

극지 우주환경-고층대기 연구프로그램
마스터플랜

Development of the research program for the polar upper
atmosphere and space environment



한국 해양 과학기술원
부설 극지연구소

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “극지 우주환경/고층대기 연구프로그램 마스터플랜”과제의 최종보고서로 제출합니다.

2015. 10. 31



연구책임자 : 지 건 화
참여연구원 : 김 정 한
: 이 창 섭
: 권 혁 진
“ : 함 영 배
“ : 김 성 중
“ : 최 태 진
“ : 박 상 종
“ : 홍 상 범
“ : 황 회 진
“ : 이 방 용
“ : 윤 영 준
“ : 이 유 경
“ : 정 지 영
“ : 김 진 석
“ : 신 형 철
“ : 한 승 우

보고서 초록

과제관리번호		해당단계 연구기간	2014.08.01. - 2015.07.31	단계 구분	(해당단계) / (총단계)
연구사업명	중 사 업 명	창의연구사업			
	세부사업명	연구정책·지원사업			
연구과제명	중 과 제 명				
	세부(단위)과제명	극지 우주환경/고층대기 연구프로그램 마스터 플랜			
연구책임자	지 권 화	해당단계 참여연구원수	총 : 17 명 내부 : 14 명 외부 : 3 명	해당단계 연구비	정부: 50,000 천원 기업: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속부서명	극지연구소 극지기후변화연구부		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
위 탁 연 구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약					보고서 면수
117					
<p>1. 극지우주환경 및 극지고층대기 연구</p> <ul style="list-style-type: none"> - 극지 전리권-열권 - 극지 고층대기와 지자기 폭풍 - 극지 고층대기와 자기권-전리권 상호작용 - 극지 고층대기 중간권-열권하부-전리권 연구 - 극지 고층대기에서의 대기중력과 연구 - 극지 고층대기와 우주선/고에너지 입자 - 극지 고층대기 연구를 위한 위성관측 및 위성관측 활용연구 - 극지 고층대기 연구를 위한 GPS/GNSS 활용 <p>2. 극지우주환경/고층대기 연구사업 개발을 위한 장기 프로그램 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 남북극 극지인프라 활용을 통한 극지우주환경/고층대기 지상 관측인프라 구축 - 지상관측인프라 활용 국내외 공동연구네트워크 구축 - 지상관측의 한계점 극복을 위한 인공위성 관측 및 대형 국제 관측프로그램 참여 					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	극지우주환경, 극지고층대기			
	영 어	Polar space environment, Polar upper atmosphere			

요 약 문

I. 제 목

극지 우주환경/고층대기 연구프로그램 마스터 플랜

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 기후변화, 우주기상 등의 글로벌이슈 대응 연구의 일환으로 극지 우주환경/고층대기 연구 프로그램 개발을 위한 연구인프라 및 연구인력 확보방안을 마련하고, 장기적인 극지 우주환경/고층대기 연구의 방향 설정 및 연구사업 개발

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 국내외 극지 고층대기 연구현황 파악
- 극지 고층대기가 기후변화 및 우주기상에 미치는 역할 규명관련 연구주체 개발
- 국제 공동 극지 고층대기 관측프로그램 참여
- 고층대기 연구에서 극지연구소의 역할 정립 및 장기 연구방향 설정을 위한 극지 고층대기연구 워크숍 개최

IV. 연구개발결과

- 극지 전리권-열권
 - 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 연구수행이 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
- 극지 고층대기와 지자기 폭풍
 - CME, 태양 플레어와 같은 태양폭발 현상이 발생하면 엄청난 양의 에너지가 다양한 형태로 지구에 도달하여 지자기 폭풍을 발생시킴
 - 지자기 폭풍이 발생하면 자기권을 경유하여 극지 고층대기에 그 에너지가 전달

- 되어 극지 고층대기에 심각한 변화를 발생시킴
- 지자기 폭풍 발생 시 극지 고층대기의 변화를 이해하기 위해서는 전리권, 열권, 열권하부 및 중간권을 포함하는 극지 고층대기의 지속적인 모니터링이 필수적임
- 극지 고층대기와 자기권-전리권 상호작용
- 빛 에너지 이외에 태양으로부터의 지구에 전달되는 대부분의 에너지는 지구 자기권을 경유하여 지구 고층대기에 전달됨
 - 태양풍과 자기권의 상호작용에 의해서 지구 자기권에 축적된 전자기적 에너지는 지구 자기력선을 따라서 극지 고층대기로 전달되어 오로라, 플라즈마 대류 등을 발생시킴
 - 전리권에서 생성된 플라즈마는 자기력선을 따라 자기권으로 이동하여 자기권에 플라즈마를 공급해주는 역할을 함
 - 이와 같은 전리권-자기권 상호작용은 시간, 계절, 태양활동 및 지자기 활동 변화에 따라 달라지는데, 이를 이해하기 위해서는 지속적인 전리권-자기권 모니터링과 수치모델 연구가 필수적임
- 극지 고층대기 중간권-열권하부-전리권 연구
- 극지 고층대기는 저층대기에서의 구성물질 변화, 대기 파동 등에 의해서도 큰 영향을 받음
 - 온실가스와 같은 저층대기 구성물질 변화는 저층대기 온도 뿐만 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
- 극지 고층대기에서의 대기중력과 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 발생된 파동의 수직적 전파 메커니즘 규명을 위한 수치모델 연구
- 극지 고층대기와 우주선/고에너지 입자
- 극지 고층대기에서는 지구 자기력선이 거의 수직으로 외부 우주로 열려 있어 태양 또는 외부 은하로부터의 고에너지 입자들이 자기권을 통과하여 지구 자기력선을 따라 극지 고층대기로 직접 유입됨
 - 유입된 고에너지 입자는 에너지의 크기에 따라 고층대기에서 저층대기로까지

진입하여 대기화학적 특성에 영향을 미쳐 중간권/성층권 오존양 변화에 영향을 줌
- 장보고과학기지에서 중성자 모니터 관측을 통해 고에너지 입자 유입을 모니터링 하고 저층대기 대기구성물질 및 오존 관측을 통해 고에너지 입자에 의한 저층대기 구성물질 변화 연구

○ 극지 고층대기 연구를 위한 위성관측

- 극지연구소에서는 남북극 극지인프라 활용을 극대화하기 위해 지상관측을 중심으로 연구를 수행 중에 있음

- 그러나 우주환경/고층대기 연구는 그 특성상 고층대기 물리량들의 공간적 분포의 관측도 매우 중요함

- 따라서 물리량의 시간적 분포의 관측이 가능한 지상관측과 공간적 분포의 관측이 가능한 위성관측의 공동 활용이 필수적임

○ 극지 고층대기 연구를 위한 GPS/GNSS 활용

- 위성항법에 활용되는 GPS 수신기 관측자료에는 지상 수신기에서부터 GPS 위성 사이에 있는 고층대기 전리권 플라즈마 밀도의 총량 산출이 가능하여, 따라서 전리권 전자밀도뿐만 아니라 전자밀도 불균일성의 관측이 가능함

- GPS 수신기는 현재 전 지구적으로 분포되어 있기 때문에, 전 지구적인 전리권 전자밀도 분포 연구가 가능함



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

S U M M A R Y

I. Title

Development of polar space environment and upper atmosphere research program

II. Significance and Objectives of the Study

- In order to respond to the global issues for the space weather and its relation to the climate changes, it is important not only to establish the observational system for the space environment and the upper atmosphere in the polar region but also to develop the research program for the polar space environment and upper atmosphere

III. Contents and Scope of the Study

- Current research activities for the polar upper atmosphere and space environment
- Development of research subject on the interrelationship between the climate changes and space weather
- Participation of the international joint observation program
- Establish the role of KOPRI in the Korean space science

IV. Results of the Study

- Polar ionosphere-thermosphere and their coupling
 - The ionosphere and thermosphere are the core of the upper atmospheric research
 - Utilizing the polar stations in the Arctic and Antarctica, the ground-based observations can be performed for the polar ionosphere and thermosphere
- Polar upper atmosphere and geomagnetic storms

- Geomagnetic storms caused by solar flares and CME can have great effects on the global upper atmosphere via the effects of the polar upper atmosphere
- Polar upper atmosphere and magnetosphere-ionosphere coupling
 - Most of solar energy except for sunlight enters the Earth atmosphere through the polar region
 - These include the energetic particles and electric field and currents, which cause the extra ionization and plasma convection in the polar upper atmosphere
 - Simultaneous observations for the polar ionosphere and magnetosphere are required to understand these processes
- Coupling of the mesosphere-lower thermosphere(MLT) and the ionosphere in the polar upper atmosphere
 - The upper atmosphere can be affected by the changes of the atmospheric constituents and the atmospheric waves in the lower atmosphere
 - Atmospheric constituents such as CO₂, CH₄, O₃ can change the atmospheric temperature not only in the lower atmosphere but also in the upper atmosphere with much greater amplitude, which requires long-term monitoring of the temperature and atmospheric constituents
- Polar upper atmosphere and atmospheric gravity wave
 - The atmospheric waves such gravity wave, planetary wave, and tidal waves generated in the lower atmosphere propagate into the upper atmosphere and greatly affect the dynamics of the region
 - For the understanding the physical mechanism of the wave effects on the upper atmosphere, we routinely monitor those waves and perform a numerical model simulation using physics-based model
- Cosmic ray and energetic particles and their effects on the polar upper atmosphere
 - Cosmic ray and energetic particles enter the Earth's atmosphere along the nearly vertical magnetic field lines in the polar region
 - Depending on the magnitude of their energy, they can penetrate into the lower atmosphere to affect the chemical reaction and result in the changes of the atmospheric constituents such as NO_x, HO_x, and O₃

