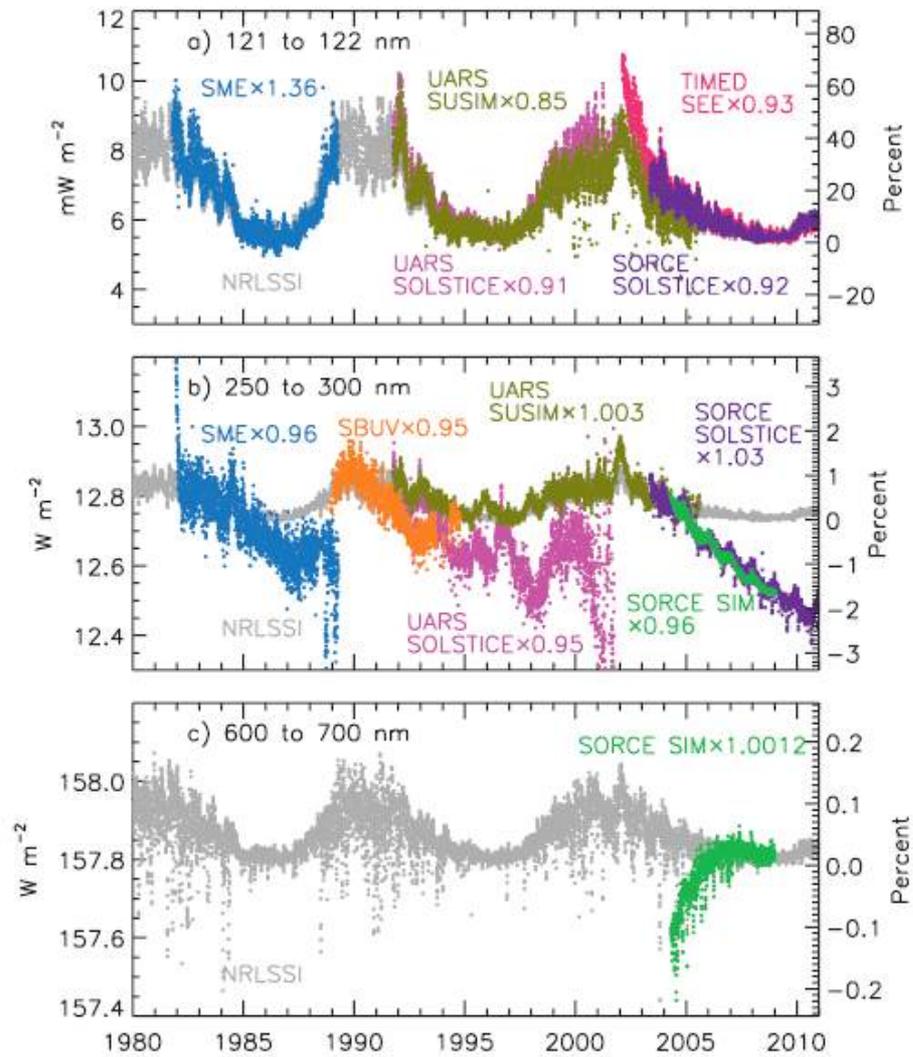


그림 11: 우주에서 관측된 다양한 태양 복사 스펙트럼의 파장 대 별 (121-122 nm, 250-300 nm, 600-700 nm) 비교. 회색은 NRLSSI 경험 모델의 결과를 나타냄 (Lean & DeLand, 2012).

다. 장기간 다양한 위성 및 우주 정거장에서의 TSIS (Total and Spectral solar Irradiance Sensor) 관측 자료 수집과 분석을 통해 태양 변동성의 장기 변동 추세에 대한 이해를 높일 수 있을 것으로 보이며, 이를 통해 최종적으로 기후 모델링에서 사용될 복사 모델의 개선에도 기여할 수 있을 것으로 보인다. 현재는 Matthes et al. (2017)이 제안한 NRLSSI2 모델과 SATIRE 모델의 평균값으로 많이 사용하고 있으나, 경험 모델이 함수에 자료를 fitting하여 만들어진 것이라는 점을 감안할 때, 관측 자료의 양이 많아짐에 따라 여전히 개선의 여지가 있을 것으로 판단된다.

가. 태양 변동성에 따른 자외선 영역의 태양 복사의 변화 (242 nm보다 작은 파장에서 강한 변화가 발생) 중상부 성층권에서 광해리 과정을 통해 더 많은 혹은 더 적은 오존을 생성하며, 오존의 자외선 (200-300 nm) 흡수량의 변화에 따라 열대 지역 성층권계면

부근 온도의 변동을 야기한다 (태양 극대-극소에 대해서 약 1.5 K 정도). 이로 인해 중·고층대기 아열대부터 고위도에 걸쳐 존재하는 제트의 강도나 구조가 변화하고, 이에 따라 행성파의 전파 특성이 변화하며, 그 결과 동서방향 극 제트를 가로지르는 자오면 순환이 변화되어 극지 지면 기압의 변화가 동반된다.

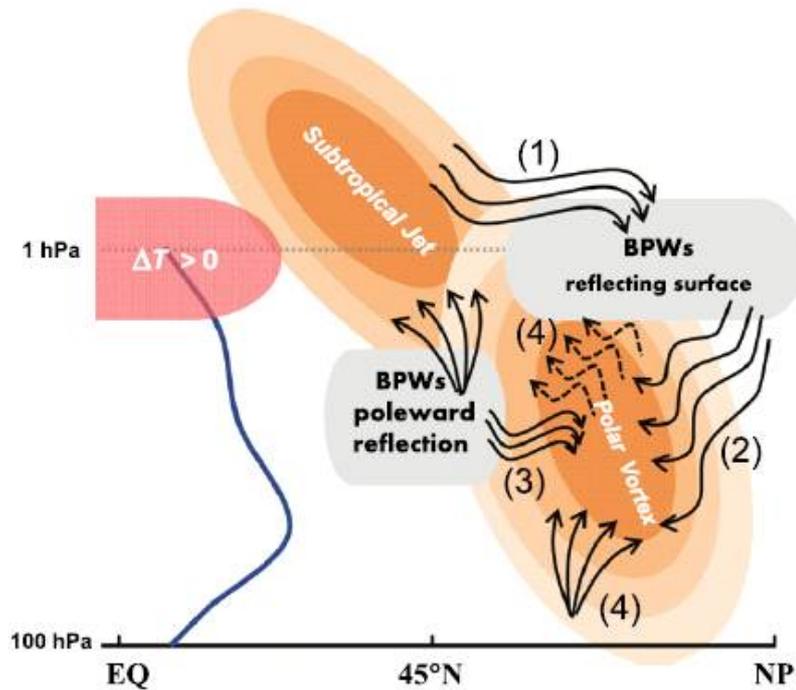


그림 12: 태양 변동성이 강할 때, 열대지역 성층권계면의 승온이 행성파 전파의 변화를 일으키는 메커니즘에 대한 모식도 (Lu et al., 2017a). 열대 지역 온도의 변화는 중간권 아열대 제트의 세기 및 강도 변화를 일으킬 수 있고, 이는 행성파의 깨짐, 굴절, 및 하향 전파를 일으킬 수 있다.

나. 이와 같은 하향식 메커니즘은 현재 대체적으로 받아들여지고 있기는 하지만, 상부 성층권 및 하부 중간권에서 행성파 전파 특성에 영향을 주는 대기 중력과 효과가 대부분의 모델에서 부정확하다는 점에서 메커니즘에 대한 개선의 여지가 여전히 남아 있다. 현재 대부분의 수치 모델에 장착된 대기 중력과 과정은 대체로 겨울철 중간권계면을 너무 낮게 만들거나 중부 중간권의 온도를 과도하게 높게 만드는 문제를 갖고 있다. 이러한 문제는 대류권에서 발생하는 것으로 시작하는 중력과 항력이 충분히 강해야 성층권 상부부터 극 제트에 영향을 주어, 관측과 유사한 크기의 서풍 극 제트 서풍 크기를 모의해낼 수 있기 때문이다. 그러나 이렇게 강하게 처방된 중력과 운동량 속은 중간권 중부에서는 오히려 오차를 만들어낼 여지를 상당히 갖고 있다. 경험적으로 이러한 문제는 튜닝으로 쉽게 되지 않는다. 성층권 제트의 강도를 현실화시키면 중간권의 오차가 커지고, 중간권의 오차를 줄이면 성층권 제트 세기의 오차가 커지는 딜레마에 빠지는 경우가 많다.

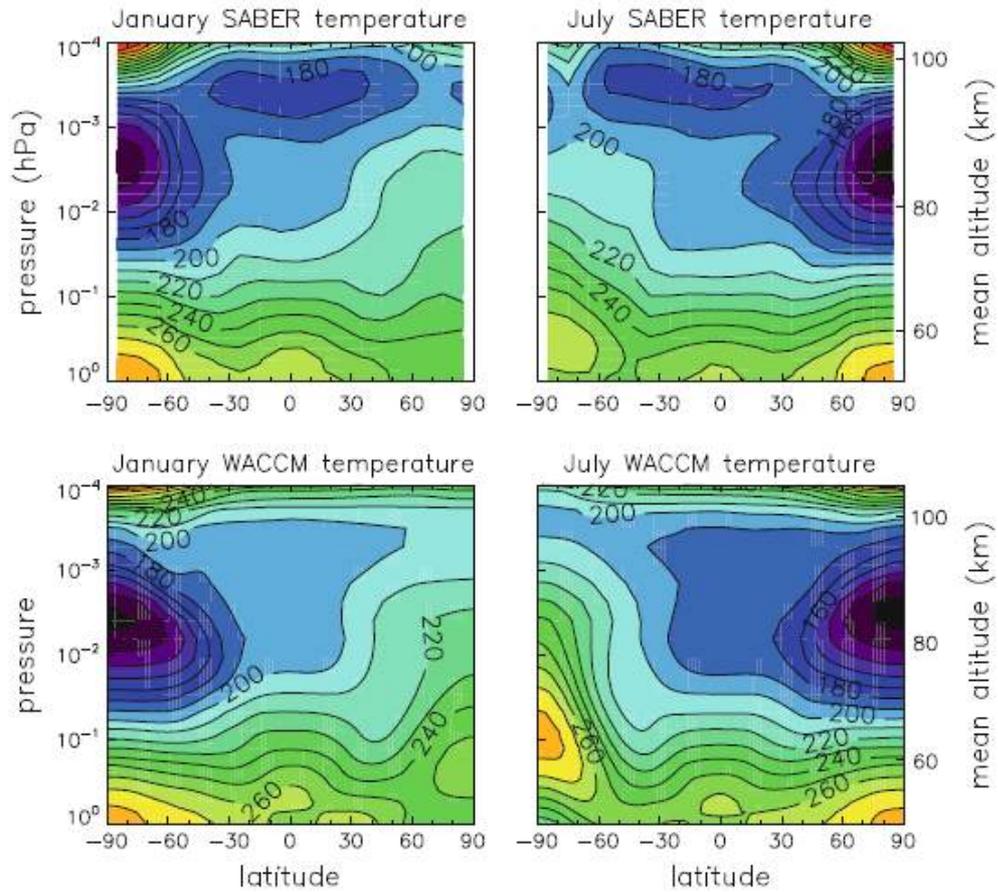


그림 13: 관측 (SABER, 위)와 모델 (WACCM, 아래)의 1월과 7월에 대한 동서평균 온도. 관측과 모델을 비교할 때, 1월에는 모델의 북반구 하부 중간권 온도가 높고, 7월에는 남반구 중부 중간권의 온도가 높다 (Smith, 2012).

다. 자외선에 의한 오존의 증감 및 오존에 의한 자외선 흡수의 증감이 야기하는 열대 지역 성층권계면 부근의 온도 변화는 앞서 설명한대로 겨울 반구 극 제트, 행성파 및 대기 중력파와의 상호작용을 통해 그 영향이 지면 근처에 까지 미칠 수 있다. 태양 활동이 강할 경우에는 중간권 및 성층권에서 극 제트의 세기가 커지면서 행성파의 소산이 약해지고, 그에 따라 성층권에서 열대지역에서 극으로 향하는 질량 수송이 약해진다. 그 결과 극지역의 해수면 기압이 낮아지고, 상대적으로 중위도 해수면 기압이 올라가면서, 대류권 제트가 극 방향으로 이동하는 모습을 보일 수 있다. 이러한 기압 패턴이나 제트 위치의 변화는 양의 북극 진동 인덱스에서 발견되는 것과 유사하다.

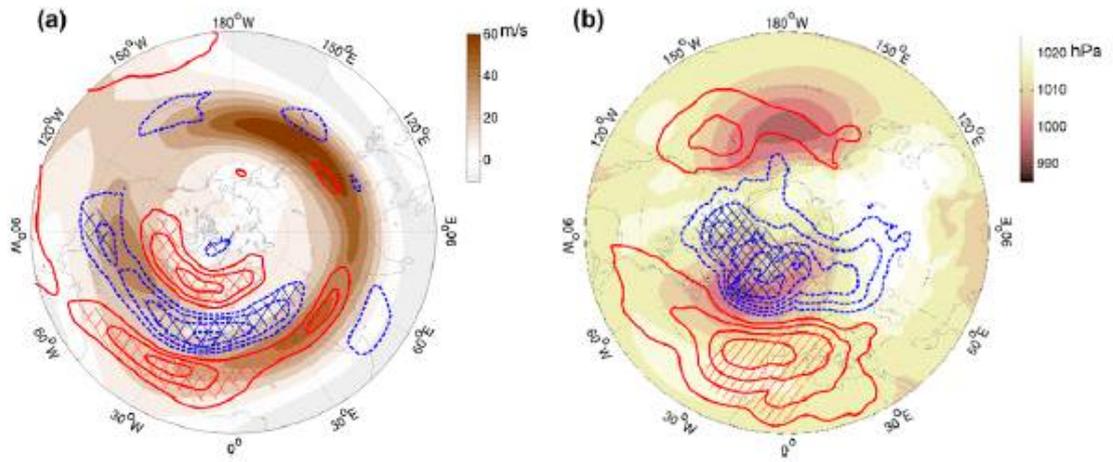


그림 14: (a) 대류권 상부 제트와 (b) 해수면 기압의 태양 활동이 강한 경우 (High Solar, HS)에서 태양 활동이 약한 (Low Solar, LS) 경우 간의 차이 (Lu et al., 2017b). HS에서 극 지역 해수면 기압이 LS때 보다 낮다.

반대로 태양 활동이 약할 경우에는 중간권 및 성층권에서 극 제트의 세기가 약해지면서 행성과 소산이 강해지고, 그에 따라 열대지역에서 극으로 향하는 질량 수송이 강해진다. 그 결과, 극지역 해수면 기압이 높아지고, 상대적으로 중위도 해수면 기압이 낮아져, 대류권 제트가 저위도로 이동하는 모습을 보일 수 있다. 이러한 모습은 음의 북극 진동 (혹은 북대서양) 인덱스에서 나타나는 모습이다. 이렇듯 태양 변동성의 효과는 지역적 혹은 대륙적인 규모로 강하게 나타날 수 있다.

극지연구소

제 2 장 국내외 연구 개발 현황

제 1 절 극지 중·고층대기 순환 및 대기 중력파의 연직 고해상도 관측 연구

1. 국내외 연구 동향

국내에서의 라이다를 활용한 대기 관측 연구는 레이더와 함께 대류권에서의 수증기, 온도, 그리고 바람 측정을 통한 기상 관측 및 예보를 주요 목적으로 수행되어왔으며 라이다를 이용한 에어로졸 관측은 대류권에서의 미세먼지, 황사 등과 같은 오염물질 확산예측 정확도 향상에 기여를 해오고 있다. 성층권 에어로졸 관측은 화산활동으로 발생한 화산재 유입 등에 의한 지구 대기 온도, 성분 변화 등을 추적, 관찰에 활용되고 있기도 하다. 라이다의 고도-시간에 대한 고해상도 관측 성능은 매우 넓은 연구 활용 분야를 가지나 대부분 대류권 기상 관측에 집중되어 있으며 중간권 이상 높은 고도의 대기 물리량 관측에서 라이다의 국내 활용 사례가 거의 전무한 상황이며, 현재까지 라이다 활용 고층 대기 관측 연구는 국내 단 1건만 보고되었다.

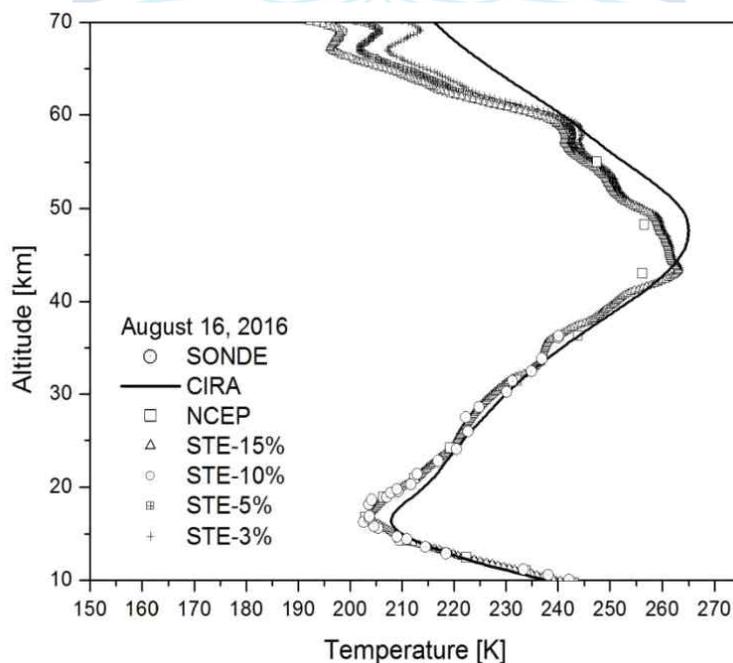


그림 15: 라이다로 관측한 대전 상공 10-70 km 고도 구간에서의 대기 온도 (Park, 2017)

극지 중·고층대기 순환과 대기 중력파 연구는 국내에서 유일하게 극지연구소에서 수행하고 있다. 1988년 남극세종기지에서의 지상 관측을 시작으로 현재까지 약 30년 넘는 기

간 동안 성층권 오존, 저층대기 에어로졸 관측 등을 수행해오고 있으며 중·고층대기 동역학적 특성 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 극지 중·고층대기 바람과 온도는 주로 유성 레이더와 페브리-페로 간섭계를 이용하여 80-100 km 고도 영역을 집중적으로 관측하며 대기 중력파는 전천 카메라 (All-sky Camera)를 활용하여 2차원 이미지 분석을 통해 파동의 수평 전파 특성인 파장, 위상 속도 등을 추출하여 연구에 활용하고 있다. 또한 대기 중력파의 고층대기 온도에 미치는 영향을 보다 정확하게 분석하기 위하여 전 세계적으로 가장 앞선 기술을 활용한 2차원 중간권 온도 맵퍼를 오는 2020-2021년 남반구 하계 기간에 세종기지에 설치하여 운영할 계획이다. 이는 기존 특정 고도에서의 온도를 낮은 시간 해상도로 관측을 해왔던 방식에서 2차원 온도 정보를 매우 높은 해상도로 관측함으로써 공간-시간에 대한 중간권 상부 온도의 변화로부터 대기 중력파 정보를 얻을 수 있으며 기존 전천 카메라와의 비교 연구에도 활용 가능하다.

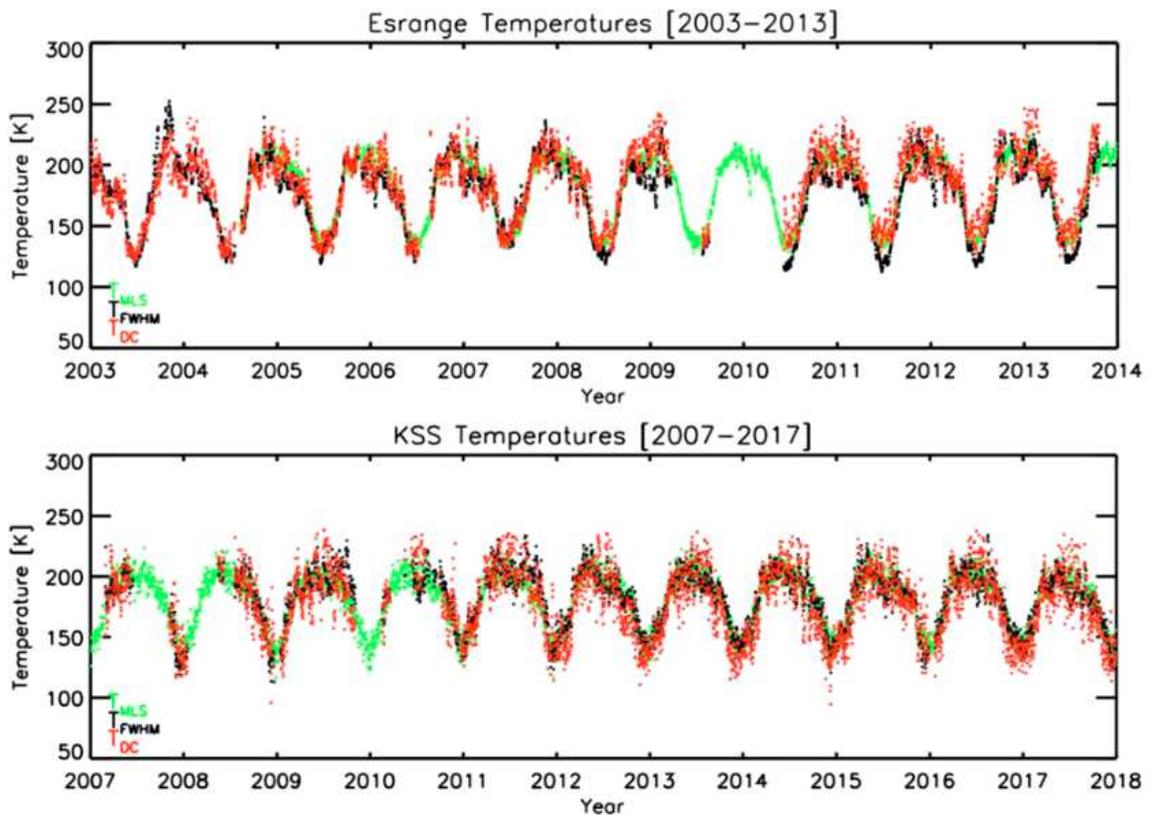


그림 16 북반구 고위도 스웨덴 에스레인지와 남반구 고위도 세종기지에서 유성 레이더로 관측한 중간권 상부 11년 장기 관측 온도를 Aura 위성 MLS 온도 관측과 비교한 결과 (Kam et al., 2019)

국외에서는 1930년대 대기 밀도 분석, 기상 관측을 위한 라이다 개발을 시작으로 지상뿐만 아니라 위성, 항공기 등에 적용되면서 현재 다양한 연구 분야에서 활용되고 있다. 중·고층대기 물리 연구를 위한 라이다 기술 또한 빠르게 발전하면서 기존의 제한된 고도 범위와 저해상도 관측 장비를 대체하거나 위성 관측 자료 검증에 사용되고 있다.

현재 유럽과 미국, 일본 등에서 중·고층대기 연구에 있어 라이다를 가장 활발하게 개발, 운용하고 있다.

(1) 유럽

유럽의 독일과 프랑스 등의 국가들은 1990년대 초부터 기후 변화 지표로서 오존 등 대기 성분 추적 관찰하기 위한 범국가적인 라이다 지상 관측 네트워크인 NDACC를 구축해서 운용해오고 있으며, 기후변화가 매우 빠르게 일어나는 북극, 남극 지역에도 라이다를 설치하여 지속적인 중·고층대기 온도와 바람 관측을 수행해오고 있다. 독일 라이프니츠 대기물리 연구소는 다른 세 종류의 라이다를 결합하여 지표에서 105 km 고도까지 온도 관측이 가능한 라이다를 개발하여 운영하였고 (Alpers et al., 2004), 북극 지역 라이다 관측 자료를 활용하여 중·고층대기의 중장기적인 특성 규명과 기후 변화 감시 관련 연구를 수행하고 있다 (Schöch et al., 2008; Hildebrand et al., 2017). 독일 항공우주센터에서는 지상 관측 라이다뿐만 아니라 대형 풍선이나 비행기에 탑재하여 대류권에서의 태양광 산란 영향이 없는 라이다 운용을 통해 낮시간 동안 중·고층대기 온도와 바람 관측을 수행한 바 있다. 남극에서의 라이다 관측은 영국 Rothera 기지, 독일 Neumayer 기지, 그리고 프랑스 Dumont d' Uville 기지에서 이루어졌으나 현재는 이 중 일부에서만 라이다 관측이 수행 중에 있는 것으로 파악된다.

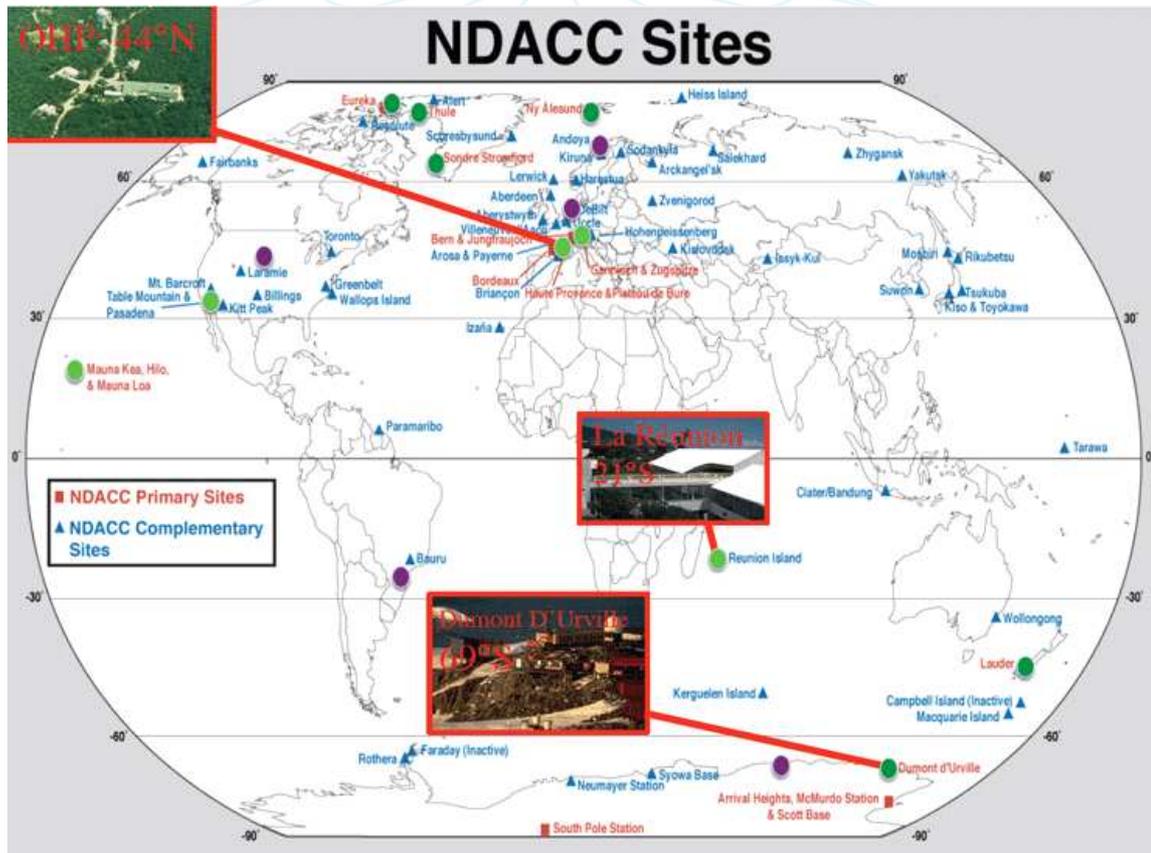


그림 17: 오존 검출 등 대기 성분 변화 감시를 위한 다국적 지상관측 네트워크 (NDACC, Network for the Detection of Atmospheric Composition Changes)

(2) 미국, 일본

미국과 일본은 자국 내 여러 지역에 라이다를 설치하여 중-저위도 지역 기상 요소 관측 뿐만 아니라 중·고층대기 온도와 바람 관측을 통해 대기 파동에 의한 서로 다른 고도의 대기 상호작용 연구를 진행해오고 있다. 미국은 남극에 두 개의 주요 연구기지에서 라이다를 이용하여 중간권 구름과 중간권-열권에서의 대기 중력과 현상에 대한 연구를 수행하였다. 남극에서 가장 큰 중·고층대기 관측 역량을 보유한 미국 맥머도 기지에서 레이더, 대기광 관측 장비와 함께 라이다 관측을 활용한 중간권 상부 유성 유입으로 형성된 금속층(철, 나트륨 등) 밀도 구조에 대한 연구와 남극 상공에서의 대기 중력과 직접 관측하여 저층대기에서 발생한 대기 중력파의 전파와 기존 대기 모델에서 예측되었던 2차, 3차 중력과 생성과 전파에 대한 관측적 증거를 제시하였다.

