

극지 고층대기 및 우주환경 모니터링을 통한
구성요소 간 연직 상호작용에 의한
극지고층대기 변화 연구

Polar Upper Atmospheric Changes due to the Vertical
Couplings between the Polar Atmosphere and Space
Environment



2016. 05. 31

한국해양과학기술원
부설극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “극지고층대기 및 우주환경 모니터링을 통한 구성요소 간 연직 상호작용에 의한 극지고층대기 변화 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 05. 31



연구책임자 : 지 건 화

참여연구원 : 김 정 한

“ : 이 창 섭

“ : 윤 영 준

“ : 최 태 진

“ : 이 방 용

“ : 김 성 중

“ : 김 백 민

“ : 홍 상 범

“ : 황 희 진

“ : 송 인 선

“ : 지 은 영

“ : 권 혁 진

“ : 김 지 은

“ : 이 지 희

“ : 최 화 진

“ : 함 영 배

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2016. 3. 1 ~ 2016. 5. 31	단계 구분	1/ 1	
연구사업명	중 사업명	연구소 정책지원사업				
	세부사업명					
연구과제명	중 과제명					
	세부(단위)과제명	극지고층대기 및 우주환경 모니터링을 통한 구성요소 간 연직 상호작용에 의한 극지고층대기 변화 연구				
연구책임자		해당단계 참여연구원수	총 : 17 명 내부 : 10 명 외부 : 7 명	해당단계 연구비	정부: 5,000 천원 계: 5,000 천원	
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 극지기후변화연구부		참여기업명			
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :			
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :			
요약					보고서 면수	67
<p>1. 연구목적 및 필요성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 목적: 극지 고층대기 및 근지구 우주환경의 지속적인 모니터링과 관측 자료 분석을 통해 극지에서 태양/태양풍/자기권-고층대기-저층대기로 이어지는 각 구성요소 간 연직 상호작용에 의한 극지 고층대기 변화 이해를 위한 연구사업 기획 - 필요성: 극지 고층대기는 태양, 태양풍, 자기권 등의 외부 우주환경으로부터 지구로 유입되는 에너지를 직접적으로 받아들이는 영역으로, 우주기상현상을 이해하고 예측하기 위해서 가장 중요한 우주환경이다. 또한 극지 고층대기는 저층대기에서 발생하여 고층대기로 전파되는 대기파동현상과 저층대기 구성물질 변화에 의해서도 큰 영향을 받는다. 따라서 극지 고층대기의 정확한 이해를 위해서는 태양/태양풍/자기권, 극지 고층대기, 저층대기 간의 연직 상호작용의 이해가 필수적임 <p>2. 주요연구내용 및 범위</p> <ul style="list-style-type: none"> - 외부 우주환경 변화에 의한 극지 고층대기 및 저층대기 변화 규명 - 저층대기 파동현상 및 대기 구성물질 변화에 의한 극지 고층대기 변화 규명 - 극지 고층대기 전리권-열권의 물리적 특성 이해 						
색인어 (각 5개 이상)	한글	극지 고층대기, 연직상호작용, 오로라, 우주환경, 우주기상				
	영어	Polar upper atmosphere, Vertical coupling, Aurora, Space environment, Space weather				

요 약 문

I. 제 목

- 극지 고층대기 및 우주환경 모니터링을 통한 구성요소 간 연직 상호작용에 의한 극지 고층대기 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

○ 연구개발 목적

- 극지 고층대기 및 근 지구 우주환경의 지속적인 모니터링과 관측 자료 분석연구를 통해 극지에서의 태양/태양풍/자기권-고층대기-저층대기로 이어지는 각 구성요소 간 연직상호작용에 의한 극지 고층대기 변화 이해를 위한 연구사업 개발

○ 연구개발 필요성

- 극지 고층대기는 우주기상 현상이 발생하는 근 지구 우주환경에서 가장 중요한 영역이며, 태양으로부터 방출되어 지구에 도달한 에너지가 직접 유입되는 영역임
- 외부 우주환경 뿐만 아니라 저층대기에서 발생하는 대기과동, 대기구성입자들이 고층대기로 전파되어 고층대기의 동역학적 특성에 영향을 미침
- 따라서 극지 고층대기의 물리적 특성을 이해하기 위해서는 태양/태양풍/자기권으로 구성되는 외부 우주환경과 극지 고층대기, 그리고 저층대기 간 연직 상호작용의 이해가 필수적임
- 특히 태양폭발로 인한 지자기 폭풍 발생 시에는 극지 고층대기에 전달된 에너지가 대기 순환 및 전자기적 에너지 형태로 중저위도 고층대기에도 중요한 영향을 미침
- 국내 우주산업의 비약적인 발전으로 우주기상예측의 중요성이 급격히 대두되고 있으며, 이는 우주기상 재해로부터 천문학적 손실을 가져올 수 있는 통신, 기상, 군사, 과학 인공위성의 안정적인 운영/유지를 위해서 필수적임

III. 연구개발의 내용 및 범위

○ 외부 우주환경 변화에 의한 극지 고층대기 변화 이해

- 태양활동, 태양풍, 자기권 등의 외부 우주환경 변화에 따른 극지 전리권 및 열권의 동역학적 특성 연구

- 오로라의 발생 및 시공간적 분포 특성과 극지 고층대기 변화와의 상관관계 이해
- 우주선/고에너지 입자 유입에 의한 극지 고층-저층대기 구성입자 및 온도 변화 기작 규명
- 저층대기 파동현상 및 대기 구성물질 변화에 의한 극지 고층대기 변화
 - 전천카메라, 유성레이더, 전리권 레이더 관측에 의한 대기중력파의 물리적 특성 이해
 - 대기중력파, 행성파, 조석파 등 대기파동에 의한 극지 고층대기의 동역학적 변화 이해
 - 저층대기 행성파에 의한 성층권 돌연승온 발생과 고층대기 온도 및 전리권 전자밀도 변화의 상관관계 이해
 - 저층대기 온실가스, 에어로졸 등이 고층대기로 전파되어 고층대기 온도 변화, 극지 중간권 구름 형성 등에 미치는 영향 이해
 - 극지 중간권 및 열권하부(MLT)의 물리적 특성 이해
- 극지 고층대기 전리권-열권의 물리적 특성 연구
 - 극지 전리권 플라즈마 밀도 및 열권 바람/온도의 장기적 변화경향 파악
 - 극지 고층대기에서 이온-중성입자 상호작용 기작 규명
 - 남북극 상호작용에 의한 극지 전리권-열권의 물리적 특성 변화 파악

IV. 연구개발결과

- 외부 우주환경 변화에 의한 극지 고층 및 저층대기 변화 연구
 - 자기권과 극지 전리권 상호작용 연구를 위해 장보고과학기지와 세종과학기지에 자기권 관측용 자력계를 설치하고 남극대륙 자력계 네트워크에 가입. 장보고기지 극지 전리권-열권 관측과 공동활용하여 자기권-전리권 상호작용 연구 수행
 - 태양활동 변화에 따른 극지 고층대기 변화는 11년 주기의 장기적인 변화와 지자기 폭풍과 같이 단기적이고 폭발적인 에너지에 의한 급격한 변화로 구분할 수 있는데, 극지 고층대기에 다양한 물리현상을 일으킴. 남북극 기지에서 수집되는 우주환경, 극지 고층대기 관측자료의 종합적으로 분석이 요구됨
 - 오로라 발생과 극지 고층대기 변화와의 상관관계 연구를 위해 오로라 관측용 전천카메라를 설치하여 오로라 발생의 시공간적 특성을 살펴보고, 동시에 극지 고층대기에서 발생하는 변화를 관측
 - 우주선 및 고에너지 입자 유입에 따른 극지 고층대기 및 저층대기의 온도 변화는 대기화학적 기작을 통해서 발생함. 장보고기지 중성자 모니터에서 고에너지 입자를 모니터링하고, 위성에서 관측된 대기구성물질 변화를 활용

하여 궁극적으로 중간권-성층권 오존변화를 통한 온도변화 규명

- 저층대기 파동현상 및 대기 구성물질 변화에 의한 극지 고층대기 변화 연구
 - 지상 및 저층대기에서 발생하는 대기중력파, 행성파, 조석파 등 다양한 파장대의 대기 파동은 고층대기로 전달되어 고층대기의 동역학적인 특성에 중요한 영향을 미침
 - 대기 파동이 고층대기 온도 및 바람 특성에 미치는 영향을 이해하기 위해서는 고층대기의 지속적인 모니터링뿐만 아니라 고층대기로 전파된 파동현상 관측이 필수적임
 - 또한 지상 및 저층대기에서 발생한 파동의 수직적 전파 메커니즘 규명을 위한 수치모델 연구
 - 극지 고층대기는 저층대기에서의 구성물질 변화, 대기 파동 등에 의해서도 큰 영향을 받음
 - 온실가스와 같은 저층대기 구성물질 변화는 저층대기 온도뿐만 아니라 고층대기 온도변화에도 큰 영향을 미치며, 특히 장기적인 고층대기 온도변화 경향에 중요한 영향을 미침. 따라서 이와 같은 저층-고층대기 상호작용의 이해를 위해서는 대기구성물질 변화와 고층대기 온도의 장기적인 모니터링이 요구됨
 - 저층대기 에어로졸이 극지 중간권에서 극지 중간권 구름(PMC) 형성에 미치는 영향 규명

- 극지 고층대기 전리권-열권의 물리적 특성 이해
 - 극지 전리권과 열권은 고층대기의 핵심영역으로 극지 우주환경 및 고층대기 연구의 가장 주요한 연구영역임
 - 극지 전리권 연구를 위해서는 남북극 극지 인프라를 적극적으로 활용하여 지상 전리권 레이더, 광학관측 등을 수행하고 인공위성 관측과 연계한 연구 수행이 필수적임
 - 극지 열권은 전리권의 배경이 되는 영역으로 열권에서의 중성대기 밀도와 온도는 전리권 변화에 큰 영향을 미치며, 따라서 전리권-열권의 동시 관측이 필수적임. 또한 EISCAT과 같은 대형 국제 관측 프로그램 참여를 통해 극지 인프라 중심 지상관측의 한계점 극복이 필요함
 - 장보고과학기지에서 운영 중인 전리권 레이더, 페브리-페로 간섭계, GPS TEC/Scintillation 모니터 관측을 활용하여 극지 전리권-열권을 종합적으로 관측하고 이온-중성입자 상호작용 규명 등을 통해 두 영역의 물리적인 특성을 이해

V. 연구개발결과의 활용계획

- 본 과제에서 제안된 극지우주환경 및 극지고층대기 연구를 위한 다양한 관측 및 모델 연구 방법을 향후 극지연구소에서의 우주환경/고층대기 연구사업 개발에 활용
- 극지우주환경 및 극지고층대기 연구는 다양한 국내외 공동연구가 반드시 필요한 분야로서 남북극 극지인프라 및 확보된 우주환경/고층대기 관측자료를 적극적으로 활용하여 공동관측, 공동자료분석 등을 통해 국내외 대학 및 연구기관과 공동연구 네트워크 구축 추진
- 남북극 지상관측 중심의 우주환경/고층대기 연구의 한계점 극복을 위해 인공위성 관측 및 대형 국제 관측네트워크에 참여 추진
- 우주환경-극지 고층대기-저층대기 각 구성요소 사이에서 일어나는 에너지의 연직 흐름을 이해하고, 확보된 정보를 국내외 우주기상 예측연구에 활용



목 차

제 1 장 서론	9
1-1. 연구개발 목적	9
1-2. 연구개발 필요성	9
1-3. 연구개발 내용 및 범위	14
제 2 장 국내외 기술개발 현황	19
2-1. 국내 동향	19
2-2. 국외 동향	20
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	24
3-1. 연구개발 목표 및 내용	24
3-2. 연구개발 수행 결과	25
제 4 장 연구개발결과의 활용계획	51
4-1. 향후 연구방향	51
4-2. 국·내외 공동연구 추진 계획	55
4-3. 연구개발 사업 규모	58
4-4. 총 연구기간 로드맵	58
4-5. 인프라 활용 로드맵	59
제 5 장 연구개발 과정에서 수집한 해외과학기술 정보	60
제 6 장 참고문헌	61

제 1 장 서론

1-1. 연구개발 목적

가. 극지 고층대기 및 근지구 우주환경의 지속적인 모니터링과 관측 자료 분석 연구를 통해 극지에서 태양/자기권-고층대기-저층대기로 이어지는 각 구성요소 간 연직 상호작용 메커니즘을 이해하고, 상호작용 결과로 발생하는 극지 고층대기 변화를 규명한다.

1-2. 연구개발 필요성

가. 우주기상(space weather) 현상이 발생하는 근 지구 우주환경(near-Earth space environment)에서 극지고층대기(polar upper atmosphere)는 빛 에너지를 제외하고 태양에서 방출되는 다양한 형태의 에너지가 자기권(magnetosphere)을 통해 지구 대기로 유입되는 관문의 역할을 하는 아주 중요한 지역이다. 태양으로부터 지구 대기로 유입되는 에너지는 매우 다양한 형태를 띠고 있는데, 이 에너지는 자기장과 플라즈마로 이루어진 태양풍

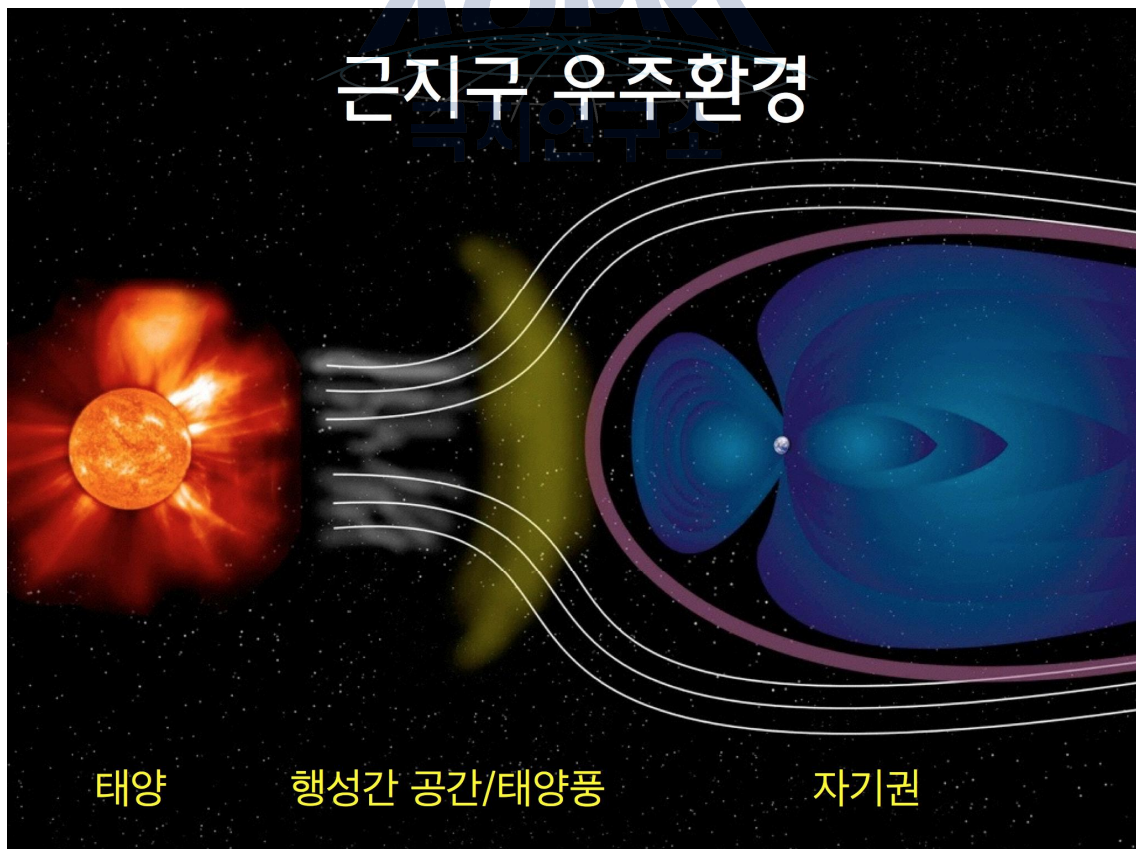


Fig. 1-1 근 지구 우주환경은 태양, 행성 간 공간 및 태양풍, 자기권, 고층대기로 이루어져 있으며, 극지 고층대기는 우주환경 에너지가 지구 대기로 유입되는 창과 같은 영역이다.

(solar wind)에 의해 지구에 도달하면, 지구 자기장과의 상호작용을 통해 전자기적 에너지의 형태로 극지 고층대기로 전달되기도 하고, 또는 태양풍에 실려온 고에너지 입자들은 외부 우주로 열려 있는 극지에서의 지구 자기장을 따라 직접 극지 고층대기로 유입되기도 한다 (Fig. 1-1).

나. 지구 자기권은 크게 두 부분으로 나누어 생각할 수 있는데, 극지고층대기로라 지역과 자기력선에 의해 연결되어 있으며, 태양 반대쪽에서는 자기권 꼬리를 형성하는 바깥쪽 자기권이 있다. 이 영역의 전자밀도는 상대적으로 낮고, 태양풍의 자기력선과 지구 자기력선이 결합되는 영역이며, 태양풍의 세기와 자기력선의 방향에 따라 그 구조 및 영역의 범위가 결정되는 영역이다. 한편, 오로라 지역 바깥쪽으로는 닫혀 있는 자기력선에 의해 비교적 높은 전자밀도를 유지하며, 자기권 안쪽을 차지하는 플라즈마권(plasmasphere)이 있다 (Fig. 1-2).

다. 태양풍과 자기권과의 상호작용에 의해 태양풍의 역학적 에너지가 전기적 에너지로 전환되어 자기력선을 따라 극지 고층대기로 전달된다. 이 전기적 에너지는 전류 또는 전기장의 형태로 극지 고층대기에 전달되어 전리권 플라즈마의 강한 운동을 일으켜 플라즈마 대류현상을 일으킨다(Fig. 1-3). 이 플라즈마 대류는 약 300 km 고도에서 발생하는데, 주변 중성대기에 운동 에너지를 전달하여 플라즈마 대류와 유사한 형태의 열권 바람을 일으키기도

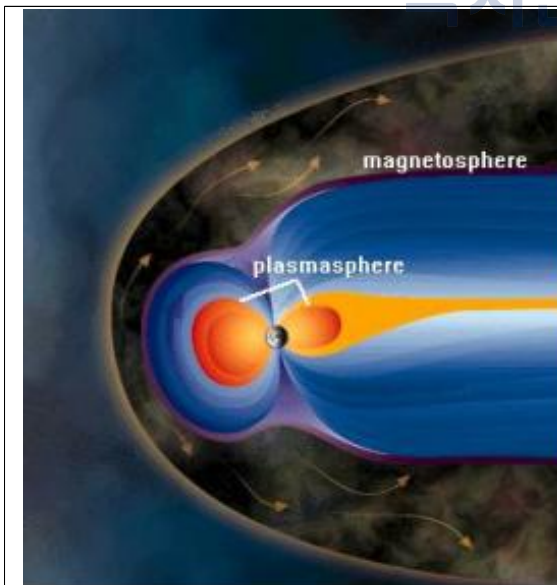


Fig. 1-2 자기권은 외부 자기권과 내부 자기권(플라즈마권)으로 구분해서 볼 수 있으며, 플라즈마권은 전리권의 연장으로 이해할 수 있다.

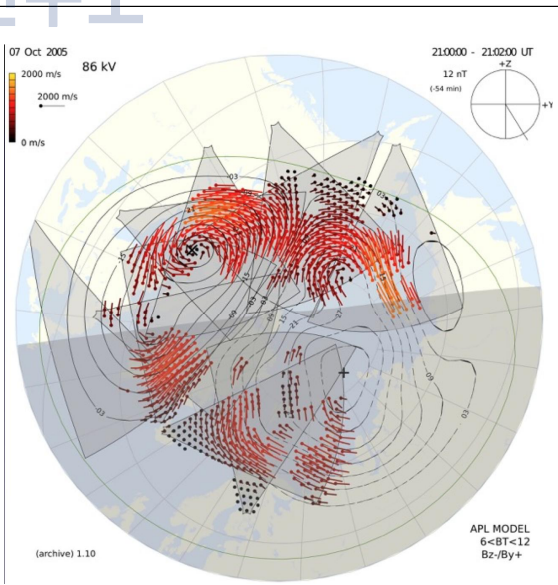


Fig. 1-3 자기권에서 생성된 전기장이 자기력선을 따라 극지 고층대기 전리권에 전달되어 강력한 플라즈마 대류현상을 일으킨다. (SuperDARN Radar 관측)

한다. 이러한 과정에서 이온과 중성입자와의 마찰에 의해 열이 발생하고, 이는 주변 중성대기의 온도를 크게 상승시키는 역할을 한다. 이와 같은 극지 고층대기 온도 상승은 주로 밤에 많이 발생하며, 낮 동안 적도부근에서의 태양열에 의한 온도 상승과 함께 전 지구적 열권 바람을 형성에 기여한다.

라. 극지고층대기에서의 발생하는 자기권-전리권-열권의 상호작용은 극지에서만 머무는 것이 아니라, 전 지구적으로 고층대기 역학에 큰 영향을 미친다. 그리고 이 상호작용은 고에너지 입자와 함께 극지고층대기에서 전리권 전자밀도와 열권 온도 및 바람에 결정적인 영향을 미친다. 이러한 일련의 물리적 과정은 지자기 폭풍이 발생하면 그 영향이 몇 배나 상승하여 전 지구적으로 고층대기에 큰 변화를 초래한다. 또한 이러한 지자기 폭풍의 영향은 고층대

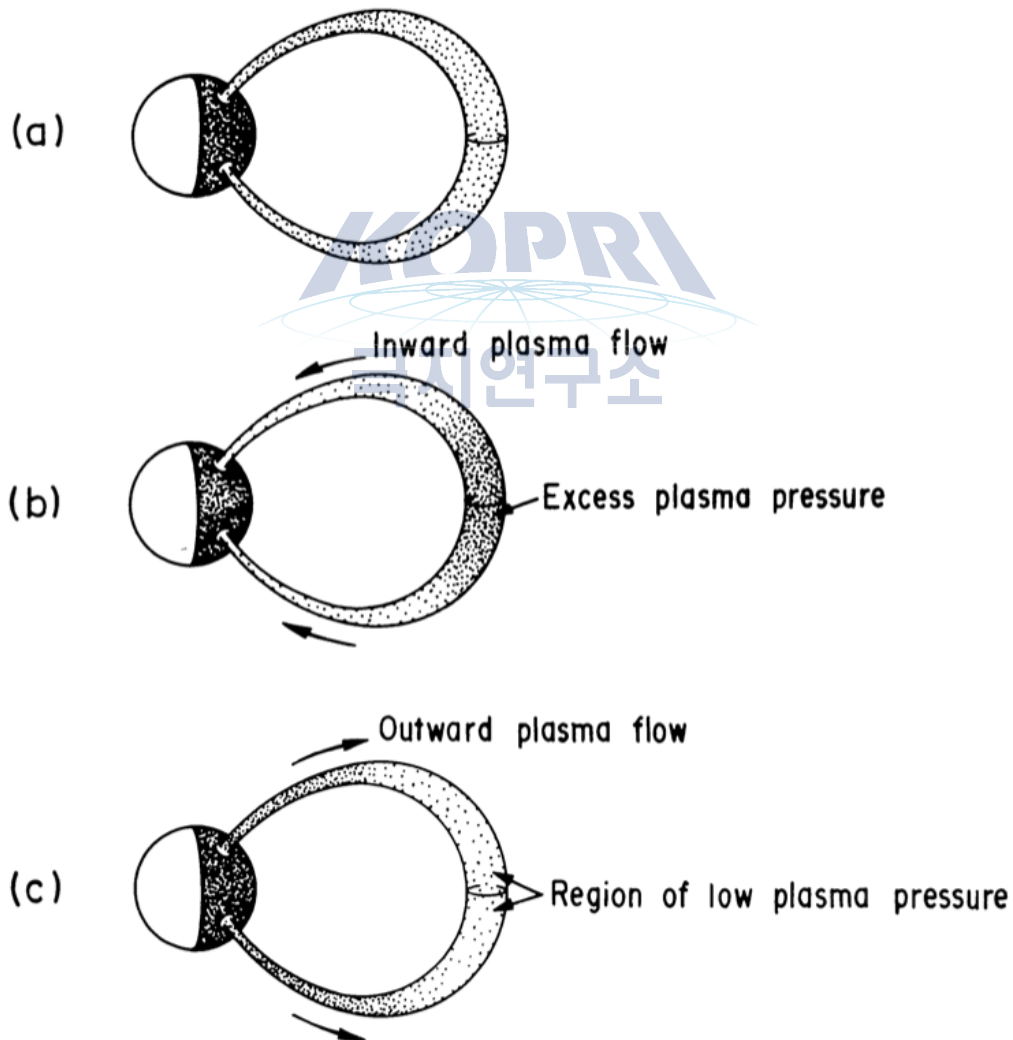


Fig. 1-4 플라즈마권과 전리권 사이에서 자기력선을 따라 이동하는 플라즈마. 여러 가지 환경 변화에 따라 다른 특성을 보인다[Banks et al., 1976].