- At Jang-Bogo Station, Antarctica, we monitor the cosmic ray and energetic particles with simultaneous observations for the atmospheric constituents to see their correlation
- Polar upper atmospheric research using satellite observations
 - The ground-based observations have a limitation in the spatial coverage of the data while the satellite observations are limited in the temporal variation of the data
 - Therefore, both observations should be used together to have better view of the upper atmosphere
- GPS/GNSS observations for the polar upper atmosphere
 - The Global Positioning System(GPS) can produce the total electron content(TEC) of the global ionosphere and the scintillation of the electron density for the global distribution of the ionospheric density and its effects on the satellite communication

V. Further Application of the Study

- Suggested observations for the polar upper atmosphere and space environment will be utilized to develop the research project for the space science in the Korea Polar Research Institute
- Polar upper atmosphere and space environment research require strong domestic and international collaborations for the observations and data analysis
- We participate the international observation network to overcome the limitation of the ground-based observations at our Arctic and Antarctic stations

C O N T E N T S

Chaper I. Introduction	13
Section 1. Objetive of the study	13
Section 2. Necessity of the study	13
Chaper II. Current status	17
Section 1. Domestic	17
Section 2. Abroad	17
Section 3. Research institutes in space science	18
Chapter III. Results of thd study	19
Section 1. Polar upper atmosphere and space environment research in the Korea Polar Research Institute	19
Section 2. Polar ionosphere and thermosphere and their coupling	29
Section 3. Polar upper atmosphere and geomagnetic storms	34
Section 4. Polar upper atmospheric research using satellite observations	38
Section 5. Application of satellite observations for the polar upper atmospheric research	47
Section 6. GPS/GNSS observations for the polar upper atmosphere	52
Section 7. Coupling of the mesosphere-lower thermosphere(MLT) and the ionosphere in the polar upper atmosphere	58
Section 8. Polar upper atmosphere and atmospheric gravity wave	75
Section 9. Cosmic ray and energetic particles and their effects on the polar upper atmosphere	93
Section 10. Polar upper atmosphere and the magnetosphere-ionosphere coupling in the polar region	104
Chapter IV. Expected Results and Application	111



목 차

제 1 장 서론	13
1. 연구개발의 목적	13
2. 연구개발의 필요성	13
제 2 장 국내외 연구개발 현황	17
1. 국내수준	17
2. 국외수준	17
3. 국내외 주요연구기관 현황	18
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	19
1. 극지연구소에서의 극지 우주환경 및 고층대기 연구	19
2. 극지 전리권과 열권	29
3. 극지 고층대기와 지자기 폭풍	34
4. 극지 고층대기 연구를 위한 위성관측	38
5. 극지 고층대기 연구를 위한 위성관측 자료 활용	47
6. 극지 고층대기 연구를 위한 GPS/GNSS 활용	52
7. 극지 중간권-열권하부-전리권 연구	58
8. 극지 고층대기에서의 대기중력과 연구	75
9. 극지 고층대기와 우주선/고에너지 입자	93
10. 극지 고층대기와 자기권-전리권 상호작용 연구	104
제 4 장 연구개발결과의 활용계획	111
제 5 장 참고문헌	112

제 1 장 서론

1. 연구개발의 목적

- 가. 전리권과 자기권 내부 영역인 플라즈마권의 전자밀도 분포 비교연구를 통해 플라즈마권 전자밀도 분포의 특성 이해하고, 플라즈마권이 전리권 전자밀도에 미치는 영향 규명
- 나. 전리권과 플라즈마권에 대한 위성 관측 자료 분석 및 수치모델 연구를 통해 전리권-플라즈마권 상호작용 연구

2. 연구개발의 필요성

- 가. 우주기상(space weather)이 발생하는 근 지구 우주환경(near-Earth space environment)에서 극지 고층대기(polar upper atmosphere)는 태양으로부터의 에너지가 자기권(magnetosphere)을 통해 지구 대기로 유입되는 관문의 역할을 하는

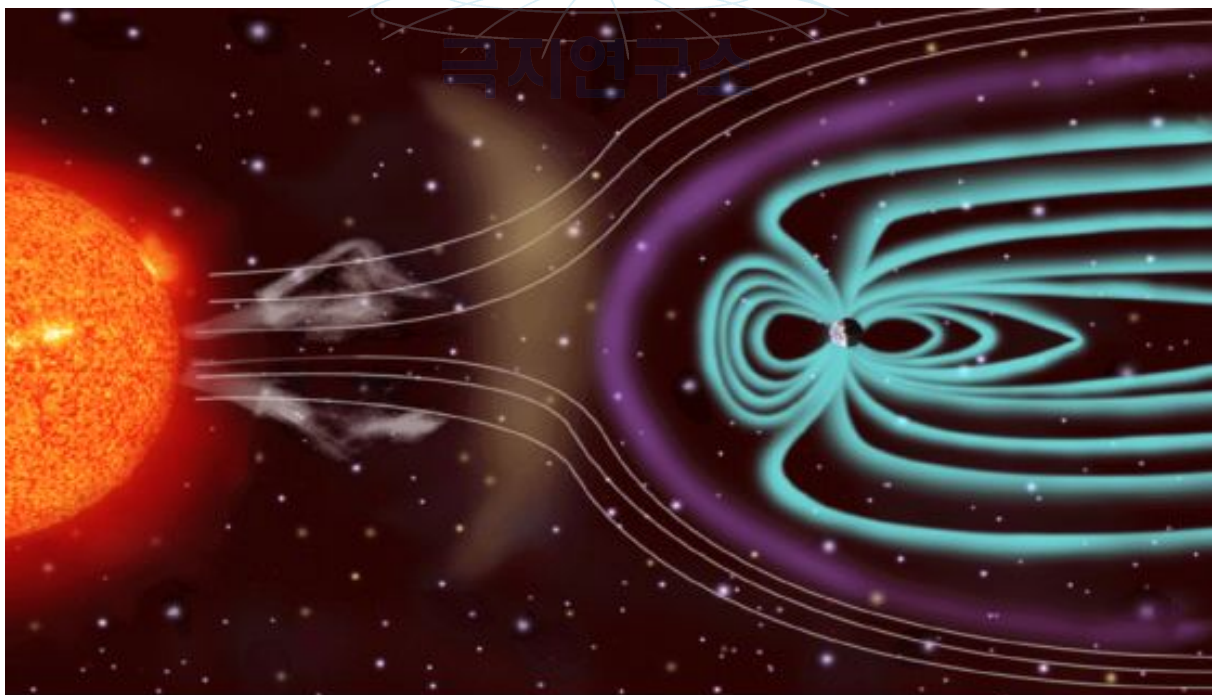


Fig. 1 Sun, solar wind and Earth's magnetosphere. The solar wind interacts with the Earth's magnetic field to form the magnetosphere.

아주 중요한 지역이다. 태양으로부터 지구 대기로 유입되는 에너지는 다양한 형태를 띠게 되는데, 자기장과 플라스마로 이루어진 태양풍(solar wind)에 실려 지구와 만나게 되고, 이때 지구 자기장과 상호작용을 통해 전자기적 에너지가 생성되어 극지 고층대기로 전달되기도 하고, 고에너지 입자는 극지에서 지구 대기로 열려있는 지구 자기장을 따라 직접 유입되기도 한다 (Fig. 1).

나. 지구 자기권은 크게 두 부분으로 나누어 생각할 수 있는데, 오로라 지역(auroral region) 내부에서는 자기력선이 외부 우주로 열려 있으며 태양 반대쪽에서는 자기권 꼬리를 형성하며 길게 늘어지는 바깥쪽 자기권이 있다. 이 영역의 전자밀도는 상대적으로 낮고 태양풍의 자기력선과 지구 자기력선이 연결되는 영역이며 태양풍의 세기에 따라 그 영역의 범위가 결정된다. 또 다른 영역은 오로라 지역 바깥쪽으로 닫혀 있는 자기력선에 의해 비교적 높은 전자밀도를 유지하며 자기권 안쪽을 차지하는 플라스마권(plasmasphere)이 있다 (Fig. 2).

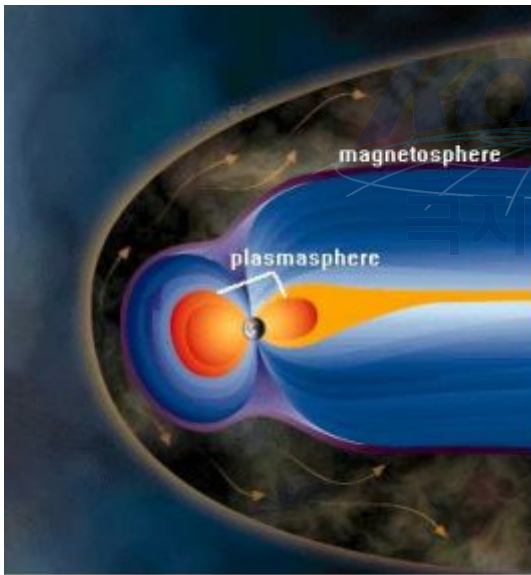


Fig. 2 The plasmasphere is the inner part of the magnetosphere.