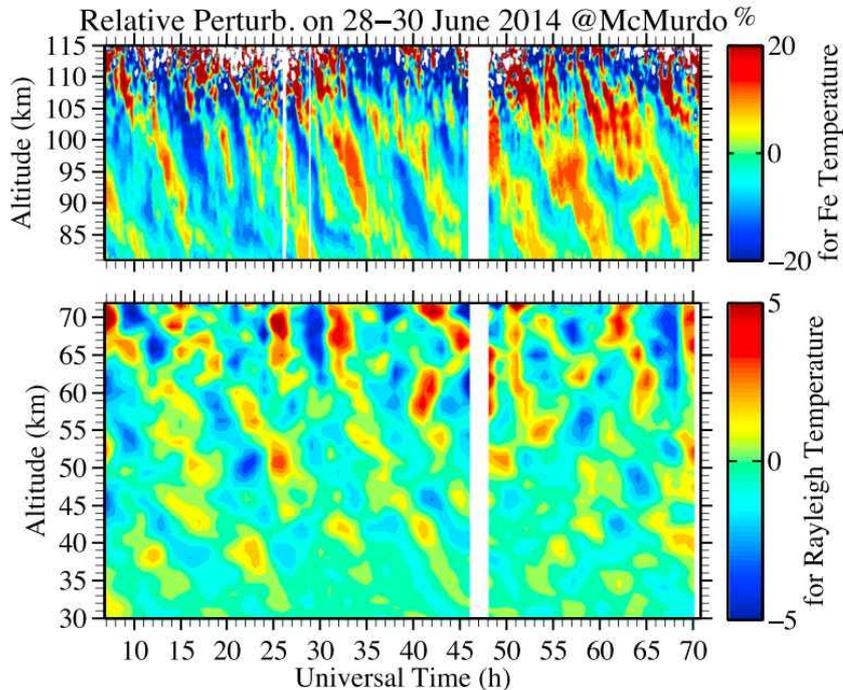


그림 18 미국 맥머도 기지 라이다 (위: Fe 볼츠만 라이다, 아래: 라이레이 라이다)로 관측한 대기 온도 변화. 대기 중력파의 의한 온도의 주기적인 변화가 선명하게 관측 (Chen et al., 2016)

일본은 남극 내륙에 위치한 쇼와기지에서 라이다를 설치, 운용하여 15-80 km의 넓은 고도 범위에서의 대기 온도와 밀도 정보를 수집하고 지상에서 성층권 중간까지의 에어로졸 관측을 수행해오고 있다. 뿐만 아니라 극지역 대기에서만 발생하는 극성층권 구름,

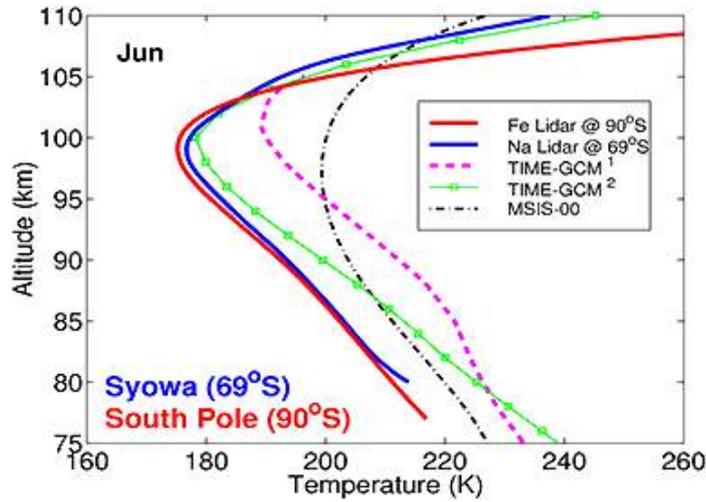


그림 19: 남극점에 위치한 미국기지(남위 90도)와 일본 쇼와기지(남위 68도) 라이다로 관측한 6월 (남반구 겨울) 중간권-열권 온도 프로파일과 대기 모델 온도와의 비교 (Pan et al., 2002; Kawahara et al., 2002).

중간권 구름 등을 직접 관측하고 중간권 온도를 지속적으로 감시하고 있다. 또한 최근 설치된 주파수 튜닝 가능한 라이더는 온도의 수직 구조, 고층대기 금속 성분과 극지역에서 발생하는 오로라 활동을 추적할 수 있는 질소 분자 이온 변화량에 대한 정보를 수집하여 연구에 활용하고 있다. 현재 지상에서 약 500 km 고도까지 관측 가능한 남극 최대 규모의 레이더를 활용한 대기 물리량, 전자 밀도 등의 관측을 병행하여 극지역 전리권 관련 연구도 활발히 수행중이다.

2. 현재 연구 개발의 문제점

앞서 기술한 라이더를 활용한 중·고층대기 온도와 바람 관측 대다수가 중·저위도에 편중되어 있으며 극지에서의 지상 관측은 레이더 또는 기타 광학 장비에 주로 의존하고 있다. 지역적인 지상 관측 편향으로 다양한 대기 중력파 발생 조건에 대한 충분한 자료 확보가 불가능하며 대기 중력파가 수직 방향뿐만 아니라 수평 방향으로의 전파하는 특성을 고려했을 때 대기 중력파가 대기 물리량 변화에 주는 영향에 대한 연구가 더욱 제한적일 수밖에 없다. 게다가 기존의 지상 관측은 시간-공간 해상도가 낮아서 중·고층대기 온도와 바람에 중요한 영향력을 행사하는 매우 짧은 주기를 가지는 작은 규모의 대기 중력파를 구분할 수 없다는 중대한 한계성을 안고 있다. 라이더를 제외한 대부분의 관측 장비가 대기의 특정 고도나 매우 좁은 고도 영역만을 관측 가능하여 수직으로 전파하는 대기 중력파의 고도에 따른 물리량 또는 전파 특성을 추적, 관찰할 수 없었다.

최근에는 북반구에 비해 지상 관측 거점이 매우 적은 남반구, 특히 남극에서의 대기 중력파 관측 연구를 위해 남극에 연구기지를 보유하고 있는 미국, 영국, 일본 등의 국가가 대기 중력파 관측 협력 체계인 ANGWIN을 구성하여 자료를 통합하고 표준화된 분석 기법

을 공유하는 시도를 하고 있다. 이를 통해 남극에서 대기 중력파의 수평적인 관측 영역이 확대되어 대기 중력파의 수평 전파에 대한 연구가 일부 가능하게 되었다. 대기 중력파는 발생 원인이 매우 다양함에 따라 파동의 시공간적인 규모 또한 매우 넓어 파동의 발생에서 전파, 2차 중력파 등 다양한 관점에서의 대기 중력파 관측을 위하여 라이다를 비롯한 다양한 관측 장비를 동시에 활용한 캠페인 (GW-LCYCLE, DEEPWAVE 등) 형태의 관측을 수행하기도 하였다. 위와 같은 국제적인 협력을 통해 대기 중력파 관측을 통한 연구에 있어 지속적인 개선 노력이 이루어지고 있으나 여전히 극지에서의 관측 거점 부족과 중·고층대기 고해상도 온도/바람 자료의 부재로 인하여 현재 모델에 내재된 대기 중력파의 항력에 대한 불확실성 개선이 어려운 상황이다.

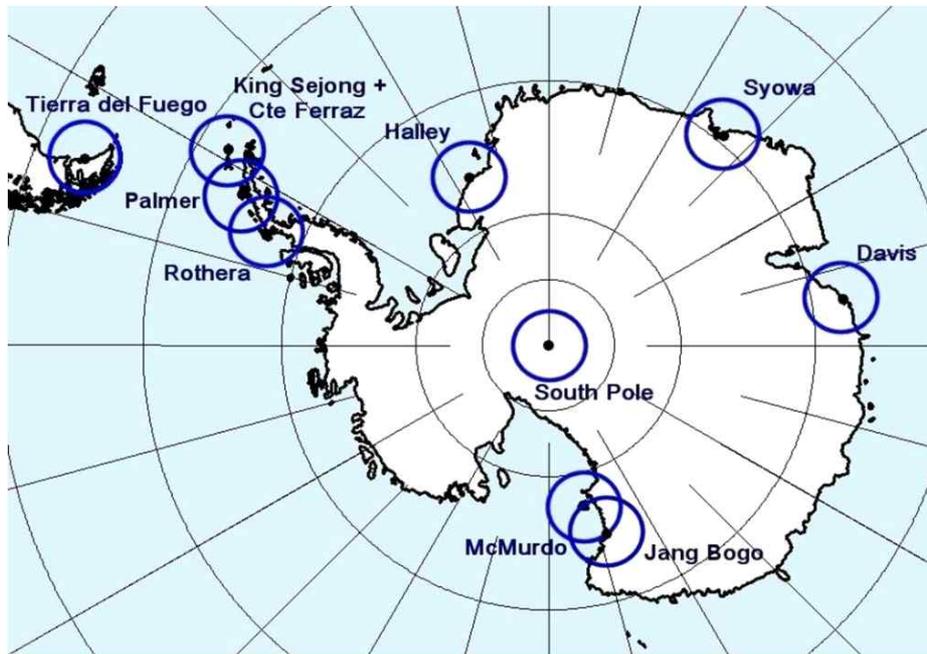


그림 20: 남극 대기 중력파 관측 네트워크 (ANGWIN)에 참여중인 지상 관측소 현황. 극지연구소에서는 세종기지와 장보고기지 지상 관측을 통해 ANGWIN 회원국들과 긴밀한 대기 중력파 연구를 수행하고 있다.

3. 대응 방안

중·고층대기의 지상 관측이 북반구 중·저위도에 집중되어 있는 문제는 남반구에 지상 관측 장비 설치가 가능한 육지의 면적이 북반구에 비하여 턱없이 작기 때문이기도 하다. 이는 남반구에서 가장 넓은 대륙인 남극을 지상 관측 거점으로서 적극 활용해야 하는 이유이며 이는 범국가적인 관측 네트워크 활용과 공동 연구를 통해 그동안의 단일 관측만으로 불가능했던 보다 큰 규모의 극지 중·고층대기 물리 연구 수행이 가능할 것이다. 중간권 및 그 이상의 고도에서 대기 중력파 항력 과정 개선을 통한 기후 모델의 예측 정확도 개선을 위해서는 극지 성층권 또는 중간권에서의 대기 중력파 특성 규명을 위한 관

측이 반드시 필요하다. 이는 대기 중력파의 발생에서 소멸에 이르기까지 주변 대기와 상호작용하는 과정에서 수평 방향뿐만 아니라 수직 방향으로 자유롭게 전파하는 대기 중력파의 물리적 특성을 높은 시간-고도 해상도로 관측함으로써 가능하다. 특히 대기 중력파 활성도가 전 세계적으로 가장 큰 곳으로 알려져 있는 세종기지 주변에서의 라이다를 활용한 중·고층대기 온도/바람 관측은 기존 지상 관측에서 제공하지 못했던 수직 고해상도 프로파일을 통해 수치 모델의 중력파 과정의 개선과 검증에 크게 기여할 수 있을 것이다.

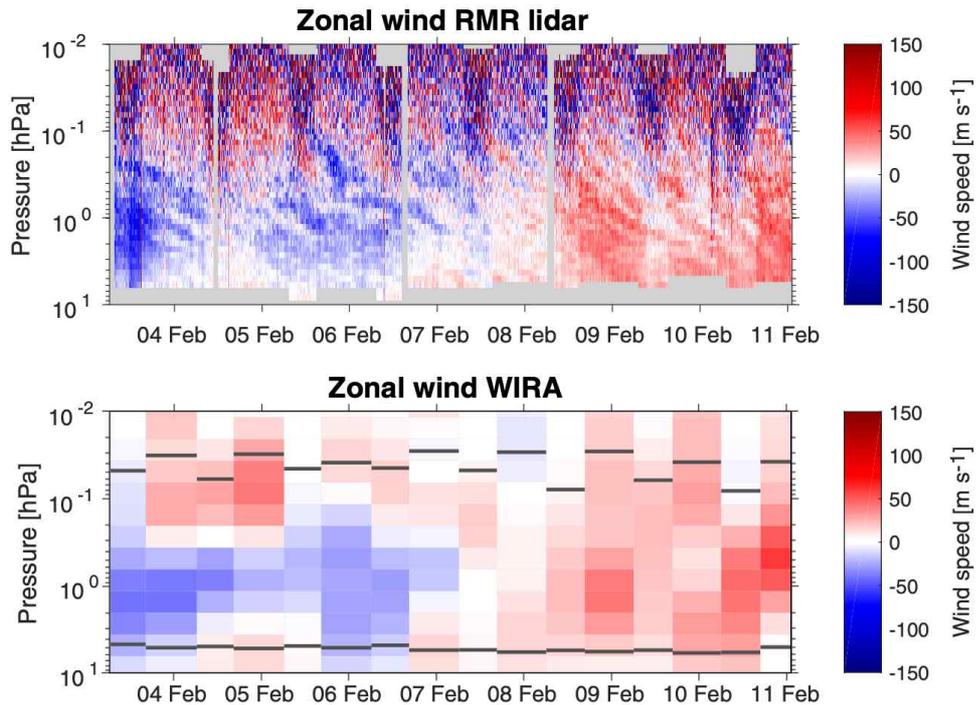


그림 21 북반구 고위도 지역에서의 성층권-중간권 동서 방향의 바람.(위) 라이다 자료, (아래) 도플러 전파 복사계 자료. 라이다 바람 자료가 복사계에 비해 매우 높은 고도-시간 해상도로 바람을 관측하고 있다 (Rüfenacht et al., 2018).

중·고층대기의 연직 고해상도 관측 시스템으로서 현재 DEEPWAVE 등 대기 중력파 관측을 위해 이미 활용하고 있는 독일 항공우주 센터 (German Aerospace Center, DLR)의 CORAL (The Compact Rayleigh Autonomous Lidar) 시스템을 생각해 볼 수 있다.

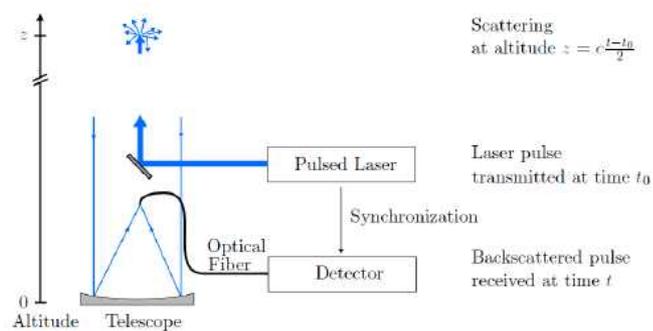


그림 22: CORAL 시스템과 라이다 컨테이너 (Bernd Kaifler, DLR 제공)

이 CORAL 시스템은 20-95 km의 고도에서 온도 관측을 통하여 대기 중력파를 관측하기 위해서 제작되었다. 이 라이다는 레일라이 산란 (대기 구성 분자와 같이 작은 매개체에 의한 빛의 등방성 산란)을 이용하는 장비로서 아래와 같이 레이저 펄스와 산란된 시그널을 받는 수신부로 구성된다. 레이저가 산란되어 수신되는 빛의 세기는 공기의 밀도의 함수로 결정된다.

극지연구소

The LIDAR Principle



Received power:
$$P(z, \lambda) = C \frac{1}{z^2} \beta(z, \lambda) T(z, \lambda)$$

↑
Proportional to air density

그림 23: 라이다의 원리에 대한 모식도 (Bernd Kaifler, DLR 제공)

CORAL 시스템의 핵심부는 아래와 같이 크게 레이저 박스, 광학부와 리시버 박스로 구성되며, 532 nm, 12.5 W의 레이저를 9 ns마다 펄스 형태로 연직 상공에 발사한다. 대략적인 구성은 아래와 같이 정리할 수 있다.

○ 레이저 시스템:

- Frequency doubled Nd:YAG laser with 14 W optical power at 532 nm (140 mJ at 100 Hz pulse repetition frequency, 9 ns pulse length)
- 2x beam expander
- Fast tip/tilt piezo mirror for beam scanning

○ 광학부:

- 24 inch diameter f/2.4 parabolic mirror with a spot size of <100 microns
- The telescope is designed for direct fiber-coupling using 550 micron diameter optical fiber (NA 0.22) mounted in the focal plane
- In-house design of the mirror cell and fiber support structure

○ 리시버 박스:

- Mechanical chopper running at 300 Hz chopping frequency
- Two elastic channels (10% and 90% signal), 0.8 nm wide interference filters, APDs
- 608 nm nitrogen vibrational Raman channel, 3 nm wide interference filter, high sensitivity PMT

The Lidar Instrument

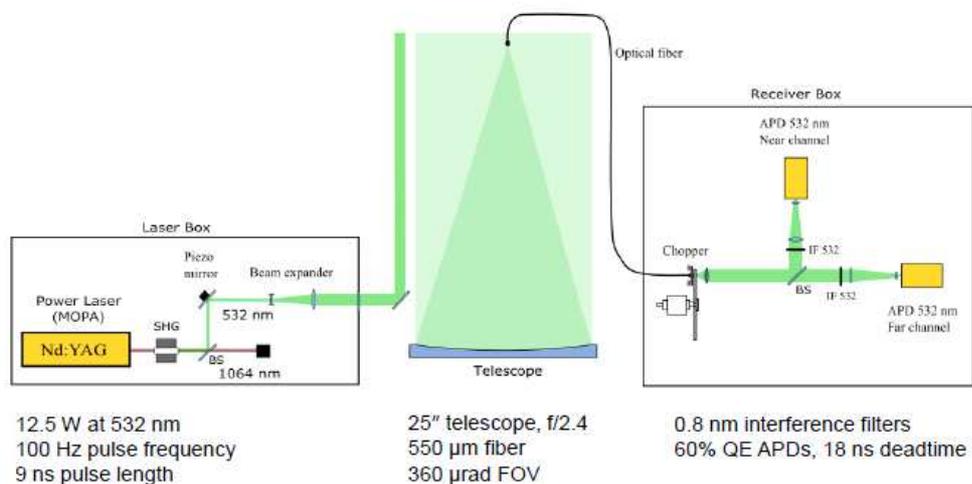


그림 24: 라이다 내부 구성 예 (Bernd Kaifler, DLR 제공)

CORAL 시스템은 8-피트 컨테이너 박스에 설치되며, 완전 자동화 관측을 수행한다.

Lidar Container

- 8-foot container, 1500 kg
- 2 kW power consumption
- Fully autonomous



그림 25: 라이다 컨테이너 설치 예 (Bernd Kaifler, DLR 제공)

CORAL 시스템은 실제로는 산란된 광자 (photon)의 개수를 관측하는데, 이 광자의 고도 분포로부터 온도 프로파일을 얻어낸다. 이러한 온도 프로파일을 얻기 위해서 이상기체 상태방정식을 가정함과 동시에 관측 고도 상단의 온도에 대한 경계 값이 필요하다. 보통 이 경계 값은 TIMED위성에 장착된 SABER (The Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) 관측 자료를 활용 한다 (Reichert et al., 2019).

Temperature Retrieval

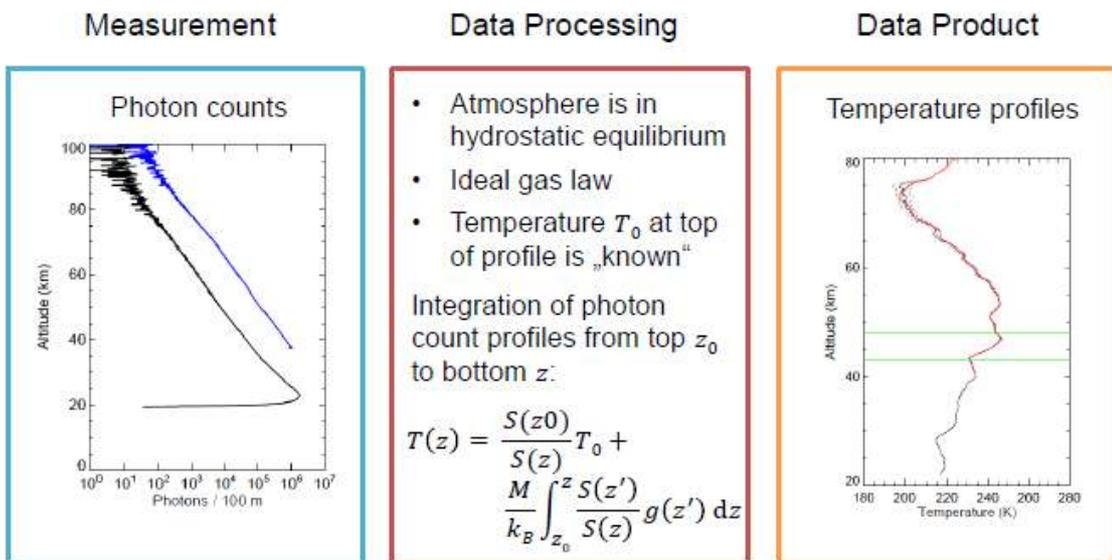


그림 26: 라이다 관측으로부터 온도를 추정하는 방법 (Bernd Kaifler, DLR 제공)

단일 CORAL 시스템으로는 온도 프로파일을 얻을 수 있으나, 수평 바람까지 관측하기 위해서는 적어도 두 개의 시스템이 필요하다. 이 두개의 시스템은 적절히 레이저 빔의 각도를 틀어서 (보통 천정 각 30도) 설치된다. 두 개의 시스템만 있을 경우에는 레이저가 바라보는 시선 방향으로의 바람만 얻을 수 있어, 남북 혹은 동성의 바람을 측정하기 위해서는 시스템을 회전시켜야 하는 문제가 발생한다. 두 개 이상의 시스템이 있을 경우에는 매 순간 동서 및 남북 성분의 수평 바람 성분을 얻을 수 있다. 현재 이와 같이 바람을 관측하는 시스템을 DLR에서 운영 중이며, 바람 관측 시스템을 보다 개선하기 위한 프로젝트가 DLR에서 진행 중이다 (아래의 communication 참조).



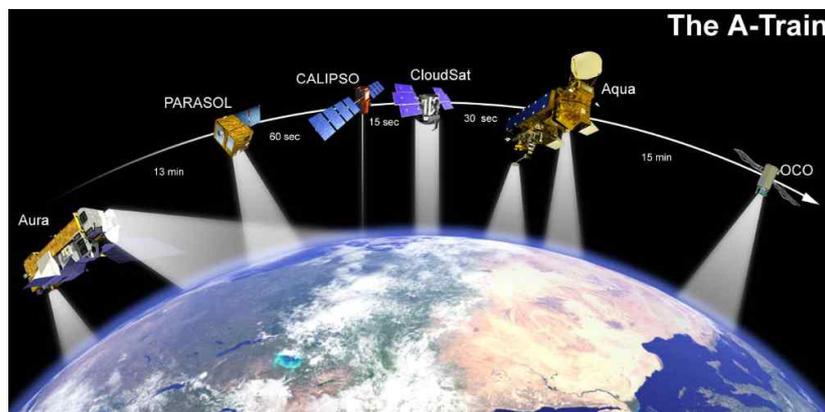
The lidar method allows wind measurements. Currently there are two stations (ALOMAR in Norway and Mado on La Reunion) which do wind measurements on a regular basis. Radars (wind profilers) work only in the troposphere and in the upper mesosphere (meteor radars: 80-100 km). Basically, what you want to do is (to) measure the Doppler shift between the emitted laser light and the light which is scattered in the atmosphere and collected by the receiving telescope. The light undergoes a Doppler during the Rayleigh scattering process twice, first when the incident photon is absorbed, and second when the scattered photon is emitted. The Doppler shift takes place in the direction of the laser beam i.e. you measure the component of the wind vector along the laser beam. **If you want to measure both components of the horizontal wind, you need two laser beams, e.g. one pointing north and one pointing west. Typically the laser beams are pointed 20-40° off zenith.** However, because the vertical component of the wind is typically small and the horizontal wind much larger, the vertical component can be neglected. Thus, Doppler measurements along the slanted beams allow you to reconstruct the horizontal wind vector.

The technically challenging part is the required precision. Assuming a zenith angle of 30°, a horizontal wind of 1 m/s causes a Doppler shift of 1.9 MHz. Thus, you will need to measure the frequency of the laser light with a precision of roughly 10^{-9} . This is not an easy task and requires a very stable laser to begin with, precise knowledge of and control over the laser frequency, and an edge filter in the receiver. This can be done, of course, but is an order of magnitude more complicated compared to a temperature only lidar, and thus more expensive. You should also keep in mind that about 60% of the lidar signal will be needed for the wind measurements and the altitude range of the temperature measurements will decrease accordingly (~ 5 km less).

At DLR we have a project to upgrade a CORAL type lidar for wind measurements. Basically, what we do is tilt the telescope of the existing lidar, add a stable seeder laser to the pulsed power laser, add a high resolution optical spectrometer and optical reference for precise frequency measurement of the outgoing laser pulses, and add an iodide cell (edge filter) in the receiver. All the components of the original temperature lidar are reused. However, this gives you only one component of the wind vector. If you want to measure both components, you will have to turn the lidar periodically and measure the wind components subsequently, or you will need a second lidar (though a single optical spectrometer and reference can serve both lidars simultaneously).

현재 중·고층대기 연구에 라이다를 가장 많이 활용 하는 유럽, 미국 등에서는 지상에서의 라이다 관측뿐만 아니라 인공위성에 라이다를 탑재하여 지구 궤도 상에서 지구 대기, 구름 등을 관측하는 방법을 적극 이용하고 있다. 인공위성을 활용한 라이다 관측은 우선

저층대기의 에어로졸 등에 의한 산란으로부터 자유롭고 육지가 분포하는 지역에 편중되었던 지상 관측의 지리적인 편중성 문제를 획기적으로 해소하여 전 지구 영역을 관측 가능하다. 그러나 지상 관측에 비해 막대한 예산과 인공위성 궤도 운동으로 인한 라이다 관측의 불안정성, 그리고 투입되는 예산 대비 짧은 운영 기간 등은 우주 공간에서의 라이다 관측에 있어 걸림돌로서 작용하기도 한다. 그러나 범국가적인 협력을 통해 보다 안정적이고 지속적인 인공위성 라이다 관측은 그동안 해양 기원 저층대기 에어로졸의 추적 조사, 대양 상공에서의 대기 관측이 불가능 했던 지상 관측 자료를 보완할 수 있다. 또한 기존 지상 라이다 관측의 또 다른 단점이었던 해가 없는 야간 관측만이 아닌 인공위성을 활용한 낮 시간 관측을 통해 대기 순환 또는 대기 중력과 활동 연구를 위한 보다 많은 관측 기간을 확보할 수 있게 될 것이다.



Aerosol -
Cloud Lidar
was
launched
by NASA in
2006.



그림 27 유럽, 미국 NASA에서 운영 중인 지구 대기 관측용 인공위성. 인공위성에 탑재된 라이다는 지상 관측의 문제점을 해소하여 저층대기 기상 요소 관측뿐만 아니라 고층대기 온도와 바람 관측에도 활용된다.

제 2 절 극지 고에너지 입자 유입에 의한 화학 과정과 기후 변동에 의 영향

1. 국내의 연구 동향

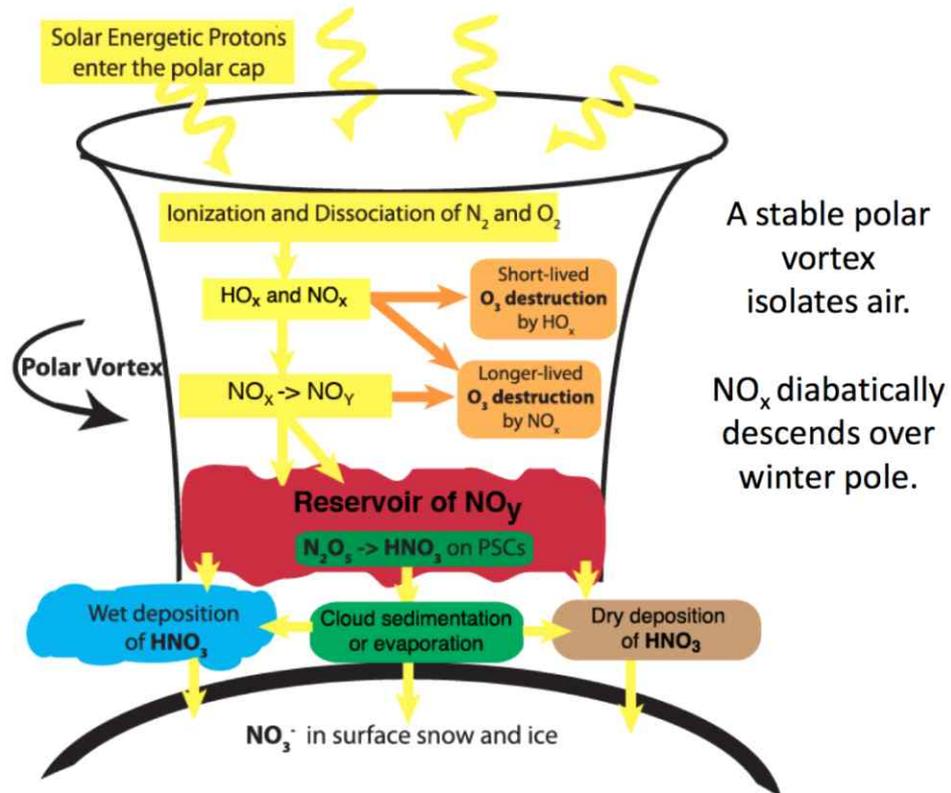


그림 28 극지 고층대기로 유입되는 우주선 및 고에너지 입자에 의한 중간권 및 성층권 NO_x/HO_x 분자 생성과 오존 변화 기작

지구 자기력선 구조의 특성 상 외부 우주로 열려 있는 극지 고층대기에서는 태양으로부터 지구 자기력선을 따라 극지 고층대기로 다양한 에너지대의 고에너지 입자들이 유입되고 있다. 이 입자들은 주로 양성자와 전자들이며, 대기 중 산소 및 질소 분자와 반응하여 NO_x/HO_x 분자 생성에 기여하는 것으로 알려져 있다. 이 과정에서 생성된 NO_x/HO_x 분자들은 중간권과 성층권에서 오존을 감소시키는 역할을 하고, 결과적으로 대기 온도 변화에 영향을 미치게 된다 (Funke et al., 2014). 국내에서의 고에너지 입자 침전에 의한 대기 변화 연구는 극지연구소에서 유일하게 수행하고 있다. 국외에서의 연구는 주로 위성 관측 자료를 활용하거나 또는 전 지구 대기 순환 모델을 이용하여 이루어져 왔다. 오로라 발생과 관련된 1-10keV의 에너지를 가진 전자들은 ~100-130km의 고도에 침전하여 저층 열권에 다량의 NO_x를 생성하는 것으로 밝혀졌다 (Porter et al., 1976; Rusch et al., 1981; Sinnhuber et al., 2012, 2013; Nieder et al., 2014). 또한 30-300keV의 전자들은 중간권까지 도달하여 중간권에서 NO_x와 HO_x를 생성할 수 있다. 극지 고층대기에 생성된 NO_x들은 겨울철 극 소용돌이 안쪽에서 저층으로 하강하여 성층권까지 도달할 수 있고 성층권의 오존

을 약 20-60%까지 소멸시킬 수 있는 것으로 알려져 있다 (Seppälä et al., 2004; Rohen et al., 2005; Verronen et al., 2005; Funke et al., 2014; Turunen et al., 2016). 이러한 대기 화학적 변화는 고속 태양풍 및 지구 자기장 교란에 의해 지속적으로 발생 될 수 있다. 태양 양성자 사건은 간헐적으로 발생되긴 하지만 중간권과 성층권에 큰 영향을 줄 수 있다. Andersson et al. (2014)에 따르면 태양 양성자 사건으로 중간권에서 최대 90%의 오존을 소멸시킬 수 있는 것으로 밝혀졌다.