기에만 머물지 않고 중간권-성층권까지 내려갈 수 있다. 지자기 폭풍 발생 시 크게 증가하는 고에너지 입자 유입은 NO_x/HO_y 생성에 영향을 주고, 이들은 화학반응에 의해 오존 밀도를 감소시키는 역할을 하는 것으로 알려져 있다 [Randall et al., 2007].

마. 내부 자기권을 형성하는 플라즈마권은 오로라 지역 바깥에서 중위도에 걸쳐 전리권 전자밀도와 밀접한 관계가 있다. 플라즈마권에 존재하는 수소 이온들은 대부분 전리권에서 자기력선을 따라 플라즈마권으로 올라온 것으로, 주로 낮에 공급되고, 밤에는 다시 전리권으로 이동하여 밤 전리권 전자밀도 유지에 도움을 준다 (Fig. 1-4). 이러한 플라즈마권-전리권 간에 발생하는 이온 이동은 계절, 태양활동 주기, 지자기 폭풍 발생 여부에 따라 그 정도가 달라지며, 이는 전리권 전자밀도 분포의 정확한 예측을 위해 반드시 밝혀져야 하는 부분이다 [Evans et al., 1978; Forster et al., 2000; Singh and Singh, 1997; Richards et al., 2000; Foster and Jakowski, 2000; Lee et al., 2013].

바. 극지고층대기는 자기권/플라즈마권 등의 우주환경이외에도 지상 및 저층대

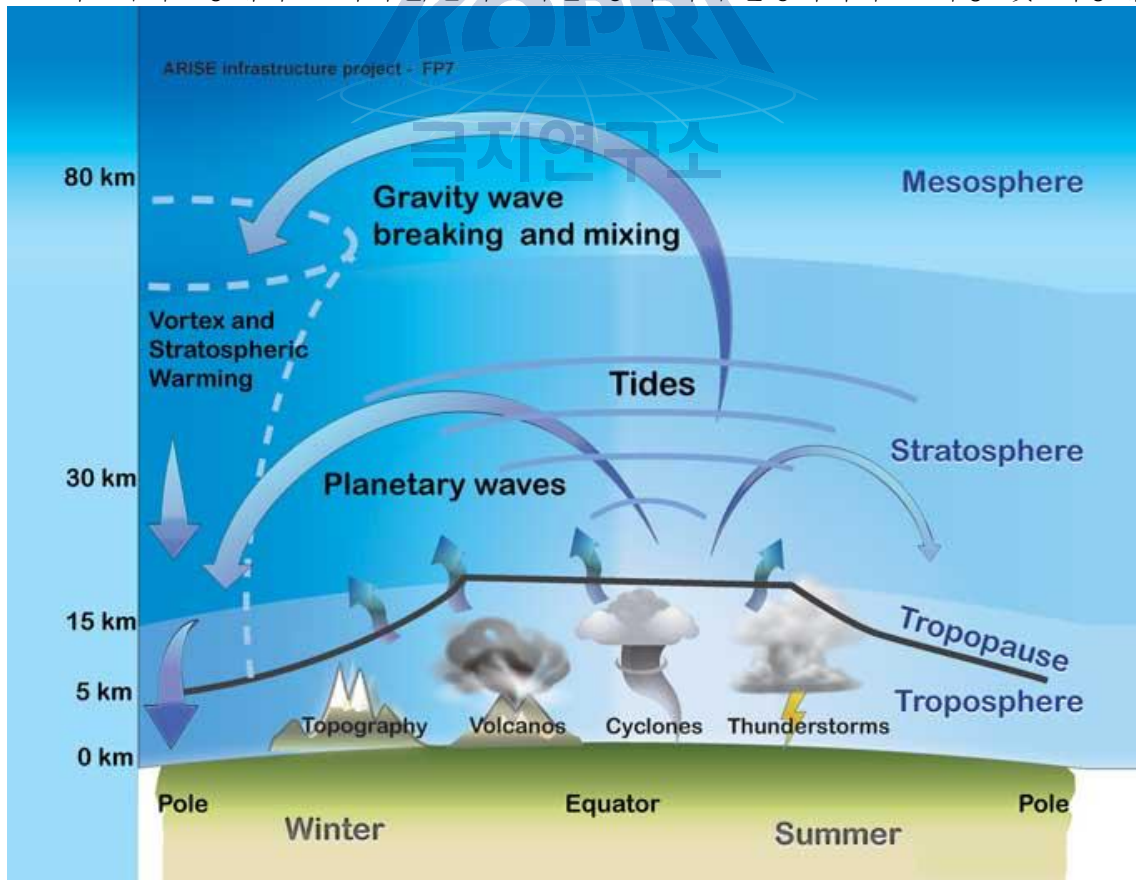


Fig. 1-5 지상 및 저층대기에서 발생되어 고층대기로 전파되는 다양한 대기 파동현상. 대기중력파, 행성파, 조석파 등이 각각 다른 특성을 가지고 고층대기에 영향을 미친다.

기에서 발생되어 고층대기로 전파되는 파동현상(대기중력파, 행성파, 조석파)에 의해서도 큰 영향을 받는다. 대기중력파의 경우 성층권/중간권에서 중성바람과의 상호작용에 의해 고층대기의 역학적 특성에 핵심적인 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 또한 최근 뜨거운 이슈가 되고 있는 성층권 돌연승온현상에서 행성파가 그 원인으로 알려지고 있으며, 이 현상은 극지고층 대기 열권 및 전리권에도 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Fig. 1-6) [Fritts et al., 2002; Won et al., 2001; Wu et al., 2004; Vadas et al., 2013].

사. 국내 우주산업의 비약적인 발전으로 우주 기상예측의 필요성이 급격히 대두되고 있다. 통신, 기상, 군사, 과학 인공위성의 비약적인 증가로 인공위성의 안정적인 운영/유지가 필수적이다. 우주기상현상으로 인해 인공위성 운영/유지에 발생할 수 있는 천문학적 손실을 최소화하기 위해서는 우주기상예측 연구가 선행되어야 한다.



1-3. 연구개발 내용 및 범위

극지 고층대기는 지구 자기장의 구조적 특성 상 태양 및 우주환경으로부터의 에너지가 지구 대기로 직접 유입되는 영역으로, 중저위도 고층대기와는 매우 다른 물리적 현상들이 발생하며, 극지 고층대기로 유입된 에너지는 중저위도 고층대기에도 중요한 영향을 미친다. 태양에서는 가시광선, 자외선(UV), 극자외선(EUV), x-선 등의 빛 에너지와 함께, 태양 자기장과 고에너지 입자들이 태양풍을 형성하여 지구에 도달하고, 자기권과의 상호작용을 통해 극지 고층대기로 다양한 형태의 에너지가 전달한다. 또한 지상 및 저층대기에서 발생하는 대기 중력과, 행성과, 조석과 등 여러 가지 파동현상들과 온실가스, 에어로졸 등의 대기구성물질 변화는 높은 고도로 이동하여 고층대기 변화에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Fig. 1-6). 따라서 극지 고층대기 변화를 이해하기 위해서는 우주환경과 저층대기에서 극

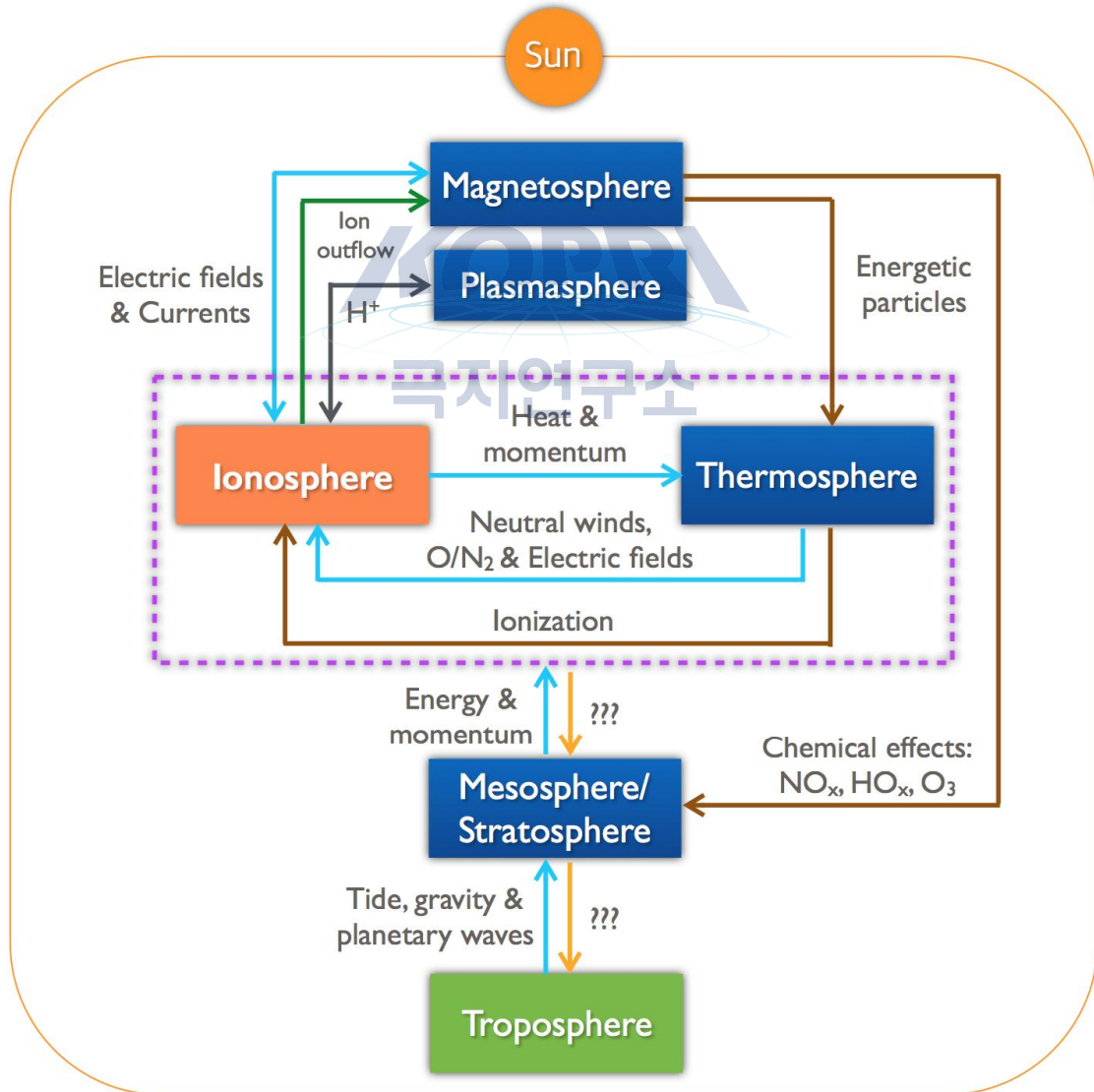


Fig. 1-6 태양 및 우주환경과 극지 고층대기(중간권-열권-전리권) 그리고 저층대기의 상호작용. 극지 고층대기는 우주환경과 저층대기에서 동시에 영향을 받는다.

지 고층대기로 이어지는 다양한 형태의 에너지 흐름에 대한 상호작용의 이해가 필수적이다[Jee et al., 2014].

가. 외부 우주환경 변화의 의한 극지고층대기 변화 연구

태양에서 비주기적으로 발생하는 태양 플레어(Solar flare), 코로나 물질 대 방출(Coronal mass ejection: CME)과 같은 태양폭발 현상이 발생하면(이들은 태양 극대기에 훨씬 자주 발생된다), 지구에 전달되는 태양 에너지가 폭발적으로 증가하여 자기권과 고층대기에 큰 변화가 일어나게 된다. 이와 같은 현상을 자기 폭풍(Geomagnetic storm)이라고 하며, 이때 지구 주변 우주환경에는 다양한 형태의 우주기상 현상이 발생한다. 지자기 폭풍 발생 시 극지 고층대기에 전달된 태양에너지는 전지구적 대기 순환을 통해서 중저위도 고층대기로 그 영향이 확대되며, 전자기적 메커니즘을 통해서 적도 지역 고층대기에 직접 영향을 미치기도 한다 (Fig. 1-7).

또 다른 형태의 에너지는 태양풍과 함께 지구에 도달한 높은 에너지를 가진 전자와 양성자가 지구 자기력선을 따라 극지 고층대기로 유입되어 고층대기 구성입자와의 상호작용에 의해 다양한 물리적 현상들을 일으킨다. 이와 같은 고에너지 전

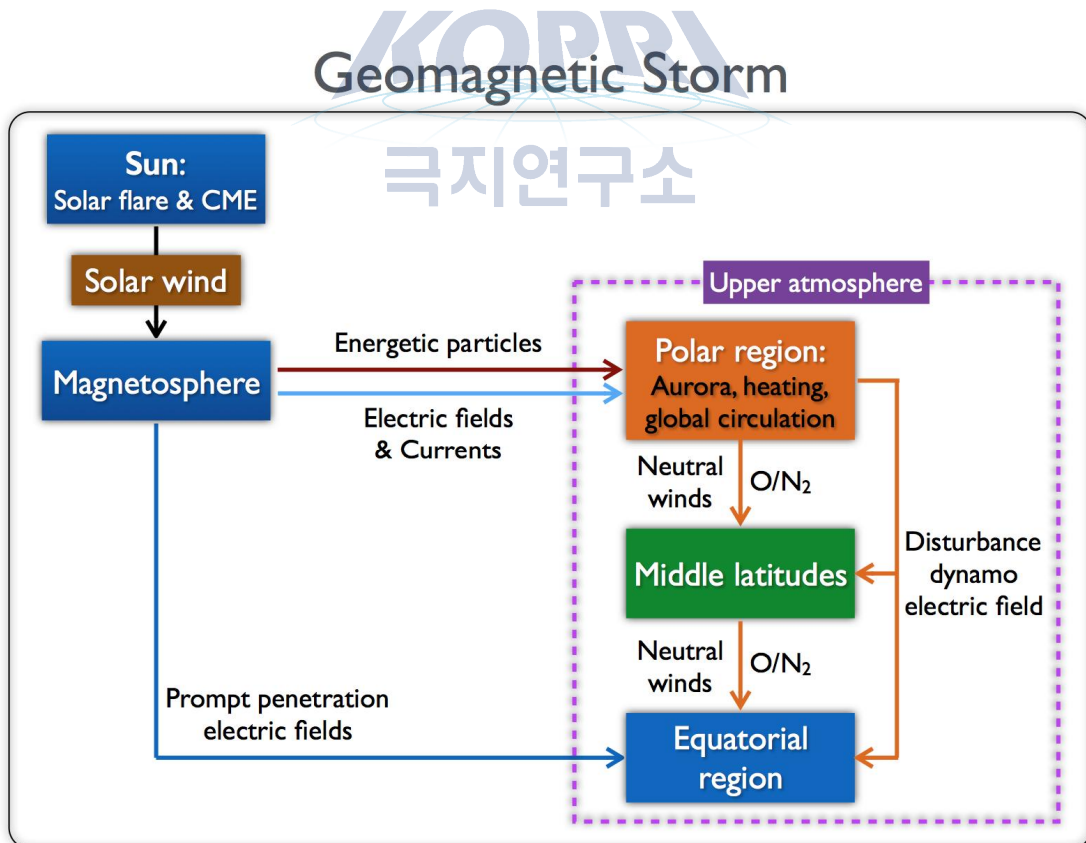


Fig. 1-7 태양 및 우주환경으로부터 극지 고층대기로 유입된 에너지는 오로라를 발생시킴과 동시에 전리권 플라즈마 밀도 상승, 플라즈마 대류 유도, 열권 온도/바람 상승 등을 일으키며, 고에너지 입자는 저층대기에까지 영향을 미친다.

자와 양성자들은 고층대기 중성입자와 충돌하여 이온화를 일으켜 전리권 플라즈마 밀도를 증가시키며, 또한 오로라를 발생시킨다. 특히 오로라는 자기권-전리권 상호작용에 의해 높은 에너지를 가지게 된 전자들이 자기권 꼬리에서 고층대기로 진입하여 발생한다.

한편 우주선이나 고에너지 전자/양성자는 중간권-성층권까지 진입하여 대기 중 NO_x, HO_x 분자 생성/소멸 기작에 영향을 미쳐 오존 밀도 감소를 일으키기도 한다.

나. 저층대기 파동현상 및 대기 구성물질 변화에 의한 극지고층대기 변화 연구
 지상 및 저층대기에서는 여러 가지 파동현상이 발생되는데, 대기중력파 (Atmospheric Gravity Wave: AGW), 행성파(Planetary wave), 조석파(Tidal wave) 등의 파동은 고층대기로 전파되어 주변 고층대기 바람과의 상호작용을 통해 에너지와 운동량을 고층대기에 전달한다. 대기중력파에 의해 고층대기에 전달된 에너지는 고층대기의 열역학적 특성 변화를 일으켜, 고층대기 온도의 계절적 특성에 중요한 역할을 한다. 저층대기 행성파는 성층권 돌연승온 현상을 일으키는 주요 원인으로 알려져 있으며, 이것은 중간권-열권에서의 온도 변화는 물론 전리권 플라즈마 밀도에까지 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[Fritts, et al., 2002; Lee et al., 2013].

Lower-upper atmosphere coupling

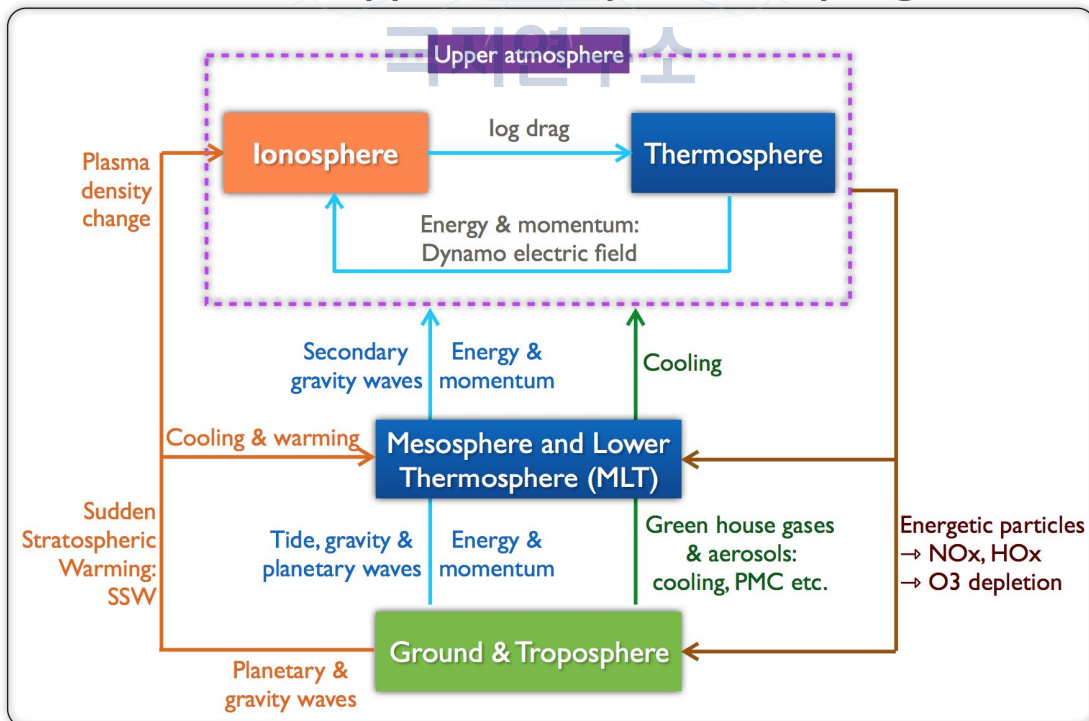


Fig. 1-8 지상 및 저층대기에서 발생하는 대기중력파, 행성파, 조석파 등은 고층대기 밀도, 온도, 대기순환 등에 영향을 미치고, 플라즈마권 전자밀도 변화를 일으키기도 한다. 또한 성층권 돌연승온현상과도 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다.

과동현상 이외에도 온실가스, 에어로졸 등의 저층대기의 구성물질이 고층대기로 전파되어 다양한 영향을 미친다. 저층대기 온실가스는 고층대기로 전파되면, 저층대기에서의 온도 상승효과와는 반대로, 고층대기 온도를 감소시키는 것으로 알려져 있다. 따라서 고층대기 온도의 장기적인 변화경향을 연구하기 위해서는 저층대기에서 고층대기로 전파된 온실가스 변화에 의한 고층대기 온도변화를 포함시켜야 한다. 또한 저층대기에서 발생된 에어로졸은 중간권으로 전파되어 극지 중간권 야광운(Polar Mesospheric Cloud: PMC)이나 극지 중간권 여름 에코(Polar Mesospheric Summer Echo: PMSE) 현상과 깊은 관련성을 가지고 있다(Fig 1-8).

다. 극지 고층대기 전리권-열권의 물리적 특성 연구

극지 고층대기에서 핵심적인 영역이라고 볼 수 있는 전리권과 열권은 200~400 km 고도에서 이온-중성입자 상호작용(ion-neutral coupling)을 통하여 활발하게 상호작용하고 있으며, 태양 및 우주환경으로부터 유입된 에너지를 받아들이는 영역이다. 극지 전리권은 자기권을 통해 극지 고층대기로 유입되는 에너지를 받아들이는 창구와 같은 역할을 하는 영역으로 상대적으로 작은 플라즈마 밀도임에도 불구하고, 극지 열권의 동역학을 지배하고 있다. 자기력선으로 따라 극지 전리권으로 유입된 전자기적 에너지는 강력한 플라즈마 대류를 통해 열권 바람을 유도하고,

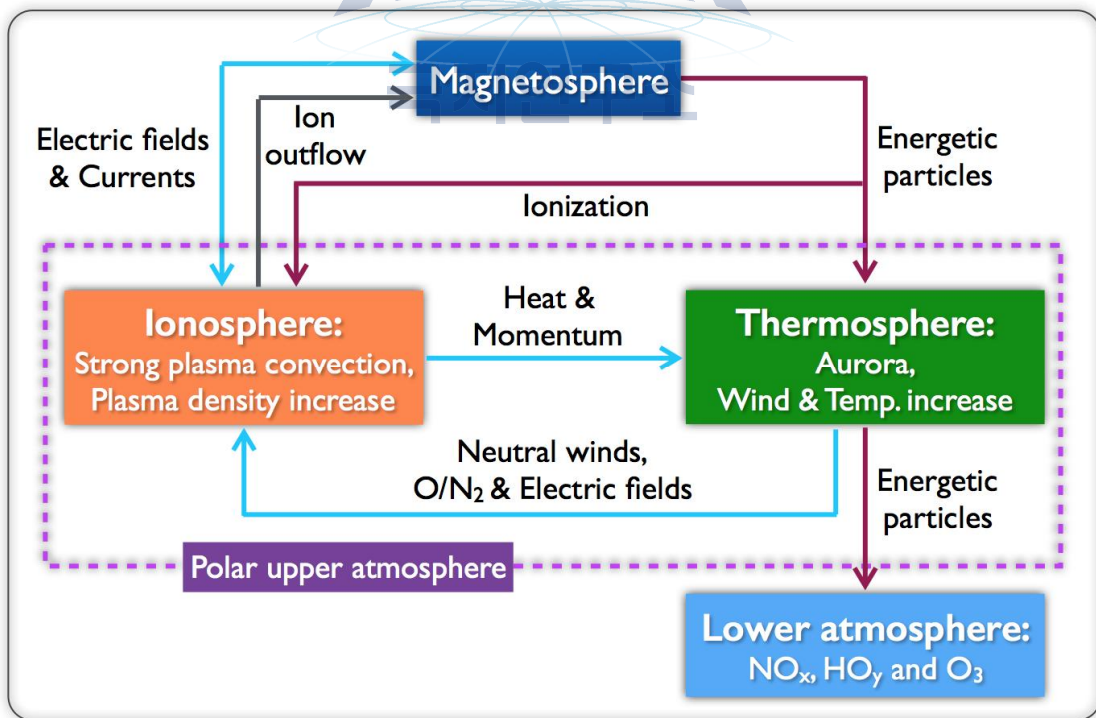


Fig. 1-9 극지 고층대기 전리권-열권은 우주환경으로부터 다양한 형태의 에너지를 직접 받아들이는 영역으로 외부 환경 변화에 의한 전리권-열권 변화의 지속적으로 모니터링이 필수적이다. 또한 전리권-열권 간 상호작용의 이해를 위해서는 이온-중성입자 상호작용 기작의 이해가 필요하다.

Joule heating을 통해 극지 열권 온도를 상승시켜, 특히 지자기 폭풍 발생 시에는 극지에서 적도 방향으로의 고층대기 대순환을 일으키기도 한다. 또한 극지 전리권에서는 다양한 이온들이 자기권으로 이동하여 자기권에 플라즈마 공급해주는 역할을 한다(Fig. 1-9).



제 2 장 국내외 기술개발 현황

2-1. 국내 동향

가. 우주환경 및 우주기상 연구는 주로 우주개발 등에 직접 참여하고 있는 국가들을 중심으로 수행되어 왔으나, 최근에는 기상, 통신, 위성항법 등 인공위성 활용이 보편화되면서 여러 나라에서 우주기상 연구가 수행되고 있다. 국내에서도 다수의 인공위성 보유, 우주센터 설립, 자체 로켓 발사 성공, 최초 우주인 양성, 달탐사 추진 등 본격적인 우주개발 사업을 추진하면서 우주환경 및 우주기상 연구의 필요성이 급격히 대두되고 있다.