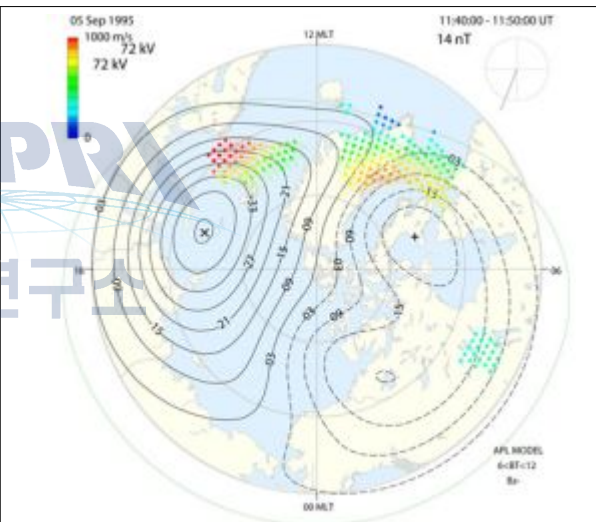


Fig. 3 Magnetospheric electric fields and currents are connected to the polar upper atmosphere and set in motion the ionospheric plasma in the polar region to form the plasma convection.

다. 태양풍과 지구 자기력선과의 상호작용에 의해 형성된 자기권은 극지 고층대기 상공의 열려있는 영역에서 태양풍의 역학적 에너지가 전기적 에너지로 전환되어 전기장/전류가 생성되고 자기력선을 따라 지구 고층대기로 전달된다. 이 전기장/전류는 극지 고층대기 전리권 플라스마의 강한 운동을 일으켜 플라스마 대류현상을

일으킨다(Fig. 3). 이 플라즈마 대류는 약 300 km 고도에서 발생하는데, 주변 중성대기 구성입자와 충돌에 의해 운동량을 전달하여 플라즈마 대류와 유사한 형태의 열권 바람을 일으키기도 한다. 이러한 과정에서 이온과 중성입자와의 마찰에 의해 강한 열이 발생하고, 이는 주변 중성대기의 온도를 크게 상승시키는 역할을 한다. 극지 고층대기에서 이렇게 상승한 고층대기 온도는 주로 밤에 더 크게 발생하여 낮 동안 적도부근에서의 태양열에 의한 온도 상승과 함께 전 지구적 열권 바람을 형성시킨다.

라. 이렇게 극지 고층대기에서의 발생하는 자기권-전리권-열권의 상호작용은 극지에서만 머무는 것이 아니라 전 지구적으로 고층대기 역학에 영향을 미친다. 그리고 이 상호작용은 고에너지 입자와 함께 극지 고층대기에서 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 고층대기에만 머물지 않고 중간권-성층권까지 내려갈 수 있다. 지자기 폭풍 시 증가한 고에너지 입자의 유입은 NO 생성에 영향을 주고, 이는 화학반응에 의해 오존 밀도를 감소시키는 역할을 한다 (Randall et al., 2007).

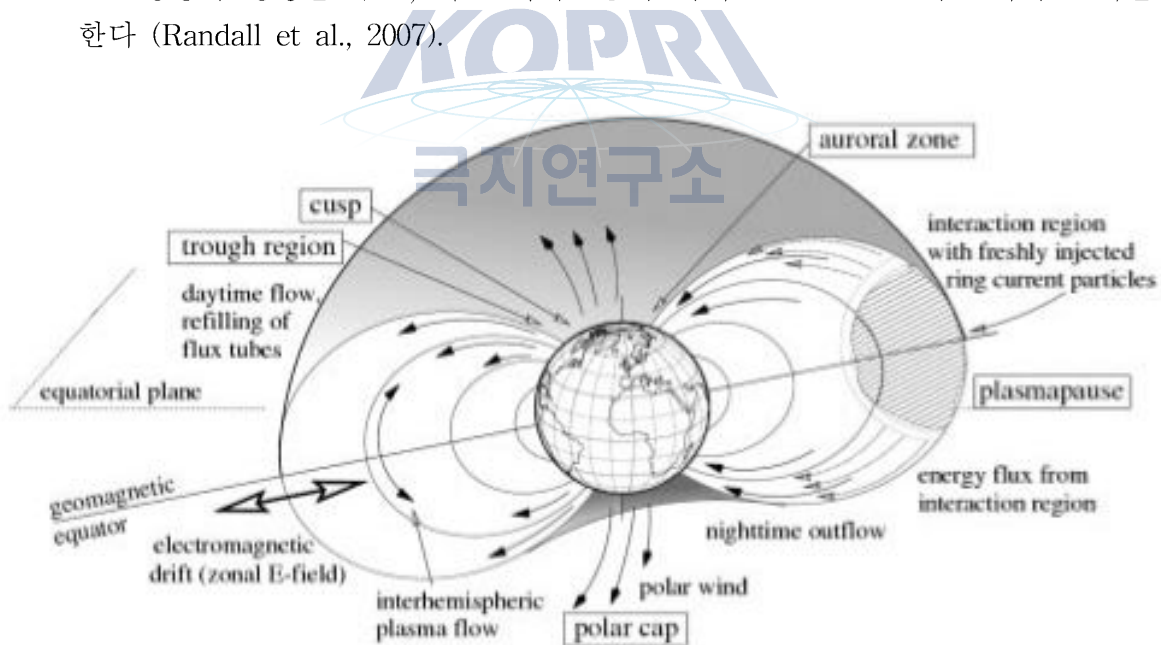


Fig. 4 Plasmasphere and polar upper atmosphere (Forster and Jakowski, 2000)

마. 내부 자기권을 내부 자기권을 형성하는 플라즈마권은 오로라 지역 바깥에서 중위도에 걸쳐 전리권 전자밀도와 밀접한 관계가 있다 (Fig. 4). 플라즈마권에 존재하는 수소 이온들은 대부분 전리권에서 자기력선을 따라 플라즈마권으로 올라온 것으로 주로 낮에 공급되고, 밤에는 다시 전리권으로 내려가 밤 전리권 전자밀도

유지에 도움을 준다 (Fig. 5). 이러한 플라마권-전리권 간에 발생하는 수소이온의 이동은 계절, 태양활동 주기, 지자기 폭풍 발생 여부에 따라 그 정도가 달라지며, 이는 전리권 전자밀도 분포의 정확한 예측을 위해 반드시 밝혀져야 하는 부분이다 (Singh and Singh, 1997; Richards et al, 2000; Foster and Jakowski, 2000).

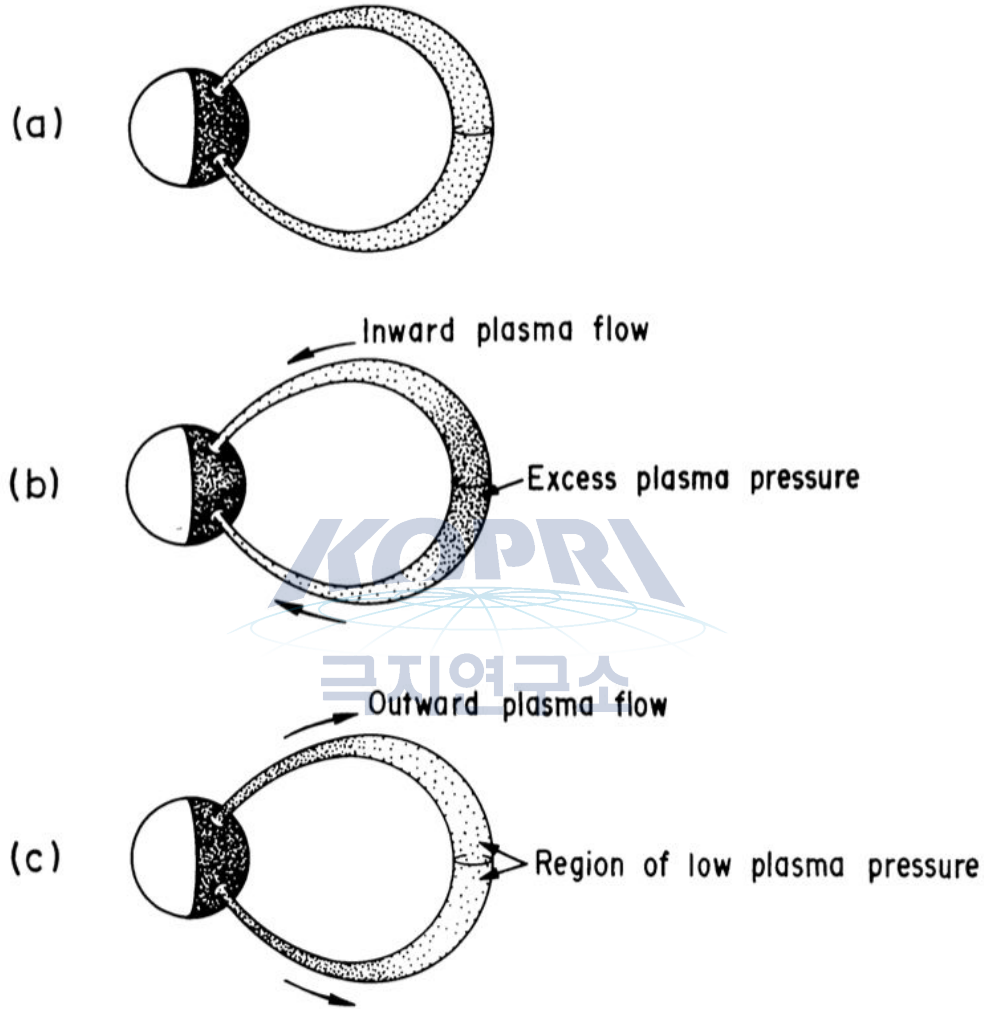


Fig. 5 Plasma flow between the ionosphere and the plasmasphere (Banks et al., 1976)

사. 국내 우주산업의 비약적인 발전으로 우주 기상예측의 필요성이 급격히 대두되고 있으며, 외나루도 우주기지에서 추진 중인 로켓의 성공적인 자체 발사를 위해서는 로켓에 실려 우주공간에 상주하게 되는 인공위성의 안정적인 운영/유지가 필수적이다. 또한 현재 국내에서 보유하고 있고, 가까운 미래에 추진 중인 다수의 인공위성의 안정적인 운영과 우주기상현상으로 인한 손실을 최소화하기 위해서는 우주기상예측연구가 선행되어야 한다.