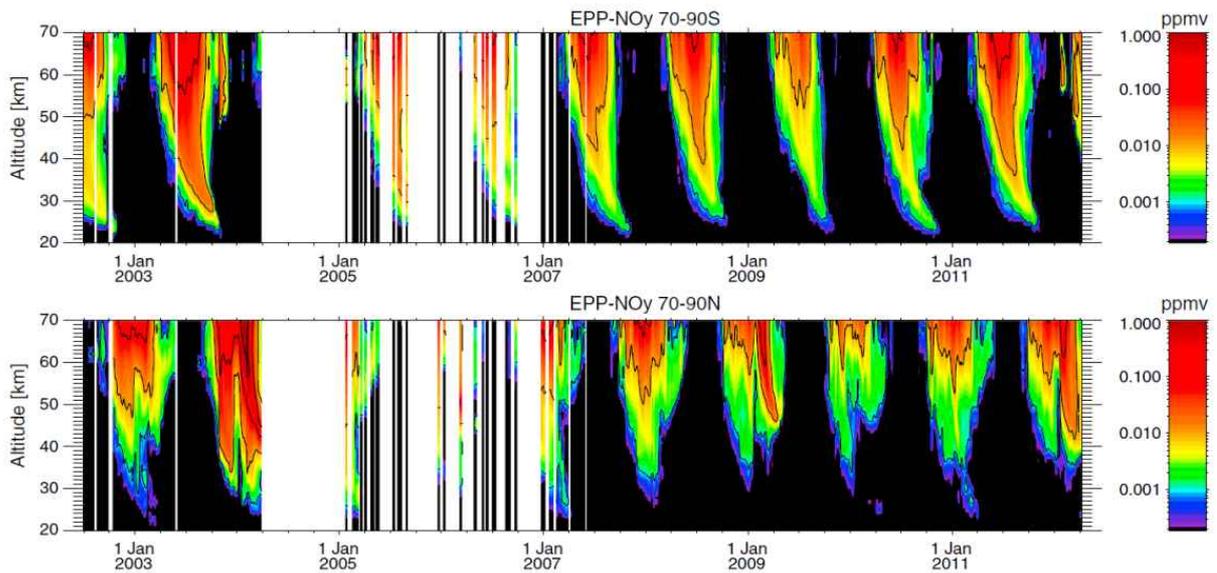


그림 29: 태양으로부터 방출된 고에너지 입자의 침전에 의해 생성된 NO_x의 시간적 변화. (위) 남반구 위도 70°-90° 평균, (아래) 북반구 위도 70°-90° 평균. (Funke et al., 2014)

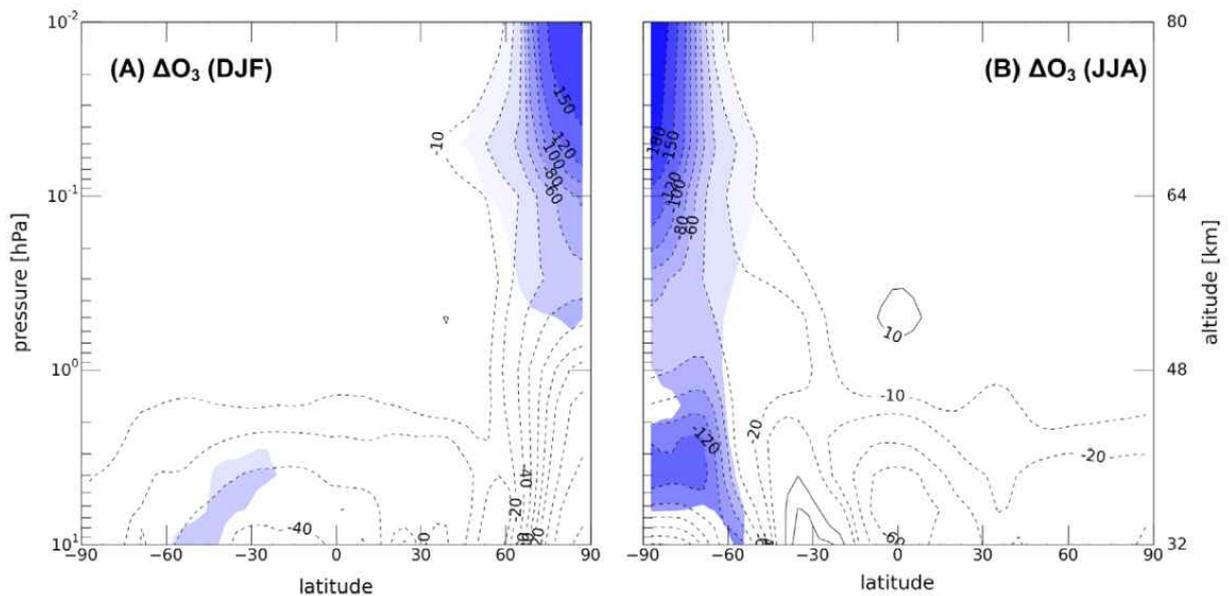


그림 30: 2002-2005년 동안 고에너지 입자 침전에 의해 소멸된 오존의 변화 모습. (Arsenovic et al., 2016)

고에너지 입자 침전에 의한 대기의 화학적 변화는 대기 온도와 바람에 영향을 줄 수 있는 것으로 밝혀졌다 (Baumgaertner et al., 2011; Seppälä et al., 2013; Arsenovic et al., 2016; Meraner & Schmidt et al., 2018). Seppälä et al. (2013)는 고에너지 입자 침전에 의한 대기의 온도와 바람의 변화를 비교하는 연구를 수행하였다. 고에너지 입자 침전에 의한 극지방 성층권에서 ~1-6K의 온도 변화와 ~2-9 m/s의 바람 변화를 야기할 수 있다고 설명하고 있다. 또한 Seppälä et al. (2009)는 대기 분석장을 사용하여 고에너지 입자 침전에 의한 표면 온도 변화를 조사하였다. 연구 결과, 고에너지 침전이 많이 발생했을 경우 북극에 성층권 돌연 승온의 발생이 없는 기간에 최대 5K의 국지적 표면 온도 상승이 발생할 수 있음을 제시하였다.

2. 현재 연구 개발의 문제점

앞서 기술한 고에너지 입자 침전에 의한 대기의 화학 및 역학적 변화의 정량적 평가를 위해서는 대기 화학 모델이나 대기 순환 모델을 이용한 연구가 필요하다. 그러나 많은 모델들에서 고에너지 입자 침전의 모의가 정확히 이루어지지 않고 있다. 특히 대기 순환 모델에서 300 KeV 이상의 에너지를 갖는 입자들의 모의는 대체로 포함하고 있지 않아 정확한 대기 변화의 결과를 얻기 어려운 점이 있다.

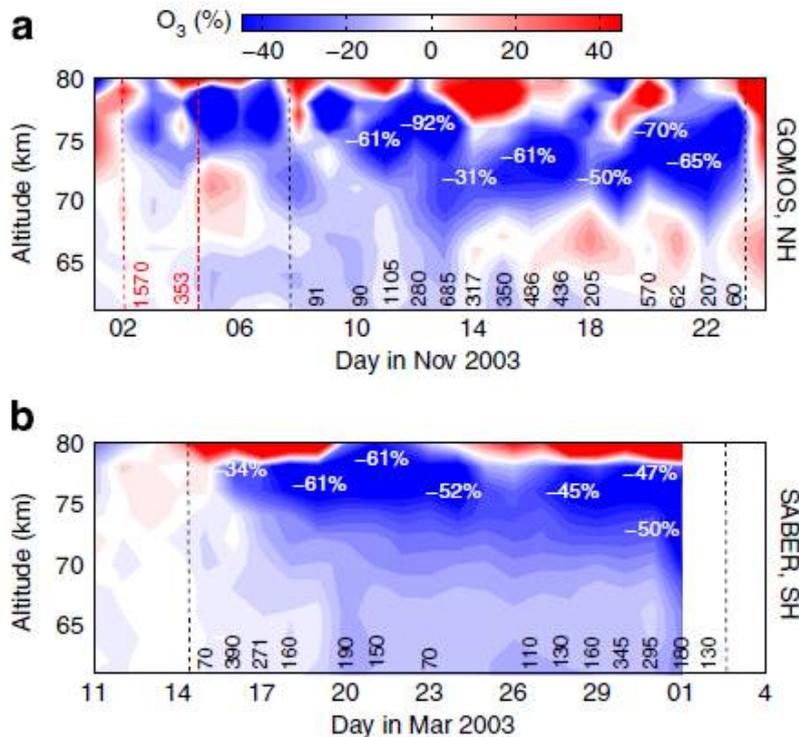


그림 31. 위성 관측자료를 사용하여 태양 양성자 사건(SPE)이 발생했을 때 중간권 오존 변화. (위) 북반구 극지방의 오존 변화, (아래) 남반구 극지방의 오존 변화. (Andersson et al., 2014)

최근 연구에서는 일부 모델을 개선하여 300 -1000 keV의 고에너지 입자들의 침전을 포함한 연구 결과들이 보고 (Andersson et al., 2018; Newnham et al., 2018; Arsenovic et

al., 2019)되고 있으나, 모델에 적용되기까지는 더 많은 시간이 필요할 것으로 보인다. 또한 1-10MeV의 고에너지 전자들의 침전에 의한 영향에 대한 모의는 많이 이루어지지 않았다. 이 전자들은 단기간에 중간권 및 성층권에 직접적으로 영향을 줄 수 있으므로 고에너지 입자 침전에 의한 기후 변동성 연구에 정확한 결과를 위해 연구가 반드시 뒷받침되어야 할 것으로 보인다.

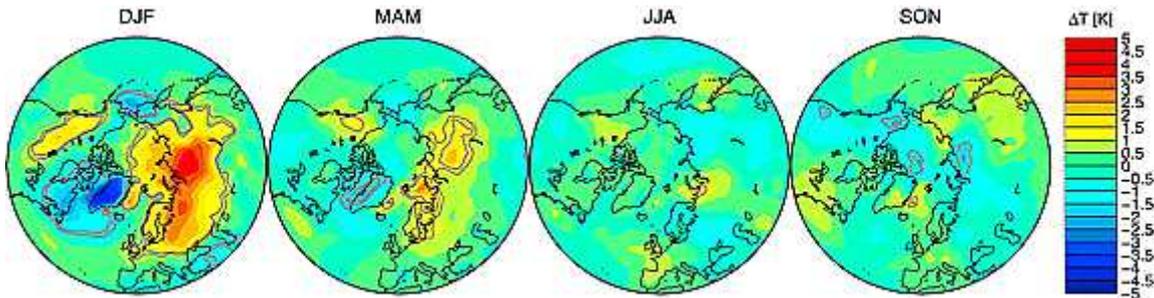


그림 32. 고에너지 입자 침전이 발생했을 때 북극지역 표면온도의 변화. 최대 5K의 국지적 표면온도의 상승이 발생. (Seppälä et al., 2009)

최근에는 전지구 기후모델(WACCM) 모의실험을 통해 중·고에너지 전자가 성층권-중간권 구성성분 및 오존 밀도에 어떤 영향이 있는지에 대한 연구가 수행되고 있다. 기후모델에 중-고에너지 전자 유입 과정이 포함되어 있을 때와 그렇지 않을 때를 비교해 보면, 모델 내에서 전자 유입이 성층권-중간권 화학 물질 구성에 상당한 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다. 화학 물질 변화는 주로 NO_x와 HO_x 변화로 나타나며, 이 변화는 궁극적으로 대기 중 오존 밀도 변화를 발생시킨다. 계절별로 여름철 보다는 겨울에 그 변화 좀 더 낮은 고도까지 영향을 미치는 것으로 나타나는데, 여름철에는 중간권 상부에 주로 나타는 반면에 겨울철에는 30km 이하 성층권 하부까지 그 영향이 나타난다. 또한 NO_x와 HO_x의 영향도 특정한 차이를 보이는데, HO_x의 영향이 주로 중간권에 머무는 반면에 NO_x의 영향은 성층권까지 미치는 것으로 나타난다. 오존에 미치는 영향은 이 두 화합물의 영향의 총합으로 나타난다. 그러나 현재 대기 순환 모델에서 중간권 화학 반응의 기여로 인해 고에너지 입자 침전에 의한 대기 반응을 정확하게 모의하지 못하는 것이 보고되고 있다. Henderickx et al. (2018)은 대기 순환 모델과 위성 관측 자료를 활용하여 중간권 NO_x의 농도를 비교한 결과, 모의된 NO가 위성 관측 자료와 비교했을 때 낮게 측정되었다고 보고했다. 이들은 대기의 하강 속도는 모델과 위성에서 측정한 결과 비슷하지만, 중간권 및 성층권에서 NO_x의 농도가 낮게 측정되는 것은 중간권에서의 화학 반응 모의가 제대로 이루어지지 않고 있음을 나타낸다고 설명했다. 고에너지 입자 침전에 의한 고층대기의 화학 변화가 성층권에 영향을 줄 수 있는 만큼 고층대기에서의 화학 반응의 부재는 기후 변동성을 평가하는 데 어려움을 줄 수 있다.

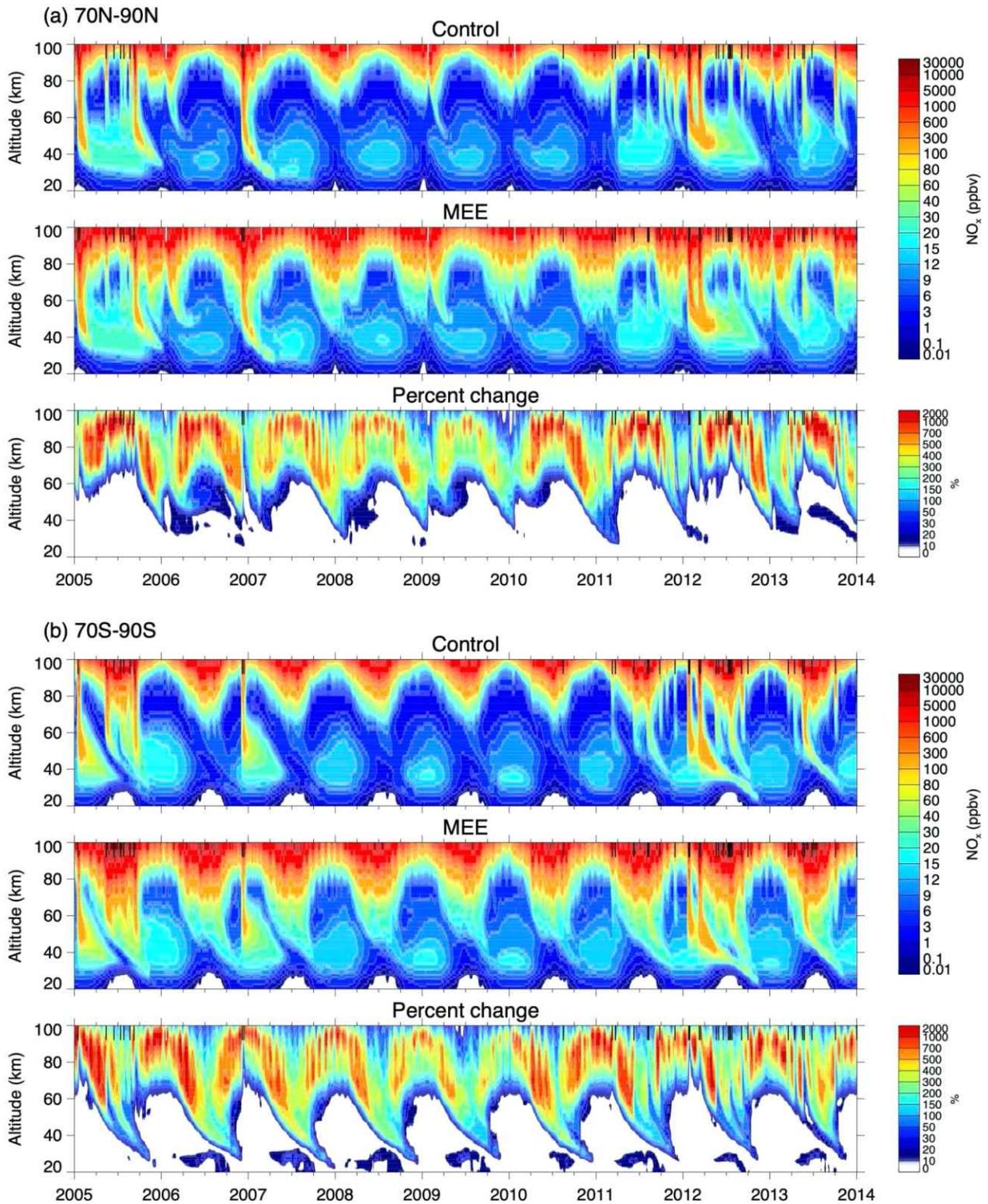


그림 33 태양에서 지구 대기로 유입되는 중-고에너지 전자가 성층권-중간권 대기 화학과정에 미치는 영향에 대한 WACCM 수치모델 모의 실험결과. 수치모델에 전자를 포함시켰을 때와 그렇지 않은 경우를 비교한 결과.

3. 대응 방안

고에너지 입자 유입에 의한 대기 이온화율과 극지 중간권 및 성층권에 대기 화학반응에 대해 모델링 과정을 개선함으로써 기후 변동성의 예측 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 보인다. 극지연구소에서는 위성 관측 자료를 활용하여 고에너지 입자 유입에 의한 대기 반응 변화를 연구하고 전지구 대기 순환 모델을 활용한 대기 역학적 변화를 모델링한 경험을 갖고 있다. 따라서 고에너지 입자 유입에 의한 기후 변동성을 연구하기 위해 전지구 순환 모델 및 화학 모델을 개선할 수 있는 역량을 갖고 있는 것으로 파악된다. 전지구 대기 순환 모델에서 결여된 고에너지 입자 침전에 의한 대기의 이온화율을 적용하여 개선하면 중간권 및 성층권의 변화를 향상시킬 수 있고 기후 변동성의 예측 향상에 기여할 수 있을 것으로 보인다. 또한 중간권의 대기 화학 반응 부재를 개선하기 위해서는 제대로 된 화학 모델이 필요할 것으로 보인다. 이를 위해서, 핀란드에서 개발한 대기 화학 모델을 구축 활용할 수 있다면 연구에 진전을 이루게 될 수 있을 것으로 판단된다.

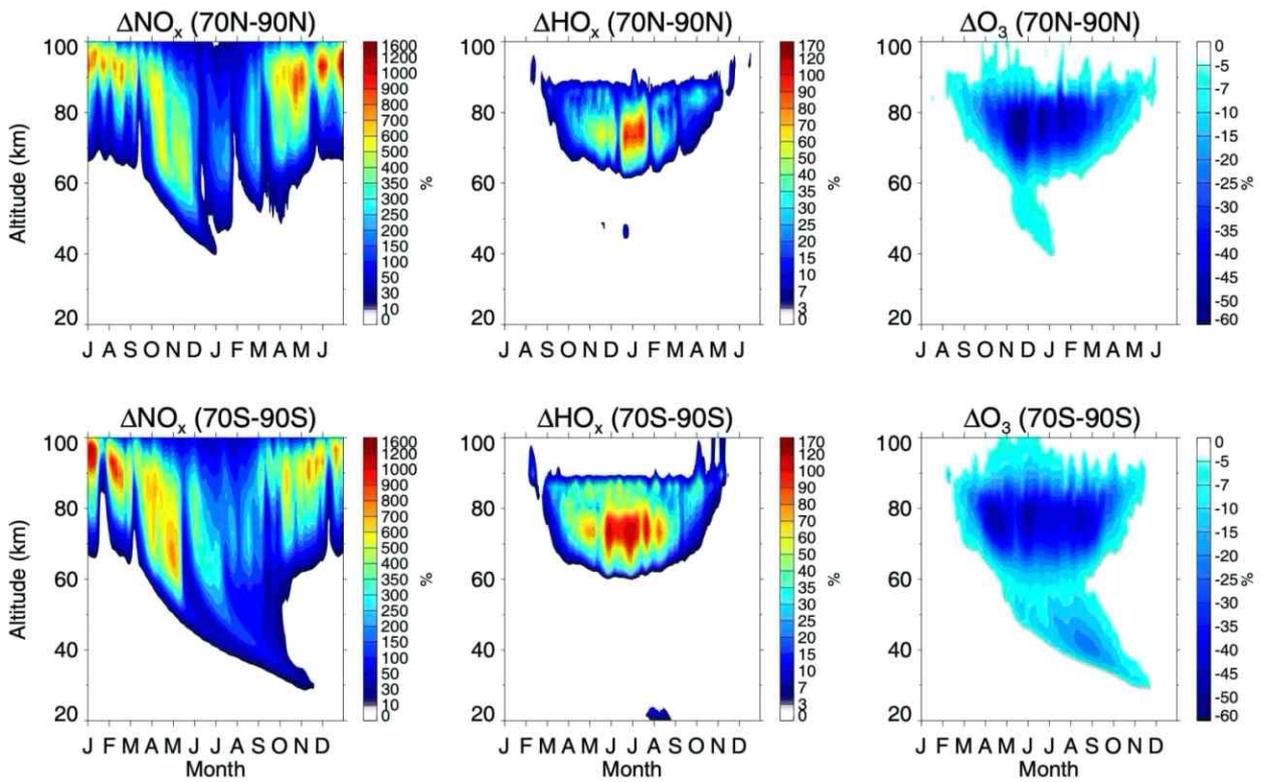


그림 34 태양에서 지구 대기로 유입되는 중-고에너지 전자가 성층권-중간권 대기 화학과정에 미치는 영향에 대한 WACCM 수치모델 모의 실험결과. NO_x와 HO_x 변화에 의한 오존 변화를 보여준다.

제 3 절 태양 복사 변화가 지표 기후 변동성에 미치는 영향과 대기 파동 역학

1. 국내의 연구 동향

태양 복사가 극지 및 전지구 기후 변동성에 영향에 대한 초기 연구는 1980년대 이전부터 시작되었다 (Hines, 1974; Geller et al., 1980; Geller, 1988; Labitzke, 1987; Labitzke & van Loon, 1988). Hines (1974)는 태양 활동과 기상과의 연계를 이룰 수 있는 매개체로서 행성 규모 파동과 그 파동의 고층대기에서의 굴절의 역할을 강조했다. 이 논문은 연구 결과 보고는 아닌 일종의 제안 같은 것이지만, 태양 활동의 변동과 대기 파동 역학과의 연관성에 대한 시작 지점으로 볼 수 있다. Labitzke (1987)과 Labitzke & van Loon (1988)은 태양 변동성과 중·고층대기의 연관성을 보인 실질적 최초의 논문으로 인식된다. 이들은 열대 지역 하부 성층권의 준2년 주기 진동 (Quasi-Biennial Oscillation, QBO)의 위상에 따라 고위도 온도 및 지위 고도 관측 자료를 분류하였을 때, 비교적 명확한 태양 변동성과의 상관관계가 나타남을 보였다.

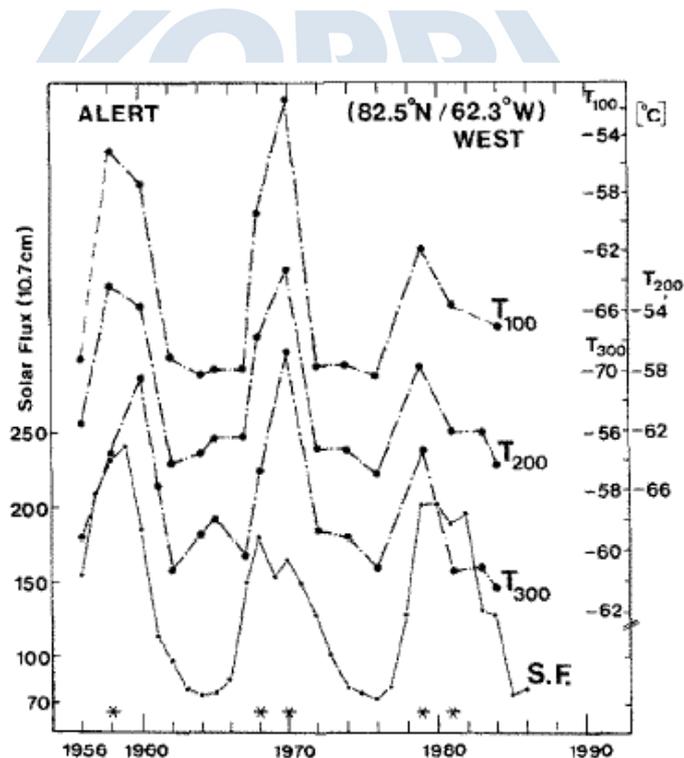


그림 35: QBO 서풍일 때, 북반구 겨울 고위도의 대류권의 온도와 F10.7 태양 플럭스와의 상관 관계를 보여주는 시계열 (Labitzke & van Loon, 1988).

태양변동성과 기후 변동성 문제를 연관시키기 위한 활발한 연구는 1990년대 후반, 2000년대 초반부터 시작된 것으로 보인다 (Haigh 1996, 1999, 2001, 2003). Haigh (2003)은

NCEP/NCAR 재분석 자료에서 계산된 동서 평균된 동서 바람의 회귀 (regressive) 모델을 이용한 분석을 수행하였다. 이 회귀 모델은 상수, 선형 추세 (linear trend), 태양 변동성 (F10.7), QBO, ENSO, 화산 폭발, NAO 및 연변동에 대한 인덱스의 선형 결합으로 이루어진 모델이다. 회귀 분석 결과, 태양 변동성과 동서 평균 동서 바람은 열대지역 하부 성층권과 아열대 대류권에서 의미 있는 상관관계를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

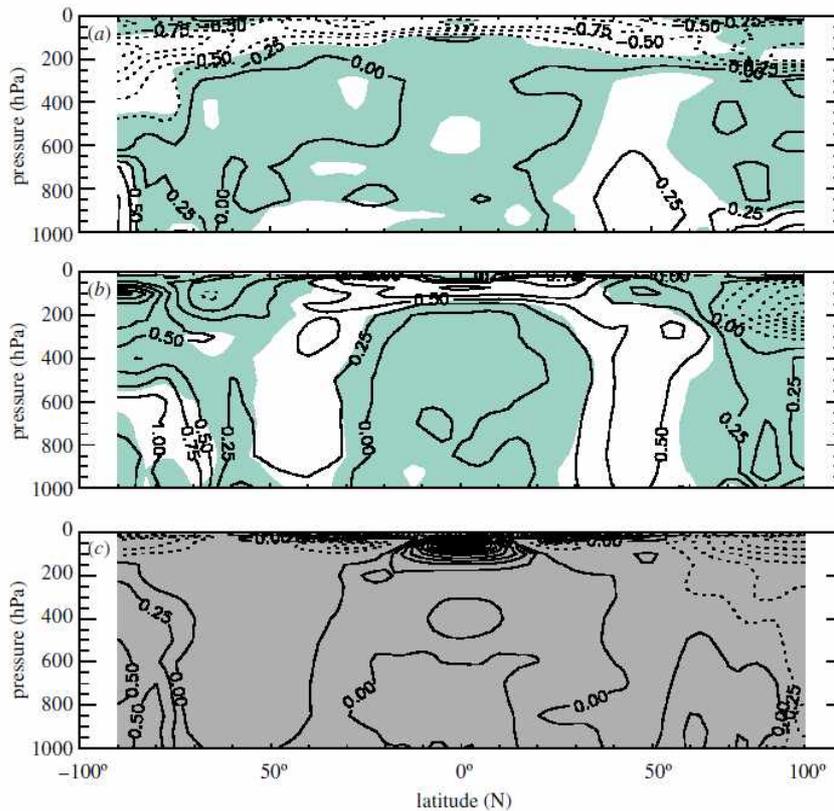


그림 36: NCEP/NCAR 재분석 자료의 동서 평균 동서 바람의 (위) 선형 추세, (중간) 태양 활동, 및 (아래) QBO에 대한 다중 회귀 분석 결과. 음영 처리된 것은 통계적인 의미가 없는 영역을 나타냄 (Haigh, 2003).