나. 한국항공우주연구원(KARI), 한국과학기술원(KAIST) 인공위성연구센터(SaTRaC), 경희대학교 우주탐사학과를 중심으로 로켓, 인공위성 개발과 함께 우주환경 관측용 위성 탑재체 개발이 수행되고 있다.

다. 우주환경연구는 한국천문연구원, 극지연구소, 서울대학교, 한국과학기술원, 충남대학교, 충북대학교, 경희대학교 등에서 수행되고 있다

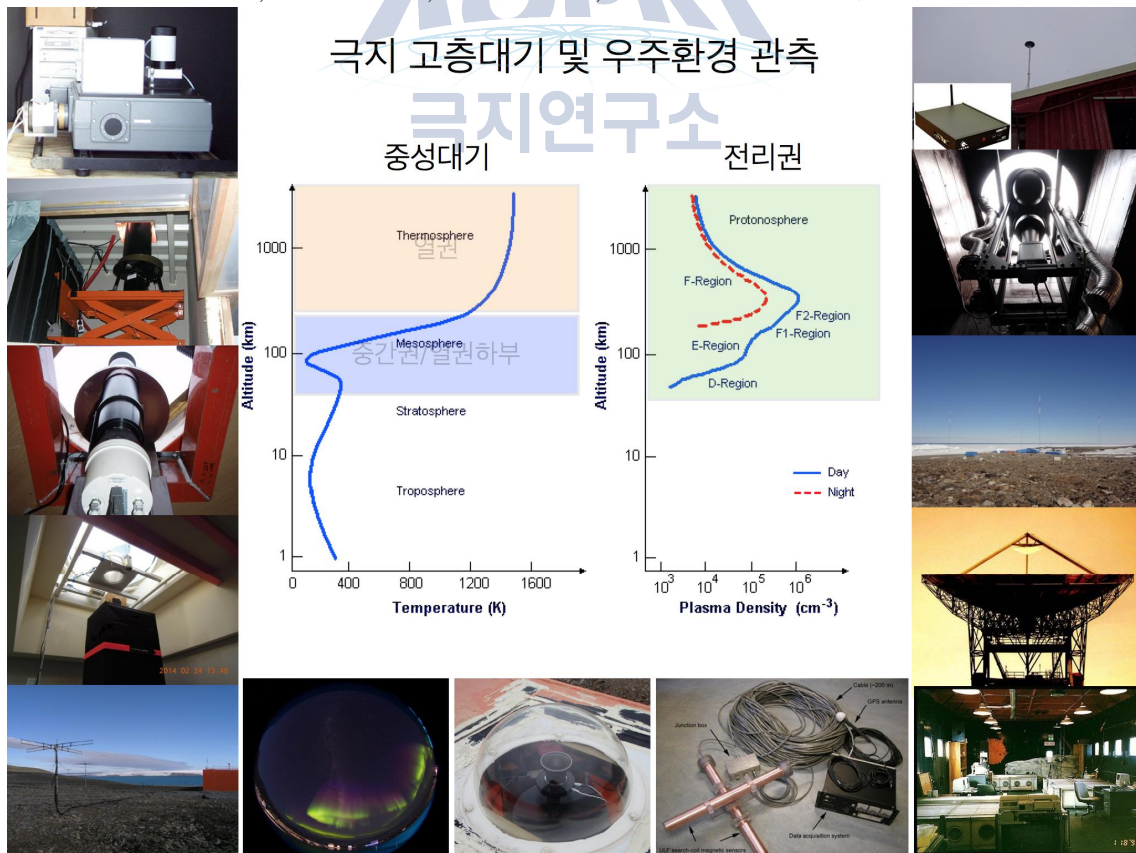


Fig. 2-1 극지연구소는 남북극에서 운영 중인 기지에 극지 고층대기 및 우주환경 관측을 위해 다양한 지상관측을 수행하고 있다.

- 한국천문연구원과 국립전파연구원 우주전파센터에서는 국내에 태양, 자기권, 전리권 등 다양한 우주환경 지상 관측을 수행 중이며, 관련 연구가 활발히 수행 중에 있다.
- 극지연구소에서는 남북극 극지 기지를 중심으로 극지 고층대기 및 우주환경 지상 관측을 수행 중이다(Fig.2-1).
- 기상청 국가기상위성센터, 한국천문연구원, 경희대학교에서는 인공위성을 이용한 우주환경 관측을 추진하고 있다.

라. 기상청 국가기상위성센터와 국립전파연구원 우주전파센터에서는 우주기상예측모델 개발을 위해서 국내 대학 및 정부출연연구기관과 공동 연구를 수행 중이다.

2-2. 국외 동향

가. 미국, 영국, 유럽, 일본, 중국 등 선진국에서는 남북극 과학기지에 단일 또는 국제 공동 대규모 지상 관측시설투자를 통해 극지 우주환경 및 고층대기 연구를 수행하고 있으며, 지상관측과 동시에 극궤도 인공위성을 통한 관측이 활발하게 수행되고 있다.

나. 유럽은 1970년대 초반부터 국제 공동 관측프로그램인 EISCAT 레이더 시스템을 구축하기 시작해서 북극권 지역인 노르웨이 스발바드, 트롬소, 핀란드 소당키아, 스웨덴 키루나 등지에서 전리권 레이더 시스템을 구축해 운영해 왔으며, 최근에서 차세대 고층대기 전리권 레이더 시스템인 EISCAT_3D를 2020년 운영을 목표로 구축하는 등 북극권 고층대기 연구를 활발하게 수행하고 있다. 또한 독일에서는 2000년부터 CHAMP 위성을 이용하여 고층대기 관측을 지속적으로 수행해 오고 있으며, 유럽 우주국(ESA)에서는 최근

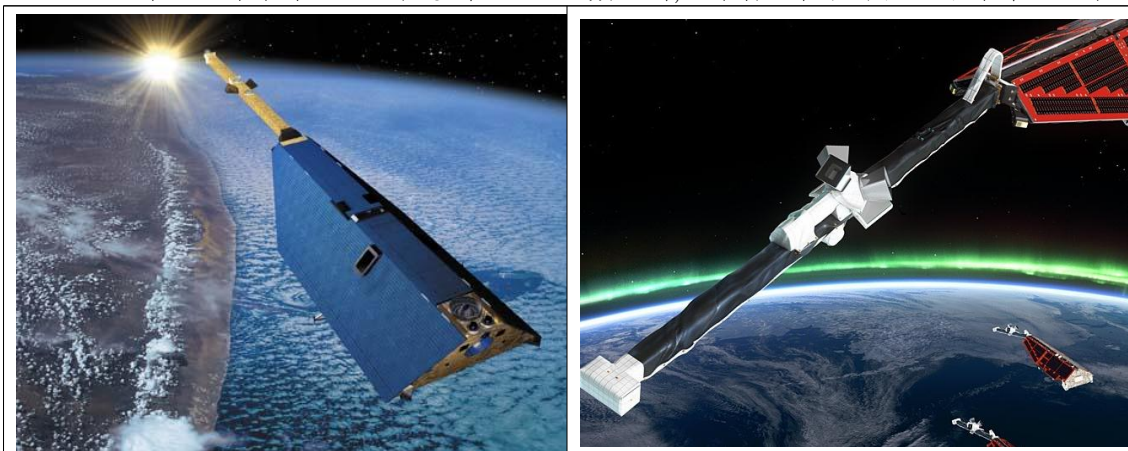


Fig. 2-2 고층대기 전리권 및 열권 관측을 위해 쏘아 올려진 CHAMP(left) and SWARM(right) 인공위성.

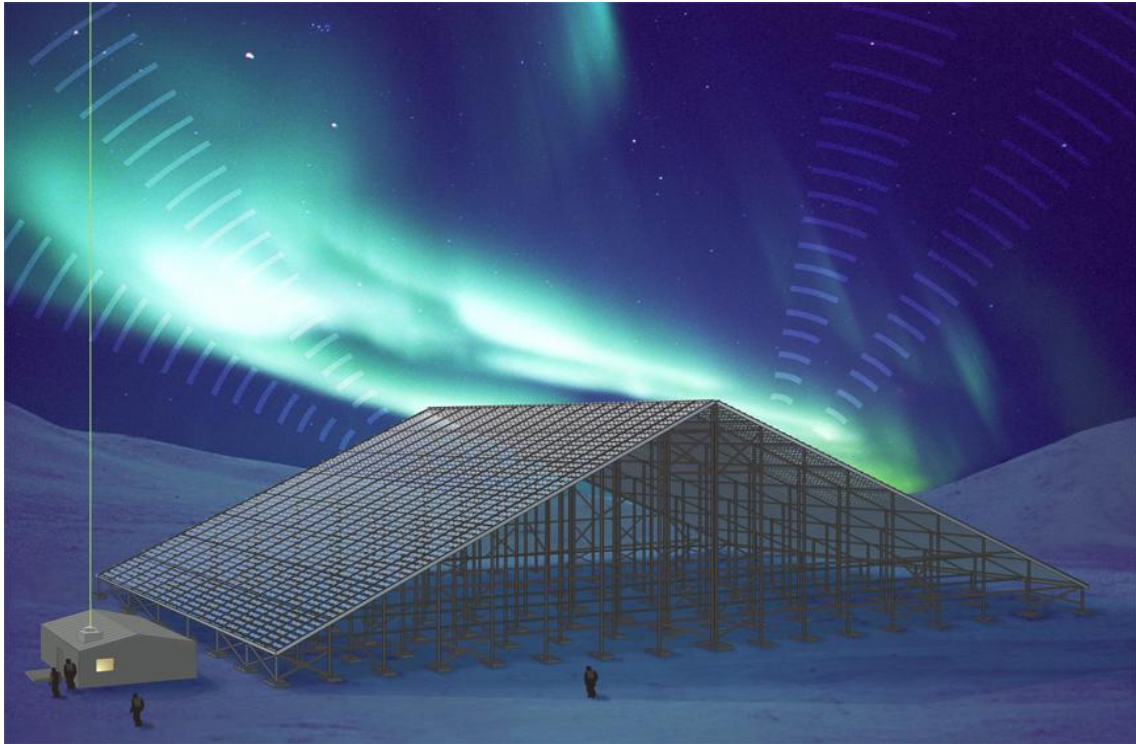


Fig. 2-3 미국 알래스카 포커플랫에서 운영되고 있는 극지 전리권 레이더 시스템 AMISR (Advanced Modular Incoherent Scatter Radar).

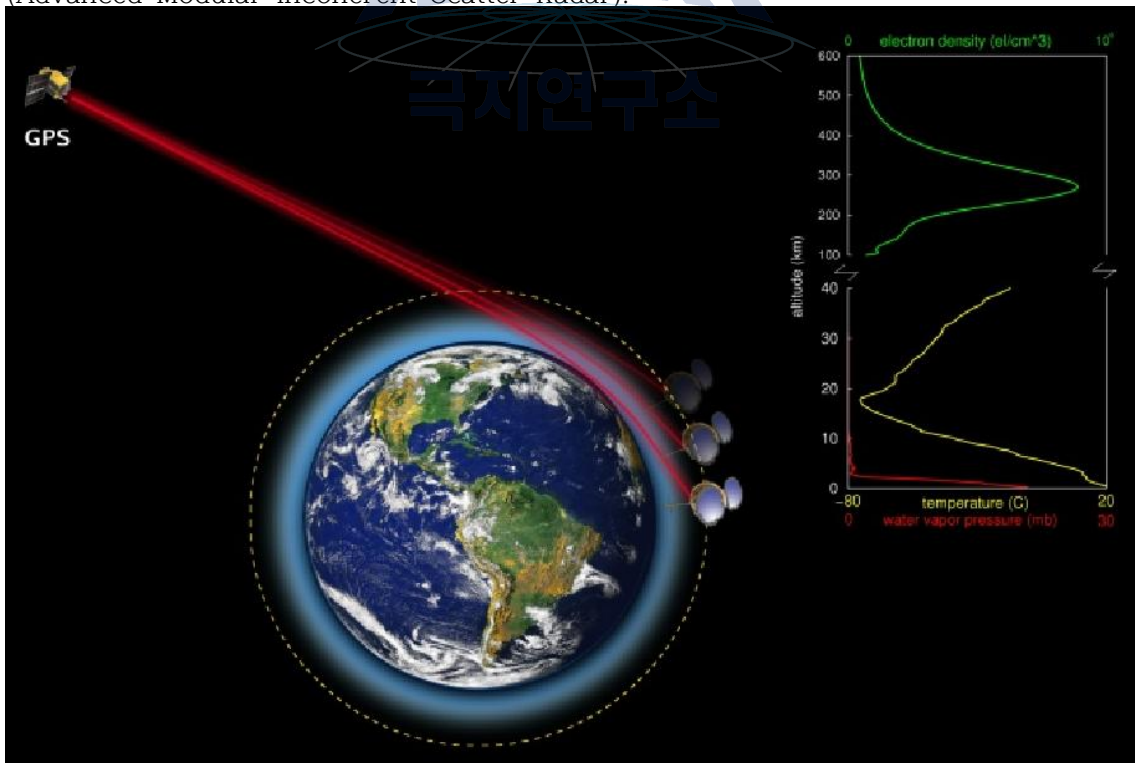


Fig. 2-4 대만이 미국과 공동으로 운영 중인 COSMIC 위성 고층대기 관측 시스템. 전리권 및 저층대기 관측이 수행 중이며, 이 위성 관측의 성공에 힘입어 COSMIC-2 시스템이 추진되고 있다.

2013년부터 3대의 위성으로 구성되어 있는 SWARM 위성관측시스템을 운영하며 우주환경 및 고층대기 관측을 수행하고 있다(Fig. 2-2).

다. 미국은 캐나다 리졸롯 베이, 알래스카 등지에서 고층대기 관측용 지상 대형 레이더(AMISR: Advanced Modular Incoherent Scatter Radar) 및 광학 관측을 중심으로 극지 고층대기 관측을 지속적으로 수행해 왔다. 또한 단독 또는 국제 공동협력을 통해 다양한 인공위성 관측을 수행하며, 전 세계 연구자들에게 방대한 우주환경 및 극지 고층대기 관측자료를 제공해오고 있다. 최근에는 우주기상예측모델 개발을 위한 수치모델 연구를 중심으로 우주환경 및 고층대기 연구를 선도하고 있다(Fig. 2-3).

라. 타이완은 2006년 미국과 공동으로 COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate) 위성 프로그램을 개발하고, 기상/기후 및 우주기상 관측을 위한 다양한 관측기기를 6개의 인공위성에 탑재하여 전 세계 연구자들에게 다양한 관측자료를 제공하고 있다. 또한 COSMIC 프로그램의 성공에 힘입어, 차세대 기상/우주기상 관측 인공위성 시스템인

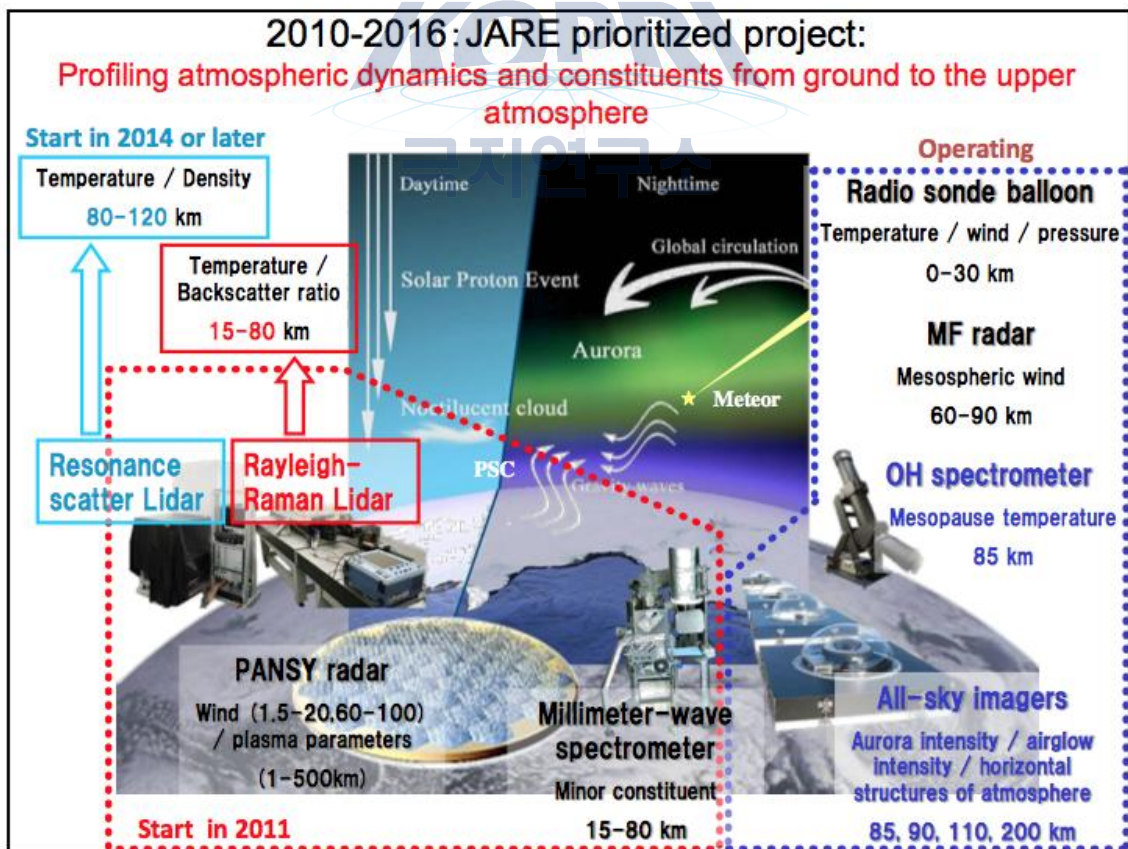


Fig. 2-5 Observations for the upper atmosphere at Japanese Syowa station, Antarctica. There are various optical and radar instruments to observe the upper atmosphere.

COSMIC-2를 추진하는 등, 단기간에 우주환경 및 고층대기 연구의 핵심 국가로 부상하였으며, 중요한 역할을 수행하고 있다(Fig. 2-4).

- 마. 일본은 남극 쇼와기지에서 극지고층대기 관측을 위한 다양한 광학 및 레이더 장비를 운영하고 있으며, 최근에는 쇼와기지에 대형 레이더 시스템(PANSY)을 설치하여 저층에서 고층대기에 이르는 대기영역의 통합 관측을 시도하고 있다 (Fig. 7). 또한 북극지역에서도 EISCAT 레이더 프로그램 참여, 스발바드/니알슨 과학기지에서의 오로라, 대기 과동현상 등의 고층대기 관측연구를 수행하고 있으며, 남극과 북극 고층대기의 동시 관측을 통한 상호 비교연구 등 활발한 고층대기 연구를 진행하고 있다.
- 바. 중국은 남극 중산기지, 장성기지, 남극내륙기지인 곤륜기지에 이어 제2 내륙기지인 태산기지를 완공하는 등 지상관측인프라 확장에 주력하고 있다. 이들 남극기지에서 다양한 극지 우주환경 및 고층대기 관측 프로그램 수행하고 있으며, 북극에서도 EISCAT 프로그램의 주도적인 참여와 스발바드/니알슨에서의 오로라 관측 등을 중심으로 고층대기 연구를 활발히 수행하고 있다.
- 사. SCAR Horizon Scan에서 지정한 남극에서의 여섯 가지 우선 연구분야에 우주환경/고층대기 연구가 포함되어 있으며, 최종 질문 리스트 중 “Near-Earth Space and Beyond - Eyes on the Sky” 항목에서 남북극 고층대기의 차이 발생 원인과 구성 요소 간 연직 상호작용의 역할 규명 연구, 우주환경/우주기상현상이 극지 고층대기 전리권 및 전지구적 대기에 미치는 영향 규명 연구 등이 포함되어 있어, 본 과제 연구목표와 잘 부합되고 있다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

3-1. 연구개발 목표 및 내용

연구개발 목표	내용
외부 우주환경 변화에 의한 극지 고층대기 및 저층대기 변화 규명	<ul style="list-style-type: none"> ○ 태양활동, 태양풍, 자기권 등의 외부 우주환경 변화에 따른 극지 전리권 및 열권의 동역학적 특성 연구 ○ 오로라의 발생 및 시공간적 분포 특성과 극지 고층대기 변화와의 상관관계 이해 ○ 우주선/고에너지 입자 유입에 의한 극지 고층-저층대기 구성입자 및 온도 변화 기작 규명
저층대기 파동현상 및 대기 구성물질 변화에 의한 극지 고층대기 변화 규명	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전천카메라, 유성레이더, 전리권 레이더 관측에 의한 대기중력파의 물리적 특성 이해 ○ 대기중력파, 행성파, 조석파 등 대기파동에 의한 극지 고층대기의 동역학적 변화 이해 ○ 저층대기 행성파에 의한 성층권 돌연승온 발생과 고층대기 온도 및 전리권 전자밀도 변화의 상관관계 이해 ○ 극지 중간권 및 열권하부(MLT)의 물리적 특성 이해
극지 고층대기 전리권-열권의 물리적 특성 이해	<ul style="list-style-type: none"> ○ 극지 전리권 플라즈마 밀도 및 열권 바람/온도의 장기적 변화경향 파악 ○ 극지 고층대기에서 이온-중성입자 상호작용 기작 규명 ○ 남북극 상호작용에 의한 극지 전리권-열권의 물리적 특성 변화 파악

3-2. 연구개발수행 결과

극지 고층대기의 물리적 상태는 위로는 태양 및 자기권 등의 우주환경에 의해 에너지를 공급받으며, 아래로는 지상 및 저층대기의 물리/화학적 상태에 의해 영향을 받아 결정된다. 우선 외부 우주환경의 영향은 자기권과 극지 고층대기의 상호작용을 통해서 유입되는데, 크게 두 가지 측면에서 생각해볼 수 있다. 첫째, 자기권을 통해서 극지 전리권으로 유입되는 전자기적 에너지가 있다. 태양풍과 함께 지구에 도달한 태양 에너지는 지구 자기장과의 상호작용을 통해 자기권에 축적된 전자기적 에너지 형태로 지구 자기력선을 따라 극지 고층대기 전리권에 전달된다. 이 에너지는 극지 전리권에서 강력한 플라즈마 대류를 형성시키며, 이온-중성입자 상호작용을 통해 주변 열권에 강한 바람을 일으킴과 동시에 열권을 뜨겁게 달구는 역할을 한다. 뜨겁게 달궈진 극지 열권은 중저위도로 향하는 전지구적 대기 순환을 일으켜 중저위도 고층대기의 역학적 특성을 변화시킨다. 또 다른 형태의 태양 에너지는 고에너지 입자(주로 전자와 양성자)로서, 자기력선을 따라 극지 고층대기로 직접 유입되어, 대기 구성입자와 충돌에 의해

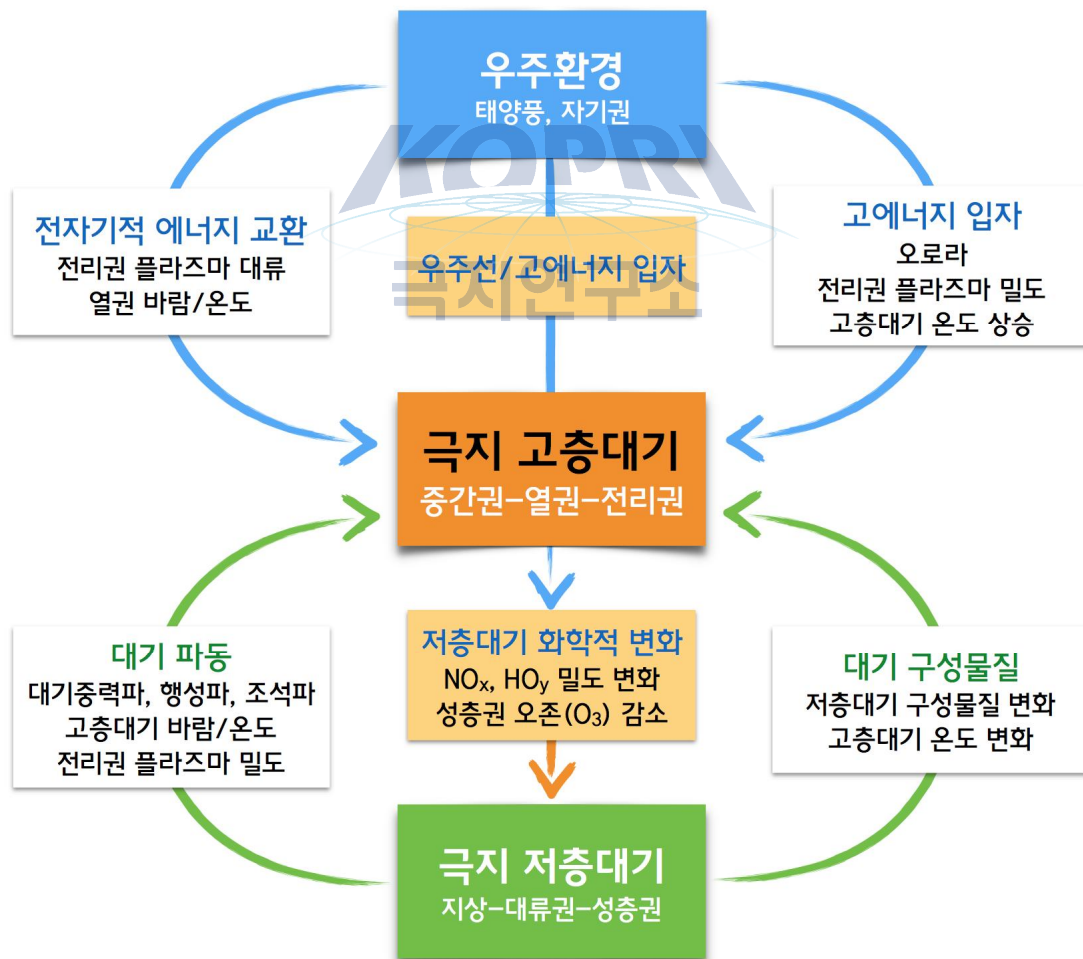


Fig. 3-1 극지고층대기를 중심으로 발생하는 연직상호작용. 태양에너지는 태양풍과 자기권을 통해서 극지고층대기로 유입되고, 또한 저층대기에서 발생하는 파동 및 온실가스는 고층대기로 전파된다.