제 2 장 국내·외 연구개발 현황

1. 국내수준

- 가. 전파연구소에는 전리권 레이더를 이용하여 오래전부터 이천에서 한반도상 전리권 전자밀도관측을 수행해 오고 있는데, 최근에는 제주도에도 추가로 설치하여 자료를 수집 중에 있다.
- 다. 한국과학기술원(KAIST)에서 국내 인공위성을 이용하여 수집한 고층대기 전리권 자료 분석 연구를 수행한 적이 있으며, 한국천문연구원에서도 우주환경연구의 일환으로 태양, 지자기권 뿐만 아니라 국내 고층대기 관측을 추진 중에 있으며, 최근에는 충남 계룡대에 VHF 비균일 전리권 관측 레이더를 설치하여 운영을 시작했다.
- 라. 경희대, 충북대, 한국과학기술원 등에서 수치모델과 위성자료 분석을 통해 지구 자기권에 대한 연구가 수행중이다. 특히 경희대에서는 위성자료 분석 및 수치모델을 활용하여 자기권 권계면 연구를 수행중이며, 이와 관련된 전리권과의 상관관계 연구가 진행되고 있다.
- 마. 현재까지 국내에서 수행된 극지 고층대기 연구는 극지연구소와 충남대학교 우주과학실험실을 중심으로 몇 가지 관측 장비를 이용하여 중간권과 열권하부 연구를 수행하고 있으나 전리권이나 열권 상부에 대한 극지에서의 관측은 전무한 상태이다.
- 바. 특히 전리권-중성대기 상호작용의 연구를 위해서는 전리권과 중성대기에 대한 지속적인 동시관측이 요구되나 국내에서는 전무한 실정이다.

2. 국외수준

- 가. 과거 관측 및 모델 연구를 통해 전리권과 플라즈마권이 서로 상호작용하며, 플라즈마권은 전리권에서 플라즈마가 공급되고 전리권 또한 플라즈마권으로부터의 플라즈마 유입에 의해 영향을 받는다는 사실이 원론적인 수준에서 알려져 있었다. 그러나 최근 전리권 전자밀도의 정확한 기술 및 예측을 위해서는 플라즈마권과의 상호작용이 중요하다는 의견이 나오기 시작하면서, 정략적인 상호작용 연구의 중요성이 부각되기 시작하고 있다.
- 나. 미국, 일본, 유럽 등 우주과학 선진국에서는 주로 전리권-플라즈마권 수치모델을 활용하여 두 영역의 상관관계 연구가 수행되고 있으며, GPS 위성과 같이 전리권-플라즈마권을 포함하는 높은 궤도의 위성에서 관측된 자료를 활용한 연구가 수행돼 있다.
- 다. 미국 해군연구소(Naval Research Laboratory)에서는 전리권-플라즈마권을 모두 포함하는 수치모델을 활용하여 전리권이 플라즈마권 전자밀도 분포에 미치는 영향 연구가 수행되고 있다.

3. 국내외 주요연구기관 현황

연구수행 기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용현황	
국 외	미국 NCAR/HAO	- 고층대기 수치모델 개발 - 지상 및 위성 관측 및 자료 분석	우주환경 연구
	미국 JHU/APL & NASA/JPL	- 우주환경 위성관측 - 자료 기반 모델링 연구	우주환경 위성자료 및 모델 서비스
	미국 NRL	- 관측자료 기반 고층대기 열권 모델링 - 전리권-플라스마권 수치모델 연구	우주환경 연구
	일본 NIPR	- 극지 저층-고층대기 지상관측	극지 우주환경 연구
	유럽 EISCAT	- 북극 고층대기 지상 관측	극지 우주환경 연구
국 내	극지 연구소	- 극지 고층대기 중간권, 열권, 전리권 지상관측	극지 우주환경 연구
	한국 천문연구원	- 태양-자기권 관측 및 모델연구 - 고층대기 열권-전리권 관측 연구	우주기상 모니터링 및 우주환경 연구
	전파연구소	- 한반도 전리권 관측소 운영	우주기상 자료 축적 및 자료 제공 서비스
	경희대학교	- 태양 및 우주환경 위성 관측 - 자기권-플라스마권 연구	우주기상 예측모델 연구
	충남대학교	- 고층대기 중간권, 열권, 전리권 지상관측 및 수치모델 연구	우주환경 연구
	충북대학교	- 자기권 수치모델 연구	우주환경 연구
	전남대학교	- 우주선 및 고에너지 입자 연구	우주환경 연구

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

1. 극지연구소에서의 극지 우주환경 및 고층대기 연구

극지연구소는 남북극 극지 인프라를 기반으로 다양한 기초 및 응용 연구활동을 수행하는 기관이다. 1988년 남극에 세종과학기지의 운영을 시작으로 극지 연구소에서는 다양한 기초과학 분야의 극지 연구가 본격적으로 수행되기 시작했다.

극지는 우리가 살고 있는 곳과는 아주 다른 여러 가지로 매우 특별한 자연 환경을 가지고 있다. 지구 상 모든 에너지의 근원은 태양으로부터 오는데, 극지는 지구 상 어느 곳보다도 적은 양의 태양 빛 에너지를 받는 지역이다. 그러나 약 70km에서 수백 km에 이르는 극지 고층대기에서는 지구의 다른 영역에서는 볼 수 없는 아주 특별한 형태의 태양 에너지가 들어오는데, 극지에서만 볼 수 있는 오로라도 바로 이 에너지와 관련이 있다. 태양에서는 지구상 생명체가 살아가는데 필요한 대기의 온도를 적절히 유지시켜주는 빛 에너지이외에도 양성자나 전자와 같은 입자들이 빠른 속도로 뿜어져 나오고 있는데, 이 고에너지 입자들은 태양 자기장과 함께 태양계 전체를 채우고 있는 태양풍을 형성한다. 따라서 태양계 내 모든 행성들은 마치 강력한 플라즈마 태풍이 부는



Fig. 6 Antarctic Jang Bogo Station(JBS) and aurora taken by Changsup Lee in 2014

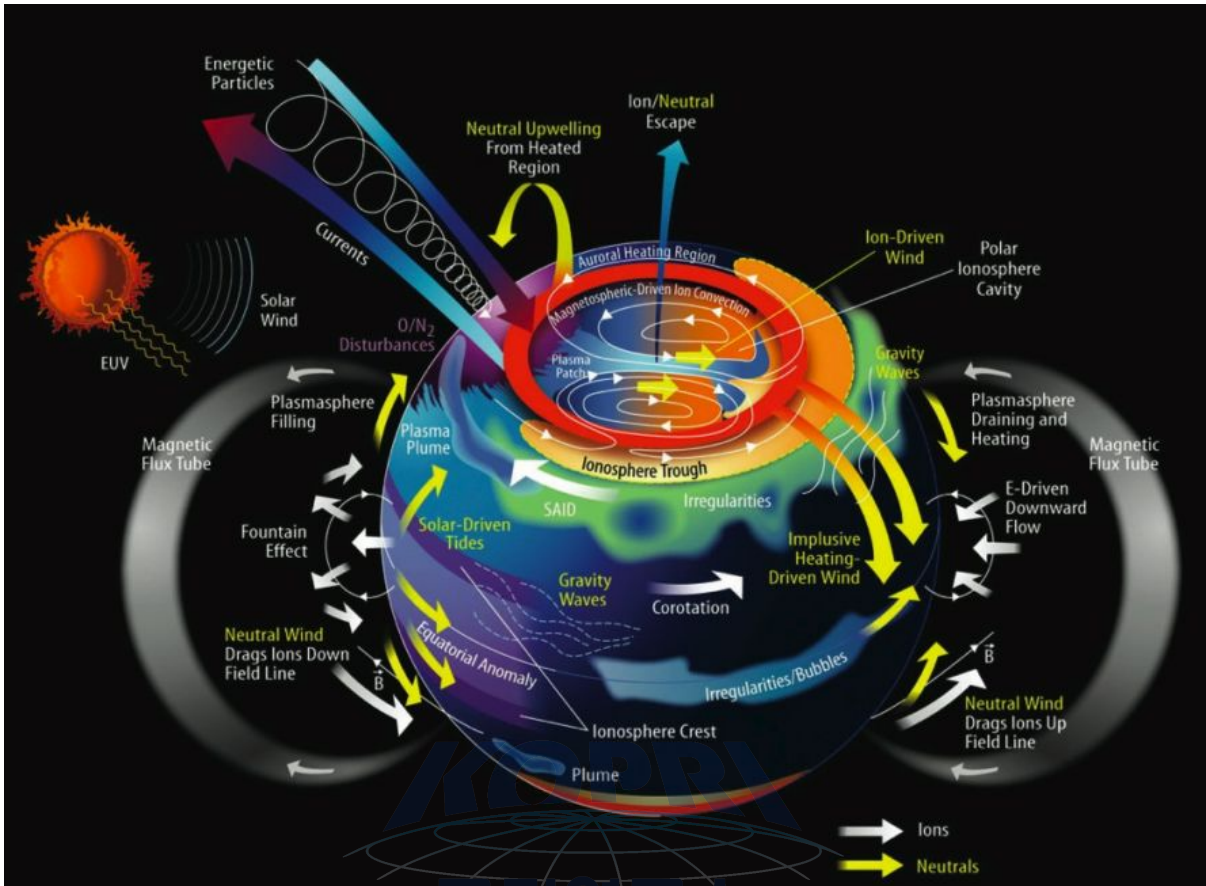


Fig. 7 The polar upper atmosphere shows various physical phenomena such as energetic particle precipitation, magnetospheric electric field, plasma convection, aurora etc., which are very different from the low and middle latitude ionosphere (NASA J. Grebowsky).