2000년 초반에도 태양에 대한 직접적인 관측은 부족했지만, 대기-해양 기후 모델을 활용한 17-18세기 마운더 극소기 시절에 대한 기후 모델링 연구 (Shindell et al., 2001)를 수행하였다. 마운더 극소기는 1645년부터 1715년까지 태양 흑점이 거의 관측되지 않았던 시기로서 태양 활동이 매우 약했던 시기이다. 이 시기에 유럽 지역의 온도가 평년 기온보다 낮았다는 것으로 소빙하기 (Little Ice Age, LIA)로 불리기도 한다. 하지만 LIA의 발생은 대체로 화산 활동과 연관되어 있는 것이 정설로 받아들여지고 있어 LIA와 태양 활동의 변화를 직접적으로 연관시키는 것은 간단한 일은 아니어 보인다.

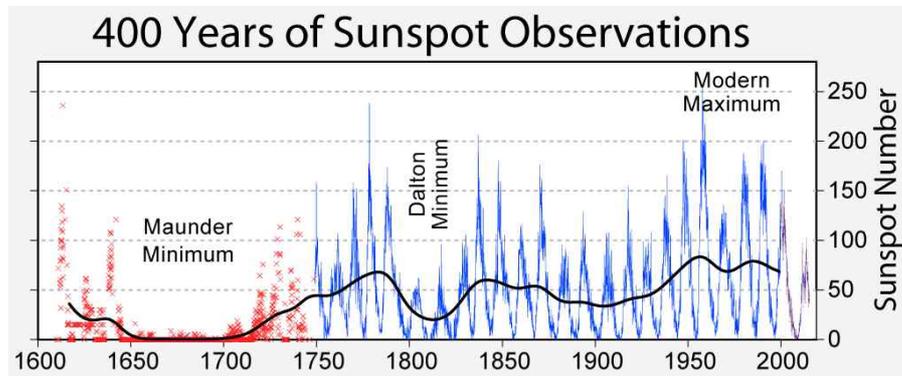


그림 37: 태양 흑점 개수의 400년 시계열 (CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=969067>)

Shindell et al., (2001)은 마운더 극소기 시간에 대한 해수면 기압에 대한 경험적 직교 함수 (Empirical Orthogonal Function, EOF)를 이용한 주성분 분석을 통해서, 첫 번째 모드가 양의 북극 진동 (Arctic Oscillation, AO) 시기와 유사한 모습을 보임을 보고하였다. 마운더 극소기 때를 그 이후 1780년 상황과 비교하면, 극소기 때 북극 지역 해수면 기압이 더 낮았고, 이와 관련하여 해양으로부터 북미 대륙이나 유라시아로의 온난한 기류의 이동이 줄어들어 이러한 대륙 지역에서 1-2도 가량 온도가 더 낮았다고 보고하고 있다.

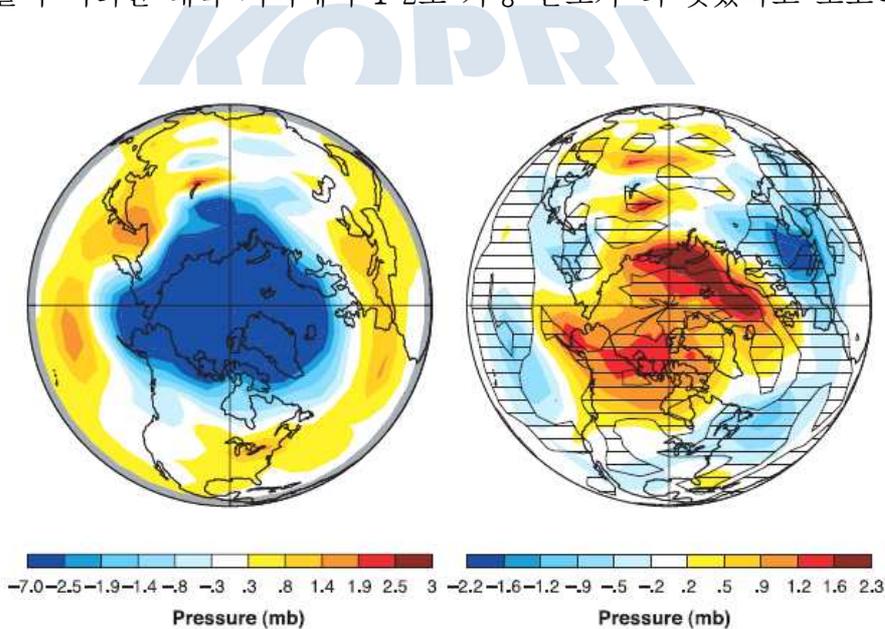


그림 38: 북반구 겨울철 북극 지역 해수면 기압의 EOF 첫번째 모드 (좌)와 1780 (마운더 극소기 이후)-1680 (마운더 극소기) 사이의 해수면 기압의 변화 (우) (Shindell et al., 2001).

태양 변동성의 영향 분석에 그치지 않고, 행성규모 아노말리의 하향 전파나 행성 규모 파동이 연관된 역학적 메커니즘에 대한 연구 (Kodera & Kuroda, 2002; Haigh & Blackburn 2006)가 시작되었다. Kodera & Kuroda (2002)는 태양 활동이 강할 경우, 양극 겨울철에 행성파의 상향 전파가 약해질 수 있으며 동시에 성층권 상부에서 열대지역으로의 전파도 약해지는 모습이 나타날 수 있음을 보였다. 태양 활동이 강할 때의 이러

한 행성파의 모습은 중·고위도 성층권 부근에서 행성파의 강제력이 약화되고, 이에 따라서 열대지역 성층권의 브루어-돕슨 순환 (Brewer-Dobson circulation) 이 약해져서 열대지역 하부 성층권이 따뜻해지고, 극지 하부 성층권은 차가와질 수 있음을 보였다.

Haigh & Blackburn (2006)은 태양 활동의 변화를 모델에 포함시킨 실험을 통해서, 태양 활동의 변화가 일어남에 따라, 해들리 및 페렐 순환과 같은 대류권의 전지구 자오면 순환이 변화하며, 이런 자오면 순환의 변화는 주로 행성파에 의한 남북 운동량 속 (행성파에 의한 남북 운동량 속은 행성파의 남북 전파 속도 및 진폭에 의해 결정)에 의해 주로 결정될 수 있음을 보고하였다.

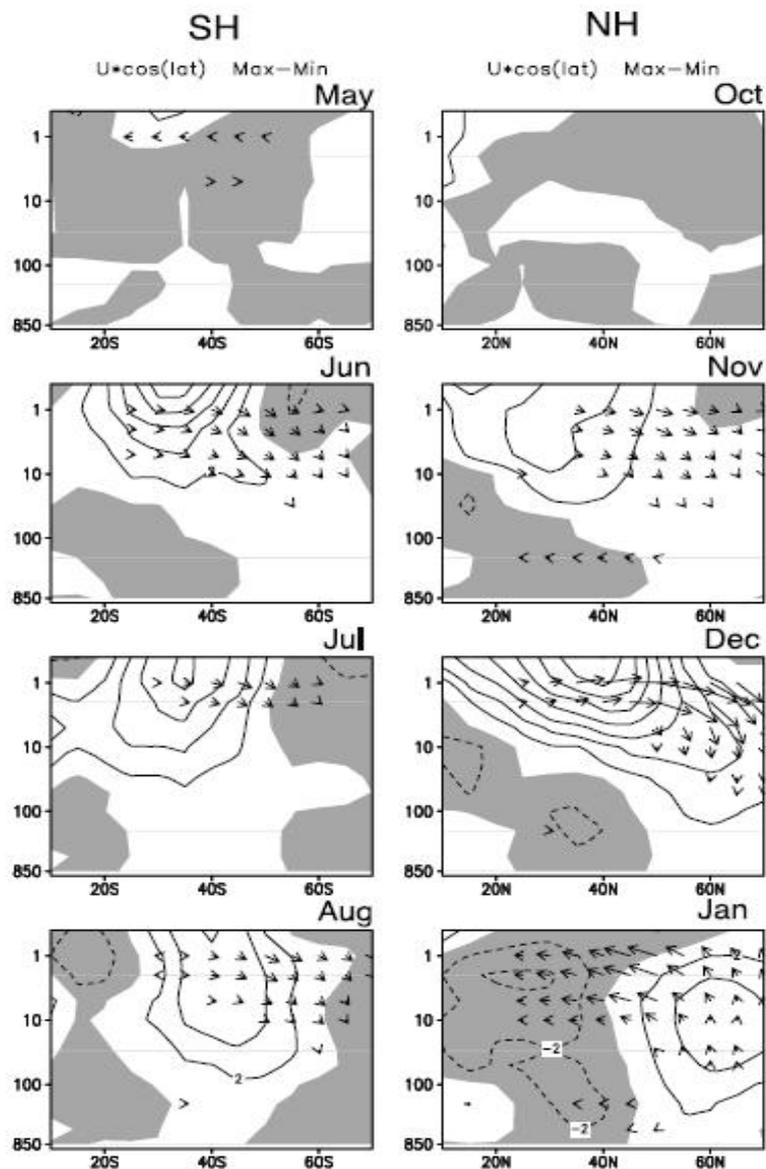


그림 39: 동서 평균 동서 바람과 엘리야센 팜 플럭스 (행성파 전파)태양 활동이 강할 경우에서 약할 때를 뺀 행성파 플럭스 (전파 방향)의 변화 (Kodera & Kuroda, 2002).

태양 변동성에 관한 재분석 자료 (Reanalysis data) 연구에 따르면, 태양 극대와 극소 기간에 대해서 열대지역 성층권계면의 온도 차이가 1-2 K임을 보였다 (Frame & Gray, 2010; Gray et al., 2010). Frame & Gray (2010)은 유럽 중기 예보 센터 (European Centre for Medium-range Weather Forecast)의 40년 재분석 자료 (ERA-40)의 분석을 통해, 태양 활동이 강했을 시기에서 약했을 시기를 빼 동서 평균 온도는 상부 성층권 및 하부 성층권에서 의미 있는 정도의 양의 값을 보이는 것을 확인하였다.

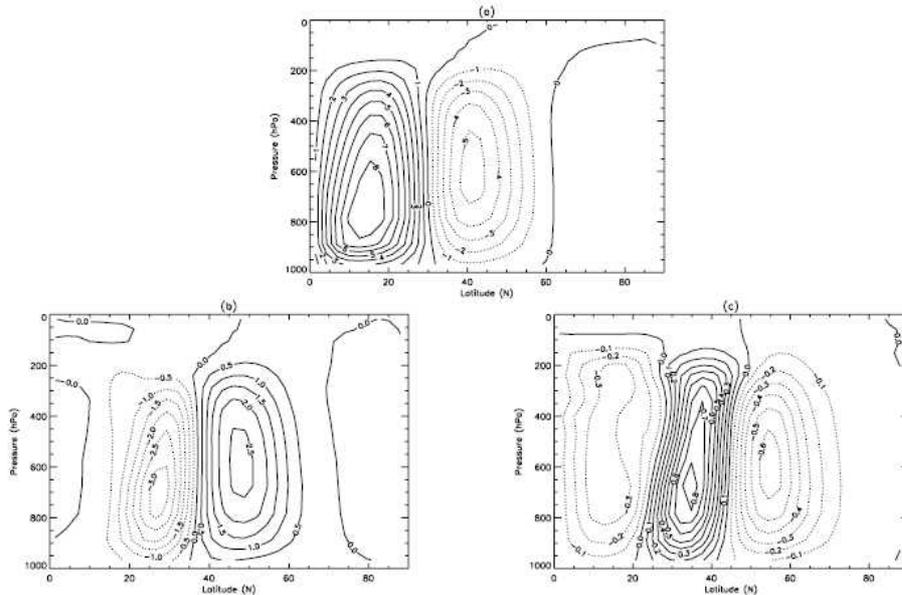


그림 40: (a) 제어 실험에 대한 유선 함수, (b, c) 두 가지 다른 형태의 태양 활동 강화 실험을 수행했을 때의 유선 함수 (Haigh & Blackburn, 2006).

극지연구소

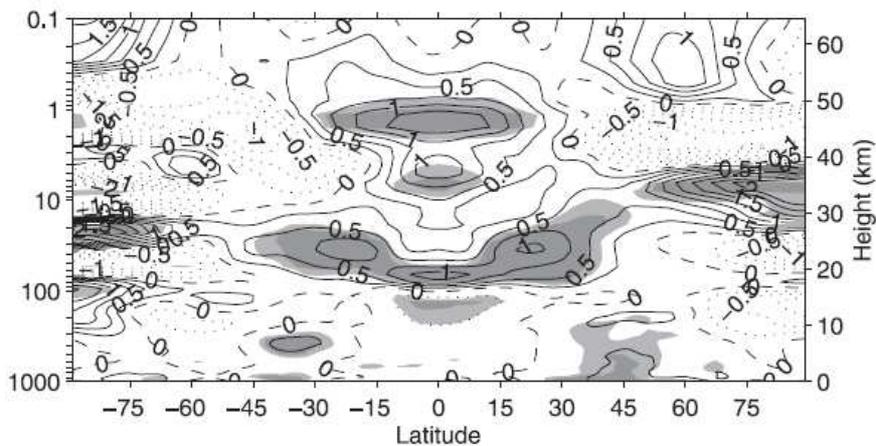


그림 41: 유럽 중기 예보 센터 40년 재분석 자료 (ERA-40)에서 태양 활동의 극대/극소에 대한 동서 평균 온도의 차이 (Frame & Gray, 2010).

이와 같은 결과는 이후, Lu et al., (2017a, b)에서 사용한 유럽 중기 예보 센터 인터림 재분석 자료 (ERA-Interim)에서도 거의 유사하게 나타난 것으로 확인된다. 다만, Lu의 연구에서는 열대지역 하부 성층권의 온도 차이는 통계적인 의미가 크지 않은 것으로 분석되었

다. 추가로 Lu의 연구에서는 북반구 겨울에 대해서 초겨울과 늦겨울로 분리해서 분석하였는데, 초겨울에는 성층권 아열대 및 극 제트가 전반적으로 강해지고 극지 성층권 온도가 떨어지는 것을 확인하였으며, 늦겨울에는 성층권 아열대 및 극 제트가 전반적으로 약해지고, 극지 성층권 온도가 올라가는 반대 양상이 나타나는 것을 확인하였다. 즉, 태양 극대/극소기의 대기의 반응이 초겨울과 늦겨울이 완전히 반대로 나타나는 것을 보여주었다.

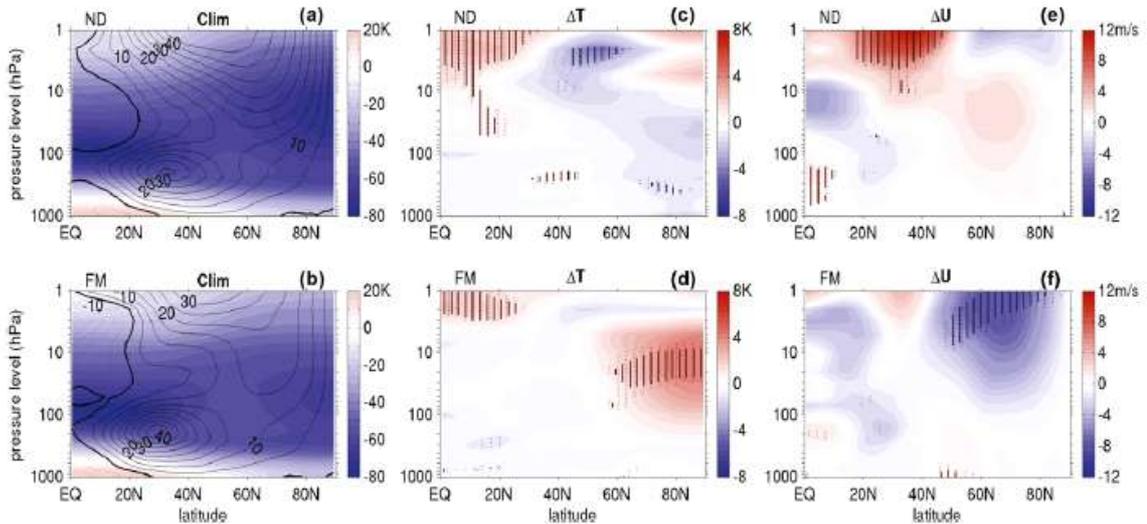


그림 42: 1979년부터 2014년까지 ERA-Interim 재분석 자료에서 북반구 (위) 초겨울과 (아래) 늦겨울에 대해서 계산된 태양 활동 극대-극소 기간에 대한 (왼쪽) 기후학적 온도와 바람, (가운데) 동서 평균 온도 차이, 및 (오른쪽) 동서 평균 바람 차이 (Lu et al., 2017a).

극지연구소에서 자체적으로 수행한 연구에서는 Lu의 연구와는 조금 다른 형태로 태양 활동 극대와 극소를 구분하였다. 태양 활동 구분을 위해서, 태양 변동성의 극대/극소/중립의 시기를 결정하기 위해서 태양 채층에서 마그네슘 이온이 방출하는 280nm 복사와 연관된 Mg-II 인덱스 (Vioreck & Puga, 1999)와 태양으로 부터 방출되는 10.7 cm 라디오파와 연관된 F10.7 인덱스 (Tapping 2013)을 이용하였다. Mg-II와 F10.7 인덱스는 미국 국립 환경정보 센터 (National Center for Environmental Information, NCEI)에서 제공하는 자료를 활용하였다 (NCEI 2018). 온도 차이가 약간 커서 2-3 K까지도 커질 수 있음을 확인한 바는 있다. 이렇게 분류된 태양 연도별 태양 활동은 아래에 표로 정리하였다. 표에서 HS (High solar irradiance)는 태양 활동 극대를, LS (Low solar irradiance)는 태양 활동 극소를, SN (Solar neutral irradiance)는 태양 활동 중립을 그리고 마지막으로 VOL은 화산 활동에 의한 섭동으로 인해 분석에서 제외한 기간을 나타낸다. Lu et al. (2017a)에서 2011-12 겨울을 HS로 구분했으나, Lu et al. (2017b)에서는 2012-13과 2013-14를 SN로 구분하기 때문에, 2011-12를 HS로 두는 것은 주기적인 태양변동성의 측면에서는 문제가 있는 것으로 판단하여 본 연구에서는 2011-12를 SN로 두었다. 전반적으로 HS가 2000년 초반 이전에 집중되어 있고, 2011년 이후에는 HS가 덜 나타나는 경향성을 보이고 있다. 실제로 태양 활동이 2014-15년 이후로 다시 감소하고 있다. 2012년부터 2014년의 기간을 HS로 두는 것이 주기

성의 측면에서는 적합할 지도 모르나, 실제 태양 활동은 그렇게 강하지 않고 오히려 약해지고 있다는 점에서 SN으로 구분하였다.

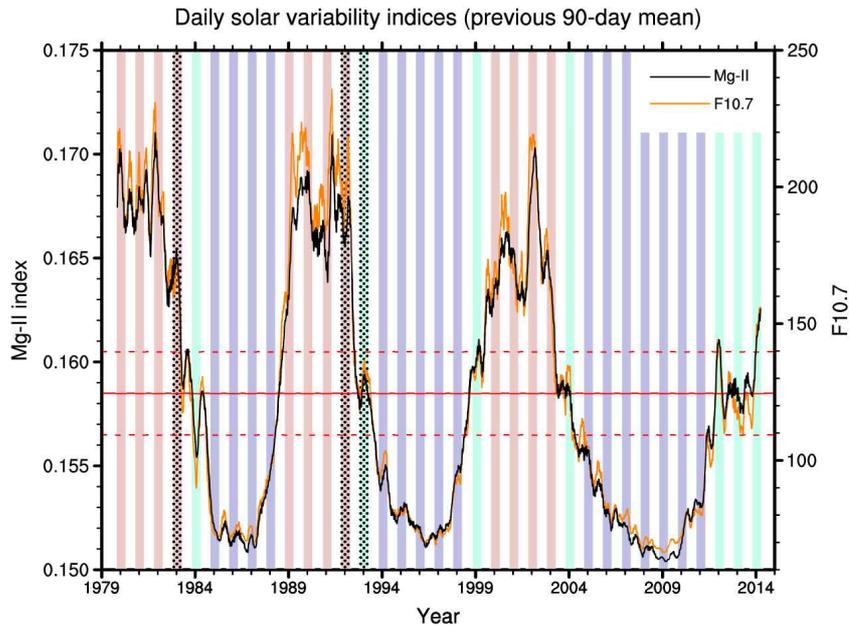


그림 43: Mg-II과 F10.7 인덱스. Mg-II 인덱스의 평균 (빨강색 실선)보다 충분히 크거나 작은 (실선 위아래의 점선) 시점을 각각 태양 활동 극대 및 극소로 두었다. 붉은색 및 푸른색 막대는 태양 활동 극대 및 극소인 북반구 겨울을 각각 나타낸다. 초록색 막대는 태양 활동 중립을 나타낸다. 1983년, 1992년, 그리고 1993년은 화산 폭발로 인한 섭동이 강한 때로서 분석에서 제외하였다.

극지연구소
표 3: 연도별 태양 활동 구분

1979-80	HS	1989-90	HS	1999-00	HS	2009-10	LS
1980-81	HS	1990-91	HS	2000-01	HS	2010-11	LS
1981-82	HS	1991-92	VOL	2001-02	HS	2011-12	SN ¹
1982-83	VOL	1992-93	VOL	2002-03	HS	2012-13	SN
1983-84	SN	1993-94	LS	2003-04	HS	2013-14	SN
1984-85	LS	1994-95	LS	2004-05	LS	2014-15	
1985-86	LS	1995-96	LS	2005-06	LS	2015-16	
1986-87	LS	1996-97	LS	2006-07	LS	2016-17	
1987-88	LS	1997-98	LS	2007-08	LS	2017-18	
1988-89	HS	1998-99	SN	2008-09	LS	2018-19	

극지연구소에서 자체적으로 분석한 재분석 자료 분석 결과에서는 유럽중기예보센터 인터립 재분석 자료의 동서평균 온도를 태양 변동성에 따라 북반구 겨울철을 중심으로 분리하여 분석한 결과이다. 11월부터 3월까지에 걸쳐서 HS와 LS의 차이가 지속적으로 나타나는

곳은 열대지역 성층권 상부 지역으로 확인된다. 이 지역에서 HS와 LS간의 동서평균 온도는 최대 2-3 K 정도인 것으로 판단된다. 이러한 결과는 Lu et al. (2017a, b)에서 분석한 결과와 유사하나, Lu et al. (2017a, b)의 경우 HS와 LS간의 온도 차이를 1-2K 정도인 것으로 분석하고 있다. 이러한 1-2K의 온도 차이는 이미 Gray et al. (2010)의 ERA-40 재분석 자료 (ERA 인터럽 이전의 40년 재분석 자료)를 이용하여 수행한 선행 연구에서 이미 언급된 바 있다.

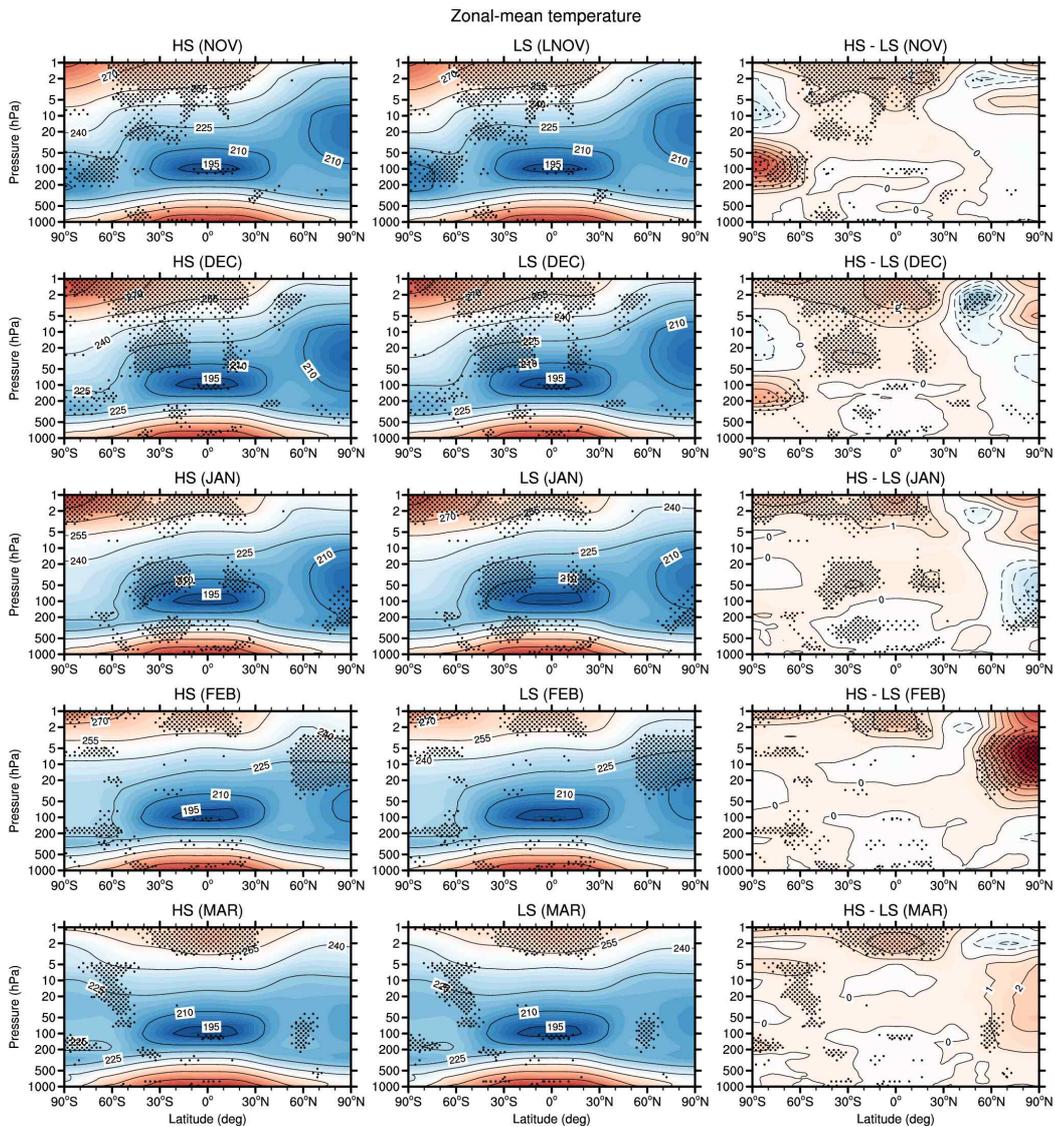


그림 44: 유럽중기예보센터 인터럽 재분석 자료를 이용하여 태양 활동성에 따라 분류된 동서평균 온도. 점으로 표시된 영역은 HS와 LS간의 차이가 95% 신뢰 수준에 대해서 통계적으로 유의미한 지역을 나타낸다. 통계적 유추에는 Boslaugh (2013)의 방법을 사용하였다.

IPCC 5차 보고서에 참여한 모델에서 보인 태양 복사 변동성의 효과는 재분석 자료 분석 결과와 비교해서 많이 약했다 (Mitchell et al., 2015). 또한, Hawkins et al. (2014)은 IPCC 5차 보고서에 참여한 모델 결과에 대한 분석을 통해서 복사 강제력 감소 추세 (태양 복사의 감소나 에어로졸의 반사)와 내부 자연변동성으로 인한 냉각이 1990년 이후 평균 지표

온도 증가세의 둔화에 비슷한 정도로 기여하는 것으로 평가하였다. 최근에는 IPCC 6차 보고에 대비하기 위하여 태양 활동의 변동성을 기후 모델에 포함시키는 표준화된 방법이 제안되기도 하였다 (Matthes et al., 2017). 태양 변동성이 기후 변동성에 영향을 주는 메커니즘은 하향식 메커니즘 (top-down mechanism)으로 현재 널리 받아들여지고 있으며 (Seppälä et al., 2014), 다음과 같이 설명 된다: 태양 활동 변동과 관련하여 열대지역 성층권계면 부근에서 오존에 의한 자외선 흡수량의 변화가 일어나면서 온도 변화가 생기고, 이와 연관되어 성층권 극 제트와 행성파에 의한 자오면 질량 순환의 변동이 발생한다. 자오면 질량 순환을 통해 극지 지표면의 기압을 올리거나 낮아질 수 있고, 이러한 지면 기압 변화는 북극 진동이나 남극 annular mode와 유사한 형태를 나타낼 수 있다 (Ineson et al., 2011; Kidston et al., 2015, Lu et al., 2017a, b).