오로라를 일으키고, 전리권 플라즈마 밀도를 증가시키기도 한다.

지상 및 저층대기에서의 물리/화학적 변화는 고층대기로 전파되어 고층대기의 동역학적 특성에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 우선 저층대기에서 발생하는 다양한 파장대의 대기 파동은 고층대기로 전파되면서 대기 밀도 감소와 함께 그 에너지가 증폭되어 고층대기에 에너지와 운동량을 전달한다. 특히 대기중력파는 주변 고층 대기 바람과의 상호작용에 의해 고층대기의 물리적 상태를 결정하는 역할을 한다. 행성파는 성층권 돌연승은 현상을 일으키는 것으로 알려져 있으며, 이 현상은 중간권-열권 온도를 변화시키고, 전리권 플라즈마 밀도 변화까지 일으킨다.

우주환경-극지 고층대기-저층대기 사이에서 일어나는 에너지의 흐름은 각 영역 간 상호작용을 통해서 일어나기 때문에, 우주환경-고층대기와 고층대기-저층대기 간 연직 상호작용의 이해가 필수적이다. 특히 극지에서는 지구 자기장의 구조적 특성으로 이와 같은 연직 상호작용의 중요성이 훨씬 크다.

가. 우주환경 변화에 의한 극지 고층 및 저층대기 변화 연구

○ 자기권과 극지 전리권 상호작용 연구

- 극지 고층대기는 지구 자기력선에 의해 자기권과 전자기적으로 밀접하게 연결되어 있다. 자기권에 전자기 에너지로 축적되어 있는 태양 에너지는 이 자기력선을 따라 극지 전리권에 전달되어 전리권의 물리적 상태를 결정한다. 반대로 극지 전리권에서는 이온들이 자기권으로 이동하여 자기권 내 플라즈마의 출처가 된다. 이와 같은 자기권-극지 전리권 상호작용 연구를 위해서 오로라 지역 안쪽에 위치해 있는 남극 장보고 과학기지는 최적의 관측환경을 제공할 수 있다.
- 장보고기지: 2016년 12월 극지연구소 장보고기지(JBS)에 지구 자기권에서 발생

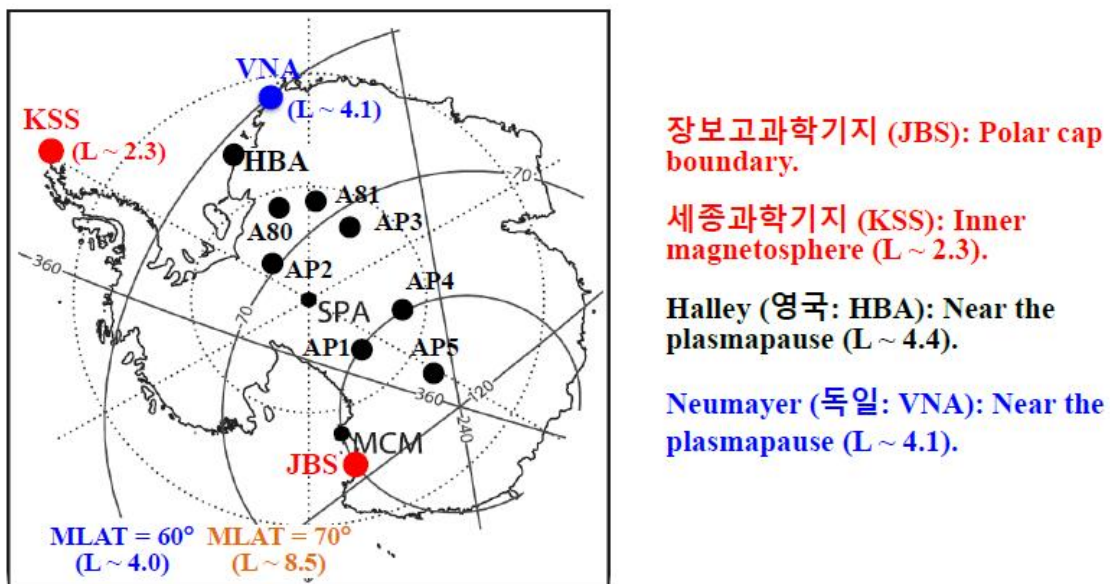


Fig. 3-2 자기권-전리권 상호작용 연구를 남극대륙에서 운용되고 우주환경 관측기지.

한 플라즈마 파동의 전리권 전파관측을 위한 서치코일 자기장 측정기 장비가 설치 예정이다. 본 장비를 이용하여 수행되어질 파동의 주파수 영역은 ~1-5 Hz이다. 이러한 파동은 지구 자기권이 태양풍 변화에 연동되어 시·공간적 자기장 및 플라즈마 변화에 의해 자기권에서 발생되어지고 지구 자기력선을 따라 전리권에 전달되므로 태양풍-자기권-전리권 에너지 전달 과정을 규명하기 위해 중요한 연구대상이 되고 있다. 이러한 이유로 미국-영국에서는 남극에 다수의 기지에 서치코일 자기장 측정기 장비를 설치하여 (Fig. 3-2에서 검은색 원으로 표시) 플라즈마 파동의 자기권-전리권 연동 연구 즉 파동의 발생 및 전파과정 연구를 수행하고 있다.

- 플라즈마권계면 위치의 중요성: 이론적으로 플라즈마 파동은 특정한 시·공간적 우주환경 물리량 변화 시 발생한다고 알려져 있고 특히 지구 자기장 및 플라즈마 분포의 공간적 변화가 심한 곳에서 잘 발생한다고 한다. 이러한 이유로 지구 자기권 내부에 존재하는 플라즈마권계면 지역(지구반경의 약 4-5배 지역에 위치하고 있음, $L = \sim 4-5$)이 파동발생의 선호 지역으로 제안되어지고 있다. 현재 남극에서 유일하게 영국에서 운영하는 Halley 관측소 (HBA)가 플라즈마 권계면 근처에 위치하고 있으며 서치코일 자기장 측정 장비를 이용하여 플라즈마 파동 연구를 수행하고 있다(Kwon et al., 2015).
- 국제협력의 중요성: 플라즈마 파동은 수 mHz의 극초저주파수(ULF) 파동과 달리 발생 지역이 공간적으로 상당히 제한되어 있어 플라즈마 파동에 의한 자기권-전

플라즈마 파동에 의한 자기권-전리권 연동

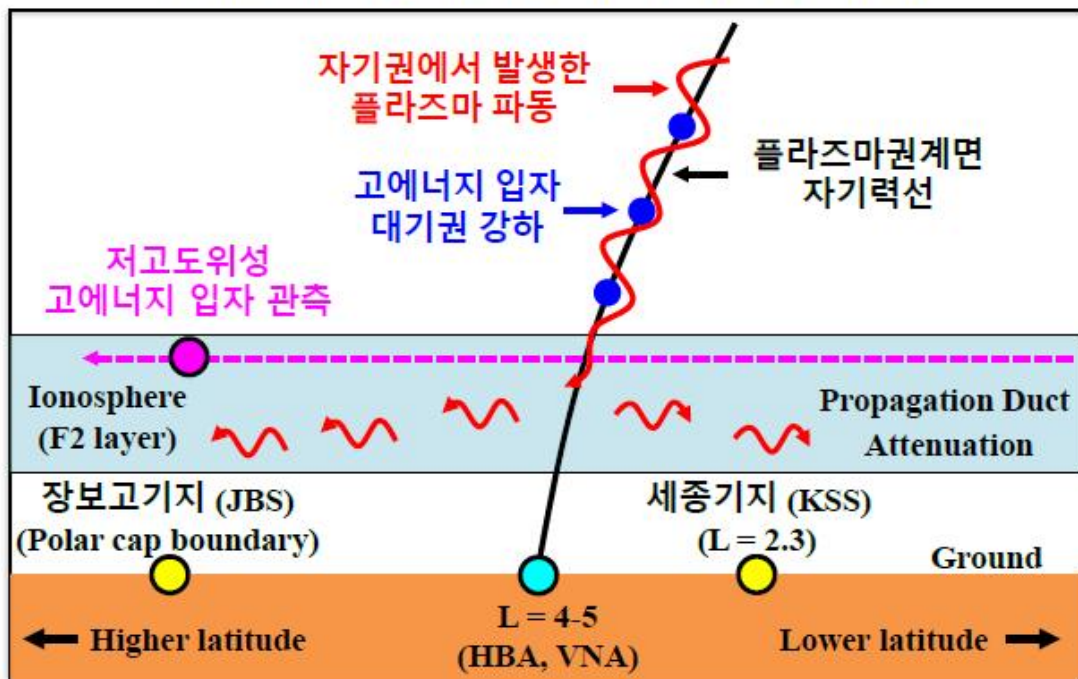


Fig. 3-3 내부 자기권인 플라즈마권 권계면 근처에서 발생한 플라즈마 파동이 극지 전리권에 전달되는 기작.

리권 연동연구를 위해 파동 발생원 근처에 다수의 관측소가 요구되어진다. 독일에서 운영하고 있는 Neumayor (VNA) 관측소는 플라즈마권계면 근처에 위치하고 있으나 현재 서치코일 장비가 없어 플라즈마 파동 연구를 수행하고 있지 않다. 극지연구소에서 서치코일 장비를 제공하면 독일 VNA 관측소는 장비 관리 및 운영을 위한 예산을 지원할 예정이다. 현재 자기권-전리권 연동 연구는 여러 국가(미국, 유럽, 일본, 중국 등)의 남/북극 관측소에서 운영되는 장비 및 관측자료 공유를 통하여 국제 협동연구로 수행되고 있다. 현재 우리나라는 국제공동연구를 위한 극지 우주환경 관측 장비 및 공유할 자료가 없어 개인적으로 여러 기관의 자료를 받아 연구를 진행하고 있다.

- NJIT (New Jersey Institute Technology, 미국) 기관은 현재 미국에서 가장 활발하게 다수의 극지에서 자기권-전리권 연동연구를 위한 장비를 운영하고 있고 UNH (University of New Hampshire, 미국)는 고정밀 자기장 측정기 개발 기술을 보유하고 있다. 2017-2019년 극지연 위탁연구과제를 통하여 극지연-경희대-NJIT-UNH 국제협력체를 구성하고 태양풍-자기권-전리권 연동연구를 수행하면 국제 경쟁력있는 연구결과가 도출 될 수 있으며 극지연의 국제적 위상이 높아질 것으로 기대된다.

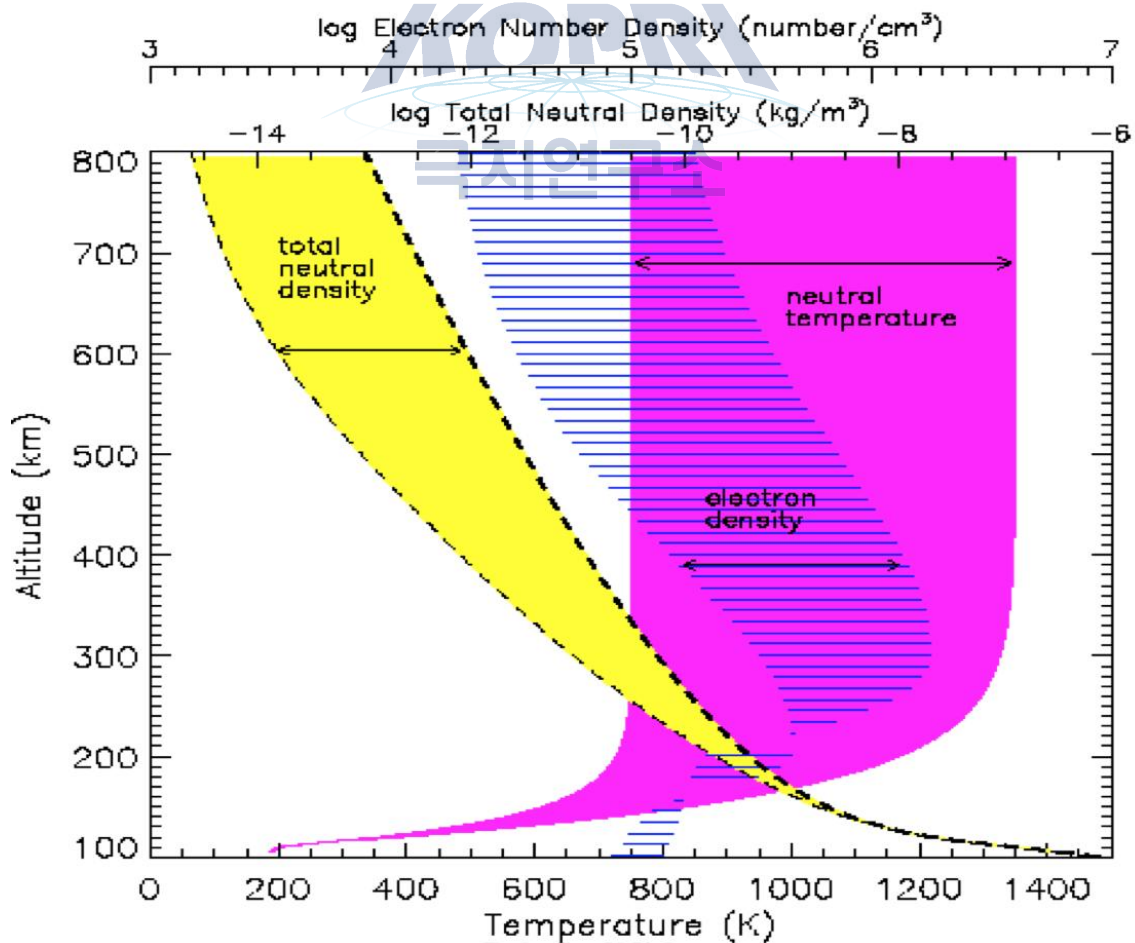


Fig. 3-4 태양활동 변화에 따른 고층대기 온도와 밀도, 전리권 플라즈마 밀도 변화

- 다중장비 운용의 중요성: 플라즈마 파동을 관측하는 서치코일 자기장 측정 장비는 제작하는 기관에 따라 장비 특성이 조금씩 차이가 있어 관측된 파동의 절대적 세기를 여러 기관에서 제작된 관측 장비를 통하여 결정할 수 없다. 이러한 단점을 보완하기 위해 한 기관에서 여러 장비를 만들어 관측망을 형성하여 극 우주환경을 관측하고 있다. Fig. 3-2에서 나타난 것처럼 극지역에서 장보고기지, 세종기지, 그리고 독일의 VNA기지에서 서치코일 장비를 운영한다면 플라즈마 파동의 발생지역과 발생원으로부터 남쪽방향의 내부 자기권 지역 북쪽방향의 극관경계지역 (polar cap boundary)까지의 넓은 영역에 대한 파동 발생 및 전달과정 연구를 수행 할 수 있다. 이러한 자료는 다른 연구기관에서도 중요한 자료로 사용될 수 있어 국제공동연구에 크게 기여할 것으로 생각된다[Park et al., 2016].

○ 태양활동 변화에 따른 극지 고층대기 변화

- 태양활동은 11년 주기의 변화를 보이는데, 이 주기 동안 태양 극자외선(EUV) 변화는 물론 태양 플레어(Solar flare), 코로나 물질 대방출(CME) 등과 같은 태양 폭발 현상들의 발생 빈도가 크게 변하게 된다. 따라서 이와 같은 태양활동 변화는 고층대기의 물리적 상태 변화를 동반한다(Fig. 3-4).
- 태양에서 분출되는 플라즈마(주로 전자와 양성자)와 자기장(Interplanetary Magnetic Field: IMF)으로 이루어진 태양풍(Solar wind)은 태양활동 정도에 따라 다양한 속도와 밀도를 가진다. 특히, 코로나홀에서 방출되는 태양풍은 높은 속도를 가지고 지구에 도달하여 지구 자기권과 고층대기를 크게 교란시키는 역



Fig. 3-5 남극 장보고 과학기지에서 촬영된 오로라.

할을 한다.

○ 오로라 발생과 극지 고층대기 변화와의 상관관계 연구

- 장보고 과학기지는 지자기적으로 오로라대 주변에 위치해 있으며, 좋은 기상조건을 가지고 있기 때문에, 오로라 관측에 최적의 조건을 가지고 있다(Fig. 3-5). 2016년 하계 시즌에 오로라 관측용 전천카메라를 설치하여 향후 지속적인 오로라 관측을 수행할 예정이다. 오로라는 태양-자기권-고층대기의 상호작용의 결과로 나타나는 현상으로 장보고 과학기지에서 수행되고 있는 우주환경-고층대기 관측과 함께 활용한다면, 오로라 연구뿐만 아니라 다양한 우주환경 연구에 사용될 수 있다.

○ 우주선 및 고에너지 입자 유입에 의한 극지 저층대기 온도변화 연구

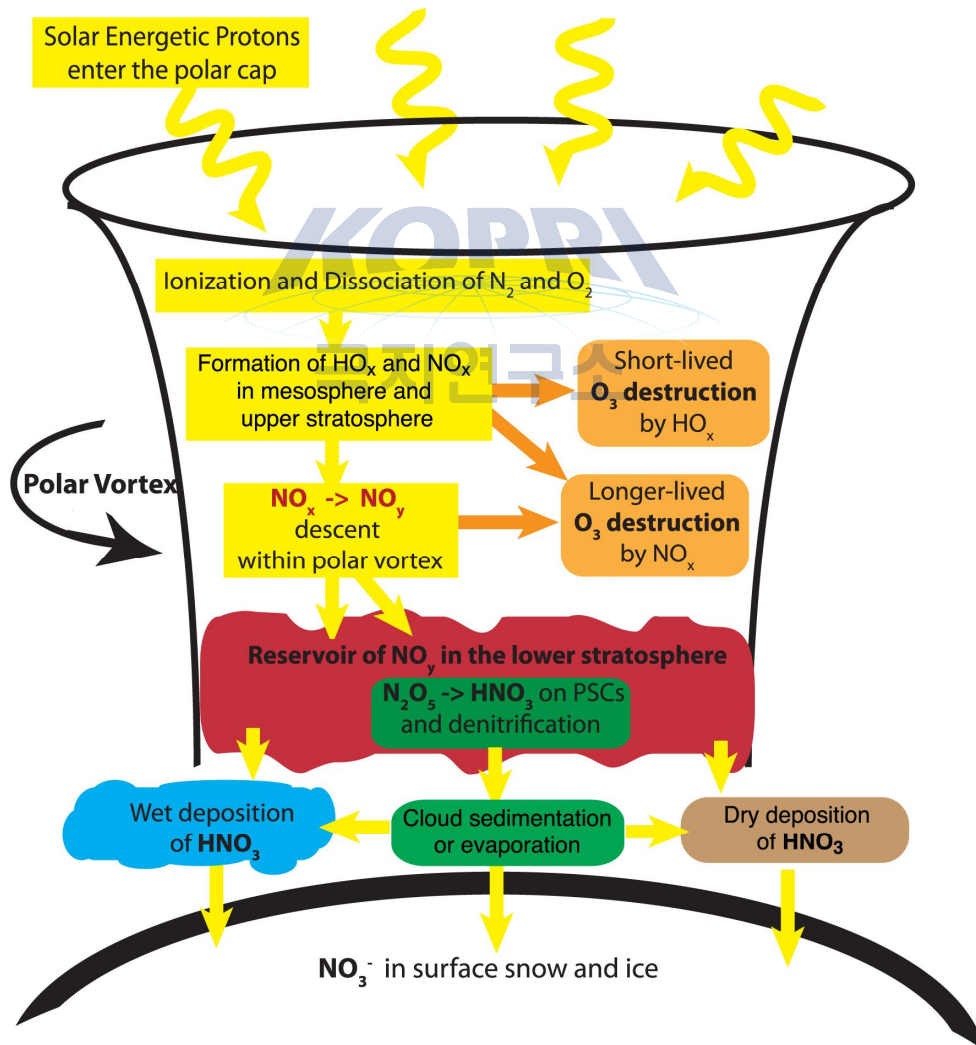


Fig. 3-6 태양 고에너지 입자 유입에 의한 대기 화학적 특성 변화. NO_x , HO_x 등의 변화는 오존 밀도 감소로 이어져

- 우주선 및 고에너지 양성자, 전자는 극지 고층대기로 유입되어 대기 구성물질의 생성/소멸 과정에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[Kepko et al., 2009].
- 에너지가 클수록 더 낮은 고도까지 진입하는 고에너지 입자들은 대기 구성입자들과 충돌하면서 NO_x, HO_x 분자들의 생성/소멸 기작에 영향을 미친다. 또한 이들 분자들은 중간권, 성층권에서 오존의 생성/소멸에 관여하여 오존밀도 감소를 일으킨다고 알려져 있다.



나. 저층대기 파동현상에 의한 극지 고층대기 변화 연구

- 고도 범위가 약 50km에서 150km 정도인 중간권 및 열권하부 (Mesosphere and Lower Thermosphere; MLT) 영역은 저층대기로부터 대기 파동 (행성파, 중량파, 조석파)의 형태로 전달되는 영향과 더 높은 고도 및 외부에서 유입되는 에너지에 의한 영향을 함께 받기 때문에 매우 복잡한 동역학적 변화가 나타나는 곳으로 알려져 있다. 저층대기로부터 전파되는 대기 파동들은 고도 증가에 따른 대기밀도의 기하적인 감소로 인해 그 진폭이 증가하여 MLT 영역에 이르면 파동이 깨지면서 가지고 있던 에너지와 모멘텀을 주변 대기로 전달하게 되고 그 결과로서 해당 고도의 물리적인 특성이 변하는 것으로 연구되어 왔다. 조석파는 주로 태양에 기인하는 대기 가열의 주기적인 변화로 발생하여 그 주기 (24h, 12h, 8h,...)와 기작이 많이 알려져 있지만, 수 분에서 24시간 사이의 주기를 갖는 중량파와 하루 이상의 주기를 갖는 행성파는 그 원인이 매우 다양하고 지역적인 특성이 크기 때문에 MLT 지역의 물리화학적 변화에 어떠한 과정으로 영향을 미치는지에 대해서 아직까지 명확히 밝혀지지 않은 상태이다. 저층대기에서 발생한 파동들이 고층대기로 전파할 때는, 대기의 상태를 반영하는 온도나 바람, 밀도 등의 물리량에 각 파동의 고유한 정보를 남기기 때문에, 이러한 물리량들을 관측함으로써 파동 현상을 검출해 낼 수가 있다. 특히, 극지 MLT 지역은 외부에서 유입되는 고에너지 입자에 의해 오로라 현상이 나타나는 영역이기도 한데, 이 오로라의 세기는 태양 활동 및 그로인한 지구 자기장의 교란 정도와 밀접한 관계에 있다. 오로라 활동이 중요한 이유는, 많은 양의 고에너지 입자가 극지 고층대기로 유입되어 오로라 활동이 활발하게 되면 주변 대기에 있는 중성 입자와의 충돌로 인해 극지 MLT 지역의 대기 온도를 증가시키고 극지 전리권의 전도도를 변화시키기 때문이다. 이는 전지구적 규모로 형성되어 있는 거대규모 대기순환 (Large Scale Circulation)을 변화시켜 중저위도의 MLT 지역 및 고층대기에까지 영향을 미치며, 전리권-중성대기 상호작용

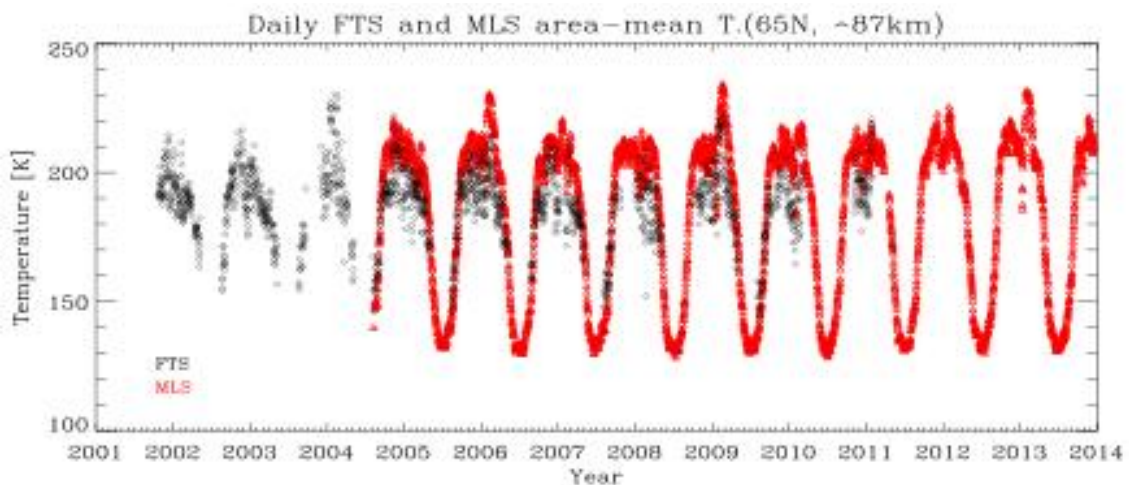


Fig. 3-7 적외선 간섭계(FTS)와 Aura/MLS에서 관측된 중간권 온도

용 현상도 더 복잡하게 만드는 원인이 되기도 한다. 따라서 극지 MLT 영역에서 나타나는 복잡한 현상의 원인 및 과정을 규명하기 위해서는 일차적으로 이 영역의 온도 및 바람의 변화를 지속적으로 감시하는 것이 필수적인데, 온도의 경우 과거부터 주로 광학 장비들을 이용하여 관측을 수행해 오고 있지만 MLT 지역의 중성대기 바람은 관측의 어려움으로 인해 페브리-페로 간섭계를 이용한 부분적인 관측만 수행되어 오다가 최근에 들어서 레이더 기기를 이용한 관측들이 활발하게 수행되고 있다.