바다 한 가운데 떠 있는 작은 배와 같이 아주 빠른 속도의 태양풍에 노출되어 있는 셈이다. 그러면 태풍보다도 훨씬 빠른 속도의 태양풍 속에 떠 있는 지구에는 어떤 일이 일어나고 있을까?

우선 태양으로부터 나오는 빛 에너지를 생각해보자. 극지는 태양빛의 입사각이 가장 크기 때문에 태양빛이 비스듬하게 입사되어 가장 적은 양의 빛에너지가 들어오는 지역이다. 따라서 일 년 평균 기온이 가장 낮다. 또한 지구의 자전축은 잘 알려진 것처럼 황도면에 수직인 방향에서 약 23.5도 정도 기울어져 있다. 이 기울기로 인하여 지구의 남반구와 북반구에서는 여름과 겨울의 차이가 생기며, 또한 극지에서는 여름에는 자정에도 해가 지지 않는 백야 현상이, 겨울에는 정오에도 해가 뜨지 않는 극야 현상이 나타나는 것이다. 다음으로 극지를 상징하는 자연현상은 무엇일까? 그것은 바로 북극의 빛으로 알려진 오로라(Aurora)일 것이다. 오로라 현상은 태양풍과 함께 지구로 날아오는 고에너지 입자들이 지구 자기력선을 따라 극지 고층대기로 들어와 주변 대기 원자나

분자들과 충돌하여 발생하는 현상이다(안병호, 지건화, 2014).

지구는 그 내부 구조의 특성상 자체 자기장을 가지고 있는데, 이 지구 자기장은 마치 막대자석이 지구의 남북극을 관통해 있을 때 나오는 자기장과 유사한 모양으로 지구를 둘러싸고 있다. 한편, 양성자나 전자와 같이 전하를 띠고 있는 입자들은 우주공간이나 대기 밀도가 아주 희박한 고층대기에서는 자기장의 자기력선을 따라서만 움직이는 특성을 가지고 있다. 다시 말하면, 이 입자들은 자기력선을 가로질러서 지나갈 수 없는 것이다. 따라서 비록 태양풍속의 양성자나 전자들이 큰 에너지를 가지고 빠른 속도로 지구를 향해 움직이고는 있지만, 지구를 둘러싸고 있는 자기장을 관통하여 지구 내부로 들어올 수 없는 것이다. 지구 자기장은 강력한 태양풍으로부터 지구를 보호해주는 보호막인 셈이다. 그런데 이 지구 자기장의 보호막에 두 개의 구멍이 있으니, 그곳이 바로 북극과 남극이다. 극지에서는 지구 자기장의 자기력선이 거의 수직으로 뻗어나가 태양풍속의 자기력선과 만나게 된다. 따라서 극지의 자극 주위에서는 태양풍의 양성자나 전자들이 자기력선을 따라 지구 고층대기로 직접 들어올 수 있게 되는 것이다.

그러면 이렇게 지구로 들어온 양성자와 전자들은 지구 고층대기에 어떤 영향을 미칠까? 큰 에너지를 가지고 있는, 즉 빠른 속도로 움직이는 이 입자들이 극지 고층대기를 통과하면서 대기 중 입자들과의 충돌을 통해 에너지를 빼앗기면서 흡수되는데, 고층대기 중 산소나 질소원자들이 주로 이 에너지를 흡수한다. 흡수된 에너지는 질소 원자를 이온화시키거나 또는 질소와 산소 원자 내 전자들의 에너지 상태를 더 높은 상태로 끌어 올리는데 사용된다. 이때 이온화된 질소가 전자와 다시 결합할 때, 그리고 질소 또는 산소 원자 내 전자들이 높은 에너지 상태에서 낮은 에너지 상태로 다시 내려올 때 흡수된 에너지가 다시 빛의 형태로 방출되는데, 이것이 바로 오로라이다. 일반적으로 오로라가 발생하는 영역은 자극을 중심으로 둥근 띠 모양으로 형성되는 오로라대(auroral oval)라고 부르는 영역인데, 밤 쪽으로 좀 더 두텁게 형성된다. 오로라가 발생하는 고층대기의 고도는 보통 80~250km 정도이다. 가장 흔히 발생하는 오로라는 녹색이며, 파란색과 적색 계열의 오로라가 발생하기도 한다. 또한 간과하기 쉬운 중요한 사실은 이러한 모든 극지 고층대기의 특성은 남극에서나 북극에서나 거의 동일하게 발생한다는 것이다.

극지 고층대기에서 일어나는 현상은 오로라가 전부일까? 오로라는 태양풍과 지구 자기장과의 만남 속에서 일어나는 여러 가지 현상 중에서 우리 맨눈으로 직접 관찰할 수 있는 유일한 자연현상으로 극지 고층대기의 물리 현상 중 극히 일부분에 지나지 않는다. 극지 고층대기는 아주 특별한 지역이다. 태양풍의 자기장과 지구 자기장이 만나 서로 결합하는 지역이며, 이때 강력한 태양풍에 의해 지구 자기장이라는 보호막에 가해진 충격이 전자기적 에너지의 형태로 축적되어 지구 고층대기로 전달되는 곳이 바로

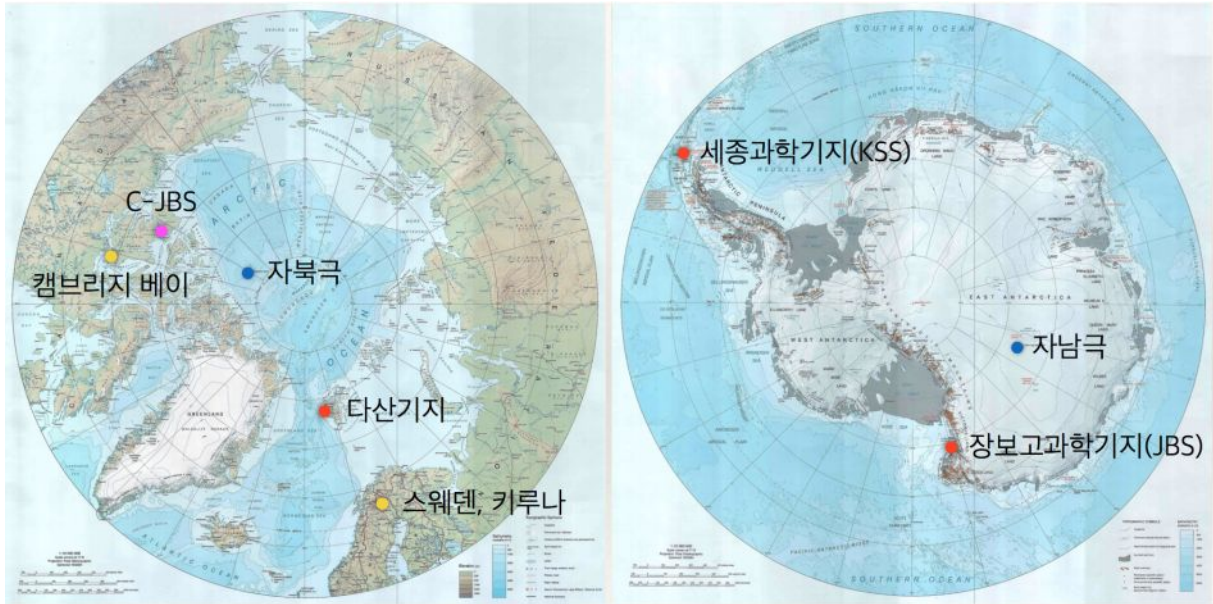


Fig. 8 Korean Arctic and Antarctic stations.