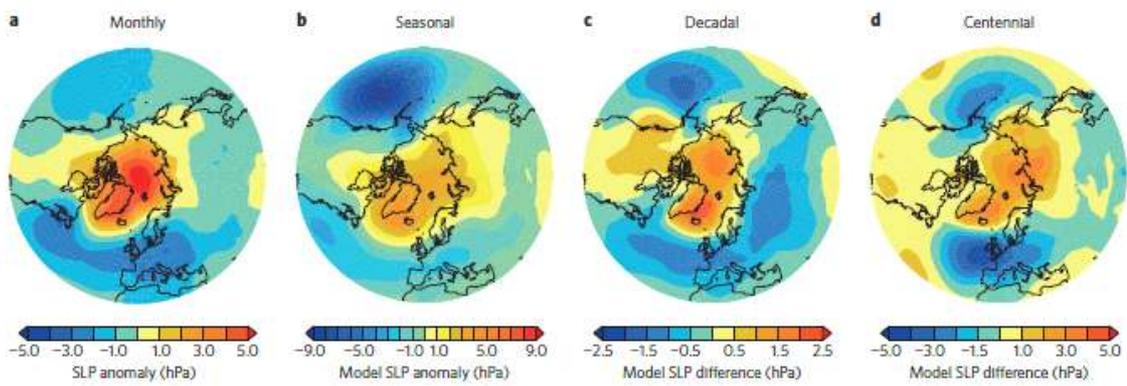
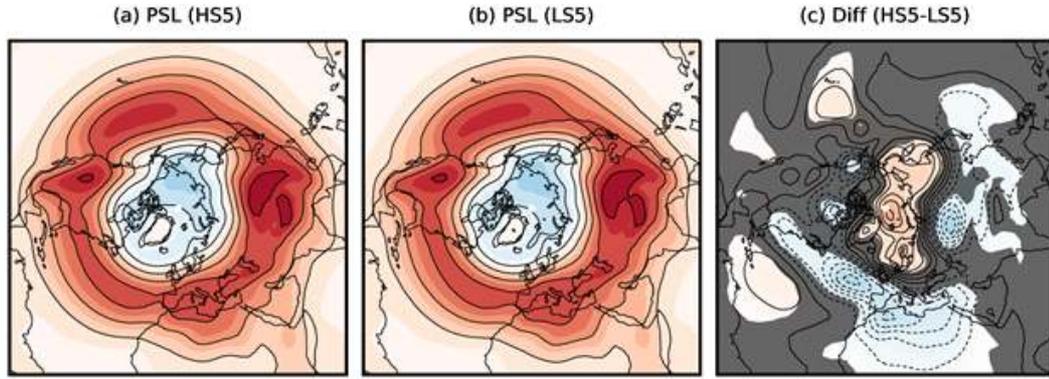


그림 45: (a) 성층권 돌연 상승, (b) 엘리뇨, (c) 태양 변동성, (d) 이산화탄소 증가에 따른 북극 지역 해수면 변화의 패턴 (Kidston et al., 2015).

극지연구소에서 자체적으로 수행한 모델링 연구에서도 태양 변동성에 대한 북극 지역 해수면 기압 패턴은 기존의 연구와 유사하게 고리 형태로 나타나는 것을 알 수 있었다. 늦겨울과 비슷한 상태를 보인 태양 변동성 차이가 적은 HS5/LS5 (HS: High Solar, LS: Low Solar)의 경우에는 극지 성층권 제트가 HS때 약해지면서 성층권의 극향 자오면 순환이 강해지고, 북극 지역 해수면 기압이 증가하는 모습을 확인할 수 있다. 북극 주변 중고위도에서는 상대적으로 해수면 기압이 낮아지는 모습을 보였다. 이는 음의 AO인덱스 때와 비슷하게 HS때 북극 주변의 제트가 LS에 비해서 좀 더 저위도로 치우쳐야 할 것이라는 것을 예상케 한다. 태양 변동성 차이가 큰 HS8/LS8의 경우에는 극지 성층권 제트가 HS때 강해지면서 성층권 극향 자오면 순환이 약해지고, 북극 지역 해수면 기압이 낮아지는 모습을 확인할 수 있다. 해수면 기압 음의 편차 (HS8-LS8)는 북극 지역 뿐 만 아니라, 북대서양 지역 전반으로 확장되어 있는 모습을 보였다. 반면에, 북태평양 지역은 양의 해수면 기압 편차 (HS8-LS8)이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 기압 패턴의 변화로 미루어볼 때, HS8/LS8의 경우, 북대서양 대류권 제트가 HS때 북상하기를 기대할 수 있다.

Sea-level pressure in January (10950 days)



Sea-level pressure in January (10950 days)

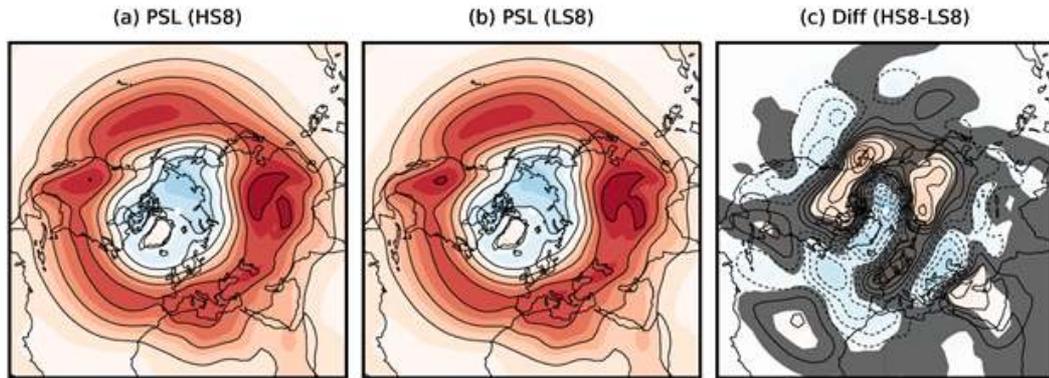


그림 46: (위) HS5와 LS5, 그리고 (아래) HS8과 LS8 실험에 대한 북극 중심의 해수면 기압과 그 차이. 해수면 기압의 등치선 간격은 5 hPa이고 차이에 대한 등치선 간격은 0.1 hPa이다. 차이에서 음의 값은 점선으로 표시되었다. 각 결과는 10950 일에 대해서 평균되었으며, 차이에서 음영 부분은 95% 수준에서 차이를 신뢰할 수 없는 영역을 나타낸다.

태양 활동의 변동성은 기후 시스템의 다양한 내부 변동성 (오존 화학, 성층권 준2년 주기 진동, 엘니뇨, 라니냐)과 상호작용을 하면서 강도의 변화가 나타날 수 있음은 다양한 모델링 연구를 통해 보고되고 있다 (Chiodo et al., 2012, 2014, 2016; Chiodo & Polvani, 2016; Gray et al., 2009; Jin et al., 2019; Lee et al., 2009; Mann et al., 2009; Marsh et al., 2007; Misios et al., 2019). Chiodo & Polvani (2016)에서는 태양 활동이 강한 경우와 일반적인 경우 실험의 비교를 통해서 태양 활동이 지면 근처 온도에 주는 영향에 대한 조사를 수행하였다. 분명히 보이는 것은 지면 근처가 분명히 따뜻해진다는 점이다. 대륙에서 온도 변화가 크고, 해양에서는 그 변화는 조금 작게 나타난다. 이러한 변화는 마치 온실 기체가 지면 근처 온도에 주는 영향과 비슷하다.

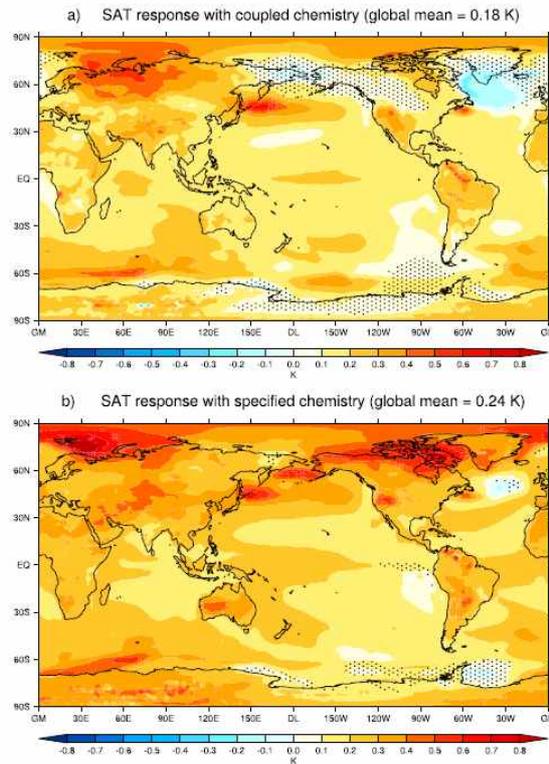


그림 47: (a) 화학 과정이 결합된 경우와 (b) 화학 과정이 결합되지 않은 경우에 대한 태양 활동이 강한 경우와 일반적인 경우에 대한 지표 근처 온도의 차이 분석 (Chiodo & Polvani, 2016).

Jin et al. (2019)는 태양변동성이 아시아 겨울 몬순의 10년 이상의 장주기 기후 변동 (Decadal variability) 미치는 영향을 모델링 연구를 통하여 조사하였으며, 11년 주기 태양

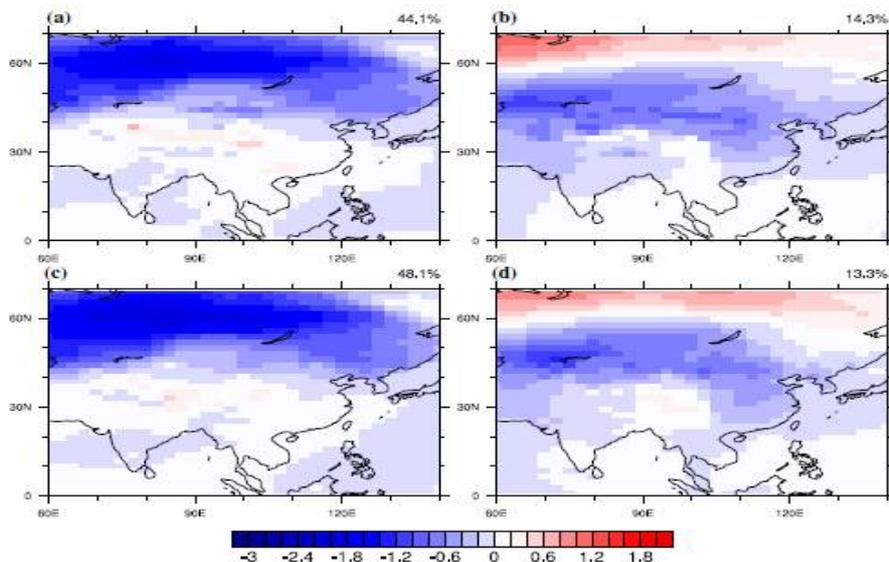


그림 48: (위) 태양 활동의 변동성이 강했던 시기 (AD 1100-1235)와 (아래) 태양 활동 변동성이 약했던 시기 (AD 1400-1535)의 아시아 지역 북반구 겨울 (December-January- February, DJF)의 지면 온도의 가장 주도적인 2개의 경험적 직교 함수의 공간 구조 (Jin et al., 2019).

변동성이 겨울 아시아 몬순의 대표적 모드 (따뜻한 북극, 차가운 시베리아)가 태양변동성으로 인해 증폭될 수 있음을 보였다. Misios et al. (2019)는 11년 주기 태양 활동이 강할 때, 태평양의 워커 순환 (Walker circulation)이 느려질 수 있음을 보고하기도 하였다. 이 역시, 태양변동성이 10년 이상의 장주기 기후 변동에 영향을 줄 수 있음을 나타낸다.

태양 활동이 기후에 주는 영향에 대한 위에서의 설명은 주로 top-down 메커니즘에 대한 것이었다. 즉, 성층권이나 중간권에서의 태양 활동 영향이 대기 대순환과 행성과 및 대기 중력과 등 파동과의 상호작용을 통해서 어떻게 지표면 부근의 변동을 일으킬 수 있는지에 대한 것이었다. 이와는 반대로 bottom-up 메커니즘들도 제시되어 온 바가 있다. 그러나 분명히 아직 이 bottom-up 과정에 대한 연구는 명확한 몇 가지의 이론으로 설명되는 것이 아닌 것으로 보인다 (Maycock & Misiois, 2015). 이런 bottom-up 과정에서의 핵심은 지면이나 해양이다. 특히, 해양은 대기과 비교해서 매우 큰 관성을 갖고 있고, 변화의 시간 규모가 매우 커서, 태양 활동의 변화가 야기할 매우 작은 태양 복사 총량의 변화에 매우 느리게 혹은 매우 미미한 반응만을 보일 수 있다. 실제로, 태양 활동에 의한 복사의 변화에 대해서 해양은 1년 혹은 2년 정도의 시간 지연을 보이면서 반응한다는 연구 결과도 존재한다. 태양 활동이 강했던 과거 시점을 골라 태평양 지역 해수면 온도를 분석하면, 열대지역 동태평양 지역의 해수면 온도가 약 1K 정도 낮게 분석된다 (van Loon et al., 2007). 이 정도의 온도 변화는 태양 활동의 변화에 대한 복사적 반응으로 보기에선 어려울 정도로 상당히 큰 것으로, 태양 활동의 변화와 해양의 변화가 단순한 복사적 관점이 아닌, 다양한 역학 및 열역학적 반응을 통해서 나타난다는 것을 보여준다.

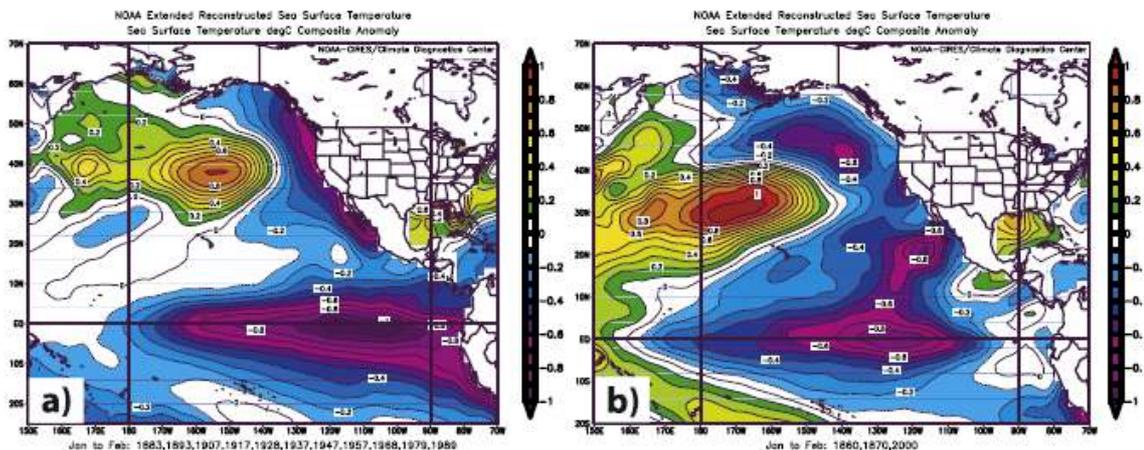


그림 49: 11년 주기의 태양 활동이 극대일 때의 해수면 온도 아노말리의 북반구 겨울 (DJF)에 대한 평균 (van Loon et al., 2007). 왼쪽은 해들리 해수면 온도이고, 오른쪽은 NOAA에서 재구성한 해수면 온도 데이터를 나타낸다. 동태평양에 최대 1K 가량의 음의 아노말리가 나타난다.

동태평양 해수면 온도의 감소를 설명하는 하나의 이론은 Meehl et al. (2008)에서 제시된 바 있다. 태양 활동이 강할 때, 동태평양에서 구름이 없는 지역에서 2 W m^{-2} 정도의 가열이 발생할 수 있다. 이러한 해수면 표면 가열은 동태평양에서 강한 잠열 플럭스를 생성하여 공기를 더욱 습윤하게 만들고, 습윤해진 공기는 무역풍을 통해서 서태평양의 주요 강수 지역으로 전달된다. 그 결과 강수는 더욱 강해질 수 있고, 서태평양에 강한 구름 및 강수 지역이 넓은 지역에 생성되면서 동태평양 지역에서 보상 하강류가 발생하여 더욱 구름이 발생하기 어려워지는 피드백이 존재할 수 있다. 이러한 피드백이 일으키는 무역풍의 강화는 해수를 보다 서쪽으로 이동시키고, 그에 따른 보상으로 동태평양 깊은 바다의 낮은 해수의 용승이 일어나 동태평양의 해수면 온도가 낮아질 수 있다.

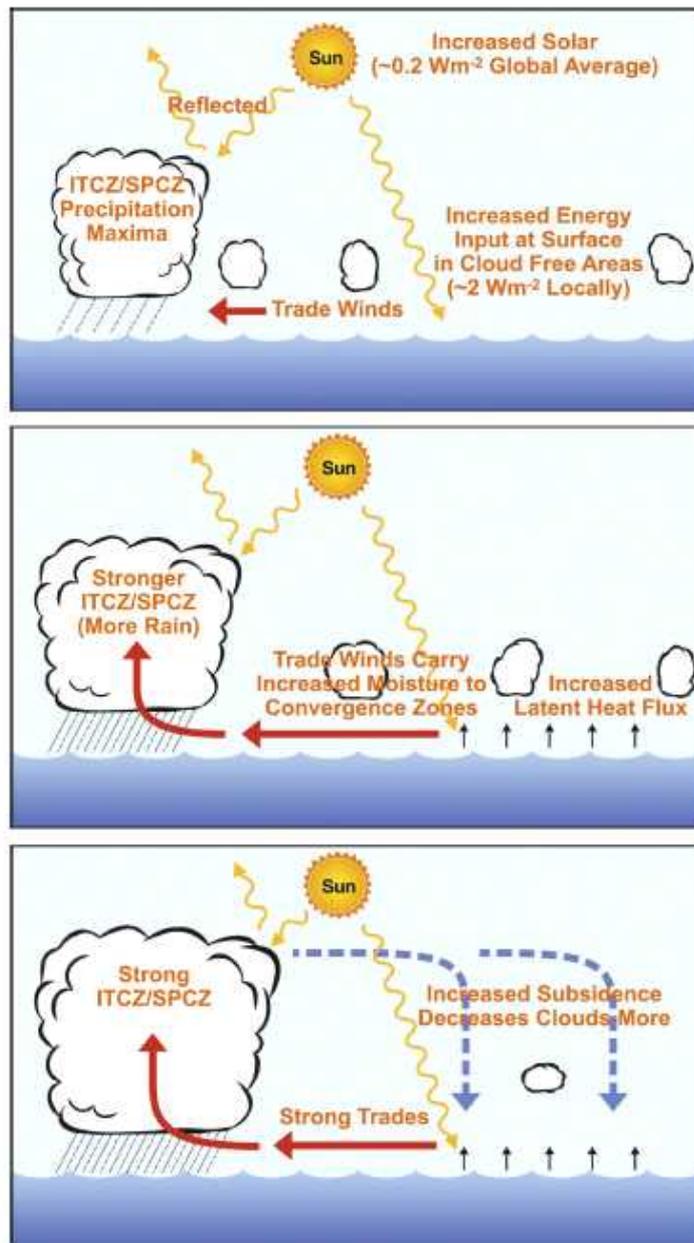


그림 50: 태양 활동 극대기에 열대지역 태평양에서 일어날 수 있는 대기-해양 상호작용의 모식도 (Meehl et al., 2009)

2. 현재 연구 개발의 문제

태양 변동성이 지표 기후에 주는 영향에 있어서 중요한 과정은 대기 순환과 행성과 간의 상호 작용, 그리고 그 과정에서 변화하는 남북 자오면 질량 순환의 변화에 있지만, 중·고층대기에서 행성과 전파 특성을 결정하거나 생성에 관여하는 등 중요한 역할을 하는 것은 대기 중력파이다. 대기 중력파는 보통 열대지역 대류에 의한 중력파가 성층권-중간권에서 강하고, 극지에서는 대류 혹은 전선에 의한 중력파가 중간권 상부에서 강한 구조를 보인다 (Richter et al., 2010; Smith, 2012; Song et al., 2007).

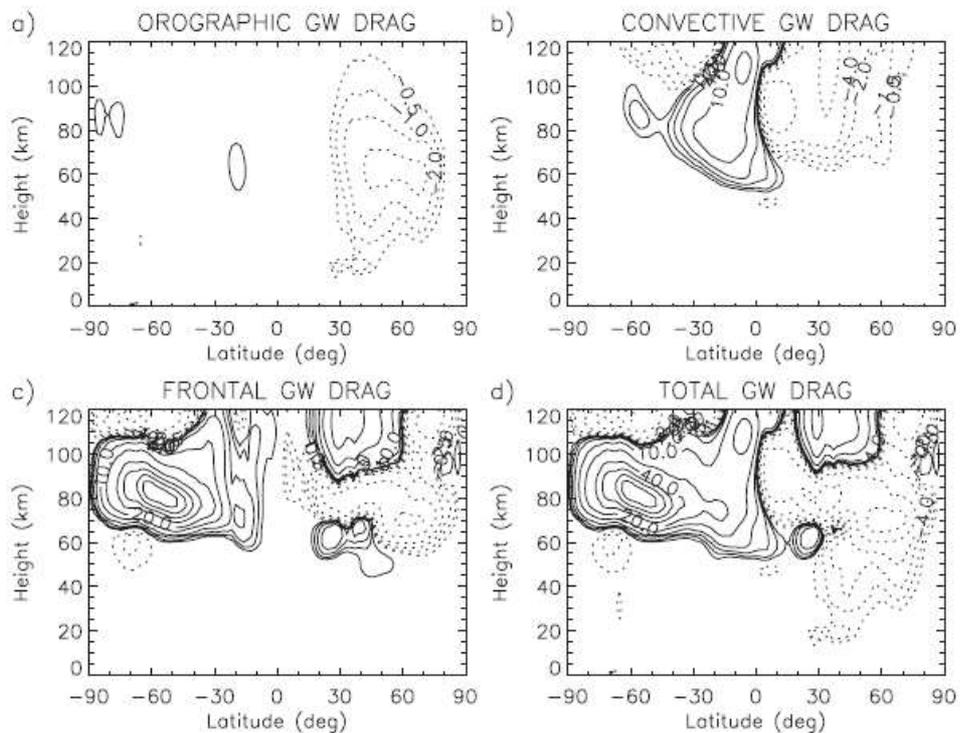


그림 51: 미국 NCAR 전층대기 전지구 기후 모델 (WACCM)에 장착된 3가지 종류 (산악, 대류, 및 전선)의 중력파 항력에 대한 동서 평균된 기후 값 및 총합 (Richter et al. 2010).

극지 중간권 중·상부에서의 대기 중력파 강제력이 성층권에서의 행성과 전파 특성을 결정하는데 중요한 역할을 함과 동시에 그 지역에서 행성파를 생성하는 역할도 할 수 있음은 잘 알려져 있다 (Sato & Nomoto, 2015). 북반구 겨울철 중간권 중간 고도에서에서는 순압 혹은 경압 불안정과 같은 현상이 많이 일어나는데, 이 지역에서 동시에 행성과 강도도 강하게 나타난다. Sato & Nomoto (2015)는 이러한 상관관계를 대기 중력파에 의해 야기되는 대규모 순압/경압 불안정이 행성파를 생성할 수 있는 것으로 설명하고 있다. 이는 행성파가 강한 북반구 겨울철에 행성파에 의해서 극 제트가 약해지면서 동시에 극 쪽으로 이동하는데, 이 때 중간권에서 대기 중력파 항력도 같이 고위도로 이동한다. 그에 따라 중간권 중위도 지역에서 강한 상승 기류가 생기면서 안정도가 높아지는 지역이 발생하고 이

지역 부근에서 대규모 순압/경압 불안정이 강한 지역이 형성되며, 이 지역에서 중간권 행성파가 발생할 수 있다. 이러한 과정은 Holton (1984)의 연구에서 언급했던 대기 중력파에 의한 중간권 행성파의 발생의 현실적인 설명인 것처럼 보인다. 어떤 방식으로든, 대기 중력파는 그 강제력으로 바람 구조를 바꿔서 중간권에서 행성파 전파의 방향을 바꾸는 역할을 함과 동시에, 행성파를 생성하는 역할도 하게 된다.

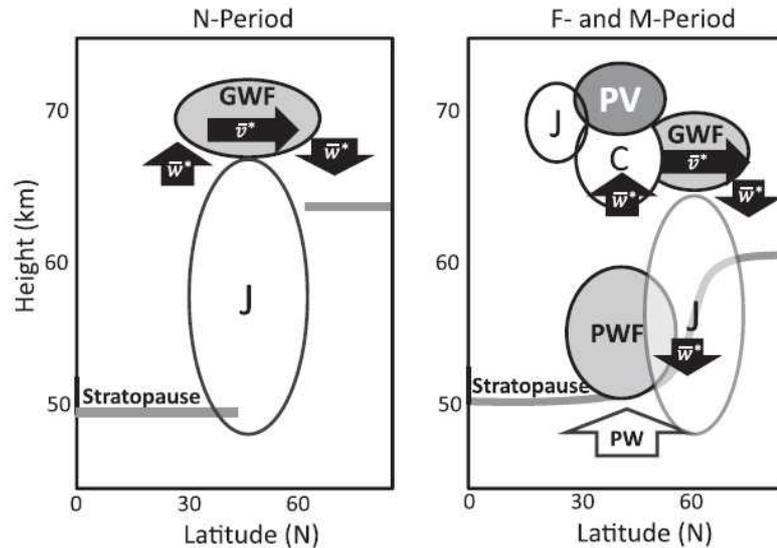


그림 52: (왼쪽) 보통의 정상적인 상태 그리고 (오른쪽) 중간권 상부에서 PV가 강화될 때의 극 제트와 대기 중력파 항력 및 대기 중력파 항력 (GWF)이 유도하는 연직 순환 (\bar{w}^*) (Sato & Nomoto, 2015). 행성파 강제력이 성층권 상부에서 강해지면서 중간권 중부 아열대 지역에 제트의 구조가 다시 발생하고, 대기 중력파 강제력은 극으로 이동.

고위도 지역에서 중요한 대기 중력파는 양 반구 극지에 설치된 여러 관측 기지에서 운영되는 라디오존데, 레이다, 라이더, 혹은 유성레이더를 통하여 연구되어 왔다 (Chen et al., 2013; Chen et al., 2016; Kam et al., 2017; Kim et al., 2004; Moffat-Griffin et al., 2011, 2013; Murphy et al., 2014; Nicolls et al., 2010; Sato & Yoshiki, 2008; Sibuya et al., 2017; Song et al., 2017; Yoo et al., 2018; Reichert et al. 2019). 이러한 관측 분석 결과에서 발견되는 흥미로운 점은 성층권 극 제트의 아래에서 하향으로 전파하는 대기 중력파가 상당한 정도로 존재한다는 것과 성층권 극 제트위의 중간권에서 고주파 대기 중력파 만 아니라 저주파의 관성 중력파도 많이 관측된다는 점이다.

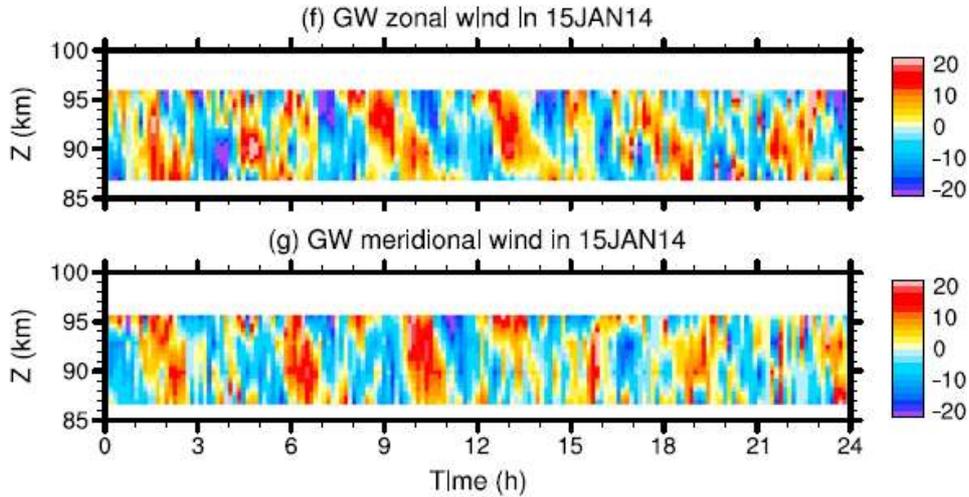


그림 53: 세종과학기지 유성레이더로 관측된 중간권계면 부근의 저주파 관성중력파의 수평 바람 성분에 대한 시간-고도 분포 (Song et al., 2017).

하향 전파하는 대기 중력파는 극 제트로부터 발생한 것일 수도 있지만 (Plougonven & Zhang, 2014; Kim et al., 2016), 대류권에서 생성되고 중·고층대기로 전파하면서 깨지는 과정에서 발생하는 2차 중력파 혹은 단순히 연직으로 반사되는 파동일 가능성도 상당하다 (Chun & Kim, 2008; Kaifler et al., 2017; Kim & Chun, 2009; Kim et al., 2012; Vadas, 2013; Vadas & Becker, 2018; Vadas et al., 2018). 기후 모델에서는 중상부 중간권의 모델 오차 (예, 겨울 극지역에서, 중간권 계면의 고도가 너무 낮고, 중간권 중·하부 온도가 너무 높음; Smith, 2012)가 흔히 존재하는데, 이러한 오차에는 모델의 중력파 항력 과정에 내제된 불확실성이 상당히 기여할 것으로 보인다. 따라서, 중간권 그 이상의 고도에서 중력파 항력 과정에 대한 개선이 필요하며, 이를 위해서는 극지 성층권 혹은 중간권에서의 대기 중력파의 특성에 대한 관측적 연구가 반드시 뒷받침되어야 할 것으로 보인다.