- 극지연구소는 북극 MLT 지역의 중간권계면 온도를 관측하기 위해, 2002년과 2003년부터 스웨덴 키루나와 다산과학기지에 동일한 FTS (Fourier Transform Spectrometer) 기기를 각각 운영해 오고 있다. FTS는 고도 약 87km에서 방출되는 OH Meinel band의 대기광을 관측하여 해당 고도의 온도와 대기광 방출율을 제공해 주는 장비이다. Fig. 3-7은 키루나 FTS관측으로 얻은 온도를 예시로서 보여주는데, 2004년 9월부터 관측을 시작한 Aura MLS (Microwave Limb Sounder) 기기로부터 얻은 온도와 잘 일치하며 저층대기의 온도와는 반대로 겨울철에 온도가 높고 여름철에 낮은 중간권계면 부근의 온도 특징을 잘 보여준다. 키루나에서의 FTS 운영을 통해 축적한 장기간의 중간권계면 부근 온도 자료는 특정 장소에서 1 태양주기에 해당하는 12년 이상의 기간동안 관측 자료를 획득하였기 때문에 그 가치가 매우 크며, 현재 충남대학교 우주과학 연구그룹과 함께 북극 중간권계면 부근 온도의 장기 변화 경향에 관한 연구를 진행하고 있다. 또한, 경도는 비슷하고 위도만 10도 정도 차이 나는 두 관측 장소의 지리적인 특성에 기반하여 오로라 영역 내에서의 MLT 지역 변화 특성과 바깥 영역의 특성을 다른 관측자료와 함께 비교하여 대기 파동과 고에너지 입자 유입에 의한 영향이 어떠한 차이를 보이는지에 대한 연구를 수행할 계획이다.
- 남극 세종과학기지에서는 남반구 고위도 MLT 영역을 연구하기 위해 2002년 2월에 설치한 Spectral Airglow Temperature Imager (SATI)를 시작으로, 2007년 2월에는 유성레이더 (meteor radar), 2008년 2월에는 All Sky Camera (ASC)등을 설치하여 현재까지 운영해 오고 있다. FTS 기기와 유사한 SATI는 OH뿐만 아니라 고도 약 94km 부근에서 방출되는 O₂ 대기광의 방출율과 온도를 함께 제공한다. SATI 운영으로 얻은 온도자료는 유성레이더 및 ASC 자료와 함께 분석하여 중간권계면 부근 온도 변화와 온도에 나타나는 대기 중량과 활동성 연구, 그리고 자료의 상호 비교검증에 활용하고 있다.
- 유성레이더는 지상의 송신안테나에서 전파를 발송하여 유성체 (meteoroid)가 지구대기로 진입하며 형성하는 유성흔 (meteor trail)에 의해 반사되어 되돌아오

는 신호를 수신안테나로 검출하는 장비이다. 세종기지 유성레이더는 5개의 수신안테나로 반송신호를 검출하는데, 이를 통해 유성흔의 위상차 (phase shift) 및 도플러 속도 (doppler velocity)를 관측하고 이러한 변화를 야기하는 해당 고도의 중성대기 바람을 역으로 산출해 낼 수가 있다. 유성레이더는 전파를 이용하기 때문에, 야간의 맑은날씨 하에만 관측이 가능한 광학 장비의 한계를 극복하여 연중 24시간 내내 관측이 가능하다는 큰 장점이 있다. 그림 ??는 세종기지 유성레이더 자료의 예를 보여주는데, 왼쪽은 관측된 유성의 공간적 분포를 보여주며, 오른쪽은 관측된 유성의 고도 분포, 유성수의 일변화, 그리고 유성까지의 거리 분포를 히스토그램으로 보여주고 있다(Fig. 3-8).

- 세종기지 유성레이더는 기존에 수행한 남극 세종기지 상공 대기 중량과 활동의 통계적인 계절적 특성에 관한 연구[Lee et al., 2013]뿐만 아니라, 대기 중량과의 원천 및 해당 고도의 온도 변화에 관한 연구에도 매우 중요한 정보를 제공한다. 현재 유성레이더 바람자료를 활용하여 세종기지 상공 MLT 지역으로 전파하는 대기 중량과의 특성을 규명하는 연구를 진행하고 있으며, 이 결과를 바탕으로 모델 시뮬레이션을 통해 세종기지 상공으로 전파되는 대기 중량과의 원

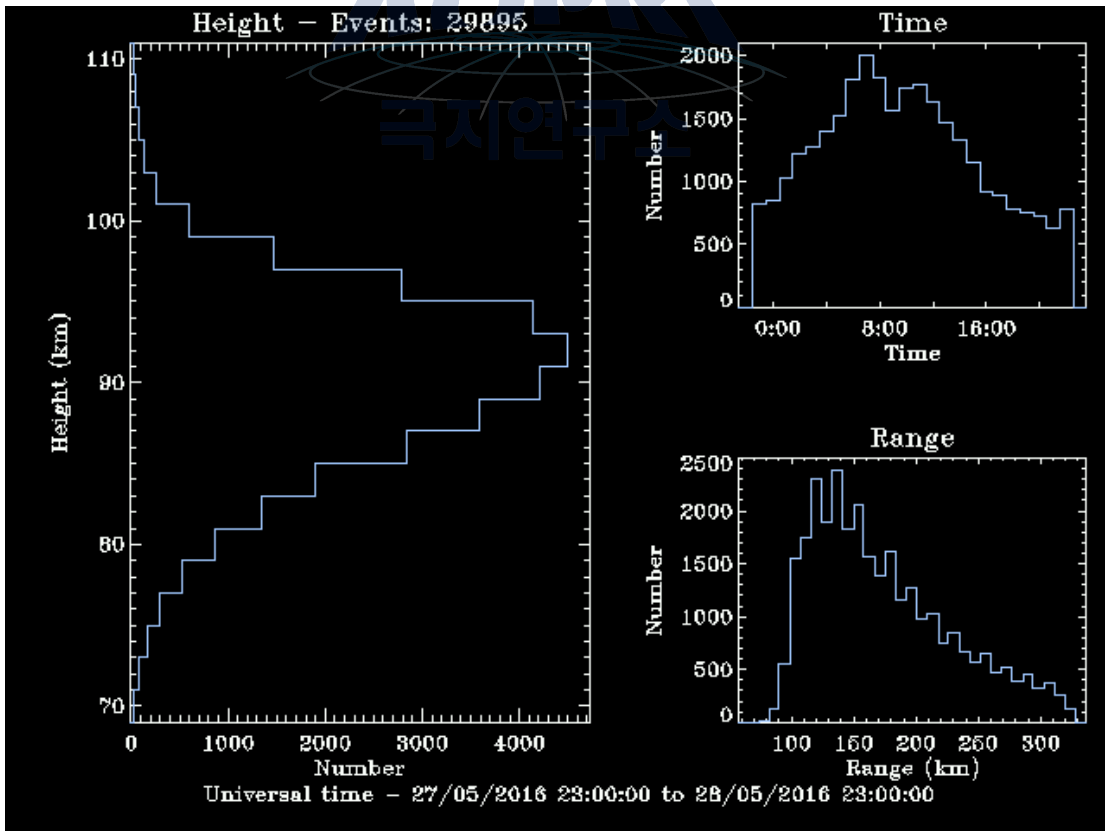


Fig. 3-8 남극 세종과학기지 유성레이더 자료 예시. (좌)유성의 공간적 분포. (우)고도분포, 유성수의 일변화, 유성까지의 거리 히스토그램

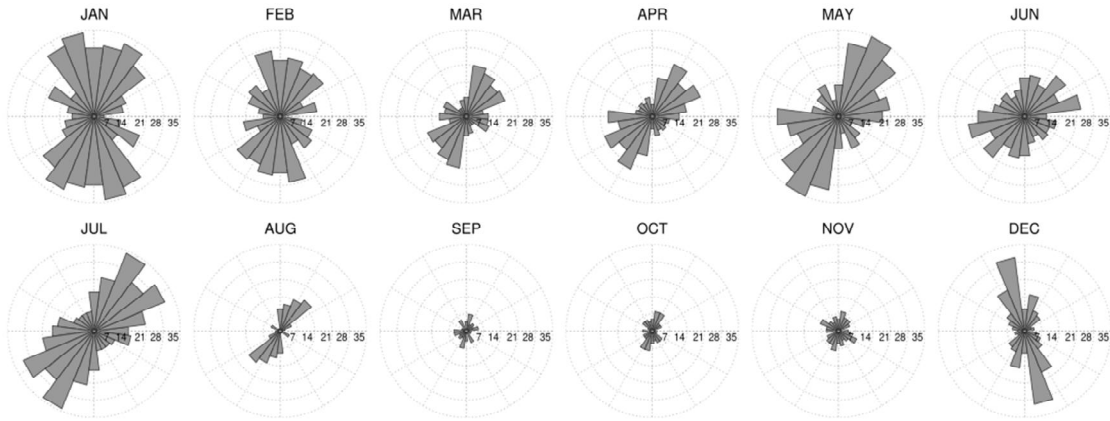


Fig. 3-9 세종기지 상공에서 관측한 IGW 수평방향 전파의 계절적 변화

천을 규명하는 연구도 수행할 예정이다. Fig 3-9는 현재 진행중인 연구의 결과 중 하나로서 세종기지 상공에서 관측된 관성 중량파 (inertia gravity wave, IGW)의 수평 전파 방향의 계절적 변화 경향을 보여주는데, 남반구 여름철에는 주로 남-북 방향 그리고 겨울철에는 북동-남서 방향이 주 전파 방향인 것을 알 수 있다. 레이더 등의 지상관측 장비를 통해 관측된 중간권계면 파동 연구에 있어서, 많은 경우 수평 파장이 짧고 고주파인 파동에 대한 연구가 주를 이루어 왔으나, 최근 관측 연구들은 이러한 고주파 중력파 뿐만 아니라 저주파의 중력파가 극지역 중간권계면 부근에서 지속적으로 관측됨을 보이고 있다 [Chen et al., 2013, 2016; Nicolls et al., 2010; Kim et al., 2004; Suzuki et al., 2013]. 최근 극지연구소 고층대기연구팀에서도 남극 세종기지에 설치된 유성레이더를 통해 관측된 중간권계면 부근 고도 80-100 km 영역에서의 3차원 바람 분석을 통하여 저주파 관성중력파가 상시 존재하며, 이러한 관성중력파가 대류권이나 성층권 제트에 의해 발생하여 전파된 것일 수 있음을 보인다 [Song et al., 2016].

- 분석된 중력파의 고유진동수는 $|f-3|f|$ (여기서 f 는 세종기지 지역의 코리올리 모수), 연직 파장은 대략적으로 18-24 km, 그리고 고유진동수 $|f-2|f|$ 와 $2|f-3|f|$ 에 대해서 분산 관계를 통해서 유추된 수평 파장은 각각 400-1000 km 그리고 700-3000 km의 값을 보였다. 이러한 특성 값과 그림 1에 보인 전파 방향을 고려하였을 때, 관측된 관성중력파 전파 특성은 대류권 및 성층권에 나타나는 제트 지역 주변에 나타나는 비선형 불균형 항 (nonlinear imbalance term)과 연관될 수 있다. Fig. 3-10은 대류권 상부 300 hPa에서 월 평균 비선형 불균형 항 및 수평 바람 크기의 월별 변화를 나타낸다. 남반구 여름철에는 뉴질랜드 남쪽이나 대서양쪽 남대양에서 발생한 관성중력파가 남극을 가로질러 세종기지 상공 중간권계면까지 전파하면서 남-북 전파를 설명할 수 있다. 같은 시기 세종기지 서쪽에도 강한 불균형 항이 존재하기는 하

지만, 이 불균형 항과 관련된 중력파는 강한 성층권 제트에 의해서 긴 연직 파장으로 도플러 편이되어 세종기지에 도착하기 전에 중간권계면을 통과할 것으로 보인다. 남반구 겨울철에는 극좌표 상에서 세종기지의 남서쪽에 위치한 불균형 항이 발생시킨 관성중력파가 성층권 제트의 경계를 따라서 전파하면서 큰 도플러 편이를 겪지 않고 세종기지 상공 중간권계면까지 전파하면서 겨울철의 남서-북동 전파 방향을 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

- 위에서 언급된 관성중력파 원천 및 파동 전파 방향은 유성레이더 관측 결과만으로 유추된 것으로서, 다른 종류의 자료와 상호 비교하여 검증될 필요가 있다. 특히, 남반구 대류권의 제트가 야기하는 중력파 중에서 실제로 저주파의 중력파가 얼마나 강하게 발생하는지와 그러한 저주파 중력파가 하루 혹은 이들의 시간에 걸쳐 남극을 가로질러 세종기지 상공까지 전파하는지를 검증할 필요가 있다. 이러한 검증을 위해서 현재 고층대기팀에서 수행하고 있는 전기

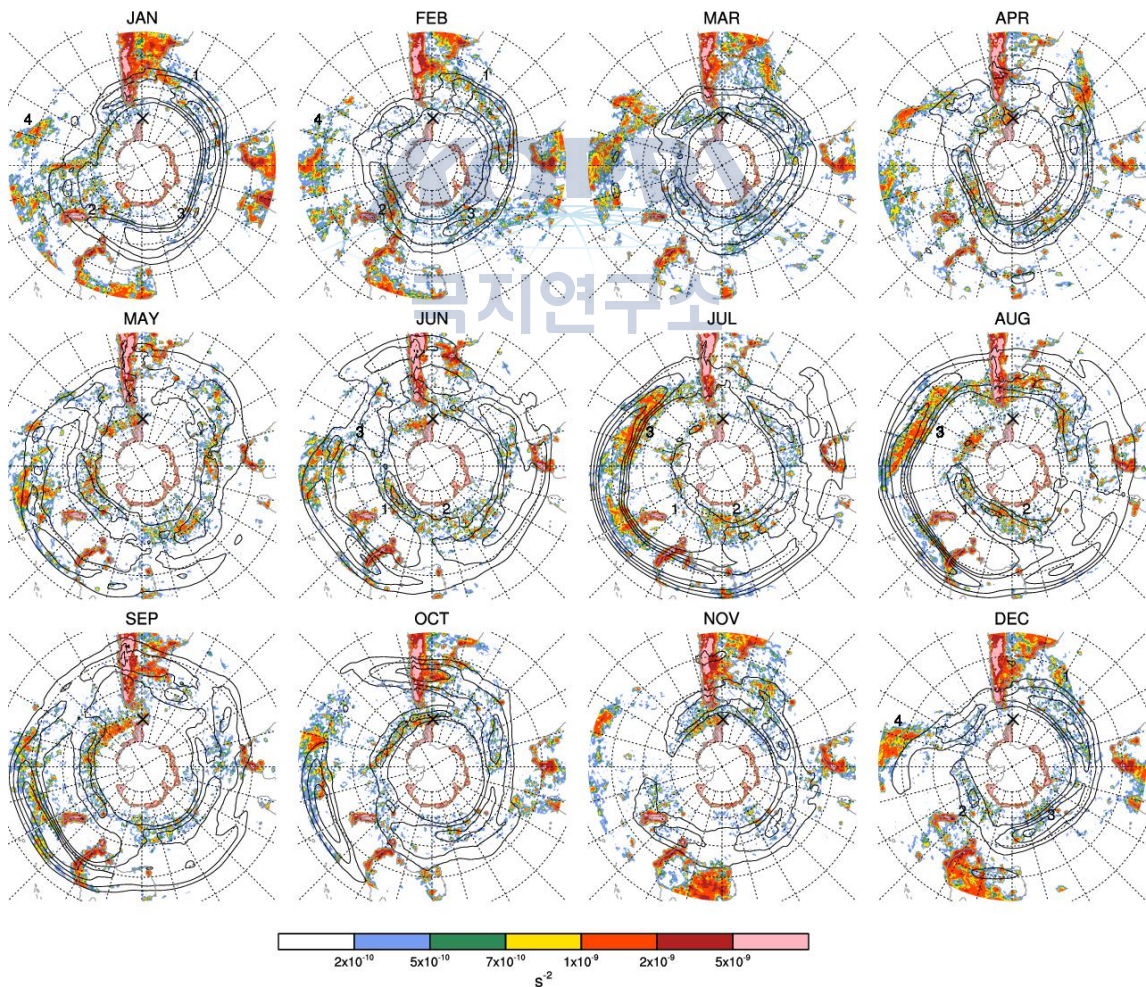


Fig. 3-10 대류권 상부 300 hPa에서의 월 평균 비선형 불균형 항 (shading) 및 수평 바람의 크기 (contour)의 월별 분포. 세종기지의 위치는 x로 표시되어 있다.

구 수치모델링 결과를 활용하고자 한다.

- 극지연구소 고층대기팀에서는 미국 National Center for Atmospheric Research (NCAR)에서 개발한 지면부터 열권하부까지 수치 모의하는 전지구 수치 모델인 Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM)을 이용하여, 대류권 및 성층권에 나타나는 다양한 기상학적 현상들이 야기하는 중력파와 그 중력파의 고층대기 (중간권 및 열권)로의 전파를 명시적으로 모의하고, 관측된 중간권계면 부근 중력파와 비교하는 연구를 수행하고 있다.
- 본 연구팀은 2015년 제 2차 HPC 응용연구지원프로그램에 선정된 과제 (KSC-2015-C3- 025)를 통해 대류권에서 발생하는 중력파가 고층대기에 주는 영향을 명시적으로 모의할 수 있도록 하는 시스템을 구축하였다. 특히, 특정 시점에 대해서 지면부터 열권하부까지의 전 층의 대기에 대해서 균형 상태 초기장을 생성하는 방법을 개발함으로써 일기예보와 유사하게 특정 시점의 중력파를 수치모의 할 수 있는 시스템도 구축하였다. 그림 3은 2014년 7월 1일 00UTC의 대기 상태를 초기장을 이용하여 수평 해상도 0.5도 및 연직 해상도 0.6 km의 WACCM으로 모의된 강수량과 연직 속도 장이다. 그림 3에서는 중간권 하부 (64 km) 및 열권 하부 (100 km)에서의 대류 중력파 (북미대륙, 북아프리카), 전선에 의한 중력파 (남대양, 남극 부근), 그리고 산악에 의한 중력파 (남아메리카 안데스)의 모습을 명시적으로 확인할 수 있다.

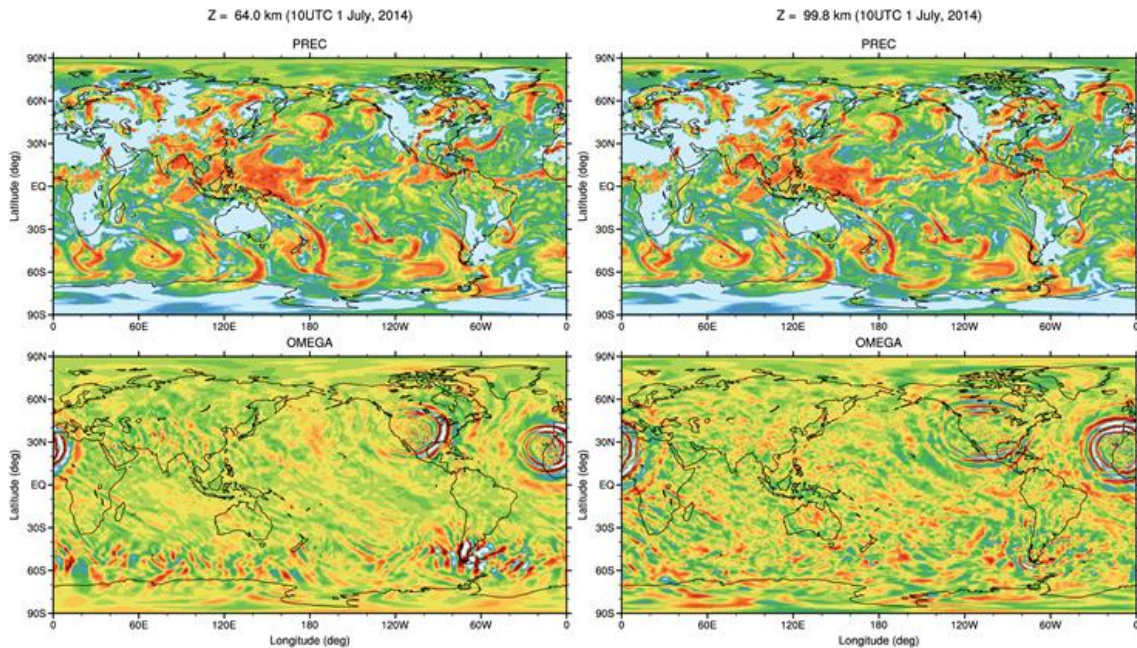


Fig. 3-11 SC-WACCM으로 모의된 2014년 7월 1일 10 UTC 지면 강수량 (위)과 고도 64 km (좌하) 및 100 km (우하)의 연직 속도 분포

수치모의된 중간권 중력파의 검증을 위해서, NOAA/NASA Suomi National Polar-orbiting Partnership (NPP) 인공위성에서 관측된 중간권계면의 중력파 패턴을 이용하고자 한다 (Miller et al. 2015). 실제로, Suomi NPP 위성에 장착된 Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)를 구성하는 Day/Night Band (DNB)는 그림 4에서 보이는 바와 같이 중간권계면 근처 nightglow 고해상도 방출 이미지를 관측하며, 이를 통해서 중력파 위상의 수평 분포의 구체적인 모습을 명시적으로 보여준다.

고해상도 전지구 모델을 이용하여 Suomi NPP 위성으로 관측된 중력파 특성의 이해를 시도함으로써, 관측으로 밝혀진 중력파 원천 및 전파 과정을 입체적으로 파악하고 이를 통해 중간권/열권 지역에 다양한 방식으로 영향을 주는 중력파에 대한 이해도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 중력파 모델링 연구는 궁극적으로 전지구 모델의 중력파 모수화에서 단순하게 표현되는 중력파 전파 특성을 개선하는데 필요한 정보를 제공하여, 중력파 항력 모수화를 개선하는데 기여할 것으로 기대된다. 추가로, 중력파 관련 연구에도 수치예보의 개념을 적용함으로써 발생할 수 있는 중력파 이벤트를 예측하는 시스템을 구축

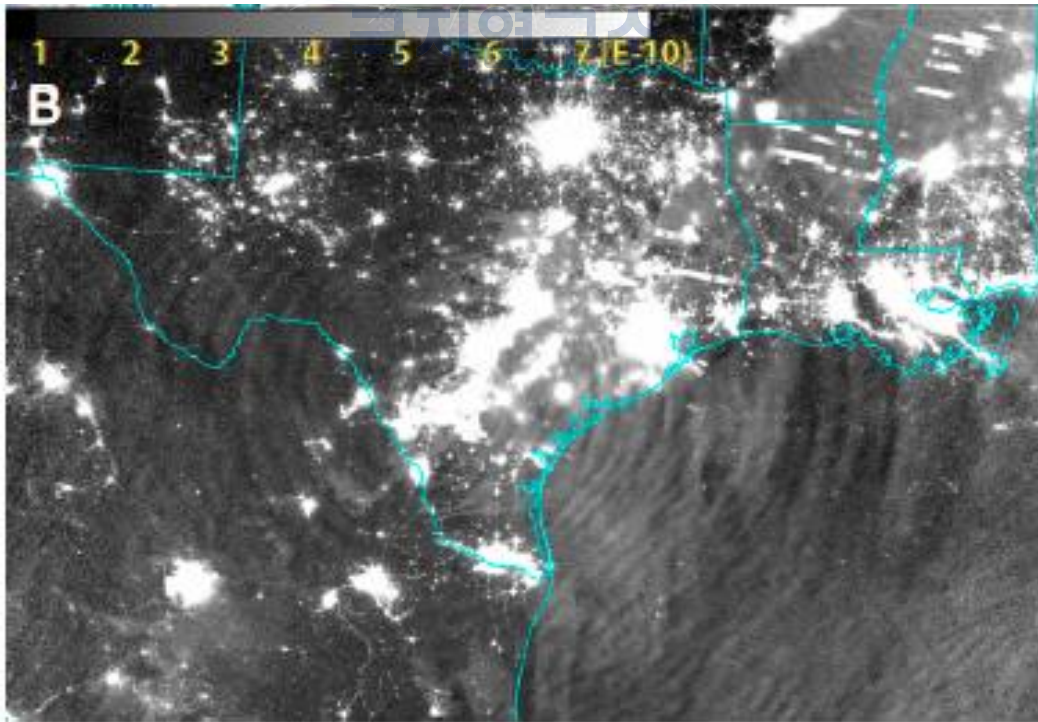


Fig. 3-12 고도 약 90 km, 멕시코 만 부근에서 발생한 대류에 의한 중력파의 위상선 패턴
[Adapted from Figure 2 in Miller et al. (2015, PNAS)]

하는데에도 활용할 수 있다.