극지이다. 특히 태양폭발과 같은 특별한 이벤트가 발생하면 평소보다 훨씬 많은 양의 에너지가 고에너지 입자와 전자기적 형태로 극지 고층대기로 유입되는데, 이 중 고에너지 입자들은 극지 고층대기로 진입하여 고층대기를 구성하고 있는 원자나 분자들과의 충돌을 통해 큰 에너지를 전달하는데, 평소보다 훨씬 강하고 잦은 오로라를 발생시키면서 동시에 고층대기 구성입자들을 이온화시키기도 한다. 이런 과정에서 생성된 이온과 전자, 즉 플라즈마 입자들은 태양 극자외선에 의한 전리권 플라즈마에 더해져, 태양풍과 지구 자기장과의 상호작용에 의해 자기권에 축적되고 자기력선을 따라 극지 고층대기로 전달된 전자기적 에너지에 의해 엄청난 속도로 가속 된다. 이렇게 가속된 이온과 전자들은 극지 고층대기에서 주변의 대기 구성 원자나 분자들과 충돌에 의해 엄청난 열을 발생시킨다. 이 열은 물론 극지 고층대기를 뜨겁게 가열시켜 극지에서 중·저위도로의 고층대기 대순환을 일으키며 전 지구적인 영향을 일으키게 된다. 따라서 극지 고층대기는 태양 빛에너지를 가장 적게 받는 지역임에도 불구하고 경우에 따라서는 적도지역보다도 훨씬 큰 에너지를 받아 전 지구적인 고층대기 변화를 일으키기도 하는 것이다.

가. 남북극 극지 인프라

이와 같은 극지 우주환경 및 고층대기 연구를 위해서 극지연구소에서는 남북극에서 운영되고 있는 극지 기반시설을 적극 활용하고 있다. 현재 남극에는 남극 반도 끝단 킹조지섬에서 1988년부터 운영을 시작한 세종과학기지(62° 13'S, 58° 47'W)와 동남극 북빅토리아랜드 테라노바 만 연안에서 2014년부터 운영을 시작한 장보고과학기지(74° 37.4'S, 164° 13.7'E)가 있으며, 북극에는 노르웨이 스발바드 군도의 스피츠 베르겐 섬의

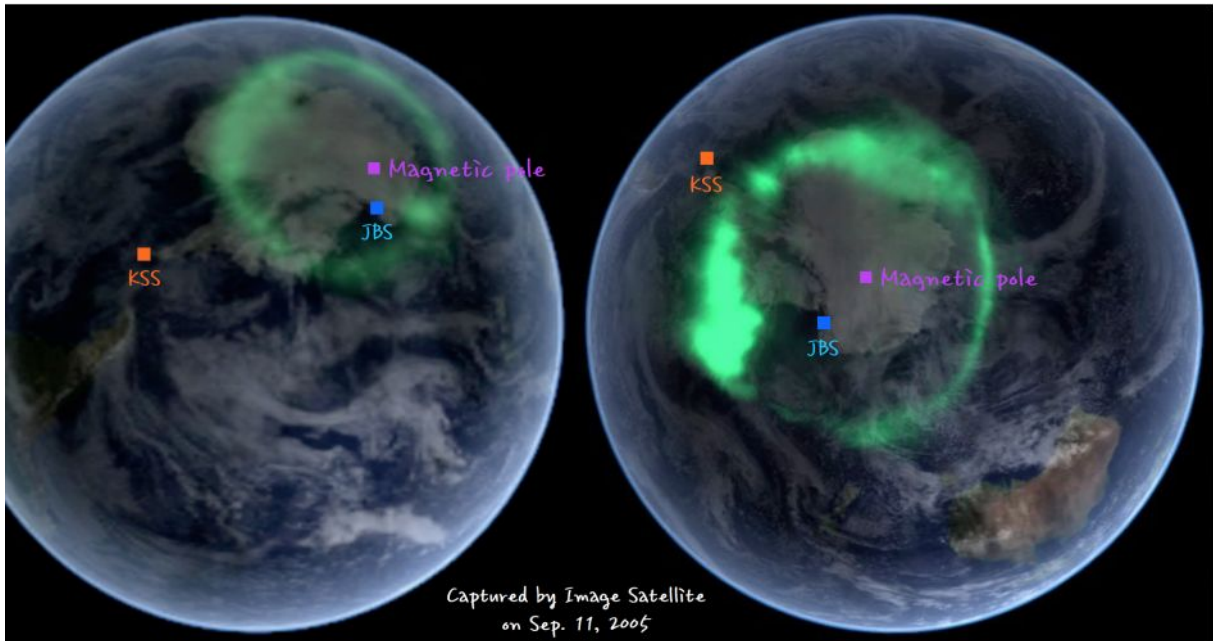


Fig. 9 Locations of the King Sejong Station (KSS) and Jang Bogo Station (JBS), Antarctica. JBS is located in the polar cap region while KSS is located in the subauroral region.

니알슨에 2002년부터 다산기지(78° 55' N, 11° 56'E)를 운영하고 있다.

나. 남극 세종과학기지

극지연구소에서는 1990년 초에 처음으로 극지 고층대기 관측을 시작했는데(당시는 한국해양연구원 산하 극지연구본부), 이때 주요 관측영역은 고층대기 중간권과 중간권 권계면이었다. 처음 설치된 관측기기는 고층대기 바람을 측정할 수 있는 페브리-페로 간섭계(Fabry-Perot Interferometer)였는데, 이 장비는 일종의 시험적인 성격의 운영이었고, 본격적인 고층대기 관측은 1999년 남극세종과학기지에 적외선 간섭계(Michelson interferometer: FTS)를 설치하면서 부터라고 할 수 있다. 이 관측기기는 동계기간 동안 야간에만 운영되는 장비로서 약 87km 고도의 고층대기에서 발생하는 OH 분자의 대기광을 관측하여 그 주변 온도를 측정할 수 있는 장비이다. 그러나 이 FTS는 2001년 북극 다산과학기지로 이전 설치되었고, 이를 대체하기 위해 2002년 캐나다 York University와 함께 대기광 분광계(Spectral Airglow Temperature Imager: SATI)를 새롭게 설치했다. 이 관측기기는 적외선 간섭계와 유사하게 대기광을 관측하여 고층대기 온도를 측정할 수 있는데, OH 대기광뿐만 아니라 산소분자의 대기광도 함께 관측할 수 있다(Won et al., 1999; Chung et al., 2000; Won et al., 2001; Won et al., 2001; Chung et al., 2006).

그러나 적외선 간섭계나 SATI의 경우 동계기간 동안 맑은 날 야간에만 관측이 가



Fig. 10 King Sejong Station was opened in 1988 at the tip of the Antarctic peninsula ($62^{\circ} 13' S, 58^{\circ} 47' W$).

능하여 고층대기 온도를 지속적으로 모니터링하기에는 한계가 있다. 이러한 점을 보완하고 고층대기의 바람까지 관측을 확대하기 위해 2007년에는 충남대학교 천문우주과학과 우주과학실험실과 공동으로 유성레이더(Meteor Radar: MR)라는 관측기기를 세종과학기지에 설치하였다. 이 레이더는 우주에서 지구 대기로 들어오는 유성 중에 약 70~110km 고도의 고층대기에서 주변 대기 입자들과의 충돌에 의한 마찰로 타서 없어지는 아주 작은 크기의 유성을 관측한다. 이 유성들이 타서 없어질 때 유성흔이라고 하는 플라즈마 가스가 길게 형성되는데, 유성레이더는 바로 이 유성흔에 반사되어 돌아오는 전파 신호를 분석해서 주변 대기의 바람과 온도를 관측할 수 있게 해준다. 이 관측기기는 광학관측기와 달리 하루 24시간, 1년 365일, 날씨 조건에 상관없이 지속적인 관측이 가능할 뿐만 아니라, 고층대기 온도 외에도 중성대기 바람의 관측이 가능하다(Kim et al., 2010; Kim et al., 2012; Kim et al., 2013; Lee et al., 2013).

또한 2000년에는 전천카메라(All Sky Camera: ASC) 시스템을 도입하여 경북 보현산 천문대에 설치 후 2006년까지 운영하였고, 2008년 세종과학기지로 이전되어 장비 노후화로 운영이 중단된 2011년까지 지속적으로 운영하였으며, 2012년 초에는 이 노후장비를 대체하기 위해 신규 전천카메라가 도입되어 현재까지 세종과학기지 상공 고층대기의



Fig. 11 Jang Bogo Station(JBS) was opened in 2014 as a second Korean Antarctic station at the Terra Nova Bay (74° 37' S, 164° 12' E), Antarctica.

대기중력과 연구에 활용되고 있다. 전천카메라 시스템은 세 가지 필터를 이용하여 87km, 92km, 250km 고도에서 발생하는 대기광을 관측하고 있는데, 세종기지 주변은 그 지역적 특성상 대기 중력파의 발생률이 매우 큰 지역으로 알려져 있어 전천 카메라 관측을 통한 대기 중력파 연구의 최적지라고 볼 수 있다.

남극 세종과학기지에서는 대기광 분광계(SATI), 전천카메라(ASC), 유성레이더(MR) 등의 관측을 통해 고층대기 중간권 및 열권 하부에서의 다양한 물리적 현상에 대한 연구를 수행하고 있다(Chung et al., 2011; Jee et al., 2014).

다. 남극 장보고과학기지

남극 세종과학기지에서의 고층대기 연구는 주로 중간권과 열권하부에 해당되는 영역의 연구에 집중되어 있다. 특히 남극 세종과학기지가 있는 남극 반도 끝단은 지자기 위도가 상대적으로 낮은 편에 있기 때문에 오로라와 같은 극지 고층대기의 특성이 잘 나타나지 않는다. 극지연구소에서는 극지 연구 영역의 확장을 위해 남극에서 두 번째 과학기지인 장보고과학기지를 2014년에 준공하여 운영해 오고 있다. 장보고과학기지는 남극에서 세종과학기지와는 거의 반대편에 위치해 있고, 지자기 위도 상 위치가 오로라 대 안쪽에 있어 오로라와 같은 극지 고층대기의 특성이 잘 나타나는 지역이다.