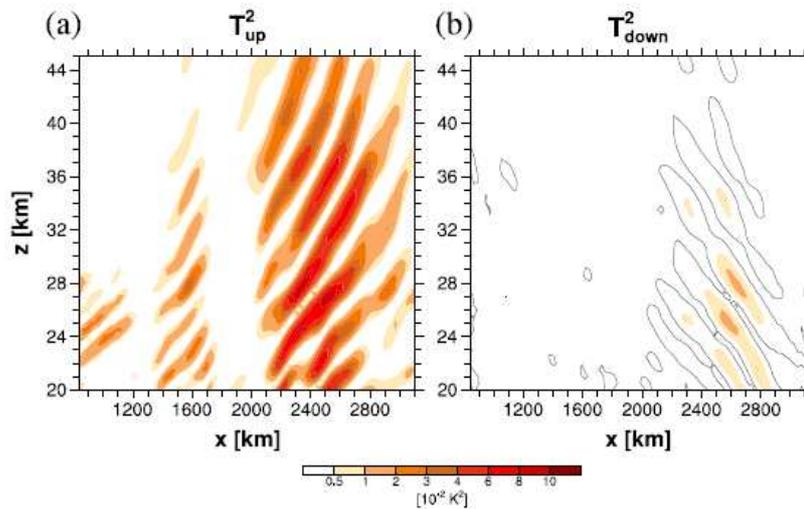


그림 54: 성층권에서 전파하는 중력파 온도 섭동의 (a) 상향 성분 및 (b) 하향 성분의 분리 (Kim et al., 2012).

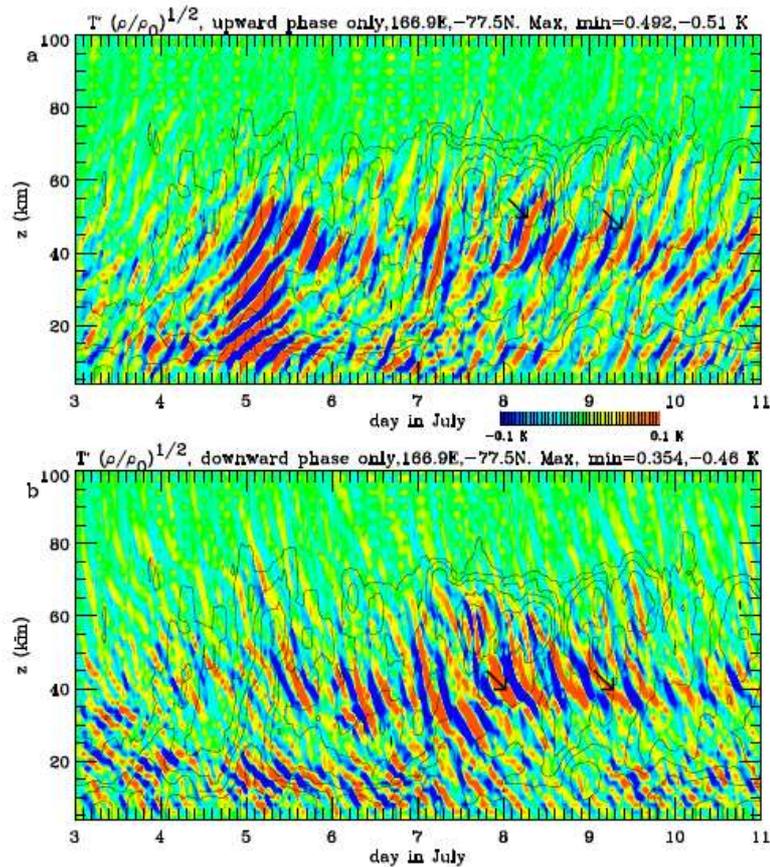


그림 55: 남극 맥머도 기지에서 관측된 2차 중력파에 대한 수치 모의 결과에서 나타난 (위) 상향 전파 중력파 및 (아래) 하향 전파 중력파 (Vadas & Becker, 2018).

극지연구소

3. 대응 방안

극지연구소에서 운영하고 있는 남극 세종기지 주변은 안데스 및 주변 많은 섬들이 유도하는 산악 중력파 (Alexander & Teitelbaum, 2007, 2011)나 남대양 위의 제트·전선에 의한 중력파로 인해 특별히 중력파의 세기가 강한 지역으로 잘 알려져 있으며 (Alexander et al., 2016; Hendricks et al., 2014; Hindely et al., 2015), 그런 이유로 이 지역을 대기 중력파 핫스팟 (hotspot)으로 부르고 있다 (Hoffman et al., 2016). 현재 세종 기지에서는 유성레이더 및 전천 카메라 등의 장비를 활용하여 상부 중간권에서의 바람, 온도 및 대기 중력파를 관측하고 있다 (Lee et al., 2013, 2016, 2018; Kam et al., 2017; Song et al., 2017). 이러한 중력파 관측은 고도 90 km를 중심으로 20 km 정도의 고도 구간에 대한 대기 중력파에 대한 정보를 준다. 하지만, 좁은 고도 구간에 대한 중력파 바람 혹은 파동 형태의 수평·시간 구조 관측은 수치 모델의 중력파 과정의 개선 혹은 검증에 필요한 정보를 제공하지 못한다. 실제로 모델링에 제대로 활용할 수 있는 형태가 되려면 라디오존데 관측과 같이 바람과 온도의 연직 고해상도 프로파일이 관측되어야 한다 (Moffat-Griffin et al., 2011, 2013; Murphy et al., 2014; Yoo et al., 2018). 태양 변동성과 연관되어 보다 현실성 있는 모델링을 위해서 모델의 대기 중력파 과정의 개선이 필요하

다는 관점에서, 중·고층대기를 대부분을 포함하는 고도 영역에 대한 온도와 바람에 대한 연직 고해상도 프로파일 관측이 필요할 것으로 판단된다. 레이더 혹은 라이다를 이용한 연직 고해상도 온도·바람 관측은 미국, 일본, 독일 등 세계 여러 그룹에서 수행하고 있으며 (예, Chen et al., 2013, 2016, Kogure et al., 2017; Sibuya et al. 2017), 최근 독일 그룹은 라이다, 유성 레이더, 중간권 온도 맵퍼 (Mesospheric Temperature Mapper, MTM)등을 동시 활용하여 대기 중력과 특성을 분석한 연구를 수행하기도 하였다 (Reichert et al., 2019).

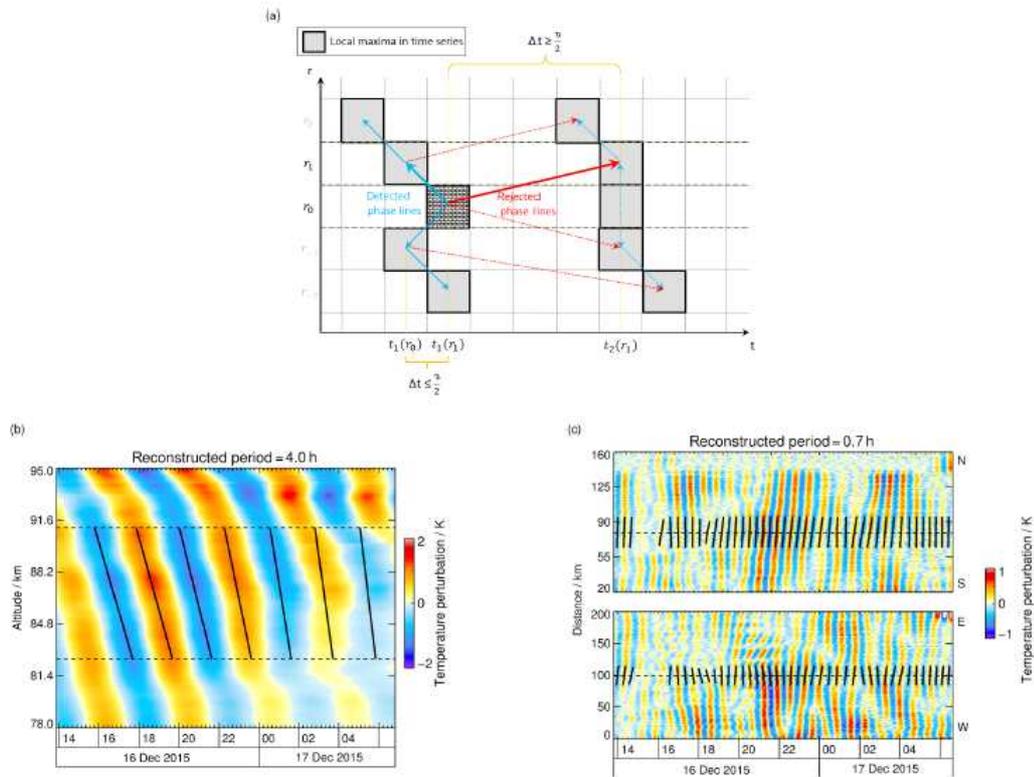


그림 56: 고해상도 라이다 관측으로부터 대기 중력파의 위상 선을 추출해내는 알고리즘에 대한 설명 (Reichert et al., 2019).

극지연구소는 중·고층대기를 포함하는 전지구 기후 모델링 및 대기 중력과 항력 모수화 과정에 대한 노하우를 갖고 있으며 (Hurwitz et al., 2011, 2013; Molod et al., 2012; Song & Chun, 2008; Song et al. 2007, 2018), 따라서 태양 활동 변화가 기후 변동성에 주는 영향 연구를 위해서 기존의 전지구 모델의 중력과 과정을 개선할 수 있는 역량을 갖고 있는 것으로 파악된다. 하지만 모수화 과정의 개선이 단순 튜닝을 넘어서 현실적인 것이 되기 위해서는 모델링에 도움을 줄 수 있는 제대로 된 정보를 제공하는 관측이 이루어져야 한다. 이를 위해서 미국, 일본, 독일 그룹이 활용하고 있는 연직 고해상도 라이다를 구축 활용할 수 있다면, 세계적 수준의 연구 성과를 넘어 관련 분야의 연구에 큰 진전을 이루게 될 수 있을 것으로 판단된다. 연직 고해상도 온도·바람 라이다는 앞서 언급되었듯이 보통 중층대기를 주로 다루는 레일라이 라이다 (Rayleigh lidar; Kogure et al. 2017;

Kaifler et al., 2015; Kaifler et al., 2017; Reichert et al., 2019)와 하부 열권까지도 다루는 Fe 볼츠만 라이더 (Fe Boltzman lidar; Chen et al., 2013, 2016)등이 있다. 레일라이 라이더는 보통 하부 성층권부터 유성 레이더가 관측하는 중간권 상부를 설정할 수 있기 때문에, 중층대기에 관심을 집중하는 한 레일라이 라이더로도 관측을 통한 중력과 모수화의 개선을 다루는데 있어서 적절할 것으로 판단된다.

과거나 미래 태양 활동 변동에 따른 기후 변화의 수치 모의에 있어서는, 앞서 언급했듯이 다양한 어려움이 있다. 우선 태양 복사 총량이나 스펙트럼의 과거 값을 결정하는 근거가 부족하거나 부정확할 수 있으며, 현재의 기후 모델에서 지정해줘야 하는 다양한 파라미터들을 과거의 시점으로 얼마나 정확하게 설정할 수 있는지가 문제가 될 수 있다. 하지만, 극지연구소에서는 빙하 및 퇴적물과 관련된 관측을 생성하고 있고 이를 통해 태양 복사 총량 및 스펙트럼에 대한 과거 재구성에 대한 연구 (Wenzler et al., 2006)가 있으며, 과거 및 미래 기후 모델링을 위한 통일된 방식을 제안하고 결과를 제시한 연구 (Maycock et al., 2015; Ineson et al., 2015; Otto-Bliesner et al., 2016; Owens et al., 2017)들이 있어, 과거나 미래 기후 모의는 실행 가능한 영역으로 판단된다.

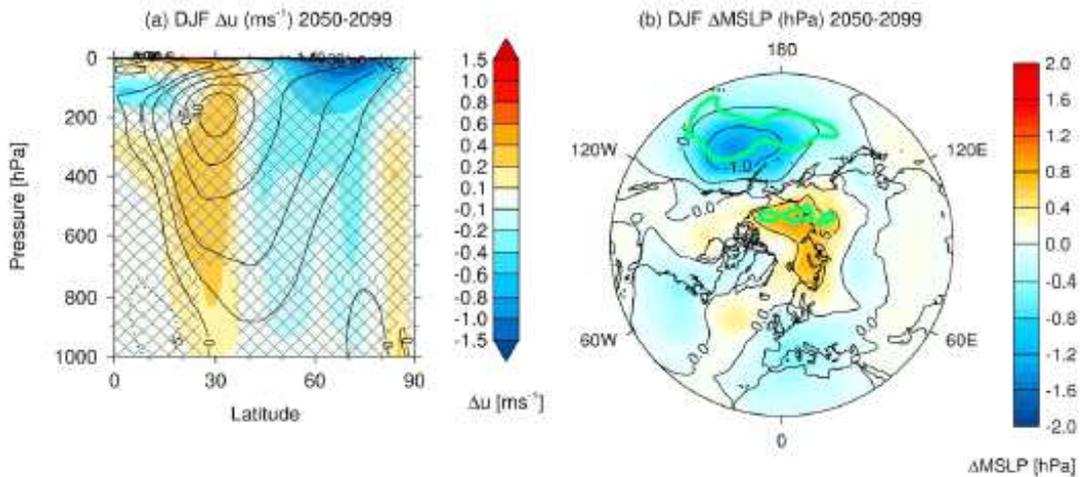


그림 57: 태양 활동을 강하게 준 실험과 평균 상태로 강제한 실험 간의 북반구 겨울철 (a) 동서평균 동서 바람의 차이 및 (b) 북반구 고위도 해수면 기압의 차이 (Maycock et al., 2015). 태양 활동의 강도의 기후적 영향은 전지구 평균값의 차이보다는 지역적 (regional)하게 나타나는 특징이 있다.

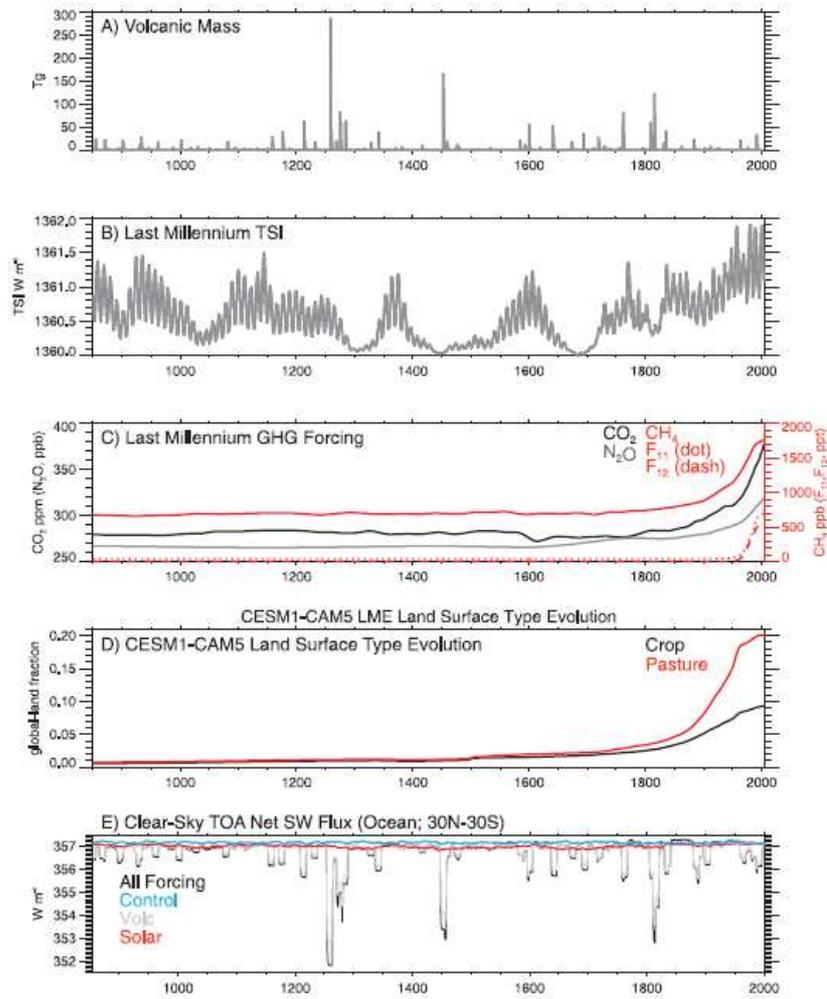


그림 58: CESM_LME (미국 NCAR CESM 모델의 Last Millenium Ensemble) 실험에 사용되는 주요 강제력 [(a) 화산 폭발, (b) 태양 복사 총량, (c) 온실기체 강제력, (d) 지면 형태 변화, 및 (e) 대기 상단 태양 복사 플럭스]의 시간 변화 (Otto-Bliesner et al., 2016).

제 3 장 연구 개발 추진 방안

태양 활동 변화가 지구 기후 시스템에 미치는 영향은 저층 대기에서 고층 대기에 이르는 광범위한 영역에서 다양한 물리-화학적 과정을 통해 일어난다. 본 사업에서는, 최근의 연구 결과들을 바탕으로, 현재 기후 모델에서 매우 단순화 하여 적용하고 있는 세 가지의 핵심 요소들에 대해 각각의 영향 및 기작을 규명하고 기존의 기후모델에 적용하여 개선한 기후모델이 기존의 모델 결과보다 더 신뢰도 높고 정확함을 제시하여, 대기 파동, 고에너지 입자 유입, 그리고 태양 활동 변화 등이 극지 및 지구 기후 시스템에 미치는 영향에 대한 이해를 높이고자 한다. 또한 현실에 맞게 개선한 기후모델에 대해 고기후 재현을 통한 검증도 수행하여 향후 여러 가지 태양 활동 예측값에 반응하는 다양한 시나리오의 극지 및 전지구 기후 변동에 대한 관측적·수치적 연구에 활용하고자 한다.



그림 59 연구개발 추진 체계에 대한 개요도

제 1 절 관측기반 극지 중·고층대기 순환 및 대기 파동 3차원 전파 연구

1. 연구 개발의 최종 목표

- 극지 중·고층대기 고해상도 온도·바람 자료 확보와 대기 중력파 모수화 개선
 - 대기 중력파 핫스팟에서의 중·고층대기 대기 중력파 특성 이해
 - 극지 중·고층대기 온도·바람 및 대기 중력파 자료 국제 데이터 베이스 구축
 - 기후 모델 내 대기 중력파의 전지구 기후 시스템에 대한 기여도 개선
 - 논문 발표 : SCI(E) 상위 30% 이내 논문 4편 이상

2. 단계별 목표

- 1단계 : 극지 중·고층대기 온도·바람 프로파일 라이다 관측 및 운영
 - 라이다 관련 극지 중·고층대기 선행 연구 및 라이다 운영 기술 확보
 - 극지 중·고층대기 온도·바람 고해상도 라이다 시스템 구축 및 시험 운영
 - ARISE 및 ANGWIN 등 국제 관측 네트워크 참여 및 공동 연구 수행
 - 수치모델 내 다양한 성분의 오차 산출 및 관측과의 차이 분석
- 2단계 : 라이다 관측을 통한 중력파 특성 연구 및 모델 중력파 과정 개선
 - 세종과학기지 라이다 관측 자료 활용 대기 중력파 특성 연구
 - 남극 다른 지역 라이다 관측 비교를 통한 대기 중력파의 지역적 특성 연구
 - 지상 관측으로 얻은 대기 중력파 특성과 수치 모델 모수화 결과 비교 연구
 - 대기 파동의 3차원 전파를 적용한 수치모델 확보 및 적용 전의 결과와 비교 분석
 - 개선한 수치모델 활용 극제트 변동성과 중위도 기후요소 간 상관성 통계적 분석
 - 극제트 변동 시 발생하는 동서 방향 비대칭성 원인 분석과 비대칭성이 중위도 지역 경도별 영향력 규명
 - 과거 극제트 변동 시 중위도의 지역별 기후요소 변화 사례들에 대해 분석
 - ARISE 및 ANGWIN 등 국제 관측 네트워크를 활용한 공동 연구 성과 창출

3. 연구 내용 및 범위

- 라이다 관측 및 운영 기술 확보
 - 라이다 활용한 선행 연구 조사 및 남극 대기 중력파 연구 파악
 - 라이다 운영 및 자료 분석 기술 확보
- 라이다 자료 활용 수치 모델 개선
 - 위성, 지상 관측 자료 비교를 통한 라이다 자료 검증
 - 관측된 대기 중력파 특성과 수치 모델 모수화 비교

- 모델-관측 비교 결과로부터 모델의 대기 중력과 요소 개선

○ 라이다 관측 네트워크 구성 및 공동연구 수행

- ARISE 및 ANGWIN에서의 대기 중력과 관측 지속
- 표준화 분석 기법 기반 관측 자료 분석 및 공동 연구 수행

○ 위탁 연구

- 전지구 전층대기 수치모델 전문 연구 기관
- 전층대기 수치모델 내 오차 요소에 대해 다양한 수치모델 별 비교·분석
- 관측 기반으로 규명한 대기 파동의 특성 및 기작을 수치모델에 적용 연구

4. 연구 추진 전략 및 체계

- 세종기지 중·고층대기 고해상도 온도·바람 관측 시설 구축 타당성 검증
- 기존 남극 지상 관측망과의 차별화 및 관측 영역 보완 방법 제시
- 남극 대기 중력과 관측 네트워크인 ANGWIN 내 라이다 관측 자료 확보
- 관측 자료 기반 수치 모델 내 중력과 모수화 요소 개선



그림 60 라이다 시스템을 활용한 수치모델 핵심요소 개선에 대한 개요도

제 2 절 극지 고에너지 입자 유입에 따른 화학 과정과 기후에 미치는 영향 연구

1. 연구 개발의 최종 목표

- 태양활동 변동에 따른 고에너지 입자 유입 변화와 고에너지 입자에 의한 극지 중·고층 대기 변화 수치모델 비교 분석 및 개선
 - 태양활동 변화에 의한 고에너지 입자 유입 변화 특성 연구
 - 고에너지 입자 유입에 의한 극지 중·고층대기 변화 특성 이해
 - 위성 관측 자료를 통해 고에너지 입자 유입에 의한 극지 중·고층대기 변화 모델링 비교 연구
 - 기후 모델 내 고에너지 입자 유입에 의한 전지구 기후 시스템에 대한 기여도 개선
 - 논문 발표 : SCI(E) 상위 30% 이내 논문 4편 이상

2. 단계별 목표

- 1단계 : 태양 중-고에너지 입자 유입에 의한 극지 중·고층대기 변화 수치모델링
 - 태양 중-고에너지 입자 유입에 의한 극지 고층대기의 이온화율 자료 확보
 - 극지 중·고층대기의 화학 과정 및 역학적 변화에 대한 전지구 수치 모델링
 - 전지구 기후 모델을 통한 태양 고에너지 입자 유입에 의한 기후 변동성 메커니즘 규명
- 2단계 : 극지 중간권의 대기 화학 변화 과정 개선
 - 기후 모델 내 극지 중간권에서 고에너지 입자에 의한 대기 화학 변화 과정의 개선
 - 위성 관측 자료를 활용하여 개선된 전지구 기후 모델 결과 비교 연구
 - 고에너지 입자 유입에 의한 전지구 기후 변동성의 예측 능력 향상

3. 연구 내용 및 범위

- 태양 중-고에너지 입자 유입에 의한 극지 고층대기의 이온화율 적용을 통한 모델링 개선
 - 태양 중-고에너지 입자 유입에 의한 대기 이온화율 정보 및 처리 기술의 확보
 - 태양 중-고에너지 입자 유입에 의한 극지 고층대기 화학 및 역학적 변화 모의 능력 개선
 - 위성 관측 자료를 활용하여 개선된 모델의 모의 능력 검증
- 중간권 대기 화학 모델 확보 및 화학 변화 과정 개선
 - 대기 화학 모델을 사용하여 전지구 기후 모델의 대기 화학 반응 과정 개선
 - 화학 모델과 전지구 기후 모델의 통합을 통해 기후 변동성의 예측 능력 향상
 - 위성 관측 자료와 비교 연구를 통해 태양 변동성에 의한 기후 변화의 영향 제시
- 국내외 협력을 통한 자료, 모델 확보 및 공동 연구 수행

- 핀란드 기상청 (FMI), 소담퀵레 지구물리 연구소 (SGO)와 협력을 통해 대기 화학 모델 확보
- 핀란드, 뉴질랜드와의 협력을 통해 태양 변동성에 의한 기후 변화 공동 연구 수행
- 핀란드, 뉴질랜드와 태양 고에너지 입자 유입에 의한 기후 변화 모델링 관련 협력

4. 연구 추진 전략 및 체계

- 중-고에너지 입자 유입에 의한 극지 고층대기 변화 모델링 개선
- 중간권 화학 반응 과정을 통한 전지구 기후 모델 능력 향상
- 국내외 전문가와 협력 (FMI, SGO, 오타고 대학교) 및 공동연구
- 과거, 현재, 미래의 기후에 태양 고에너지 입자 유입이 미치는 영향 이해

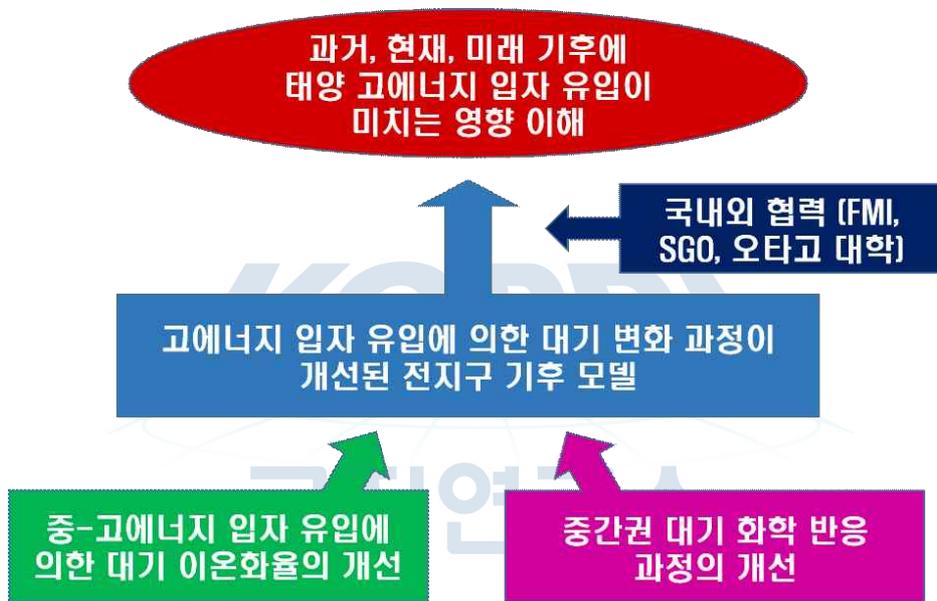


그림 61 극지방 고에너지 입자 유입에 의한 중층대기 변동성 연구에 대한 개요도

제 3 절 태양 복사 변화가 지표 기후 변동성과 대기 파동에 미치는 영향 연구

1. 연구 개발의 최종 목표

- 기후 수치모델을 통한 태양 변동성이 극지 및 전지구 기후 변동에 미치는 영향 연구
 - 기후 모델에 사용되는 태양 복사 지수 비교·분석 및 각 지수 별 대기 파동의 차이 분석
 - 개선된 모델 활용 산업화 전후 기후 모델링에서 나타나는 태양 변동성 효과 연구
 - 과거 및 현재 태양 활동에 의한 기후 변동으로의 영향력 수치 모델링
 - 과거, 현재, 미래 기후 모델링을 통한 태양 변동성의 기후 영향 및 메커니즘 규명
 - 논문 발표: SCI(E) 상위 30% 이내 논문 4편 이상 (NSC급 논문 포함)

2. 단계별 목표

- 1 단계 : 기후 모델 내 태양 변동성 관련 핵심 물리 과정의 개선
 - 태양 복사 관측이 보다 정교하게 반영된 태양 복사 과정 개선
 - 연직 고해상도 온도·바람 자료를 활용한 대기 중력과 과정 개선
 - 고에너지 입자 이온화 과정 및 고층대기 화학 반응 과정 개선
- 2 단계 : 기후 모델링을 통한 태양 변동성의 기후 영향 이해
 - 산업화 전후에 대한 기후 모델링을 통한 태양 변동성 영향 및 메커니즘 이해
 - 과거 태양 극소기에 대한 모델링을 통한 태양 변동성의 기후적 효과 이해
 - 미래 태양 변동 예측을 이용하여 모델링을 통한 태양 변동성의 미래 효과 제시

3. 연구 내용 및 범위

- 태양 변동성과 연관된 핵심 물리과정 개선
 - 기후 모델 내 태양 복사, 대기 중력과, 고에너지 입자-화학 과정 개선 및 장차
 - 개선된 기후 모델을 이용한 최근 30년 기후 실험을 통한 모델 검증
 - 개선된 모델의 성능 및 오차에 대한 분석
- 산업화 전후, 과거, 및 미래에 대한 기후 모델링을 통한 태양 변동성 효과 연구
 - 산업화 전후에 대한 표준적인 기후 실험 수행을 통한 태양 변동성 효과 연구
 - 과거 태양 극소기에 대한 기후 모델링 수행을 통한 태양 극소기의 기후적 영향 이해
 - 미래 태양 변동이 적용된 기후 모델링을 통한 태양 변동성의 향후 기후에의 영향 제시

- 국내외 협력을 통한 물리 과정 개선 및 기후 영향에 대한 공동 연구 수행
 - 영국 극지 연구소 (BAS)와 태양 변동성과 관련 파동 역학 관련 협력
 - 미국 국립 대기 연구소 (NCAR)와 대기 중력과 모수화 및 전지구 모델링 관련 협력
 - 영국 기상청과 태양 변동성 모델링 관련 협력