- 전통적으로 지상에서 중간권계면 부근의 온도를 관측하는데는 주로 광학 장비들을 활용해 왔는데, 최근들어 레이더 기술의 발달로 유성레이더를 이용한 중간권계면 부근 온도를 감시하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다 (Kim et al., 2012). 현재까지의 연구들은 Hocking (1999)이 제안한 중간권계면 부근 온도 추정 방법에 근거하여 유성레이더 관측으로 얻는 유성 소멸 시간 (meteor decay time)으로부터 중간권 계면 부근 온도를 추정하고 지상관측 및 위성 관측 온도와 비교분석하는 연구인데, Hocking (1999)의 온도 추정 방법에는 여전히 유성 최빈 고도 (meteor peak height)에서의 온도 경사 (temperature gradient)를 알아야 계산이 가능하다는 단점이 있다. 최근 극지연구소 우주과학 연구팀은, 유성레이더 관측으로부터 얻는 유성 소멸 시간으로부터 중간권계면 부근의 온도를 추정하는 기존의 전통적인 방법과는 달리, 유성 에코들의 고도 분포로부터 직접 중간권계면 부근의 온도를 추정하는 새로운 방법을 개발하였다. 새로운 방법으로 추정한 중간권계면 부근의 온도는 기존의 방법으로 구한 온도보다 신뢰도 측면에서 더 우수한 것으로 판단되고, 더 중요한 점은 Hocking (1999)의 방법에서 온도 추정을 위해 온도 경사를 알아야 한다는 모

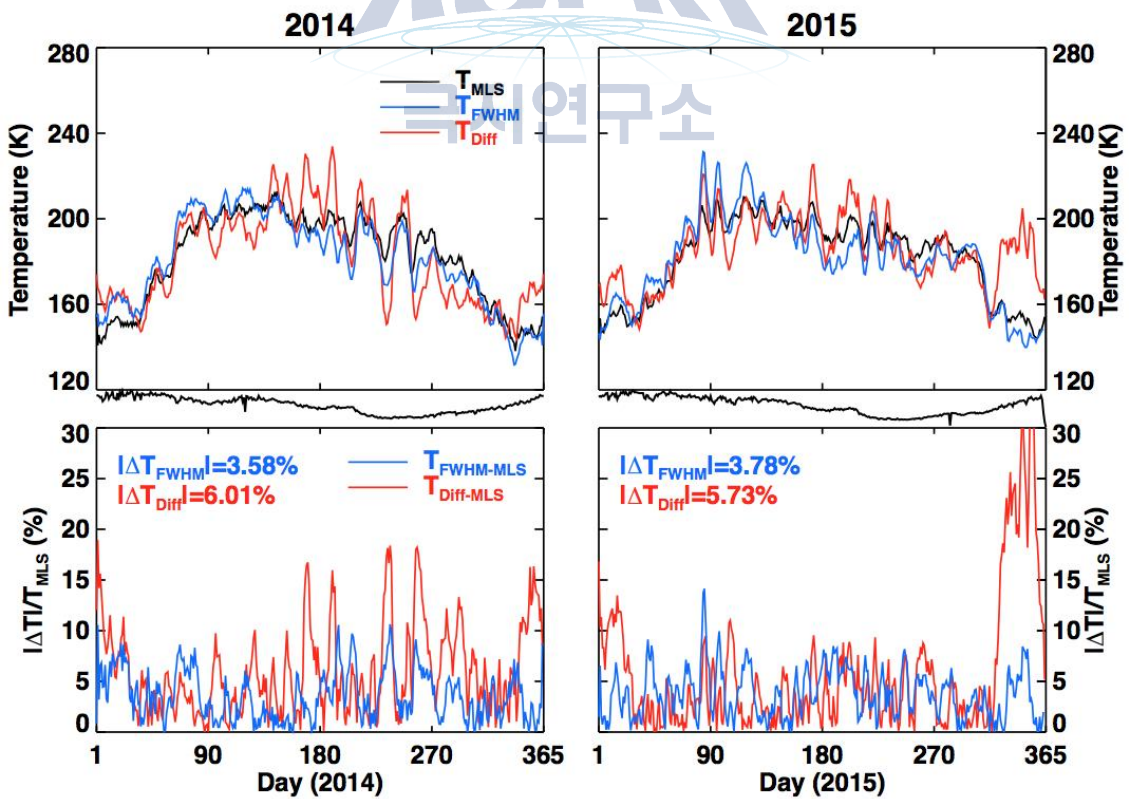


Fig. 3-13 새로운 방법으로 추정한 중간권계면 부근 일평균 온도(blue)와 기존의 방법(red) 및 위성 관측으로 얻은 온도(black) (위). 두가지 방법으로 추정한 온도와 위성관측 온도와의 차이 (아래).

순점을 해결했다는데 있다. Fig. 3-13은 새로운 방법으로 추정된 유성레이다 온도와 기존의 방법 및 Aura/MLS 온도를 함께 보여주고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 새로운 방법의 온도가 위성 관측온도와 더 잘 맞고, 온도 자체에서의 진동 (fluctuation) 세기도 기존 방법의 온도에 비해 감소한 것을 볼 수 있다. 이는 기존의 방법으로 추정된 온도에 나타나는 진동에는 자연적인 진동과 함께 온도 계산 방법에 기인하는 변화도 크게 영향을 미친 것으로 추정된다. 유성레이다 관측으로부터 온도를 추정하는 새로운 방법을 활용하여, 현재까지 기존의 온도추정 방법으로 수행한 연구 결과들과 비교검증하는 연구와 장기간 축적한 유성레이다 자료를 바탕으로 중간권계면 부근 온도의 장기변화 경향 등에 관한 연구를 수행할 계획이다.

- 남극 세종과학기지에서 운영하고 있는 전천카메라는 필터 휠 (filter wheel)을 이용하여 각기 다른 고도에서 방출되는 네 가지의 대기광을 순차적으로 관측하여 특정 파장의 대기광 2-D 이미지를 제공하는 장비이다. 극지연구소 우주과학연구팀은 전천카메라 2-D 이미지 자료를 분석하는 알고리즘을 개발하였고 이를 이용하여 전천카메라로 관측한 대기 중량파의 통계적인 특성에 관한 연구를 수행하고 있다. Fig. 3-14는 세종기지 전천카메라로 관측한 다양한 고도에서의 대기중량파 이미지를 예시로 보여주는데, 왼쪽은 고도 약 87km에서 방출되는 OH 대기광에 나타난 대기중량파이며 오른쪽은 고도 약 95km에서 방출되는 산소원자 대기광 (557.7nm)에 나타난 대기중량파이다. 현재 기존에 개발한 이미지 분석 알고리즘을 적용하여 관측으로 얻은 이미지들을 분석한 후, 세종기지 상공에서 관측되는 대기중량파들의 통계적인 특성에 관한 연구를 수행하고 있다(Fig. 3-15). 최근 남극에 설치되어 있는 모든 대기중량파 관측 장비들

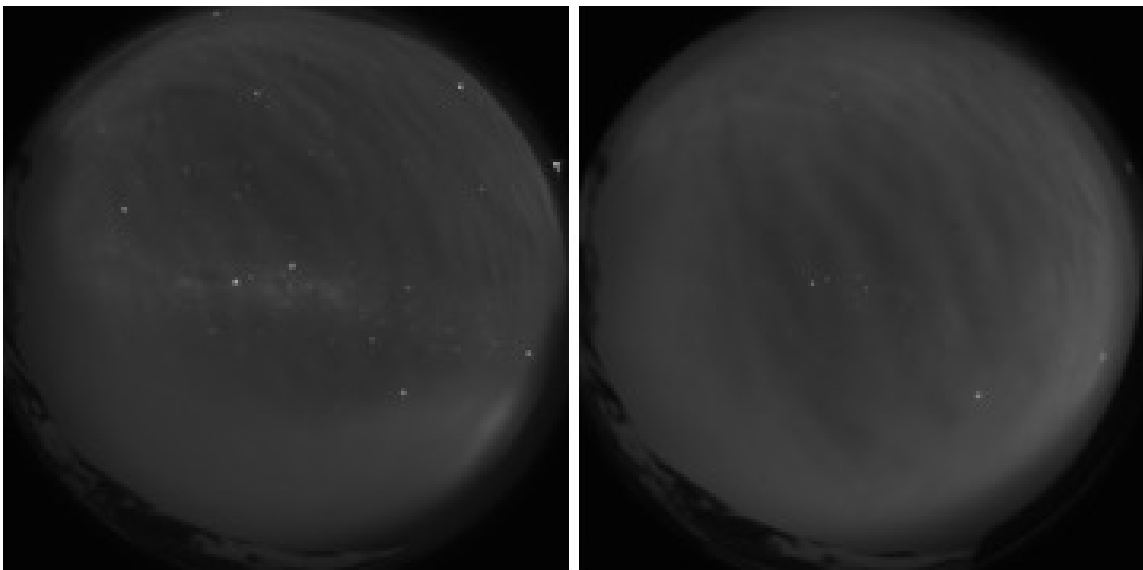


Fig. 3-14 세종기지 전천카메라로 관측한 필터별 대기 중량파 이미지. (좌)고도 약 87km의 OH 대기광에 나타난 대기중량파. (우)고도 약 95km의 O 대기광에 나타난 대기중량파.

을 공동으로 활용할 수 있도록 하기위해 국제 관측 네트워크 구축을 위한 각국 연구자들의 모임이 활발해 지고 있다. 극지연구소 우주과학연구팀도 현재 이 국제 네트워크에 참여하고 있으며, 여기에서 제공하는 많은 자료들을 활용하여 국제 공동연구를 수행할 계획이다.

- 북반구 고위도 지역에서 겨울철에 주로 발생하는 성층권 돌연승은 현상은 성층권에서의 갑작스런 온도변화뿐만 아니라 대류권, 중간권, 열권에까지 영향을 미치는 전지구적 규모의 현상으로 잘 알려져 있다. 이 성층권 돌연승은 현상은 저층대기, 주로 저층대기에서 발생하는 행성과와 중량과 그리고 배경 바람 간의 상호작용에 의한 것으로 추정하고 있는데, 성층권 돌연승은 발생 시 중간권에서는 냉각이 일어난다는 연구결과가 많이 발표되어 왔다. 최근 우주과학연구팀의 자료분석에 따르면, 성층권 돌연승은 동안 중간권에서 냉각도 일어나지만 성층권 온도 증가가 가장 큰 중심날짜 이후 어느정도 시간이 지난후에는 중간권 온도가 증가하는 것으로 추정되는데 아직까지 이 부분에 대해 명확히 설명하는 연구가 부족하기 때문에, 북극에서 관측한 자료들과 위성 자료를 활용하여 이에 관한 연구를 진행하고 있다. 또한, 근래들어 성층권에서 돌연승은 현상이 발생할 경우 전리권에서도 이 현상에 반응하는 변화가 나타난다는 연구결과가 발표되고 있지만 그 기작에 대해서는 아직까지 제대로 밝혀진바가 없는 상태이다. 따라서 성층권 돌연승은이 발생할 경우 고층대기의 온도와 전리권 전자밀도가 어떻게 변화하는지에 관한 자세한 연구가 필요하다.

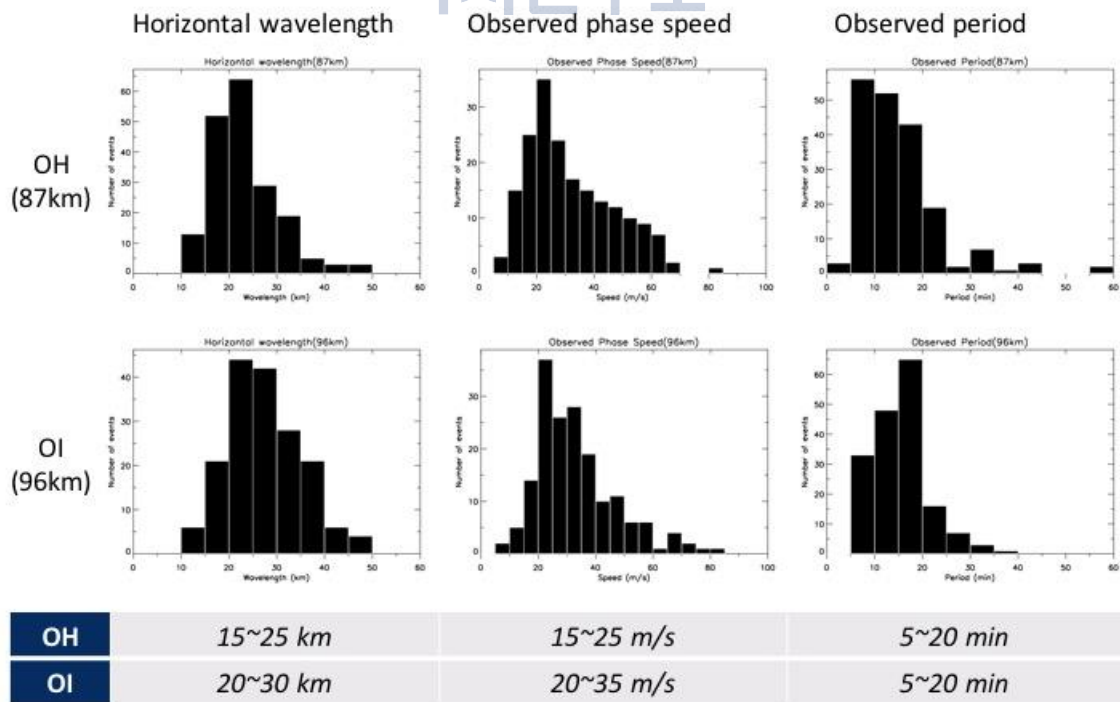


Fig. 3-15 2008년~2015년 기간동안 세종기지 전천카메라로 관측한 대기중량파들의 가시 (apparent) 수평파장, 위상속도, 주기에 관한 통계적인 특성

- 양 극지방의 여름동안, 고도 약 80km~85km 정도의 중간권계면 부근에서는 야광운 (Noctilucent Cloud, NLC) 또는 극 중간권 구름 (Polar Mesospheric Cloud, PMC)으로 불리는 현상이 빈번히 발생한다. 이 현상은 중간권계면 부근의 미세입자들이 태양빛을 굴절시켜 나타나는 것으로 알려져 있는데, 이러한 미세입자들이 어떻게 형성되는지에 관해서는 아직 잘 알려지지 않고 있다. 또한 NLC 또는 PMC의 발생과 함께 나타나는 것으로 알려진 Polar Mesospheric Summer Echoes (PMSE) 현상의 원인과 이 현상들의 공간적인 분포 특성, 그리고 양 반구의 차이점 등에 관해서는 아직까지 잘 알려지지 않았기 때문에 이를 규명하는 연구를 수행할 계획이다.



다. 극지 고층대기 전리권-열권의 물리적 특성 이해

- 열권은 지구에서 가장 높은 고도에 분포하는 대기권으로 저층에서 발생하는 대기 파동이 대부분 열권에서 소멸하여 에너지와 운동량이 축적되며, 우주에서 진입하는 유성을 비롯한 높은 에너지의 전자기파 (X선, 극자외선 등)와 플라즈마가 중성대기와 상호작용하여 매우 복잡한 대기현상들이 발생하는 영역이다. 특히 극지역에서의 열권은 태양-지구 자기권의 상호작용에 의해 발생하는 플라즈마 대류가 열권 대기의 바람을 결정하고 자기장을 따라 유입되는 전자는 극지역의 다양한 고도에 걸쳐서 오로라를 발생시킨다. 극지역 열권에서의 이러한 중성대기 바람은 극지역에서만 머무르지 않고 중저위도로 확산되어 전리권의 플라즈마의 수직 방향 운동을 초래하여 전리권 F층의 최대 전자 밀도 변화, 또는 전리권의 전자 밀도 분포 변화에도 중요한 영향을 미친다. 전리권은 오늘날 인공위성을 이용한 통신과 GPS를 활용한 네비게이션 등과 같이 인류의 삶과 직결되는 문제에 중대한 영향을 주는 대기 영역이므로 열권과 전리권의 고유 물리적 특성과 우주환경에 의한 변화를 지속적으로 연구해야 한다.
- 남극세종기지가 광학, 레이더 장비를 활용하여 중간권 및 열권 하부 영역에 초점을 맞춰 관측이 이루어지고 있다면, 2014년 남극 대륙에 건설된 남극장보고 과학기지는 지자기 위도 80도에 위치하여 지구 자기장이 수렴하여 우주로부터 유입되는 플라즈마가 지구 고층대기와 상호작용하는 극관, 오로라 대에 포함되어 있어 우주환경과 열권, 전리권 간의 전자기적 현상을 연구하기에 훌륭한 입지 조건을 가지고 있다. 2014년 장보고기지 개소와 함께 운영을 시작한 페브리-페룟 간섭계는 열권의 중성대기 바람과 온도를 관측하여 우주환경 변화에 따른 열권의 상태 변화, 전리권-열권 간의 상호작용 등 잠재적 연구 활용성이 큰 지상관측 장비이며[Meriwether, 2006; Makela et al., 2014] 2015년 이후 추가로 운영되는 전리권 레이더, 중성자 모니터 등의 자료와 비교하여 다양한 열권-전

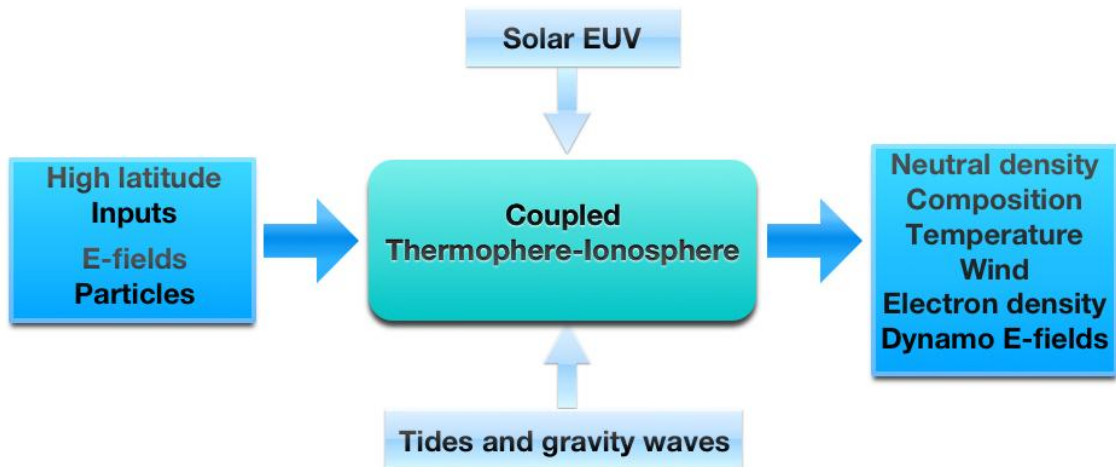


Fig. 3-16 극지역 열권과 전리권으로 유입되는 에너지, 입자 등의 공급원과 그에 따라 변화하는 고층대기 주요 특성들

리권 연구가 가능할 것으로 기대한다. 현재 2014-2015년 2년 동안의 관측 자료 분석을 통해 지상 250 km에서의 열권 바람, 온도 특성을 해석하고 북반구 극관에 위치한 Resolute Bay FPI 관측 결과와 비교 연구를 수행 중이다.

- 극지역 열권은 태양풍-자기권 상호작용에 의해 발생하는 전자기적 현상으로 인해 플라즈마의 대류와 낮과 밤지역 사이의 온도 차이로 발생하는 기압 경사 효과가 결합하여 태양 반대 방향으로의 바람이 지배적인 특성을 보이고 있다. 극지역 상공 열권에 존재하는 플라즈마 대류의 패턴은 태양과 지구 사이에 분포하는 행성간 자기장 (Interplanetary Magnetic Field, IMF)에 의해 결정되기 때문에 IMF의 세기와 방향에 따라서 열권의 바람 방향과 세기가 크게 변화한다. 특히 지자기 폭풍이 발생할 때에는 많은 양의 플라즈마들이 극지역 열권으로 유입되어 열권의 온도와 바람, 그리고 전리권 전자밀도를 크게 증가시킨다 [Wu et al., 2015]. 또한 오로라 가열 (Aurora heating)로 인해 큰 규모 (수평과장 1000 km 이상) 의 대기 중력파가 고위도 지역에서 발생되면 빠른 속도로 수평 방향으로 전파하여 약 1시간 이내로 중위도에서 관측될 수 있으며 이러한 규모의 대기 중력파는 지구 전체 대기 압력 경사도의 전달 기작을 제공하는 역할을 한다.
- 오로라, 플라즈마 강하 등의 우주환경 변화가 고도에 따라 차등적인 열권의 온도 변화가 발생하는 것을 장보고기지 FPI 관측을 통해 확인하였다. 고위도 중간권 상부와 열권 하부는 플라즈마 밀도에 비해 중성대기의 밀도가 매우 크기 때문에 우주환경의 영향보다는 저층대기에서 발생한 대기파동의 영향이 두드러지는 것으로 알려져 있다. 고도에 따른 대기의 온도, 역학적인 특성을 결정하는

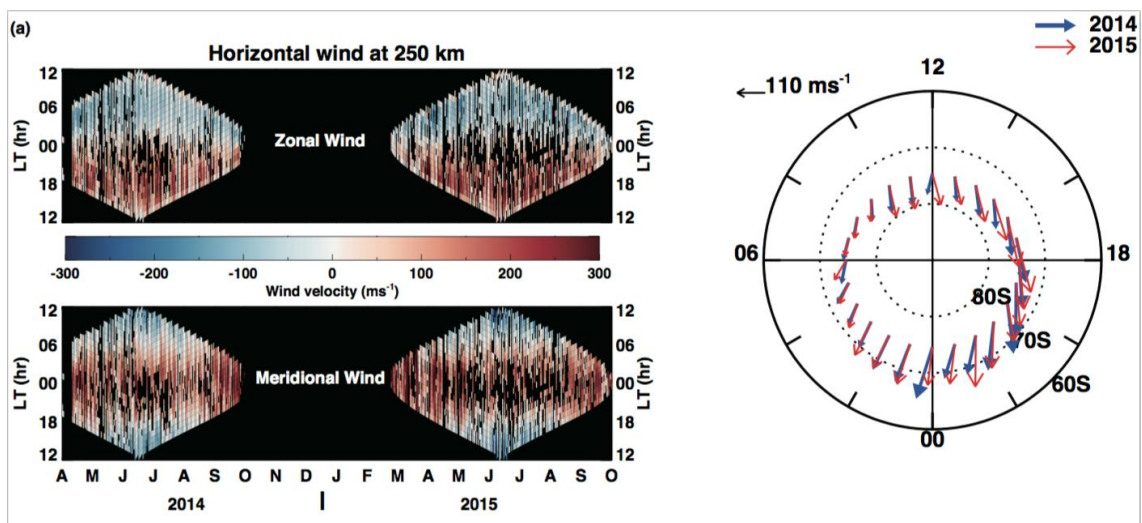


Fig. 3-17 남극장보고과학기지 FPI로 관측한 지상 250 km 상공 열권 바람(위: 동서방향, 아래: 남북방향)의 시간에 따른 변화 특성(왼쪽). 지리적 남극을 중심으로 시간에 따른 장보고기지에서의 열권 바람 방향과 세기 분포 (오른쪽).