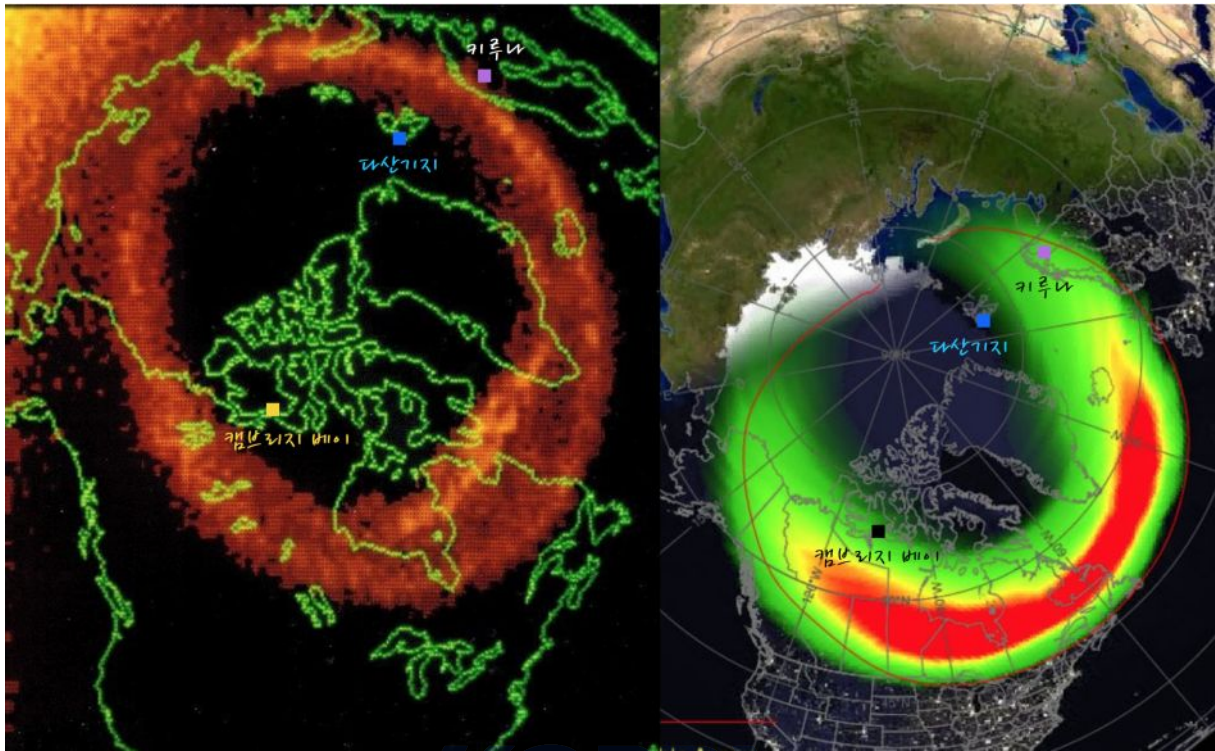


Fig. 12 Dasan Station (78° 55' N, 11° 56' E) and Kiruna, Sweden (67° 51' N, 20° 13' E) are located in the polar cap and auroral regions, respectively.

장보고과학기지에서의 관측은 극지 고층대기는 물론 우주환경에 대한 관측까지 확대되어 수행될 예정이다. 우선 첫 번째로 시작된 관측은 2014년 봄 장보고기지의 준공과 함께 시작된 페브리-페로 간섭계에 의한 열권 바람 및 온도의 관측이다. 미국 국립대기연구소(NCAR)와 공동으로 설치된 페브리-페로 간섭계(Fabry-Perot Interferometer: FPI)는 중간권에서 열권에 이르는 넓은 고도 영역에서 대기광 관측을 통해 중성대기 바람을 측정할 수 있는 거의 유일한 관측기기이다. 두 번째 관측기기는 전리권에서의 전자(또는 이온) 밀도와 이온 바람을 동시에 모니터링하기 위한 레이더 시스템이다. 이 전리권 레이더(Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar: VIPIR)는 2015년에 미국 콜로라도 대학과 공동으로 설치되어 운영되고 있으며, FPI 관측과 함께 극지 고층대기 열권-전리권 연구에 활용될 예정이다. 또한 미국 존스홉킨스 응용물리연구소(JHU/APL)와 한국천문연구원과 공동으로 양성자 오로라 관측용 전천카메라, 대기광 관측용 전천카메라, GPS TEC/Scintillation 모니터를 2016년 초에 장보고기지에 설치할 예정이다. 경희대학교 우주탐사학과와 공동으로 자력계를 설치하여 자기권과 극지 전리권과의 상관관계 연구에도 활용할 예정이다. 마지막으로 미국 델라웨어 대학이 미국 맥머도 기지에서 운영하던 중성자 모니터를 전남대학교와 함께 장보고기지로 이전 설치하여 우주에서 지구 고층대기로 유입되는 고에너지 입자를 모니터링할 예정이다. 따라서 장보고과학기지에서는 극지 고층대기뿐만 아니라 우주환경 관측이 동시에 수행되어 우주환경과 지구 고층대기에 발생하



Fig. 13 The Dasan Station is situated at Ny-Alesund (78° 55' N, 11° 56' E), on the high Arctic island of Spitsbergen, part of the Svalbard Archipelago.

는 다양한 물리적 현상 연구를 통해 궁극적으로 우주기상예측연구에 활용될 수 있는 기반정보 확보에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

라. 북극 다산과학기지

북극에서의 고층대기 관측은 남극에 비해서 상대적으로 미미한 수준에 머물러 왔다. 2001년부터 북극지역에서도 고층대기 관측을 시작했는데, 세종기지에서 운영되었던 것과 동일한 적외선 간섭계를 스웨덴 키루나에 설치하여 운영을 시작했고, 2002년 북극 노르웨이 스텔바드 지역에 다산기지를 설립하면서 세종기지의 적외선 간섭계를 다산기지로 이전하여 운영을 시작했다. 이 관측기기는 두 북극 지역에서 현재까지도 정상적으로 운영되고 있으며, 북극 고층대기 중간권 및 열권하부 지역 연구에 활용되고 있다(Won et al., 2003). 그러나 우리나라가 2013년 북극 이사회 정식 옵서버 자격을 획득함에 따라 북극연구 활성화 정책이 추진되었고, 이를 계기로 북극 우주환경 및 고층대기 연구에서도 남극지역과 비슷한 수준으로의 연구기반 확보를 추진하고 있다. 우선 다산과학기지에서는 고층대기 열권 바람과 전리권 이온 바람을 동시에 관측하기 위한 페브리-페로 간섭계를 2015년 가을에 설치할 예정이며, 그 이듬해에는 스웨덴 키루나에 동일한 장비를 설치하여

극관 지역과 오로라대에서 열권-전리권의 역학적 상호작용 연구를 수행할 예정이다. 또한 유럽연합 중심의 대형 전리권 레이더 프로젝트인 EISCAT에 참여하여 북극 전리권 연구를 활성화할 계획이다.



2. 극지 전리권과 열권

가. 개요

- 지구 고층대기 전리권은 대략 60-1000 km 고도 사이에 존재하며 열권과 비슷한 대기 영역을 차지하고 있음
- 고층대기 전리권은 대부분 열권 내 산소원자가 태양 극자외선에 의해 광이온화되어 형성됨
- 극지 전리권-열권은 태양풍과 지구 자기권과 직접적으로 연결된 곳으로, 이들과의 상호작용에 의해 고층대기의 물리적 특성 변화를 유발시킴