4. 연구 추진 전략 및 체계

- 태양 복사, 대기 중력과, 고에너지 입자 및 화학 과정의 개선
- 태양 변동성 관련 핵심 과정이 개선된 전지구 기후 모델
- 국내외 전문가와 협력 (BAS, NCAR, UKMO) 및 공동연구
- 과거, 현재, 미래 기후에 태양 변동성이 미치는 영향 이해

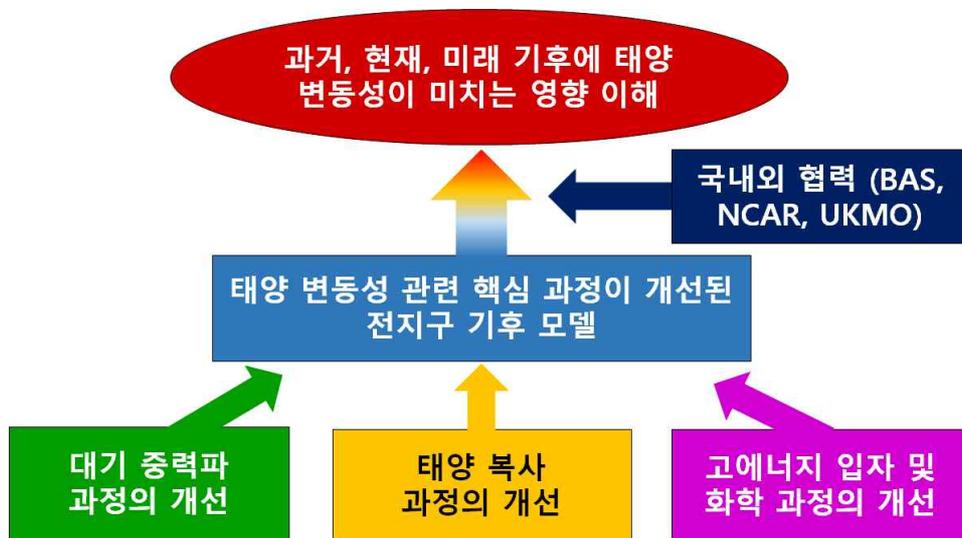


그림 62 기후모델 내 핵심요소들의 개선 연구에 대한 개요도

제 4 절 추진체계 및 로드맵

1. 추진체계

- 본과제의 성공적인 수행을 위해서는 국내 유관기관의 특화된 강점을 살려서 각 세부 주제에 해당하는 연구를 수행하는 것이 필요
 - 극지연구소
 - : 본과제 총괄. 다년간 극기지에서 장비 설치, 운영 등의 노하우를 바탕으로 대기과동 3차원 관측 시스템 (라이다) 구축, 시험운영, 자료검증, 분석 및 연구.
 - : 기존 2차원 관측 자료를 포함하여 관측 기반 중·고층대기에서의 대기 과동 3차원 전파 특성, 대기 과동 간 상호작용 및 극제트로의 영향력과 기작 규명 연구
 - : 전층대기 기후모델에서의 고에너지 입자 유입 영향력을 진단 및 개선하기 위해 관측과 수치모델 결과의 비교 연구
 - : 현재 참여 중인 국제 관측 네트워크 ANGWIN을 비롯하여, SCAR 산하 워킹 그룹인 GRAPES에 공동연구 제안 및 주도
 - 연세대학교
 - : 기후관련 수치모델 연구를 중점적으로 수행하기 때문에, 현재 널리 사용되고 있는 WACCM 및 WACCM-X 등 다양한 수치모델을 활용한 분석 연구
 - : 대기 과동의 3차원 전파와 관련하여 관측 결과와의 비교를 위한 과동 이론 연구 및 ray-tracing 모델 연구 수행
 - 천문연구원
 - : 태양복사 관측 자료를 바탕으로 다양한 태양복사 지수에 대해 수치모델로의 적합성 비교·검증 연구
 - : 태양복사 파장 범위 별 대기로의 영향력 진단 공동연구

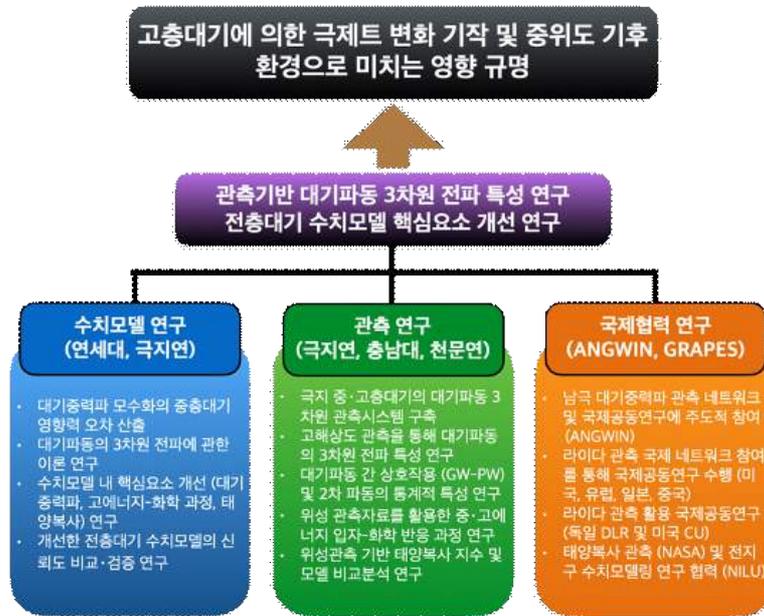


그림 63 추진체계

2. 로드맵

- 본 기획과제에서는 2단계 (각 단계별 3년)로 본과제의 로드맵 수립
- 라이다 시스템은 제작에만 약 1년 정도 걸리는 대형 시스템으로, 남극 세종과학기지에 구축을 완료하기 위해서는 두 하계시즌이 소요될 것으로 예상 됨
- 고도별 고해상도 중성대기 바람 관측을 위해서는 라이다 시스템에 두 개의 레이저가 사용되어야 하기 때문에 계약 시 제조사와의 협의를 통해 운송 및 현장 테스트 계획 수립 필요
- 1, 2단계별 로드맵

최종목표	고층대기에 의한 극제트 변화 기작 및 중위도 기후환경으로 미치는 영향 규명	
구분	1단계 (3년)	2단계 (3년)
관측기반 고층대기에 의한 극제트 변화 연구	<ul style="list-style-type: none"> · 극지역 중·고층대기 온도 및 바람 관측용 고해상도 지상 관측시스템 구축 및 시험 운영 · 라이다 시스템 운영 기술 확보 및 자료 검증에 위한 비교·분석 연구 · 중간·고에너지 입자 유입에 의한 극지방 중·고층대기 화학변화 연구 · ARISE & ANGWIN 등 국제 관측 네트워크에 주도적 참여 및 국제 공동연구 수행 	<ul style="list-style-type: none"> · 세종과학기지 지상 관측자료 활용 대기중력파 3차원 전파 특성 연구 · 대기 파동 및 배경 바람 사이의 상호작용과 2차 파동의 전파 특성 연구 · 지상관측으로 얻은 대기중력파 특성과 수치모델 모수화 결과 비교 연구 · ARISE & ANGWIN 등 국제 관측 네트워크에 참여 및 국제 공동연구 지속 수행
전지구 전층대기 기후모델 핵심요소 개선 및 활용	<ul style="list-style-type: none"> · 대기파동의 3차원 전파에 관한 이론 연구 · 대기중력파 모수화의 중·고층대기 영향력 오차 산출 · 다양한 태양복사 모델 및 지수 비교·분석 연구 · 태양활동에 의한 극지방 고에너지 입자 유입 변화가 중·고층대기에 미치는 영향 수치적 연구 · 전층대기 화학결합 수치모델링용 서버 구축 	<ul style="list-style-type: none"> · 핵심요소를 개선한 수치모델을 활용하여 과거 기후변동성 재현 연구 · 개선한 수치모델 활용 극제트의 변화가 중위도 지역에 미치는 영향 및 기작 연구 · 태양변동성 예측에 관한 다양한 결과를 적용하여 미래 극지 기후 변화 시나리오에 대한 모델링 연구

그림 64 총 2단계로 계획한 본사업의 로드맵

3. 연차별 세부 연구목표 및 연구내용

단계	년도	세부연구목표	연구내용	예산 (안)
1단계	Y-1	○ 극지 중·고층대기 3차원 관측 시스템 구축 ○ 기후모델 내 고층대기 변화 핵심요소 분석	- 남극 기지 라이다 운영 현황 및 국제 네트워크 세부 조사 - 라이다 시스템 운영 기술 확보 - 현재 기후모델에 탑재된 태양복사 파장별 모델 및 지수 분석 - 전층대기 수치모델용 서버 구축	17억원
	Y-2	○ 극지 중·고층대기 3차원 관측 시스템 구축 ○ 기후모델 내 고층대기 변화 핵심요소 분석	- 라이다 시스템 1단계 설치 및 테스트 - 위성 및 지상관측 자료와의 비교를 통한 라이다 초기자료 검증 - 중간 및 고에너지 입자 유입에 의한 극지 중·고층대기 화학변화 연구	19억원
	Y-3	○ 대기파동의 3차원 전파 특성 연구 ○ 기후모델 내 고층대기 변화 핵심요소 분석	- 라이다 시스템 구축 완료 및 운영 - 대기 파동의 2차원 및 3차원 전파에 대한 이론적 연구 - 현재의 기후모델에 적용하고 있는 대기중력과 모수화 분석 및 오차 산출 - 극지방 중간 및 고에너지 입자 유입에 의한 중·고위도 대기 순환 변화 연구	18억원
2단계	Y-1	○ 대기파동의 3차원 전파 특성 연구 ○ 기후모델 내 핵심요소 개선	- 대기중력과 및 행성파의 3차원 전파 특성 분석 - 기후모델에 태양복사 지수 및 중간·고에너지 입자에 의한 화학변화 과정 적용	14억원
	Y-2	○ 대기파동의 3차원 전파가 극제트에 미치는 영향 연구 ○ 개선한 기후모델 검증	- 대기파동과 배경 바람의 상호작용 및 2차 파동의 특성 분석 - 기후모델에 대기중력과 및 행성파의 3차원 전파 기작 적용 - 개선한 기후모델 결과와 3차원 관측 결과 비교·분석 - 개선한 기후모델 활용 과거 기후변동성 재현 연구	12억원
	Y-3	○ 극지역 대기파동이 중·고위도 대기순환에 미치는 영향 연구 ○ 극제트 변동성과 중위도 기후인자 변화의 상관성 연구	- 극지역 대기파동 활동의 경도별 차이 분석 및 인접 중위도로의 영향력 수치적 진단 - 중·고위도 지역 대기중력과 활동에 의한 대기 순환 변동의 수치모델 연구 - 극제트 변화에 반응하는 중위도 기후인자의 변화에 대해 기존 기후모델 결과와 비교·분석 - 학계에 제시된 태양변동성 예측 결과를 적용한 미래 극지기후 변화 모델링 연구	11억원
합 계				91억원

4. 예산계획 (안)

	1단계			2단계			합계
	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5	Y-6	
라이다 시스템	700	700	600				2,000
기존 장비 업그레이드				100	100		200
수치모델용 서버	200	100	100	100			500
위탁연구비	200	300	300	300	300	300	1,700
외부인건비	200	300	300	400	400	400	2,000
출장비	100	100	100	100	100	100	600
기타	300	400	400	400	300	300	2,100
합계	1,700	1,900	1,800	1,400	1,200	1,100	9,100

- 라이다 시스템 : 라이다 시스템은 기본적으로 레이저 1개와 2개의 수신 안테나로 구성. 기본 시스템은 고도별 온도 관측만 가능. 고도별 중성대기 바람을 관측하기 위해서는 특정 각도를 두고 두 개 이상의 레이저가 각각 송출되어 3개 이상의 수신 안테나에서 반사 신호를 수신해야 함. 단일 레이저의 라이다 시스템이 통상 6~7억 정도이고 본 과제에서 구축 계획인 라이다 시스템은 3개의 레이저가 가능한 플랫폼 기반의 2개 레이저를 사용하는 시스템으로 부대비용 고려 약 20억원으로 계획 (현재 남극의 맥머도 기지에서는 3개의 단일 라이다 시스템을 운영하고 있음)
- 기존 장비 업그레이드 : 3차원 대기 파동 관측에 함께 활용할 기존 2차원 관측 장비들이 2007년~2013년도에 도입된 장비로서 본 사업의 2단계를 수행할 시기 즈음엔 노후화로 인해 주요 파트 업그레이드가 필요
- 수치모델용 서버 : 전지구 전층대기 수치모델링은 고사양의 리로스가 필요하고, 모델링 결과로 얻게 되는 데이터들은 매우 방대한 양이기 때문에 전용 고사양의 서버 도입 필요
- 위탁연구 : 효율적이고 성공적인 본사업 수행을 위해 국내 전문 기관 별 강점을 바탕으로 위탁연구 수행
 - 연세대학교 : 대기 파동의 2차원 및 3차원 전파에 대한 이론 연구. 중·고층대기 영역에서의 대기 파동에 대해 Ray-tracing 및 전층대기 기후모델을 활용한 영향력 연구 전문
 - 충남대학교 : 2차원 관측을 통한 극지 MLT (Mesosphere and Lower Thermosphere) 지역에서의 대기중력과 영향력 연구
 - 천문연구원 : 태양 관측, 태양복사 지수, 태양활동성에 대한 예측 등의 연구 전문.

제 4 장 연구 개발의 활용방안

1. 핵심 요소를 개선한 전지구 전층대기 화학결합 수치모델

- 태양 복사, 대기 중력과, 고에너지 입자에 의한 화학 물질 생성 등 수치모델 내 태양 활동 관련 핵심 요소들을 개선하고 기존 수치모델과의 비교·분석을 통해 수치모델의 향후 개선 방향 제시
- 중·고층대기 순환 및 구성 성분의 화학적 변화·수송에 중요한 작용을 하는 대기 중력과의 특성 이해를 통한 보다 정밀한 화학 물질 수송을 위한 수치 모델 대기 중력과 과정의 개선 방향 제시
- 개선된 전지구 전층대기 화학결합 수치모델에 상세한 극지역 구름 생성 과정을 결합하여 관측 자료가 적은 극지역 기후 예측에 활용
- 태양 물리학 혹은 해양 퇴적물이나 빙하 시료를 연구하는 고기후학과의 협력을 통해, 과거 동위 원소 (^{14}C 나 ^{10}Be) 기반 태양 활동 및 기후 자료를 활용한 수치 모델의 과거 기후 재현 성능 검증 및 미래 기후 모델 정립을 위한 다학제간 연구
- 태양 변동성과 연관되어 개선된 모델과 해양 및 얼음 (해빙 및 육빙)에 대한 모델링 컴포넌트를 결합시켜 급격한 극지 온도 상승, 폴리냐*의 변화, 및 극지 동토**의 변화와 연관된 극지 주변의 기후 변화에 대한 보다 종합적인 이해
 - * 폴리냐 (Polynya): 해빙에 둘러싸인 노출된 해수면 (해빙이 국지적으로 제거된 영역)
 - ** 동토 (Permafrost): 2년 혹은 이상의 기간에 토양 온도가 0°C 이하인 토양 지역
- 전리권과 열권을 완전하게 포함하는 확장된 전층대기 모델을 이용하여, 태양 활동의 변동이 고도 약 600 km 아래에 대기가 존재하는 전체 대기층 (대류권, 성층권, 중간권, 전리권, 열권)에 미치는 영향을 살펴보기 위한 기초 자료로 활용

2. 고위도 중·고층대기 대기 중력과 종합 관측망 활용 연구 확대

- 현재 남극 세종과학기지에서 운영하고 있는 전천카메라, 2차원 중간권 온도 관측기 (2021/2022 하계기간에 설치 예정), 페브리-페로 간섭계, 유성 레이더, 전리권 교란 감시기, 자력계 등의 장비에 더해 고해상도 중·고층대기 바람 및 온도 관측용 라이다를 구축하여 세종과학기지를 남극 대기 중력과 종합 관측시스템을 운영하는 거점 기지로 활용
- 서남극의 맥머도 기지, 동남극의 쇼와 및 중산 기지 라이다와 함께 남극 반도의 세종과학기지 라이다를 활용하여 남극에서의 위치별 대기 중력과의 특성 차이 규명에 활용
- 극지역 대기 중력과 관측 네트워크에 참여 중인 국가들의 대기 중력과 관측 자료를 활용하여 극지역 상공 대기 중력과의 3차원 전파 과정 추적 연구 및 중·고층대기에 주는 영향의 정량적 평가
- 남극 장보고과학기지에서 전리권, 열권 관측 자료를 활용하여 대기 중력과 관측 영역 확대
- 전리권-열권에서의 대기 중력과 활동성 검증을 위한 북극 다산과학기지, 스웨덴 키루나 관측소의 열권 중성대기 바람 및 이온 바람 관측 자료 추가 활용
- 현재 극지연구소에서 운영 중인 남북극 지상 관측 인프라를 통합적으로 활용한 남북반구 고위도 지역 대기 중력과 특성의 반구별 유사점 및 차이점 분석
- 전 세계 묀온 및 중성자 지상 관측 자료와 기상 위성의 구름 자료를 활용하여 지표 기상, 기후 변화에서 우주선의 역할에 대한 기존 연구 결과 추가 검증
- 우주기상 연구를 주도적으로 수행 중인 천문연구원의 중·저위도 관측 자료 및 기상청의 지표 부근 대기 기상 자료를 활용한 확장된 위도-고도 영역에서의 기후 요소 통합 관측 및 예보 정확도 개선

제 5 장 참고문헌

- Alexander, M. J., & Teitelbaum, H. (2007). Observation and analysis of a large amplitude mountain wave event over the Antarctic peninsula. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *112*, D21103. <https://doi.org/10.1029/2006JD008368>
- Alexander, M. J., & Teitelbaum, H. (2011). Three-dimensional properties of Andes mountain waves observed by satellite: A case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *116*, D23110. <https://doi.org/10.1029/2011JD016151>
- Alexander, S. P., Sato, K., Watanabe, S., Kawatani, Y., & Murphy, D. J. (2016). Southern Hemisphere extratropical gravity wave Sources and intermittency revealed by a Middle-Atmosphere general circulation model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, *73*, 1335-1349. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0149.1>
- Andersson, M. E., Verronen, P. T., Rodger, C. J., Clilverd, M. A., & Seppälä, A. (2014). Missing driver in the Sun-Earth connection from energetic electron precipitation impacts mesospheric ozone. *Nature Commun.*, *5*, 5197. <https://doi.org/10.1038/ncomms6197>
- Andersson, M. E., Verronen, P. T., Marsh, D. R., Seppala, A., Paivarinta, S.-M., Rodger, C. J., ... van de Kamp, M. (2018). Polar ozone response to energetic particle precipitation over decadal time scales: The role of medium-energy electrons. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *123*, 607-622. <https://doi.org/10.1002/2017JD027605>
- Arsenovic, P., Rozanov, E., Stenke, A., Funke, B., Wissing, J. M., Mursula, K. et al. (2016). The influence of middle range energy electrons on atmospheric chemistry and regional climate. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *149*, 180-190. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2016.04.008>
- Arsenovic, P., Damiani, A., Rozanov, E., Funke, B., Stenke, A., and Peter, T. (2019). Reactive nitrogen (NO_y) and ozone responses to energetic electron precipitation during Southern Hemisphere winter. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *19*, 9485-9494. <https://doi.org/10.5194/acp-19-9485-2019>
- Alpers, M., Eixmann, R., Fricke-Begemann, C., Gerding, M., & Höffner, J. (2004). Temperature lidar measurements from 1 to 105 km altitude using resonance, Rayleigh, and Rotational Raman scattering. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *4*, 793-800. <https://doi.org/10.5194/acp-4-793-2004>
- Baumgaertner, A. J. G., A. Seppälä, P. Jöckel, and M. A. Clilverd (2011). Geomagnetic activity related NO_x enhancements and polar surface air temperature variability in a chemistry climate model: Modulation of the NAM index. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *11*, 4521-4531. <https://doi.org/10.5194/acp-11-4521-2011>
- Beer, J. (2000). Neutron monitor records in broader historical context. *Space Science Reviews*,

93, 107–119. <https://doi.org/10.1023/A:1026536226656>

- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M. N. Showers, W. et al. (2001). Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, *294*, 2130–2136. <https://doi.org/10.1126/science.1065680>
- Boslaugh, S. (2013). *Statistics in a Nutshell*, 2nd ed., O’ Reilly Media, 569 pp.
- Calogovic, J., Albert, C., Arnold, F., Beer, J., Desorgher, L., & Flueckiger, E. O. (2010), Sudden cosmic ray decreases: No change of global cloud cover. *Geophysical Research Letters*, *37*, L03802. <https://doi.org/10.1029/2009GL041327>.
- Carlsaw, K. S., Harrison, R. G., & Kirkby, J. (2002). Cosmic Rays, Clouds, and Climate. *Science*, *298*, 1732–1737. <https://doi.org/10.1126/science.1076964>
- Chen, C., Chu, X., McDonald, A. J., Vadas, S. L., Yu, Z., Fong, W. et al. (2013). Inertia-gravity waves in Antarctica: A case study using simultaneous lidar and radar measurements at McMurdo/Scott Base (77.8°S, 166.7°E), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *118*, 2794–2808. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50318>
- Chen, C., Chu, X., Zhao, J., Roberts, B. R., Yu, Z., Fong, W. et al. (2016). Lidar observations of persistent gravity waves with periods of 3–10 h in the Antarctic middle and upper atmosphere at McMurdo (77.83°S, 166.67°E). *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *121*, 1483–1502. <https://doi.org/10.1002/2015JA022127>
- Chun, H.-Y., & Y.-H. Kim, 2008: Secondary waves generated by breaking of convective gravity waves in the mesosphere and their influence in the wave momentum flux. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *113*, D23107. <https://doi.org/10.1029/2008JD009792>
- Chiodo, G., Calvo, N., Marsh, D. R., & Garcia-Herrera, R. (2012). The 11 year solar cycle signal in transient simulations from the Whole Atmosphere Community Climate Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *117*, D06109. <https://doi.org/10.1029/2011JD016393>
- Chiodo, G., Marsh, D. R., Garcia-Herrera, R., Calvo, N., & Garcia, J. A. (2014). On the detection of the solar signal in the tropical stratosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *14*, 5251–5269. <https://doi.org/10.5194/acp-14-5251-2014>
- Chiodo, G., Garcia-Herrera, R., Calvo, N., Vaquero, J. M., Anel, J. A., Barriopedro, D., & Matthes, K. (2016). The impact of a future solar minimum on climate change projections in the Northern Hemisphere. *Environmental Research Letters*, *11*, 034015. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034015>
- Chiodo, G., & Polvani, L. M. (2016). Reduction of climate sensitivity to solar forcing due to stratospheric ozone feedback. *Journal of Climate*, *29*, 4651–4663.

<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0721.1>

Coddington, O., Lean, J. L., Pilewskie, P., Snow, M., & Lindholm, D. (2016). A Solar irradiance climate data record. *Bulletin of American Meteorological Society*, *116*, 1265–1282. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00265.1>

Crutzen, P. J., Isaksen, I. S. A., & Reid, G. C. (1975). Solar proton events: Stratospheric sources of nitric oxide. *Science*, *189*, 457–459. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.457>.

DeLand, M. T., & Cebula, R. P. (2012). Solar UV variations during the decline of Cycle 23. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *77*, 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.01.007>

DeLand, M. T., Floyd, L. E., Marchenko, S., & Tiruchirapalli, R. (2019). Creation of the GSFCSSI2 composite solar spectral irradiance data set. *Earth and Space Science*, *6*, 1284–1298. <https://doi.org/10.1029/2019EA000616>

Dickinson, R. E. (1975). Solar variability and the lower atmosphere. *Bulletin of American Meteorological Society*, *56*, 1240–1248. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1975\)056<1240:SVATLA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1975)056<1240:SVATLA>2.0.CO;2)

Ermolli, I., Matthes, K., Dudok de Wit, T., Krivova, N. A., Tourpali, K. et al. (2013). Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *13*, 3945–3977. <https://doi.org/10.5194/acp-13-3945-2013>

Erykin, A. D., & Wolfendale, A. W. (2011). Cosmic ray effects on cloud cover and their relevance to climate change. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *73*, 1681–1686. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.03.001>

Frame, T. H., & Gray, L. J. (2010). The 11-Yr solar cycle in ERA-40 data: An update to 2008. *Journal of Climate*, *23*, 2213–2222. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3150.1>

Funke, B., López-Puertas, M., Gil-López, S., Von Clarmann, T., Stiller, G., Fischer, H., & Kellmann, S. (2005). Downward transport of upper atmospheric NO_x into the polar stratosphere and lower mesosphere during the Antarctic 2003 and Arctic 2002/2003 winters. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *110*, D24308. <https://doi.org/10.1029/2005JD006463>

Funke, B., López-Puertas, M., Stiller, G., & Clarmann, T. (2014). Mesospheric and stratospheric NO_y produced by energetic particle precipitation during 2002–2012. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *119*, 4429–4446. <https://doi.org/10.1002/2013JD021404>

Geller, M. (1988). Solar cycles and the atmosphere. *Nature*, *332*, 584–585. <https://doi.org/10.1038/332584a0>

- Gettelman, A., Mills, M. J., Kinnison, D. E., Garcia, R. R., Smith, A. K., Marsh, D. R., et al. (2019). The whole atmosphere community climate model version 6 (WACCM6). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *124*, 12380–12430. <https://doi.org/10.1029/2019JD030943>
- Gray, L. J., Rumbold, S. T., & Shine, K. P. (2009). Stratospheric temperature and radiative forcing response to 11-year solar cycle changes in irradiance and ozone. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *66*, 2402–2417. <https://doi.org/10.1175/2009JAS2866.1>
- Gray, L. J., Beer, J., Geller, M., Haigh, J. D., Lockwood, M., Matthes, K. et al. (2010). Solar influences on climate. *Reviews of Geophysics*, *48*, RG4001. <https://doi.org/10.1029/2009RG000282>
- Haigh, J. D. (1996). The impact of solar variability on climate. *Science*, *272*, 981–984. <https://doi.org/10.1126/science.272.5264.981>
- Haigh, J. D. (1999). A GCM study of climate change in response to the 11-year solar cycle. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, *125*, 871–892. <https://doi.org/10.1002/qj.49712555506>
- Haigh, J. D. (2001). Climate variability and the influence of the sun. *Science*, *294*, 2109–2111. <https://doi.org/10.1126/science.1067013>
- Haigh, J. D. (2003). The effects of solar variability on the Earth's climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, *361*, 95–111. <https://doi.org/10.1098/rsta.2002.1111>
- Haigh, J. D., & Blackburn, M. (2006). Solar influences on dynamical coupling between the stratosphere and troposphere. *Space Science Reviews*, *125*, 331–344. <https://doi.org/10.1007/s11214-006-9067-0>
- Haigh, J. D., & Cargill, P. (2015): *The Sun's Influence on Climate*. Princeton University Press.
- Haigh, J. D., Winning, A. R., Toumi, R., & Harder, J. W. (2010). An influence of solar spectral variations on radiative forcing of climate. *Nature*, *467*, 696–699. <https://doi.org/10.1038/nature09426>
- Harder, J. W., Béland, S., & Snow, M. (2019). SORCE-based solar spectral irradiance (SSI) record for input into chemistry-climate studies. *Earth and Space Science*, *6*, 2487–2507. <https://doi.org/10.1029/2019EA000737>
- Harder, J. W., Thuillier, G., Richard, E. C., Brown, S. W., Lykke, K. R., Snow, M. et al. (2010). The SORCE SIM solar spectrum: Comparison with recent observations. *Solar Physics*, *263*, 3–24. <https://doi.org/10.1007/s11207-010-9555-y>
- Harrison, R. G., & Ambaum, M. (2010). Observing Forbush decreases in cloud at Shetland. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *72*, 1408–1414.

<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.09.025>.