주요 기작들을 이해하기 위해서 고유 대기 물리량을 측정하는 관측기기 간의 연계를 통한 연구가 지속적으로 수행이 되어야 할 것이다. 또한 지상 FPI의 열

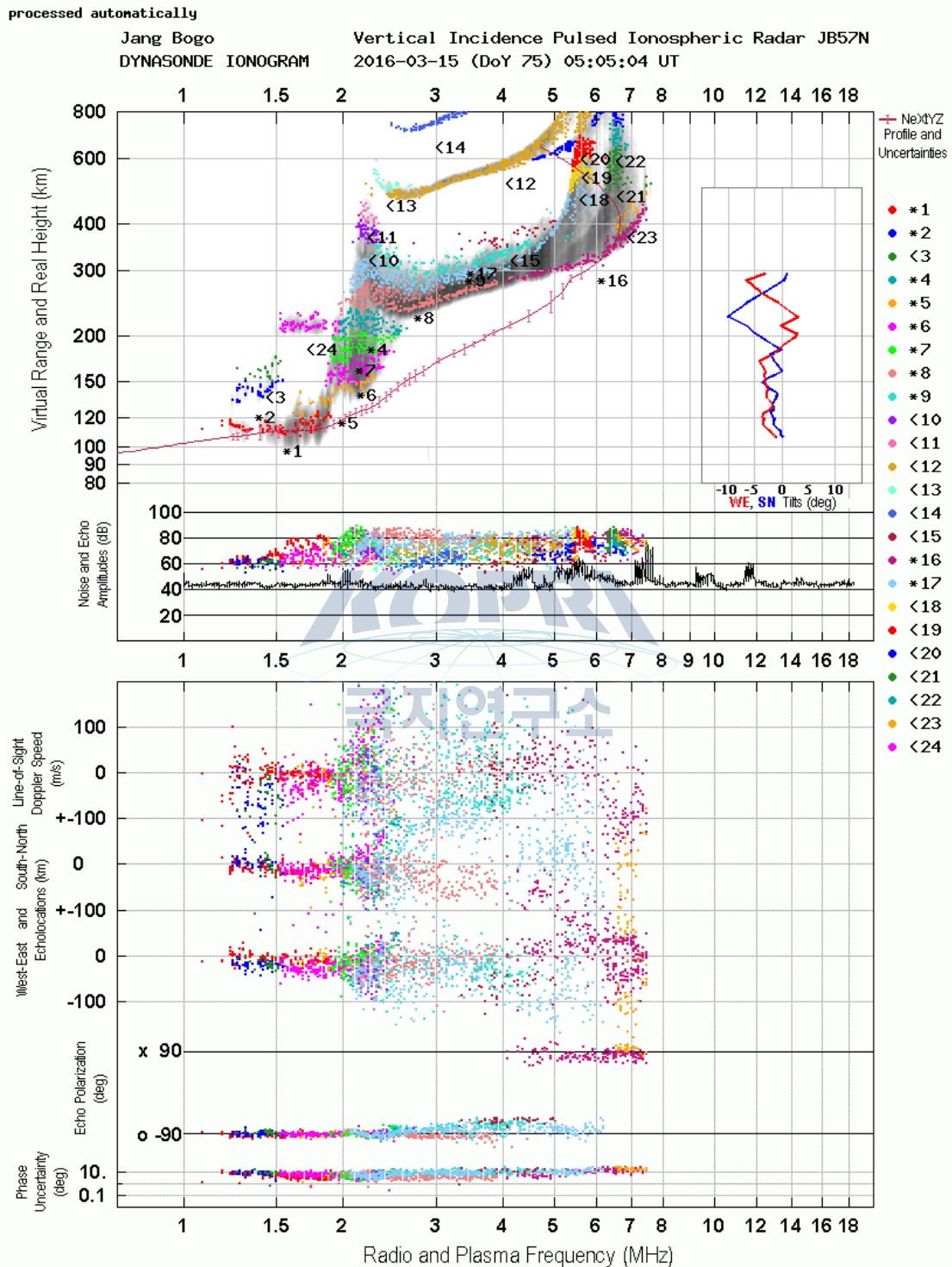


Fig. 3-18 남극장보고기지 VIPIR로 관측된 2분 동안의 전리권 상태를 나타내는 Ionogram. 관측된 에코, 도플러 속도, 전자밀도의 고도 분포, 전리권 수평 경사도 등의 정보가 모두 포함되어 있다.

권 온도, 바람관측 결과를 위성 관측과의 비교를 통하여 열권의 밀도 변화로 인한 위성 운용에 미치는 영향을 이해하여 대응 방안을 마련하는 등의 기술적

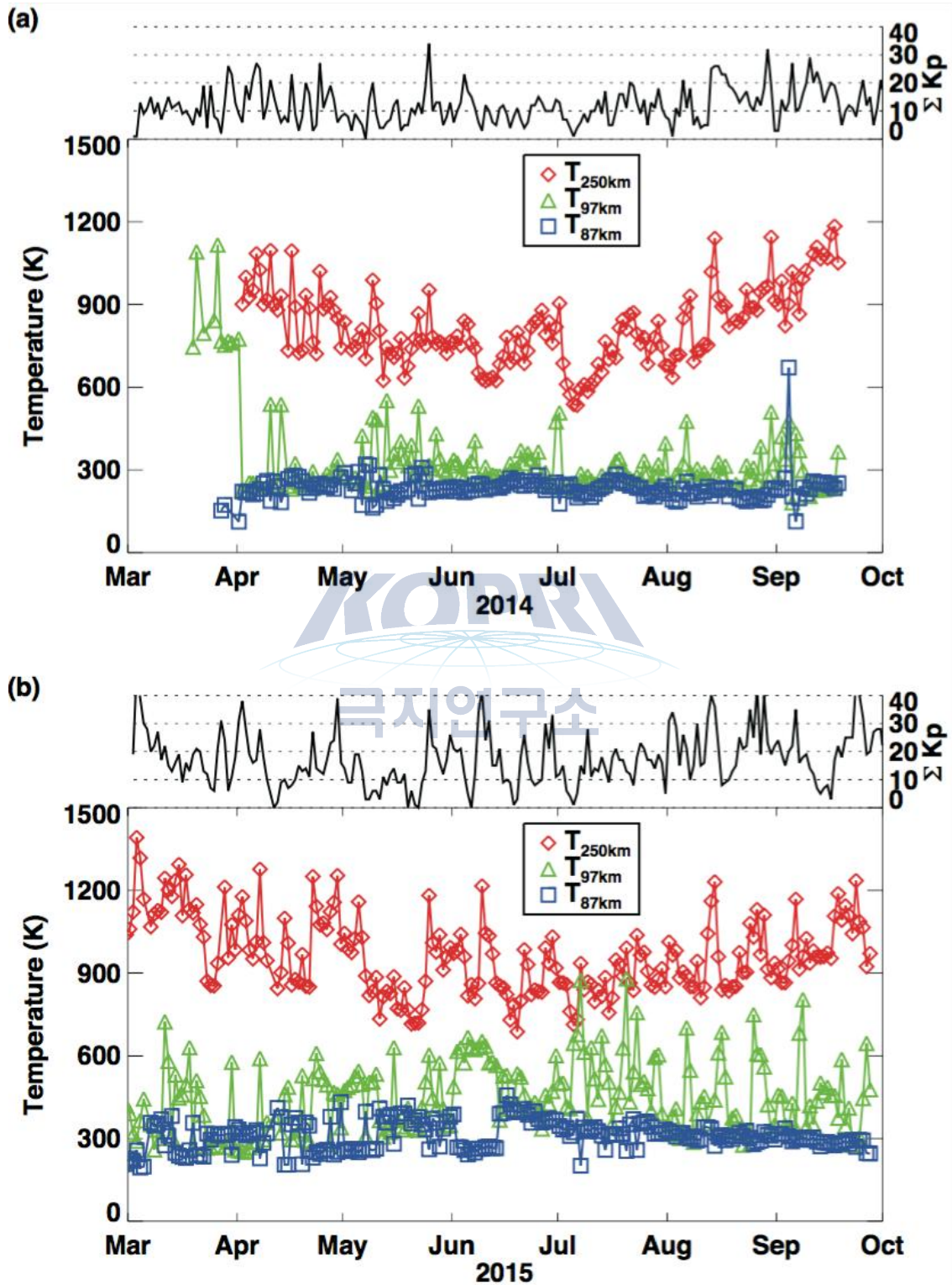


Fig. 3-19 남극장보고기지 FPI로 관측된 중간권 상부 (Blue square), 열권 (Green triangle, red diamond) 일평균 온도의 계절 변화. (위) 3시간 단위의 지자기 활동 지수 (Kp) 하루동안 더한 수치.

인 응용도 가능할 것이다.

- 지자기 활동과 극지역 열권의 온도, 바람과의 상관관계는 많은 연구가 이루어져 왔으나, 지자기 활동이 미치는 고층대기 고도 범위가 현재까지 명확하지 않으며, 지자기 활동과 고층대기의 물리적 특성 변화에 따른 시간적 차이 등에 대해서는 여전히 많은 연구가 필요한 상황이다. 따라서 남극장보고과학기지의 FPI의 중간권-열권 바람, 온도 관측 자료는 위성자료와의 비교를 통하여 우주 환경 변화에서 극지역 고층대기에 이르는 영역에 대한 추적 연구가 가능할 것으로 기대하고 있다.
- 전리권의 전자밀도와 플라즈마의 운동을 연구하기 위하여 2015년에 설치, 운영 중인 전리권레이더 (VIPIR)는 고도 약 100 km - 400 km 범위의 전리권으로부터 반사되는 개별 에코의 파라미터를 활용하여 3차원적 전리권 상태 (전리권 전자 밀도의 수평방향 경사도, 전리권 전자 밀도의 고도 분포)를 감시할 수 있는 장점을 가지고 있다. 기존의 전리권 레이더가 단지 전리권으로부터 반사되어 오는 신호의 세기만을 활용하는 반면에 장보고기지 VIPIR는 전리권 에코의 세기와 위성 정보를 동시에 활용하여 전리권의 물리적 특성을 보다 정확하게 관측할 수 있도록 디자인 되었다. 이미 운영 중인 FPI의 중성대기 바람, 온도 자료와의 비교는 플라즈마 운동과 중성대기 바람, 그리고 Joule heating 에 의한 열권의 온도 변화 연구가 가능할 것으로 기대하고 있다. 한편, 전리권 전자 밀도의 수평방향 경사도 자료로부터 전리권에서의 대기파동 현상이 관측되어 전리권에서 대기중력과, 대기 조석과 등의 연구에도 활용할 수 있게 되었다

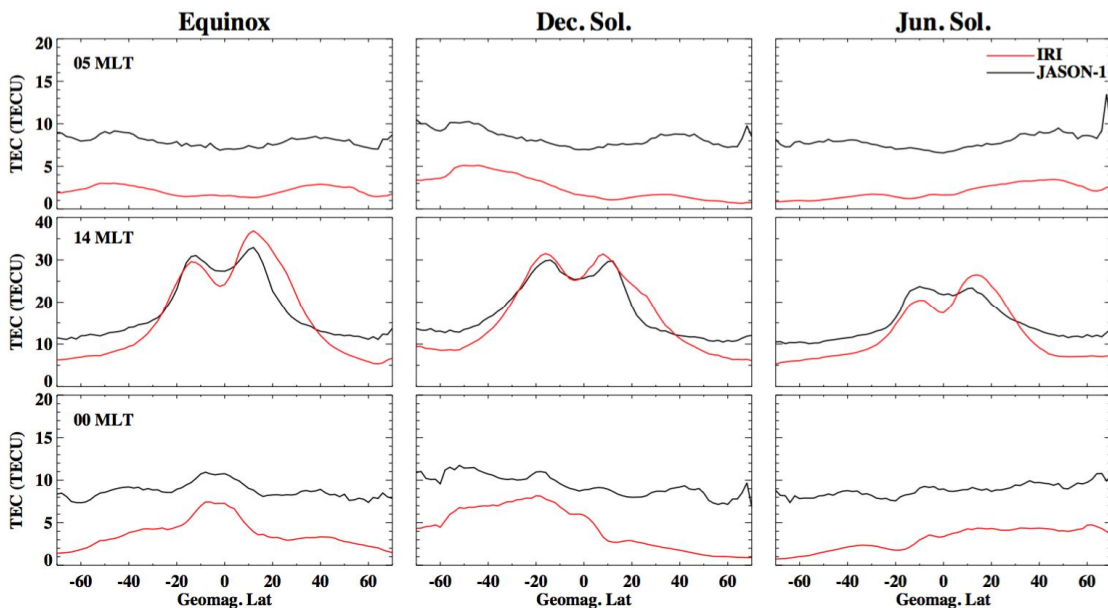


Fig. 3-20 서로 다른 계절(왼쪽: 3/9월, 중간: 12월, 오른쪽: 6월)에서 지자기 위도별, 시간별 (MLT) IRI 모델과 Jason 위성 관측 TEC 간의 비교.

[Negrea et al., 2016].

- 전리권의 전자기동밀도 (Total Electron Contents, TEC) 관측은 GPS 위성을 활용하여 대부분의 대륙 상공 전리권에 대해서 수행되고 있다. GPS TEC scintillation monitor 는 남극세종기지를 비롯하여 북극 다산기지, 그리고 남극 장보고기지에도 설치되어 지속적인 관측을 수행해 오고 있다. 최근 극지연구소 우주과학연구팀에서는 전리권 연구에 널리 활용되고 있는 International Reference Ionosphere (IRI) 모델이 태양활동 극소기인 2008-2009년에 겨울 반구의 밤 지역에서의 전자기동밀도를 위성 관측 보다 약 20-50% 가량 적게 예측한다는 연구 결과를 도출하였다. [Ji et al., in press] 이는 IRI 모델에 계절에 따른 열권의 밀도 변화에 의해 영향을 받는 중성대기-플라즈마 간의 화학반응이 제대로 반영이 되어 있지 않았기 때문일 것이라고 해석하였다. 전리권에 분포하는 플라즈마 밀도는 태양을 비롯한 우주환경에 의해 결정되는 플라즈마의 에너지와 양, 그리고 그에 따라서 변화하는 열권의 중성대기가 결합하여 그 특성이 결정되기 때문에 전리권을 기술하는 모델의 신뢰도를 높이기 위해서는 다양한 우주환경 지표를 바탕으로 지속적인 지상, 위성 관측 자료를 수집하여 현재까지 갖춰진 물리적 해석을 보완해야 한다. 국지적인 전리권 관측에 내재하는 한계를 극복하기 위하여 극지연구소 우주과학연구팀은 2016년 국제적인 규모의 전리권 관측 레이더 커뮤니티인 EISCAT 에 회원으로 등록하였다. 이로써 EISCAT에서 운영하는 고성능 전리권 레이더 네트워크를 활용한 전리권 관측을 수행하고 FPI 관측 결과와의 비교를 통해 우주환경 변화가 고위도 지역 전리권, 열권에 미치는 영향과, 전리권-열권 간의 상호작용에 대한 다각적인 연구가 가능할 것이다.
- 극지역 열권에서의 온도 변화는 적도 방향으로의 강한 바람이 형성되고 대기의 거대 순환으로 이어진다. 열권에서의 바람은 인접한 고도에 있는 플라즈마를 같은 방향으로 이끄는 역할을 하여 자기장을 따라 운동하는 플라즈마의 특성에 따라 플라즈마 밀도 분포에 변화가 생긴다. 열권의 중성대기가 태양의 복사에 의해 이온화되는 과정으로 형성되는 전리권은 플라즈마의 운동에 의해 다시 열권에 에너지를 전달하여 열권의 성분과 순환, 밀도 등을 변화시켜 매우 긴밀한 피드백 관계가 형성되어 있다 [Schunk and Nagy, 2009].
- 미국 국립 대기과학연구소에서 개발된 TIE-GCM 은 전 지구 대기 바람, 온도, 성분 등의 물리적 특성을 고도 범위 97-700 km 에 걸쳐 계산하는 모델로 열권-전리권 연구에 널리 활용되고 있다. 그러나 Huang et al., [submitted for publication]는 자기폭풍이 일어날 때 자기권으로부터 유입되는 에너지로 인한 열권의 가열 효과가 위성 관측 결과와 모델 예측 간에 매우 큰 불일치를 보였

는데, 이러한 이유로는 모델 내의 수직 방향 바람이 실제보다 작게 추정되고 자기권에서 극관을 유입되는 에너지가 충분히 반영되어 있지 않은 점이다. 현재까지의 대기 모델이 중-저위도 관측 자료에 의존하기 때문에 관측자료가 매우 적은 극지역 고층대기의 물리적 특성이 관측과 상이한 경우가 많다. 모델의 정밀성을 개선하기 위해서는 일정 기간 이상의 지상 FPI, VIPIR를 활용한 열권 온도, 플라즈마 밀도 관측, 위성의 플라즈마 플럭스, 온도 자료를 바탕으로 자기권 에너지, 열권에서 대기의 수직방향 운동에 대한 통계적인 연구가 수행

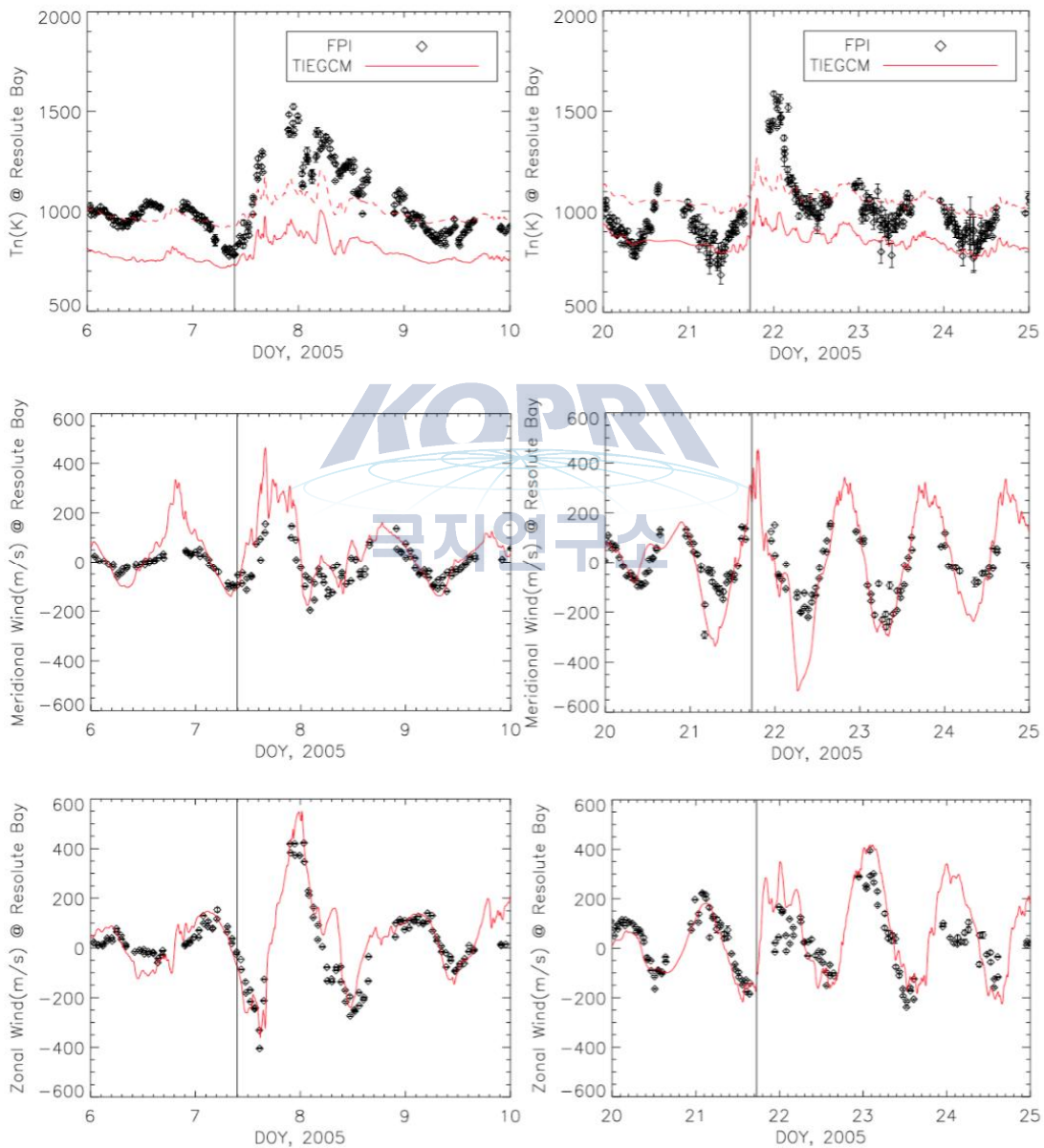


Fig. 3-21 2005년 1월에 2차례 (왼쪽: 1월 7일, 오른쪽: 1월 21일) 발생한 지자기 폭풍 기간 동안 북반구 극관에 위치한 Resolute Bay FPI 관측 (Black diamond)과 TIE-GCM 모델 결과 (Red solid line). 위에서 아래로 열권 온도, 남북방향 바람, 동서방향 바람을 나타냄 [Huang et al., submitted for publication].

되어야 한다.

- 남극장보고과학기지에서 연구활동이 시작되면서 그동안 지리적인 조건으로 인해 불가능했던 오로라 연구가 가능하게 되었다. 오로라는 우주에서 날아오는 전자들이 고층대기 원자 또는 분자들과 충돌하면서 발생하는 현상으로 우주환경지자기 고위도에서만 관측이 가능했다. 2016-2017 하계기간에 장보고과학기지에 설치할 오로라 전천카메라는 고해상도 센서를 활용하여 탁월한 시간 분해능을 가지고 오로라를 지속적으로 촬영하여 태양을 비롯한 우주환경 변화와 오로라의 발생, 그리고 오로라에 의한 고층대기의 온도, 바람 등을 FPI, VIPIR 자료와 비교함으로써 효과적으로 연구할 수 있으리라 기대하고 있다.



제 4 장 연구개발결과의 활용계획

4-1. 향후 연구방향

1. 정성적 목표

구분	년도	세부연구목표	연구내용
1차 년도	2017	외부 우주환경 변화에 의한 극지 고층 및 저층대기 변화 규명	<ul style="list-style-type: none"> ○ 태양활동, 태양풍, 자기권 등의 외부 우주환경 변화에 따른 극지 전리권 및 열권의 동역학적 특성 연구 - 장보고기지 자기권 자력계 관측과 극지 전리권 관측 비교 ○ 오로라와 극지 고층대기 변화와의 상관관계 이해 - 오로라 발생의 시공간적 분포 특성 연구: 오로라 전천카메라 자료 분석 - 오로라 발생과 극지 전리권-열권 변화의 상관관계 규명 ○ 우주선/고에너지 입자 유입에 의한 극지 고층-저층대기 구성입자 및 온도 변화 기작 규명 - 고속태양풍 발생 시 유입된 고에너지 전자에 의한 대기 구성물질 변화 연구
		저층대기 파동현상 및 대기 구성물질 변화에 의한 극지 고층대기 변화 규명	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대기중력파의 물리적 특성 이해 - 극지 중간권 및 열권하부 대기중력파 관측 - 극지 열권 대기중력파 관측: 전리권 레이더 ○ 대기중력파에 의한 극지 중간권 및 열권하부(MLT)의 물리적 특성 변화 규명 - 대기중력파와 극지 MLT 관측자료 비교 분석 수행 ○ 성층권 돌연승온과 극지 고층대기 온도 및 전리권 전자밀도 변화의 상관관계 이해 - 성층권 돌연승온 발생 시 고층대기 중간권-열권 온도 변화 연구: 위성 자료 분석 및 수치 모델 연구
		극지 고층대기 전리권-열권의 물리적 특성 이해	<ul style="list-style-type: none"> ○ 극지 전리권 플라즈마 밀도 및 열권 바람/온도의 장기적 변화경향 파악 - 장보고기지 전리권 레이더 관측자료 분석 - 북극 EISCAT 전리권 플라즈마 밀도 관측 자료 분석 ○ 극지 고층대기에서 이온-중성입자 상호작용 기작 규명 - 극지 전리권 플라즈마 대류와 열권 바람 비교 연구 ○ 극지 전리권 플라즈마 밀도 불균일성 연구 - GPS TEC & Scintillation 모니터 관측 자료 분석 - 극궤도 위성에서 관측된 전리권 전자밀도 비교 분석

2차 년도	2018	외부 우주환경 변화에 의한 극지 고층 및 저층대기 변화 규명	<ul style="list-style-type: none"> ○ 태양활동, 태양풍, 자기권 등의 외부 우주환경 변화에 따른 극지 전리권 및 열권의 동역학적 특성 연구 - 장보고기지 자기권 관측용 자력계 관측자료 분석 ○ 오로라와 극지 고층대기 변화와의 상관관계 이해 - 오로라 발생과 지자기 활동(Kp, AE 인덱스)도 비교 연구 ○ 우주선/고에너지 입자 유입에 의한 극지 고층-저층대기 구성입자 및 온도 변화 기작 규명 - 우주선(Cosmic ray) 유입에 의한 대기 구성물질 변화 연구
		저층대기 파동현상 및 대기 구성물질 변화에 의한 극지 고층대기 변화 규명	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대기중력파의 물리적 특성 이해 - 극지 중간권 및 열권하부(MLT) 지역과 열권에서의 대기 중력파 특성 비교 ○ 대기중력파에 의한 극지 중간권 및 열권하부(MLT)의 물리적 특성 변화 규명 - 대기중력파에 의한 극지 고층대기의 동역학적 특성 변화 규명 ○ 성층권 돌연승온과 극지 고층대기 온도 및 전리권 전자 밀도 변화의 상관관계 이해 - 성층권 돌연승온 발생 시 고층대기 중간권-열권 온도 변화의 수치모델 재현
		극지 고층대기 전리권-열권의 물리적 특성 이해	<ul style="list-style-type: none"> ○ 극지 전리권 플라즈마 밀도 및 열권 바람/온도의 장기적 변화경향 파악 - 장보고기지 전리권 레이더 관측과 북극 EISCAT 전리권 플라즈마 밀도 관측 자료 비교 분석 ○ 극지 고층대기에서 이온-중성입자 상호작용 기작 규명 - 열권 바람에 의한 전리권 플라즈마 대류 유도 현상 연구 ○ 극지 전리권 플라즈마 밀도 불균일성 연구 - GPS TEC & Scintillation 모니터 관측과 극궤도 위성에서 관측된 전리권 전자밀도 비교 분석