- Hawkins, E., Edwards, T., & McNeall, D. (2014). Pause for thought. *Nature Climate Change*, 4, 154–156. <https://doi.org/10.1038/nclimate2150>
- Hendricks, E. A., Doyle, J. D., Eckermann, S. D., Jiang, Q., & Reinecke, P. A. (2014). What is the source of the stratospheric gravity wave belt in austral winter? *Journal of the Atmospheric Sciences*, 71, 1583–1592. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-13-0332.1>
- Hendrickx, K., Megner, L., Marsh, D. R., and Smith-Johnsen, C. (2018). Production and transport mechanisms of NO in the polar upper mesosphere and lower thermosphere in observations and models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 9075–9089. <https://doi.org/10.5194/acp-18-9075-2018>
- Hildebrand, J., Baumgarten, G., Fiedler, J., & Lübken, F.-J. (2017). Winds and temperatures of the Arctic middle atmosphere during January measured by Doppler lidar. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 13345–13359. <https://doi.org/10.5194/acp-17-13345-2017>
- Hindley, N. P., Wright, C. J., Smith, N. D., & Mitchell, N. J. (2015). The southern stratospheric gravity wave hot spot: individual waves and their momentum fluxes measured by COSMIC GPS-RO. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15, 7797–7818. <https://doi.org/10.5194/acp-15-7797-2015>
- Hines, C. O. (1974). A possible mechanism for the production of Sun-weather correlations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 31, 589–591. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1974\)031<0589:APMFTP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1974)031<0589:APMFTP>2.0.CO;2)
- Hoffman, L., Grimsdell, A. W., & Alexander, M. J. (2016). Stratospheric gravity waves at Southern Hemisphere orographic hotspots: 2003–2014 AIRS/Aqua observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 9381–9397. <http://doi.org/20.5194/acp-16-9381-2016>
- Holt, L. A., Randall, C. E., Harvey, V. L., Remsberg, E. E., Stiller, G. P., Funke, B. et al. (2012). Atmospheric effects of energetic particle precipitation in the Arctic winter 1978–1979 revisited. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D05315. <https://doi.org/10.1029/2011JD016663>
- Holton, J. R. (1984). The generation of mesoscale planetary waves by zonally asymmetric gravity wave breaking. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 41, 3421–3430. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)041<3427:TGOMPW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1984)041<3427:TGOMPW>2.0.CO;2)
- Hurwitz, M. M., Song, I.-S., Oman, L. D., Newman, P. A., Molod, A. M., Frith, S. M. et al. (2011). Response of the Antarctic stratosphere to warm pool El Niño events in the GEOS CCM. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 9659–9669. <https://doi.org/10.5194/acp-11-9659-2011>

- Hurwitz, M. M., Oman, L. D., Newman, P. A., & Song, I.-S. (2013). New influence of an intensity generated quasi-biennial oscillation on modelled stratospheric climate and chemistry. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *13*, 12187–12197. <https://doi.org/10.5194/acp-13-12187-2013>
- Ineson, S., Maycock, A., Gray, L., Scaife, A. A., Dunstone, N. J., Harder, J. W., et al. (2015). Regional climate impacts of a possible future grand solar minimum. *Nature Communications*, *6*, 7535. <https://doi.org/10.1038/ncomms8535>
- Ineson, S., Scaife, A., Knight, J. R., Manners, J. C., Dunstone, N. J., Gray, L. J., & Haigh, J. D. (2011). Solar forcing of winter climate variability in the Northern Hemisphere. *Nature Geoscience*, *4*, 753–757. <https://doi.org/10.1038/ngeo1282>
- Jackman, C. H., Marsh, D. R., Vitt, F. M., Garcia, R. R., Fleming, E. L., Labow, G. J. et al. (2008). Short- and medium-term atmospheric constituent effects of very large solar proton events. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *8*, 765–785. <https://doi.org/10.5194/acp-8-765-2008>
- Jiang, J. H., Wu, D. L., Eckemann, S. D., & Ma, J. (2003). Mountain waves in the middle atmosphere: Microwave Limb Sounder observations and analyses. *Advances in Space Research*, *32*, 801–806. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(03\)00402-2](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(03)00402-2)
- Jin, C., Wang, B., Liu, J., Ning, L., & Yan, M. (2019). Decadal variability of northern Asian winter monsoon shaped by the 11-year solar cycle. *Climate Dynamics*, *53*, 6559–6568. <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04945-4>
- Kaifler, B., Kaifler, N., Ehard, B., Dörnbrack, A., Rapp, M., & Fritts, D. C. (2015). Influences of source conditions on mountain wave penetration into the stratosphere and mesosphere. *Geophysical Research Letters*, *42*, 9488–9494. <https://doi.org/10.1002/2015GL066465>
- Kaifler, N., Kaifler, B., Ehard, B., Gisinger, S., Dörnbrack, A., Rapp, M. et al. (2017). Observational indications of downward-propagating gravity waves in middle atmosphere lidar data. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *162*, 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.03.003>
- Kam, H., Jee, G., Kim, Y. H., Ham, Y.-B., & Song, I.-S. (2017). Statistical analysis of mesospheric gravity waves over King Sejong Station, Antarctica (62.2°S, 58.8°W). *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *155*, 86–94. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.02.006>
- Kam, H., Y. H. Kim, N. J. Mitchell, J.-H. Kim, and C. Lee (2019), Evaluation of estimated mesospheric temperatures from 11-year meteor radar datasets of King Sejong Station (62° S, 59° W) and Esrange (68° N, 21° E), *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *196*, 105148–8, doi:10.1016/j.jastp.2019.105148.

- Kawahara, T. D., Kitahara, T., Kobayashi, F., Saito, Y., Nomura, A., She, C. Y. et al. (2002). Wintertime mesopause temperatures observed by lidar measurements over Syowa station (69°S, 39°E), Antarctica. *Geophysical Research Letters*, *29*, 1-4. <https://doi.org/10.1029/2002GL015244>
- Kidston, J. Scaife, A. A., Hardiman, S. C., Mitchell, D. M., Butchart, N., Baldwin, M. P., & Gray, L. J. (2015). Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather. *Nature Geoscience*, *8*, 433-440. <https://doi.org/10.1038/ngeo2424>
- Kim, Y. H., Chung, J. K., & Won, Y. I. (2004). Observation of a persistent Leonid meteor train with an all-sky camera. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, *66*, 1001-1009, <https://doi:10.1016/j.jastp.2004.03.007>
- Kim, Y.-H., & Chun, H.-Y. (2009). Effects of the basic-state wind on secondary waves generated by the breaking of gravity waves in the mesosphere. *Asian-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, *45*, 91-100.
- Kim, Y.-H., Chun, H.-Y., Preusse, P. Ern, M., & Kim, S.-Y. (2012). Gravity wave reflection and its influence on the consistency of temperature- and wind-based momentum fluxes simulated above Typhoon Ewinar. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *12*, 10787-10795.
- Kim, Y.-H., Chun, H.-Y., Park, S.-H., Song, I.-S., & Choi, H.-J. (2016). Characteristics of gravity waves generated in the jet-front system in a baroclinic instability simulation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *16*, 4799-4815. <https://doi.org/10.5194/acp-12-10787-2012>
- Kodera, K., & Kuroda, Y. (2002). Dynamical response to the solar cycle. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *107*, 4749. <https://doi.org/10.1029/2002JD002224>
- Kogure, M., Nakamura, T., Ejiri, M. K., Nishiyama, T., Tomikawa, Y., Tsutsumi, M. et al. (2017). Rayleigh/Raman lidar observations of gravity wave activity from 15 to 70 km altitude over Syowa (69oS, 40oE), the Antarctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*, 7869-7880. <https://doi.org/10.1002/2016JD026360>
- Kovács, T., Plane, J. M. C., Feng, W., Nagy, T., Chipperfield, M. P., Verronen, P. T. et al. (2016). D-region ion-neutral coupled chemistry (Sodankylä Ion Chemistry, SIC) within the Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM 4) - WACCM-SIC and WACCM-rSIC. *Geoscientific Model Development*, *9*, 3123-3136. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3123-2016>
- Krivova, N. A., Vieira, L. E. A., & Solanki, S. K. (2010). Reconstruction of solar spectral irradiance since the Maunder minimum. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *115*, A12112. <https://doi.org/10.1029/2010JA015431>.
- Krivova, N. A., Solanki, S. K., & Unruh, Y. C. (2011). Towards a long-term record of solar total and spectral irradiance. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *73*,

223-234. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2009.11.013>

- Labitzke, K. (1987). Sunspots, the QBO and the stratospheric temperature in the north polar region. *Geophysical Research Letters*, *14*, 535-537. <https://doi.org/10.1029/GL014i005p00535>
- Labitzke, K., & van Loon, K. (1988). Associations between the 11-year solar cycle, the QBO and the atmosphere. Part I: The troposphere and stratosphere in the northern hemisphere in winter. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, *50*, 197-206. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(88\)90068-2](https://doi.org/10.1016/0021-9169(88)90068-2)
- Lean, J. L., & DeLand, M. T. (2012). How does the Sun's spectrum vary? *Journal of Climate*, *25*, 2555-2560. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00571.1>
- Lee, C., Kim, Y. H., Kim, J.-H., Jee, G., Won, Y.-I., & Wu, D. L. (2013). Seasonal variation of wave activities near the mesopause region observed at King Sejong Station (62.22°S, 58.78°W), Antarctica. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *105-106*, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.07.006>
- Lee, C., Kim, J.-H., Jee, G., Lee, W., Song, I.-S., & Kim, Y. H. (2016). New method of estimating temperatures near the mesopause region using meteor radar observations, *Geophysical Research Letters*, *43*, 10580-10585. <https://doi.org/10.1002/2016GL071082>
- Lee, C., Jee, G., Kim, J.-H., & Song, I.-S. (2018). Meteor echo height ceiling effect and mesospheric temperature estimation from meteor radar observations. *Annales Geophysicae*, *36*, 1267-1274. <https://doi.org/10.5194/angeo-36-1267-2018>
- Lee, J.-H., Jee, G., Kwak, Y.-S., Hong, S.-B., Hwang, H., Song, I.-S., et al. (2018). Responses of nitrogen oxide to high-speed solar wind stream in the polar middle atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *123*, 9788-9801. <https://doi.org/10.1029/2017JA025161>
- Lee, J. N., Shindell, D. T., & Hameed, S. (2009). The Influence of solar forcing on tropical circulation. *Journal of Climate*, *22*, 5870-5885. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2670.1>
- Lu, H., Scaife, A. A., Marshall, G. J., Turner, J., & Gray, L. J. (2017a). Downward wave reflection as a mechanism for the stratosphere-troposphere response to the 11-yr solar cycle. *Journal of Climate*, *30*, 2395-2414. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0400.1>
- Lu, H., Gray, L. J., White, I. P., & Bracegirdle, T. J. (2017b). Stratospheric response to the 11-yr solar cycle: Breaking planetary waves, internal reflection, and resonance. *Journal of Climate*, *30*, 7169-7190. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0023.1>
- Maliniemi, V., Asikainen, T., & Mursula, K. (2018). Decadal variability in the Northern Hemisphere winter circulation: Effects of different solar and terrestrial drivers. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *179*, 40-54. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.06.012>

- Mann, M. E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R. S., Hughes, M. K., Shindell, D. et al. (2009). Global signatures and dynamical origins of the Little Ice Age and Medieval climate anomaly. *Science*, *326*, 1256–1260. <https://doi.org/10.1126/science.1177303>
- Marchenko, S. V., Woods, T. N., DeLand, M. T., Mauzeri, S., Pilewskie, P., & Haberreiter, M. (2019). Improved Aura/OMI solar spectral irradiances: Comparisons with independent data sets and model predictions. *Earth and Space Science*, *6*, 2379–2396. <https://doi.org/10.1029/2019EA000624>
- Marsh, D. R., Garcia, R. R., Kinnison, D. E., Boville, B. A., Sassi, F., Solomon, S. C., & Matthes, K. (2007). Modeling the whole atmosphere response to solar cycle changes in radiative and geomagnetic forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *112*, D23306, <https://doi.org/10.1029/2006JD008306>
- Masarik, J., & Beer, J. (2009). An updated simulation of particle fluxes and cosmogenic nuclide production in the Earth's atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *114*, D11103. <https://doi.org/10.1029/2008JD010557>
- Matthes, K., Funke, B., Andersson, M. E., Barnard, L., Beer, J., Charbonneau, P. et al. (2017): Solar forcing for CMIP6 (v3.2). *Geoscientific Model Development*, *10*, 2247–2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>
- Maycock, A. C., & Misios, S. (2015). ‘Top-down’ versus ‘bottom-up’ mechanisms for solar-climate coupling. *Earth's Climate Response to a Changing Sun* Edited by de Wit Dudok T., Ermolli, I., Haberreiter, M. et al. 237–246.
- Maycock, A. C., Ineson, S., Gray, L. J., Scaife, A. A., Anstey, J. A., Lockwood, M. et al. (2015). Possible impacts of a future grand solar minimum on climate: Stratospheric and global circulation changes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *120*, 9043–9058. <https://doi.org/10.1002/2014JD022022>
- Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Branstator, G., & van Loon, H. (2009). A coupled air-sea response mechanism to solar forcing in the Pacific region. *Journal of Climate*, *21*, 2883–2897. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1776.1>
- Meehl, G. A., Arblaster, J. M., Matthes, K., Sassi, F., & van Loon, H. (2009). Amplifying the Pacific climate system response to a small 11-year solar cycle forcing. *Science*, *325*, 1114–1118. <https://doi.org/science.1172872>
- Meraner, K., & Schmidt, H. (2018). Climate impact of idealized winter polar mesospheric and stratospheric ozone losses as caused by energetic particle precipitation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *18*, 1079–1089. <https://doi.org/10.5194/acp-18-1079-2018>
- Meraner, K., Schmidt, H., Manzini, E., Funke, B., & Gardini, A. (2016). Sensitivity of simulated mesospheric transport of nitrogen oxides to parameterized gravity waves. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *121*, 12045–12061.

<https://doi.org/10.1002/2016JD025012>

- Misios, S., Gray, L. J., Knudsen, M. F., Karoff, C., Schmidt, H., & Haigh, J. D. (2019). Slowdown of the Walker circulation at solar cycle maximum. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *116*, 7186–7191. <https://doi.org/10.1073/pnas.1815060116>
- Mitchell, D. M., Misios, S., Gray, L. J., Tourpali, K., Matthes, K., Hood, L. et al. (2015). Solar signals in CMIP-5 simulations: the stratospheric pathway. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, *141*, 2390–2403, <https://doi.org/10.1002/qj.2530>
- Moffat-Griffin, T., Hibbins, R. E., Jarvis, M. J., & Colwell, S. R. (2011). Seasonal variations of gravity wave activity in the lower stratosphere over an Antarctic Peninsula station. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *116*, D14111. <https://doi.org/10.1029/2010JD015349>
- Moffat-Griffin, T., Jarvis, M. J., Colwell, S. R., Kavanagh, A. J., Manney, G. L., & Daffer, W. H. (2013). Seasonal variations in lower stratospheric gravity wave energy above the Falkland Islands. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *118*, 10861–10869. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50859>
- Molod, A., Takacs, L., Suarez, M., Bacmeister, J., Song, I.-S., & Eichmann, A. (2012). *The GEOS-5 Atmospheric General Circulation Model: Mean Climate and Development from MERRA to Fortuna*. NASA Technical Report Series on Global Modeling and Data Assimilation. NASA/TM-2012-104606, 28, 124 pp, available at <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120011790.pdf>
- Morrill, J. S., Floyd, L., & McMullin, D. (2011). The solar ultraviolet spectrum estimated using the Mg II Index and Ca II K disk activity. *Solar Physics*, *269*, 253–267. <https://doi.org/10.1007/s11207-011-9708-7>
- Murphy, D. J., Alexander, S. P., Klekociuk, A. R., Love, P. T., & Vincent, R. A. (2014). Radiosonde observations of gravity waves in the lower stratosphere over Davis, Antarctica, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *119*, 11973–11996, <https://doi.org/10.1002/2014JD022448>
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J. et al. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. In *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, Available at https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf
- National Center for Environmental Information (NCEI) (2018), Daily, solar flux and geomagnetic indices, Boulder, CO, USA, available at:

ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP (last access: 12 November 2019).

Ney, E. (1959). Cosmic radiation and the weather. *Nature*, *183*, 451–452.
<https://doi.org/10.1038/183451a0>

Newnham, D. A., Clilverd, M. A., Rodger, C. J., Hendrickx, K., Megner, L., Kavanagh, A. J., et al. (2018). Observations and modeling of increased nitric oxide in the Antarctic polar middle atmosphere associated with geomagnetic storm-driven energetic electron precipitation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *123*.
<https://doi.org/10.1029/2018JA025507>

Nicolls, M. J., Varney, R. H., Vadas, S. L., Stamus, P. A., Heinselman, C. J., Cosgrove, R. B. et al. (2010). Influence of an inertia-gravity wave on mesospheric dynamics: A case study with the Poker Flat Incoherent Scatter Radar. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *115*, D00N02, <https://doi.org/10.1029/2010JD014042>

Nieder, H., Winkler, H., Marsh, D. R., & Sinnhuber, M. (2014). NO_x production due to energetic particle precipitation in the MLT region: Results from ion chemistry model studies. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *119*, 2137–2148.
<https://doi.org/10.1002/2013JA019044>

Owens, M. J., Lockwood, M., Hawkins, E., Usoskin, I., Jones, G. S., Barnard, L. (2017). The Maunder minimum and the Little Ice Age: an update from recent reconstructions and climate simulations. *Journal of Space Weather and Space Climate*, *7*, A33.
<https://doi.org/10.1052/swsc/2017034>

Otto-Bliesner, Brady, E. C., Fasullo, J., Jahn, A., Landrum, L., Stevenson, S. et al. (2016). Climate variability and change since 850 CE: An ensemble approach with the community earth system model. *Bulletin of American Meteorological Society*, *97*, 735–753.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00233.1>

Pan, W., Gardner, C. S., & Roble, R. G. (2002). The temperature structure of the winter atmosphere at South Pole. *Geophysical Research Letters*, *29*, 49–1–49–4.
<https://doi.org/10.1029/2002GL015288>

Park, C. B. (2017). Development of 355 nm Rayleigh Lidar for Measurements of Temperature Vertical Profile over Daejeon City, Korea. *Journal of Advanced Information Technology and Convergence*, *7*(2), 55–64.

Pierce, J. R. (2017). Cosmic rays, aerosols, clouds, and climate: Recent findings from the CLOUD experiment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*, 8051–8055.
<https://doi.org/10.1002/2017JD027475>

Pierce, J. R., & Adams, P. J. (2009). Can cosmic rays affect cloud condensation nuclei by altering new particle formation rates? *Geophysical Research Letters*, *36*, L09820.

<https://doi.org/10.1029/2009GL037946>

- Plougonven, R., & Zhang, F. (2014). Internal gravity waves from atmospheric jets and fronts. *Review of Geophysics*, *52*, 33–76. <https://doi.org/10.1002/2012RG000419>
- Porter, H. S., Jackman, C. H., & Green, A. E. S. (1976). Efficiencies for production of atomic nitrogen and oxygen by relativistic proton impact in air. *The Journal of Chemical Physics*, *65*, 154–167. <https://doi.org/10.1063/1.432812>
- Randall, C. E., Harvey, V. L., Singleton, C. S., Bailey, S. M., Bernath, P. F., Codrescu, M. et al. (2007). Energetic particle precipitation effects on the Southern Hemisphere stratosphere in 1992–2005. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *112*, D08308. <https://doi.org/10.1029/2006JD007696>
- Randall, C. E., Harvey, V. L., Holt, L. A., Marsh, D. R., Kinnison, D., Funke, B. et al. (2015). Simulation of energetic particle precipitation effects during the 2003–2004 Arctic winter. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *120*, 5035–5048. <https://doi.org/10.1002/2015JA021196>
- Reichert, R., Kaifler, B., Kaifler, N., Rapp, M., Pautet, P.-D., Taylor, M. J. et al. (2019). Retrieval of intrinsic mesospheric gravity wave parameters using lidar and airglow temperature and meteor radar wind data. *Atmospheric Measurement Techniques*, *12*, 5997–6015. <https://doi.org/10.5194/amt-12-5997-2019>
- Richter, J. H., Sassi, F., & Garcia, R. R. (2010). Toward a physically based gravity wave source parameterization in a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *67*, 136–156. <https://doi.org/10.1175/2009JAS2112.1>
- Rohen, G., von Savigny, C., Sinnhuber, M., Liewellyn, E. J., Kaiser, J. W., Jackman, C. H., et al. (2005). Ozone depletion during the solar proton events of October/November 2003 as seen by SCIAMACHY. *Journal of Geophysical Research*, *110*, A09S39. <https://doi.org/10.1029/2004JA010984>
- Rüfenacht, R., Baumgarten, G., Hildebrand, J., Schranz, F., Matthias, V., Stober, F. et al. (2018). Intercomparison of middle-atmospheric wind in observations and models. *Atmospheric Measurement Techniques*, *11*, 1971–1987. <https://doi.org/10.5194/amt-11-1971-2018>
- Rusch, D. W., Gérard, J.-C., Solomon, S., Crutzen, P. J., & Reid, G. C. (1981). The effect of particle precipitation events on the neutral and ion chemistry of the middle atmosphere—I. Odd nitrogen. *Planetary and Space Science*, *29*, 767–774. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(81\)90048-9](https://doi.org/10.1016/0032-0633(81)90048-9)
- Salminen, A., Asikainen, T., Maliniemi, V., & Mursula, K. (2019). Effect of energetic electron precipitation on the Northern polar vortex: Explaining the QBO modulation via control of meridional circulation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *124*, 5807–5821.

<https://doi.org/10.1029/2018JD029296>

- Sato, K., & Yoshiki, M. (2008). Gravity wave generation around the polar vortex in the stratosphere revealed by 3-hourly radiosonde observations at Syowa station. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65, 3719–3735. <https://doi.org/10.1175/2008JAS2539.1>
- Sato, K., & Nomoto, M. (2015). Gravity wave-induced anomalous potential vorticity gradient generating planetary waves in the winter mesosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 72, 3609–3624. <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0046.1>
- Scafetta, N., Willson, R. C., Lee, J. N., Wu, D. L. (2019). Modeling quiet solar luminosity variability from TSI satellite measurements and proxy models during 1980–2018. *Remote Sensing*, 11, 2569. <https://doi.org/10.3390/rs11212569>
- Schöch, A., Baumgarten, G., & Fiedler, J. (2008). Polar middle atmosphere temperature climatology from Rayleigh lidar measurements at ALOMAR (69°N), *Annales Geophysicae*, 26, 1681–1698. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-1681-2008>
- Seppälä, A., Verronen, P. T., Kyrölä, E., Hassinen, S., Backman, L., Hauchecorne, A., et al. (2004). Solar proton events of October–November 2003: Ozone depletion in the Northern Hemisphere polar winter as seen by GOMOS/Envisat. *Geophysical Research Letters*, 31, L19107. <https://doi.org/10.1029/2004GL021042>
- Seppala, A., Randall, C. E., Clilverd, M. A., Rozanov, E., and Rodger, C. J. (2009). Geomagnetic activity and polar surface air temperature variability. *Journal of Geophysical Research*, 114, A10312. <https://doi.org/10.1029/2008JA014029>
- Seppala, A., H. Lu, M. A. Clilverd, and C. J. Rodger (2013). Geomagnetic activity signatures in wintertime stratospherewind, temperature, and wave response. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 2169–2183. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50236>
- Seppälä, A., Matthes, K., Randall, C. E., & Mironova, I. A. (2014). What is the solar influence on climate? Overview of activities during CAWSES-II. *Progress in Earth and Planetary Science*, 1, 24. <https://doi.org/10.1186/s40645-014-0024-3>
- Shindell, D. T., Schmidt, G. A., Mann, M. E., Rind, D., & Waple, A. (2001). Solar forcing of regional climate change during the Maunder minimum. *Science*, 294, 2149–2152. <https://doi.org/10.1126/science.1064363>
- Shibuya, R., Sato, K., Tsutsumi, M., Sato, T., Tomikawa, Y., Nishimura, K. et al. (2017). Quasi-12 h inertia-gravity waves in the lower mesosphere observed by the PANSY radar at Syowa Station (39.6°E, 69.0°S). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 6455–6476. <https://doi.org/10.5194/acp-17-6455-2017>
- Sinnhuber, M., Nieder, H., & Wieters, N. (2012). Energetic particle precipitation and the chemistry of the mesosphere/lower thermosphere. *Surveys in Geophysics*, 33, 1281–1334.

<https://doi.org/10.1007/s10712-012-9201-3>

- Sinnhuber, M., Wieters, N., & Winkler, H. (2013). The impact of energetic particle precipitation on the chemical composition of the middle atmosphere: Measurements and model predictions. In F. J. Lübken (Ed.), *Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES) Springer Atmospheric Sciences*, 275–299. Dordrecht, Netherlands: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-4348-9_16
- Smith, A. K. (2012). Global Dynamics of the MLT. *Survey of Geophysics*, 33, 1177–1230.
<https://doi.org/10.1007/s10712-012-9196-9>
- Snow-Kropla, E. J., Pierce, J. R., Westervelt, D. M., & Trivitayanurak, W. (2011). Cosmic rays, aerosol formation and cloud-condensation nuclei: sensitivities to model uncertainties. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 4001–4013.
<https://doi.org/10.5194/acp-11-4001-2011>
- Solomon, S., Crutzen, P. J., & Roble, R. G. (1982). Photochemical coupling between the thermosphere and the lower atmosphere: 1. Odd nitrogen from 50 to 120 km. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 87, 7206–7220. <https://doi.org/10.1029/JC087iC09p07206>
- Song, I.-S., & H.-Y. Chun (2008). A Lagrangian spectral parameterization of gravity wave drag induced by cumulus convection. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65, 1204–1224.
<https://doi.org/10.1175/2007JAS2369.1>
- Song, I.-S., Chun, H.-Y., Garcia, R. R., & Boville, B. A. (2007). Momentum flux spectrum of convectively forced internal gravity waves and its application to gravity wave drag parameterization. Part II: Impacts in a GCM (WACCM). *Journal of the Atmospheric Sciences*, 64, 2286–2308. <https://doi.org/10.1175/JAS3954.1>
- Song, I.-S., Lee, C., Kim, J.-H., Jee, G., Kim, Y.-H., Choi, H.-J. et al. (2017). Meteor radar observations of vertically propagating low-frequency inertia-gravity waves near the southern polar mesopause region. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122, 4777–4800. <https://doi.org/10.1002/2016JA022978>
- Song, I.-S., Chun, H.-Y., Jee, G., Kim, S.-Y., Kim, J., Kim, Y.-H. et al. (2018). Dynamic initialization for whole atmospheric global modeling. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 10, 2096–2120. <https://doi.org/10.1029/2017MS001213>
- Steinhilber, F., Abreu, J. A., Beer, J., Brunner, I., Christl, M., Fischer, H. et al. (2012). 9,400 years of cosmic radiation and solar activity from ice cores and tree rings. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109, 5967–5971.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1118965109>
- Tapping, K. F. (2013). The 10.7 cm solar radio flux (F10.7), *Space Weather*, 11, 394–406.
<https://doi.org/10.1002/swe.20064>

- Tinsley, B. A., Rohrbaugh, R. P., Hei, M., & Beard, K. V. (2000) Effects of image charges on the scavenging of aerosol particles by cloud droplets and on droplet charging and possible ice nucleation processes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *57*, 2118–2134. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2000\)057<2118:EOICOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2000)057<2118:EOICOT>2.0.CO;2)
- Turunen, E., Verronen, P. T., Seppälä, A., Rodger, C. J., Clilverd, M. A., Tamminen, J. et al. (2009). Impact of different energies of precipitating particles on NO_x generation in the middle and upper atmosphere during geomagnetic storms. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, *72*, 1176–1189. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.07.005>
- Turunen, E., Kero, A., Verronen, P. T., Miyoshi, Y., Oyama, S.-I., & Saito, S. (2016). Mesospheric ozone destruction by high-energy electron precipitation associated with pulsating aurora. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *121*, 11,852–11,861. <https://doi.org/10.1002/2016JD025015>
- Usoskin, I. G. (2017). A history of solar activity over millennia. *Living Reviews in Solar Physics*, *14*, 3. <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0006-9>
- Vadas, S. (2013). Compressible f-plane solutions to body forces, heatings, and coolings, and application to the primary and secondary gravity waves generated by a deep convective plume. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *118*, 2377–2397. <https://doi.org/10.1002/jgra.50163>
- Vadas, S., & Becker, E. (2018). Numerical modeling of the excitation, propagation, and dissipation of primary and secondary gravity waves during wintertime at McMurdo Station in the Antarctic. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *123*, 9326–9369. <https://doi.org/10.1029/2017JD027974>
- Vadas, S., Zhao, J., Chu, X., & Becker, E. (2018). The excitation of secondary gravity waves from local body forces: Theory and observation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *123*, 9296–9325. <https://doi.org/10.1029/2017JD027970>
- van Loon, H., Meehl, G. A., & Shea, D. J. (2007). Coupled air-sea response to solar forcing in the Pacific region during northern winter. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *112*, D02108. <https://doi.org/10.1029/2006JD007378>
- Viereck, R. A., & Puga, L. C. (1999). The NOAA Mg II core-to-wing solar index: Construction of a 20-year time series of chromospheric variability from multiple satellites. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *104*, 9995–10005. <https://doi.org/10.1029/1998JA900163>
- Verronen, P. T., Seppälä, A., Clilverd, M. A., Rodger, C. J., Kyrölä, E., Enell, C.-F., et al. (2005). Diurnal variation of ozone depletion during the October–November 2003 solar proton events. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, *110*, A09S32. <https://doi.org/10.1029/2004JA010932>
- Verronen, P. T., Andersson, M. E., Marsh, D. R., Kovács, T., & Plane, J. M. C. (2016).

WACCM-D—Whole Atmosphere Community Climate Model with D-region ion chemistry. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 8, 954–975. <https://doi.org/10.1002/2015MS000592>

- Yoo, J.-H., Choi, T., Chun, H.-Y., Kim, Y.-H., Song, I.-S., & Song, B.-G. (2018). Inertia-gravity waves revealed in radiosonde data at Jang Bogo Station, Antarctica (74° 370S, 164° 130E): 1. Characteristics, energy, and momentum flux. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 13305–13331. <https://doi.org/10.1029/2018JD029164>
- Wu, C.-J., Krivova, N. A., Solanki, S. K., & Usoskin, I. G. (2018). Solar total and spectral irradiance reconstruction over the last 9000 years. *Astronomy and Astrophysics*, 620, A120. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201832956>
- Wenzler, T., Solanki, S. K., Krivova, N. A., & Fröhlich, C. (2016). Reconstruction of solar irradiance variations in cycles 21–23 based on surface magnetic fields. *Astronomy and Astrophysics*, 460, 583–595. <https://doi.org/10.1052/0004-6361:20065752>
- Zharkova, V. V., Shepherd, S. J., Popova, E., & Zharkov, S. I. (2015). Heartbeat of the Sun from principal component analysis and prediction of solar activity on a millenium timescale. *Scientific Reports*, 5, 15689. <https://doi.org/10.1038/srep15689>