3차 년도	2019	외부 우주환경 변화에 의한 극지 고층 및 저층대기 변화 규명	<ul style="list-style-type: none"> ○ 태양활동, 태양풍, 자기권 등의 외부 우주환경 변화에 따른 극지 전리권 및 열권의 동역학적 특성 연구 - 지자기 폭풍 시 자기권 변화와 극지 전리권 변화의 상관관계 규명 ○ 오로라와 극지 고층대기 변화와의 상관관계 이해 - 지자기 폭풍과 오로라 발생의 상관관계 규명 ○ 우주선/고에너지 입자 유입에 의한 극지 고층-저층대기 구성입자 및 온도 변화 기작 규명 - 지자기 폭풍 시 우주선(Cosmic ray), 고에너지 입자 유입에 의한 대기 구성물질 변화
		저층대기 파동현상 및 대기 구성물질 변화에 의한 극지 고층대기 변화 규명	<ul style="list-style-type: none"> ○ 대기중력파의 물리적 특성 이해 - 지자기 폭풍 시 대기중력파의 고층대기 전파 특성 변화 이해 ○ 대기중력파에 의한 극지 중간권 및 열권하부(MLT)의 물리적 특성 변화 규명 - 지자기 폭풍 시 대기중력파에 의한 극지 고층대기의 동역학적 특성 변화 규명 ○ 성층권 돌연승온과 고층대기 온도 및 전리권 전자밀도 변화의 상관관계 이해 - 성층권 돌연승온과 고층대기 중간권-열권 온도 변화에 대한 수치모델 연구를 통해 상호작용 기작 규명
		극지 고층대기 전리권-열권의 물리적 특성 이해	<ul style="list-style-type: none"> ○ 극지 전리권 플라즈마 밀도 및 열권 바람/온도의 장기적 변화경향 파악 - 지자기 폭풍 시 극지 전리권 전자밀도 변화 연구 - 지자기 폭풍 시 극지 열권 변화 연구 ○ 극지 고층대기에서 이온-중성입자 상호작용 기작 규명 - 지자기 폭풍 시 전리권 대류에 의한 극지 열권 온도변화 이해 ○ 극지 전리권 플라즈마 밀도 불균일성 연구 - 지자기 폭풍시 전리권 Scintillation 특성 변화 규명

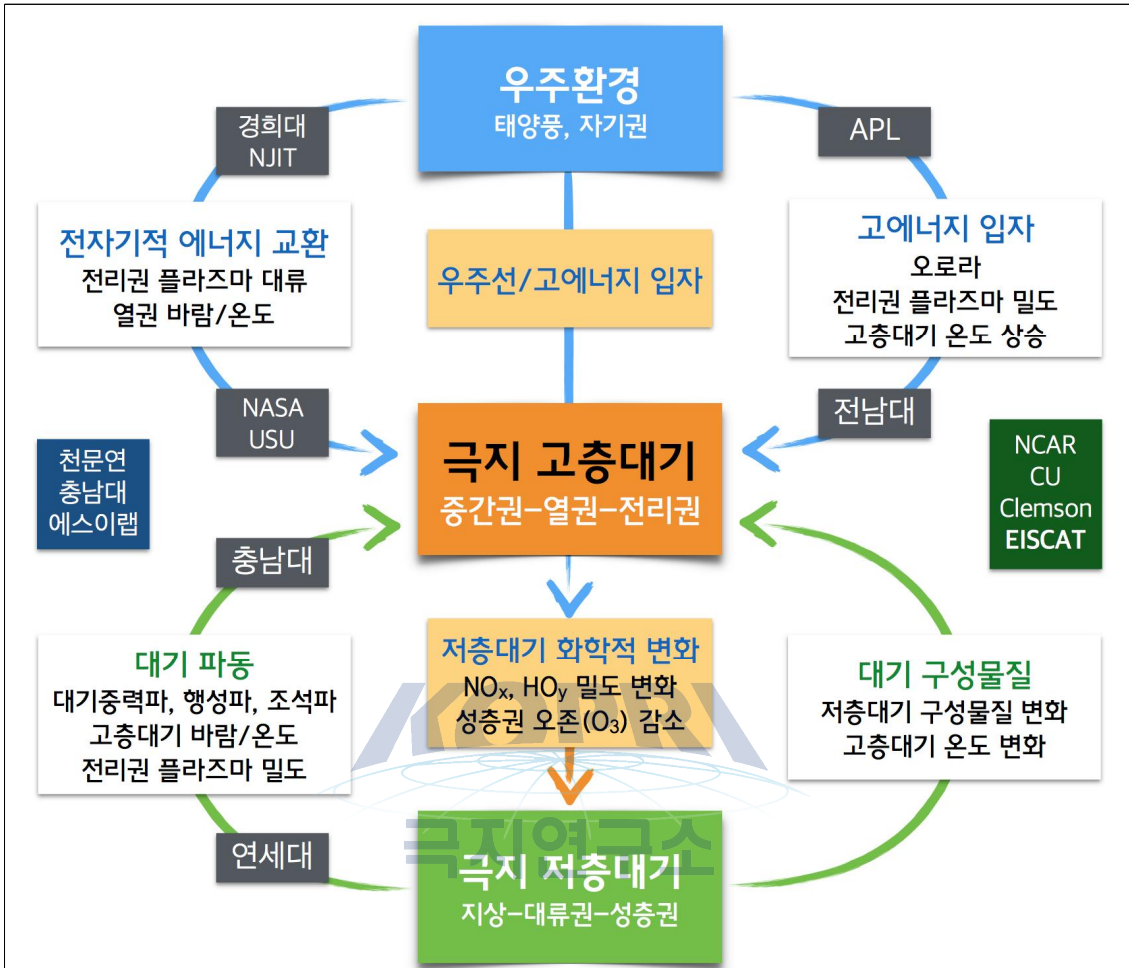
2. 정량적 목표

구분	국외논문		국내논문		특허출원		기술이전
	SCI* (1저자/공동)	기타	SCI (1저자/공동)	기타	국외	국내	
1차년도 (2017)	6 (4/2)	-					
2차년도 (2018)	7 (4/3)	-					
3차년도 (2019)	7 (5/2)	-					
합 계	20 (13/7)	-					

* 제1저자 및 공동저자(제2저자까지) 기재

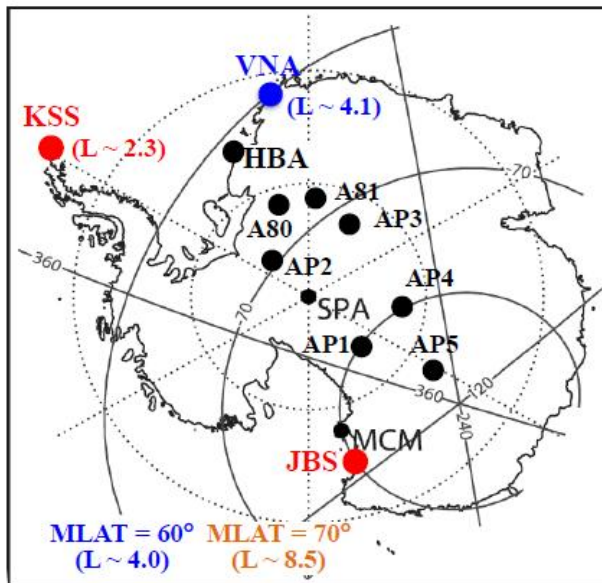


4-2. 국·내외 공동연구 추진 계획



<우주환경-극지 고층대기 연구를 위한 국내외 공동 연구 체계>

- 자기권-극지 전리권 상호작용 연구를 위한 남극 자력계 네트워크 참여 (경희대, 미국 NJIT)
 - 외부 우주환경에 의한 극지 고층대기 변화의 이해를 위해서는 자기권과 극지 전리권 간 에너지 흐름의 이해가 필수적임.
 - 경희대학교 우주탐사학과와 미국 뉴저지 공과대학(NJIT)의 자기권 연구팀과 공동으로 장보고 과학기지와 세종과학기지에 자기권 관측용 서치코일 자력계를 설치하여 현재 남극대륙에서 설치 운영 중인 자력계 네트워크에 가입



장보고과학기지 (JBS): Polar cap boundary.

세종과학기지 (KSS): Inner magnetosphere (L ~ 2.3).

Halley (영국: HBA): Near the plasmopause (L ~ 4.4).

Neumayer (독일: VNA): Near the plasmopause (L ~ 4.1).

<자기권-전리권 연동연구를 남극대륙에서 운용되고 우주환경 관측기지>

- 북극 전리권 레이더 EISCAT (한국천문연구원, 미국 JHU/APL)
 - 북극 스발바드, 트롬소, 키루나 지역에서 운영 중인 전리권 레이더 EISCAT 네트워크에 참여하여 북극 다산과학 전리권
- 극지 대기중력과 관측 네트워크(ANGWIN)
 - 일본 극지연구소, 미국 유타 대학, 영국 BAS 등 남북극 기지에서 대기중력과 관측을 수행 중인 연구팀들이 극지 고층대기에서의 대기중력과 관측자료를 공유하고 공동연구 수행을 위해 설립한 관측 네트워크
 - 초기에는 남극 대륙에서 운영 중인 광학관측으로 시작했으나, 현재는 대기 중력과 관측을 위해 남북극에서 운영 중인 모든 관측을 아우르고 있다.
 - 극지연구소에서는 충남대학교 연구팀과 함께 세종과학기지 관측을 중심으로 참여하기 시작했으며, 최근에는 북극 다산기지과 장보고 과학기지에서의 광학/레이더 관측을 통한 대기중력과 자료를 이용하여 적극적으로 참여하고 있다.
- 극관 지역 양성자 오로라 관측 (미국 JHU/APL)
 - 미국 존스홉킨스 대학 응용물리 연구소(JHU/APL)와 공동으로 북극 스발바드와 남극 장보고 과학기지에 극관 지역 양성자 오로라 관측용 전천카메라 설치
 - 동계 시즌 극관 지역에서만 발생하는 양성자 오로라의 발생 기작과 극지 고층 대기 변화와의 상관관계 연구
- 남북극 열권 바람 관측 연구 (미국 NCAR/HAO, Clemson Univ.)

- 미국 국립대기연구소(NCAR/HAO)와 공동으로 장보고과학기지에 페브리-페로 간섭계를 2014년에 설치하여 운영 중이며, 2016년에는 세종과학기지에도 추가 설치하여 운영 예정임
 - 2015년 북극 다산과학기지에 설치한 페브리-페로 간섭계 관측 자료 분석을 위해 미국 Clemson 대학 John Merriwether 교수팀과 공동 연구 수행 중임.
 - 2016년에는 북극 오로라대에 위치한 키루나 지역에 동일한 관측장비를 추가 설치하여 운영 예정임.
 - 장보고기지에서 운영 중인 페브리-페로 간섭계와는 달리 전리권 이온 바람 관측까지 가능하기 때문에 이온-중성입자 상호작용 연구에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.
- 장보고과학기지 전리권 레이더 자료 분석 연구 (미국 Colorado Univ.)
- 미국 콜로라도 대학 CIRES와 장보고과학기지에서 운영 중인 전리권 레이더 (VIPIR) 관측 자료 공동 분석 연구
 - 2015년 장보고 과학기지에 설치하여 운영 중인 전리권 레이더 시스템의 관측을 활용하여 극지 전리권 플라즈마 밀도 모니터링 및 대기중력과 연구에도 활용이 가능하다. 이 관측기기의 자료 분석을 위해 콜로라도 대학 연구팀과의 공동 연구가 필요하다.



4-3. 연구개발 사업 규모

연구기간(년)	연구개발비(백만원)		
	2017	2018	2019
2017~2019 (3년간)	1,700	1,800	1,900

4-4. 총 연구기간 로드맵



4-5. 인프라 활용 로드맵

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

* 남극 기지: 상시 관측, 북극 기지: 하계 관측 중단



제 5 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

- 유럽 전리권 레이더 네트워크(EISCAT)에서 수집된 장기 전리권 관측자료. 지난 10여 년간 축적되어 온 북극 전리권 플라즈마 밀도 및 이온 바람 관측자료 확보. 이 기본 자료는 향후 극지연구소와 한국천문연구원과 공동으로 이 레이더 관측 네트워크에 참여하여 확보가 예상되는 관측자료 활용을 위한 기반 정보를 제공해 줄 수 있을 것으로 기대된다.
- 2013년 유럽에서 발사한 극궤도 인공위성 SWARM은 3대의 위성으로 구성되어 있으며, 고층대기 전리권-열권 관측을 수행하고 있다. 극지연구소에서 남북극 기지에 운영 중인 우주환경 및 극지 고층대기 지상 관측과 함께 공동 활용을 통해 시너지 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.



제 6 장 참고문헌

- Banks, P. M., R. W. Schunk, and W. J. Raitt (1976), The topside ionosphere: a region of dynamic transition, *Ann. Rev. Earth and Plan. Sci.*, 381-440.
- Chen, C., X. Chu, A. J. McDonald, S. L. Vadas, Z. Yu, W. Fong, and X. Lu (2013), Inertia-gravity waves in Antarctica: A case study using simultaneous lidar and radar measurements at McMurdo/Scott Base (77.8oS, 166.7oE), *J. Geophys. Res.*, 118, 2794-2808, doi:10.1002/jgrd.50318.
- Chen, C., X. Chu, J. Zhao, B. R. Roberts, Z. Yu, W. Fong, X. Lu, and J. A. Smith (2016), Lidar observations of persistent gravity waves with periods of 3-10 h in the Antarctic middle and upper atmosphere at McMurdo (77.83oS, 166.67oE), *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, doi:10.1002/2015JA022127.
- Chung, J.-K., Y. I. Won, Y. H. Kim, B. Y. Lee, J. Kim (2000), "Solar Cycle Variation of Upper Thermospheric Temperature Over King Sejong Station, Antarctica", *J. Astron. Space Sci.*, 17(2), 241-248.
- Chung, J.-K., Kim, Y. H., Won, Y.-I., Moon, B.-K., and Oh, T. H. (2006), Observation of temperatures and emission rates from the OH and O2 nightglow over a southern high latitude station. *Adv. Space Res.*, 38 (11), 2374-2379.
- Chung, J.-K., G. Jee, C.-N. Lee (2011), "Global Positioning System Total Electron Content Variation over King Sejong Station in Antarctic under the Solar Minimum Condition Between 2005 and 2009", 28(4), 305-310.
- Gao, H., Xu, J., Ward, W., and Smith, A. K. (2011), Temporal evolution of nightglow emission responses to SSW events observed by TIMED/SABER, *J. Geophys. Res.*, 116, D19110, doi:10.1029/2011JD015936.
- Evans, J. V., and J. M. Holt (1978), Nighttime proton fluxes at millstone Hill, *Planet. Space Sci.*, 26, doi:10.1016/0032-0633(78)90004-1.
- Forster, M. and N. Jakowski (2000), Geomagnetic storm effects on the topside ionosphere and plasmasphere: a compact tutorial and new results, *Surveys in Geophys.*, 21, 47-87.

- Fritts, D. C., S. L. Vadas, and Y. Yamada (2002), An estimate of strong local body forcing and gravity wave radiation based on OH airglow and meteor radar observations, *Geophys. Res. Lett.*, 29(10), 1429, doi:10.1029/2001GL013753.
- Hocking, W. K. (1999), Temperatures using radar-meteor decay times, *Geophys. Res. Lett.*, 26 (21), 3297-3300.
- Holdsworth, D. A., Morris, R. J., Murphy, D. J., Reid, I. M., Burns, G. B., and French, W. J. R. (2006), Antarctic mesospheric temperature estimation using the Davis mesosphere-stratosphere-troposphere radar, *J. Geophys. Res.*, 111, D05108, doi:10.1029/2005JD006589.
- Huang, Y., Q. Wu, C. Y. Huang, and Y.-J. Su (2016), Neutral heating at various altitudes over the northern polar cap during magnetic storms, *J. Geophys. Res. Space*, submitted.
- Jarvis, M. J. (2001), Bridging the atmospheric divide, *Science*, 293, 2218-2219, doi:10.1126/science.1064467.
- Jee, G., H.-B. Lee, and S. C. Solomon (2014), Global ionospheric total electron contents (TECs) during the last two solar minimum periods, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 2090-2100, doi:10.1002/2013JA019407.
- Ji, E.-Y., G. Jee, and C. Lee (2016), Comparison of IRI-2012 with JASON-1 TEC and incoherent scatter radar observations during the 2008-2009 solar minimum period, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, in press.
- Jiang, J. H., D. L. Wu, S. D. Eckermann, and J. Ma (2003), Mountain waves in the middle atmosphere: Microwave limb sounder observations and analyses, *Adv. Space Res.*, 32(5), 801 - 806, doi:10.1016/S0273-1177(03)00402-2.
- Jiang, J. H., S. D. Eckermann, D. L. Wu, and J. Ma (2004), A search for mountain waves in MLS stratospheric limb radiances from the winter Northern Hemisphere: Data analysis and global mountain wave modeling, *J. Geophys. Res.*, 109, D03107, doi:10.1029/2003JD003974.
- Kim, J.-H., Kim, Y. H., Lee, C. and Jee, G. (2010), Seasonal variation of meteor decay times observed at King Sejong Station (62.22S, 58.78W), Antarctica, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, 72, 883-889.

- Kim, J.-H., Kim, Y. H., Jee, G., and Lee, C. (2012), Mesospheric temperature estimation from meteor decay times of weak and strong meteor trails, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, 89, 18-26.
- Kirkby, J. (2007) Cosmic rays and climate, *Surv. Geophys.*, 28, 333 - 375.
- Kepko, L., H. Spence, D. F. Smart, M. A. Shea (2009), Interhemispheric observations of impulsive nitrate enhancements associated with the four large ground-level solar cosmic ray events (1940 - 1950), 71, 1840 - 1845.
- Kim, Y. H., J. K. Chung, and Y. I. Won (2004), Observation of a persistent Leonid meteor train with an all-sky camera, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 66, 1001-1009, doi: 10.1016/j.jastp.2004.03.007.
- Kwon, H.-J., K.-H. Kim, G. Jee, J.-S. Park, H. Jin, and Y. Nishimura (2015), Plasmapause location under quiet geomagnetic conditions ($K_p \leq 1$): THEMIS observations, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2015GL066090.
- Kumar, K. K. (2007), Temperature profiles in the MLT region using radar-meteor trail decay times: Comparison with TIMED/SABER observations, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L16811, doi:10.1029/2007GL030704.
- Kunihiko Kodera, Yuhji Kuroda (2002), Dynamical response to the solar cycle, *J. Geophys. Res. Atmospheres* 107, doi:10.1029/2002JD002224.
- Lee, C. S., Kim, Y. H., Kim, J.-H., Jee, G., Won, Y.-I., and Wu, Dong L. (2013), Seasonal variation of wave activities near the mesopause region observed at King Sejong Station (62.22S, 58.78W), Antarctica, *JASTP*, 105-106, 30-38.
- Lee, H.-B., G. Jee, Y. H. Kim, and J. S. Shim (2013), Characteristics of global plasmaspheric TEC in comparison with the ionosphere simultaneously observed by Jason-1 satellite, *J. Geophys. Res. Space Physics* 118, doi:10.1002/jgra.50130.
- Lühr, H., M. Rother, W. Köhler, P. Ritter, and L. Grunwaldt (2004), Thermospheric up-welling in the cusp region: Evidence from CHAMP observations, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L06805, doi:10.1029/2003GL019314.
- Makela, J. J., et al. (2014), Storm time response of the midlatitude thermosphere: Observations from a network of Fabry-Perot interferometers, *J.*

- Geophys. Res. Space Physics, 119, 6758–6773, doi:10.1002/2014JA019832.
- Meek, C. E., Manson, A. H., Hocking, W. K., and Drummond, J. R. (2013), Eureka, 80N, SKiYMET meteor radar temperatures compared with Aura MLS values, *Ann. Geophys.*, 31, 1267–1277, doi:10.5194/angeo-31-1267-2013.
- Meriwether, J. W. (2006), Studies of thermospheric dynamics with a Fabry Perot interferometer network: A review, *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 68(1), 1576 - 1589, doi:10.1016/j.jastp.2005.11.014.
- Miller, S. D., W. C. Straka III, J. Yue, S. M. Smith, M. J. A. L. Hoffmann, M. Setvak, and P. T. Partain (2015), Upper atmospheric gravity wave details revealed in nightglow satellite imagery. *Proc. Natl. Acad. Soc. USA*, 112, doi: 10.1073/pnas.1508084112.
- Negrea, C., N. Zobotin, T. Bullett, M. Codrescu, and T. Fuller–Rowell (2016), Ionospheric response to tidal waves measured by dynasonde techniques, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, doi:10.1002/2015JA021574.
- Nicolls, M. J., R. H. Varney, S. L. Vadas, P. A. Stamus, C. J. Heinselman, R. B. Cosgrove, and M. C. Kelley (2010), Influence of an inertia–gravity wave on mesospheric dynamics: A case study with the Poker Flat Incoherent Scatter Radar, *J. Geophys. Res.*, 115, 730, D00N02, doi:10.1029/2010JD014042.
- Park, J., H. Lühr, C. Lee, Y. H. Kim, G. Jee, and J.-H. Kim (2014), A climatology of medium–scale gravity wave activity in the midlatitude/low–latitude daytime upper thermosphere as observed by CHAMP, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 2187 - 2196, doi:10.1002/2013JA019705.
- Park, J.-S., K.-H. Kim, K. Shiokawa, D.-H. Lee, E. Lee, H.-J. Kwon, H. Jin, and G. Jee (2016), EMIC waves observed at geosynchronous orbit under quiet geomagnetic conditions ($K_p \leq 1$), *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, doi:10.1002/2015JA021968.
- Randall, C. E., V. L. Harvey, C. S. Singleton, S. M. Bailey, P. F. Bernath, M. Codrescu, H. Nakajima, and J. M. Russell III (2007), Energetic particle precipitation effects on the Southern Hemisphere stratosphere in 1992 - 2005, *J. Geophys. Res.*, 112, D08308, doi:10.1029/2006JD007696.
- Richards, P. G., T. Chang, and R. H. Comfort (2000), On the causes of the

annual variation in the plasmaspheric electron density, *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.*, 62, 935-946.

Sargoytchev, S. I., Brown, S., Solheim, B. H., Cho, Y.-M., Shepherd, G. G., and Lopezgonzalez, M. J. (2004), Spectral airglow temperature imager (SATI): a ground-based instrument for the monitoring of mesosphere temperature, *Applied Optics*, 43 (30), 5712-5721.

Schunk, R., and A. Nagy (2009), *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry* (Cambridge Atmospheric and Space Science Series), 2nd ed., Cambridge University Press.

Singh, U. P. and R. P. Sinng (1997), Study of plasmasphere-ionosphere coupling fluxes, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 59, 1321-1327.

Song, I.-S., C. Lee, J.-H. Kim, G. Jee, Y.-H. Kim, H.-J. Choi, H.-Y. Chun, and Y. Kim (2016), Meteor radar observations of vertically propagating low-frequency inertia-gravity waves near the Southern polar mesosphere region. *J. Geophys. Res. Space Physics* (submitted).

Stober, G., Jacobi, Ch., Frohlich, K., and Oberheide, J. (2008), Meteor radar temperatures over Collm (51.3N, 13E), *Adv. Space Res.*, 42, 1253-1258, doi:10.1016/j.asr.2007.10.018.

Suzuki, H., T. Nakamura, S. L. Vadas, M. Tsutsumi, and M. Taguchi (2013), Inertia gravity wave in the polar mesopause region inferred from successive images of a meteor train, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 3047-3052, doi:10.1002/jgrd.50228.

Iijima, T. and T. A. Potemra (1976), Field-Aligned Currents in the Dayside Cusp Observed by Triad, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/JA081i034p05971.

Vadas, S. L., and H.-L. Liu (2013), Numerical modeling of the large-scale neutral and plasma responses to the body forces created by the dissipation of gravity waves from 6 h of deep convection in Brazil, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 2593 - 2617, doi:10.1002/jgra.50249.

Won Y.-I., Cho, Y.-M., Niciejewski, R. J., and Kim, J. (2001), Observations of OH(3,1) airglow emission using a Michelson Interferometer at 62S, *Adv. Space Res.*, 27 (6-7), 1165-1170.

- Won, Y. I., Y.-M. Cho, B. Y. Lee, J. Kim (2001), "Studies of Gravity Waves Using Michelson Interferometer Measurements of OH (3-1) Bands", J. Astron. Space Sci. 18(1), 21-26.
- Wu, D. L., and F. Zhang (2004), A study of mesoscale gravity waves over the North Atlantic with satellite observations and a mesoscale model, J. Geophys. Res., 109, D22104, doi:10.1029/2004JD005090.
- Wu, Q., B. A. Emery, S. G. Shepherd, J. M. Ruohoniemi, N. A. Frissell, and J. Semeter (2015), High-latitude thermospheric wind observations and simulations with SuperDARN data driven NCAR TIEGCM during the December 2006 magnetic storm, J. Geophys. Res. Space Physics, 120, 6021-6028, doi:10.1002/2015JA021026.



주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 기본연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