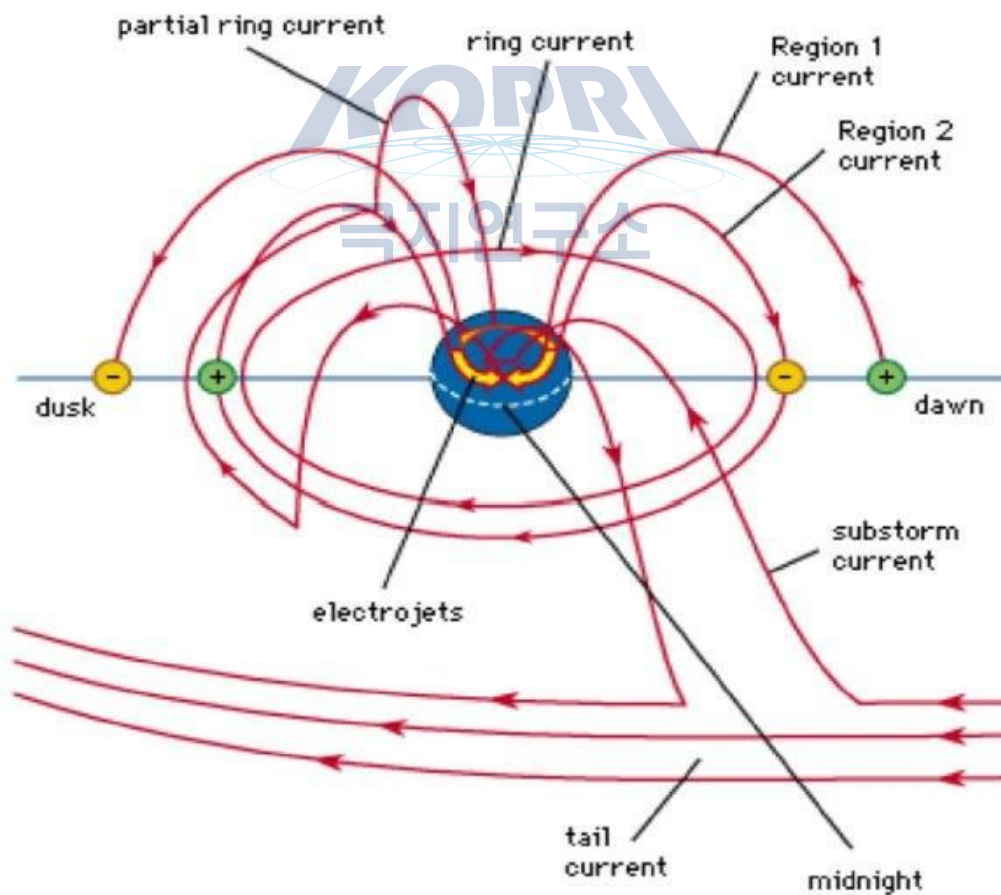


Fig. 14 Magnetosphere-Ionosphere connection through Field-Aligned current

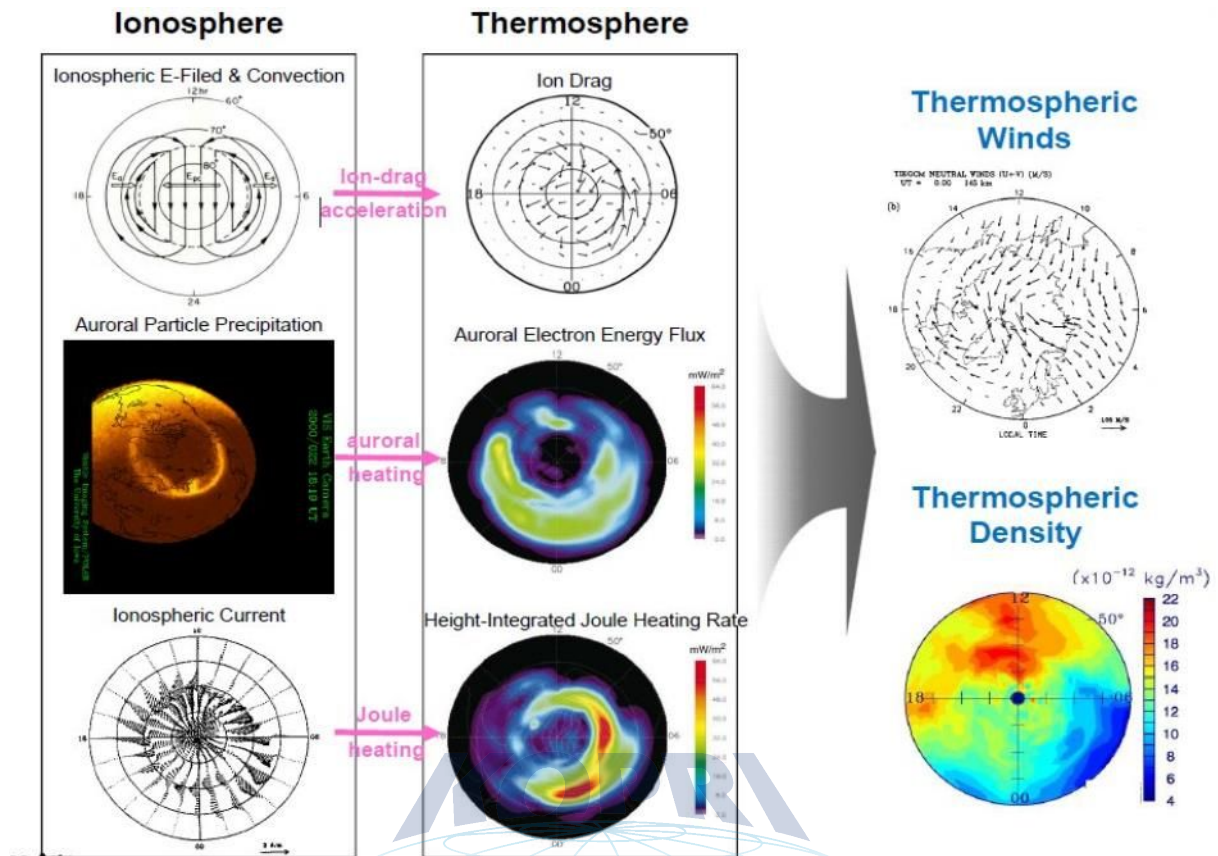


Fig. 15 Ionosphere-Thermosphere processes in the high-latitudes

나. 극지 고층대기에서의 태양풍 및 지구 자기권과의 상호작용

- 극지 고층대기에서는 지구 자기권과 태양풍과의 상호작용에 의해 생성된 전기장/전류가 발생
- 생성된 전기장/전류는 극지 고층대기로 전달되어 전리권 플라즈마의 강한 운동을 일으켜 플라즈마 대류현상을 발생
- 이 플라즈마 대류는 주변 중성대기 입자와 충돌에 의해 운동량을 전달하여 플라즈마 대류와 유사한 형태의 열권 바람을 생성
- 이러한 과정에서 이온과 중성입자와의 마찰에 의해 강한 열이 발생하고, 이는 주변 중성대기의 온도를 크게 상승시키는 역할을 함
- 극지 고층대기에서 상승한 온도는 주로 밤에 더 크게 발생하여 낮 동안 적도 부근에서의 태양열에 의한 온도 상승과 함께 전 지구적인 열권 바람을 형성

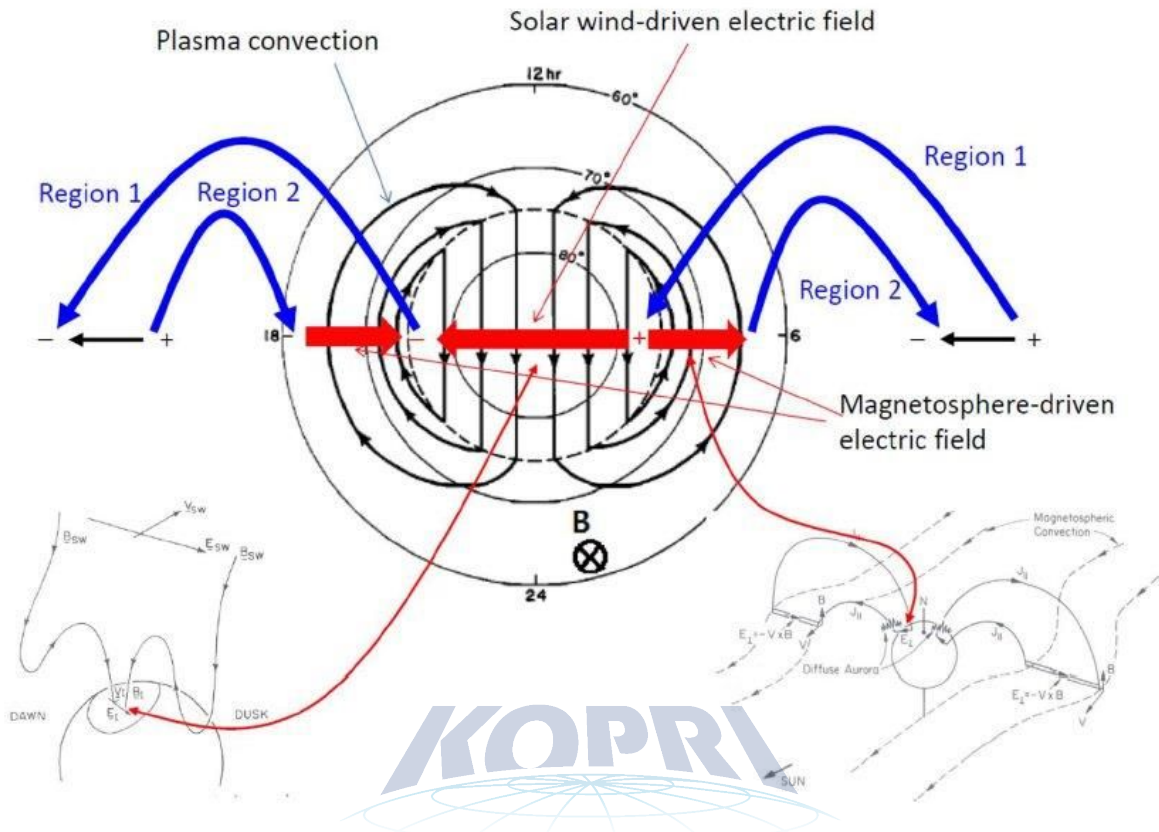


Fig. 16 Plasma convection in high latitudes

다. 우주환경 변화에 의한 극지 전리권-열권 상호작용

- 태양활동에 의해 지구 자기장이 교란되면 다양한 형태의 에너지가 고층대기에 유입되어 전리권뿐만 아니라 열권에도 큰 변화가 발생
- 극지 전리권에 오로라 입자가 유입이 증가하면서 강한 전류가 발생하고, 이러한 전류의 발생은 줄가열 및 이온항력이 증가하여 열권의 성분, 밀도, 역학 및 구조에 큰 변화가 발생
- 이와 같이, 극지고층대기에서 전리권과 열권은 밀접하게 상호 연결되어 있어 반드시 함께 연구되어야하는 영역. 모델뿐만 아니라 전리권-열권의 중성대기를 동시에 관측이 필요

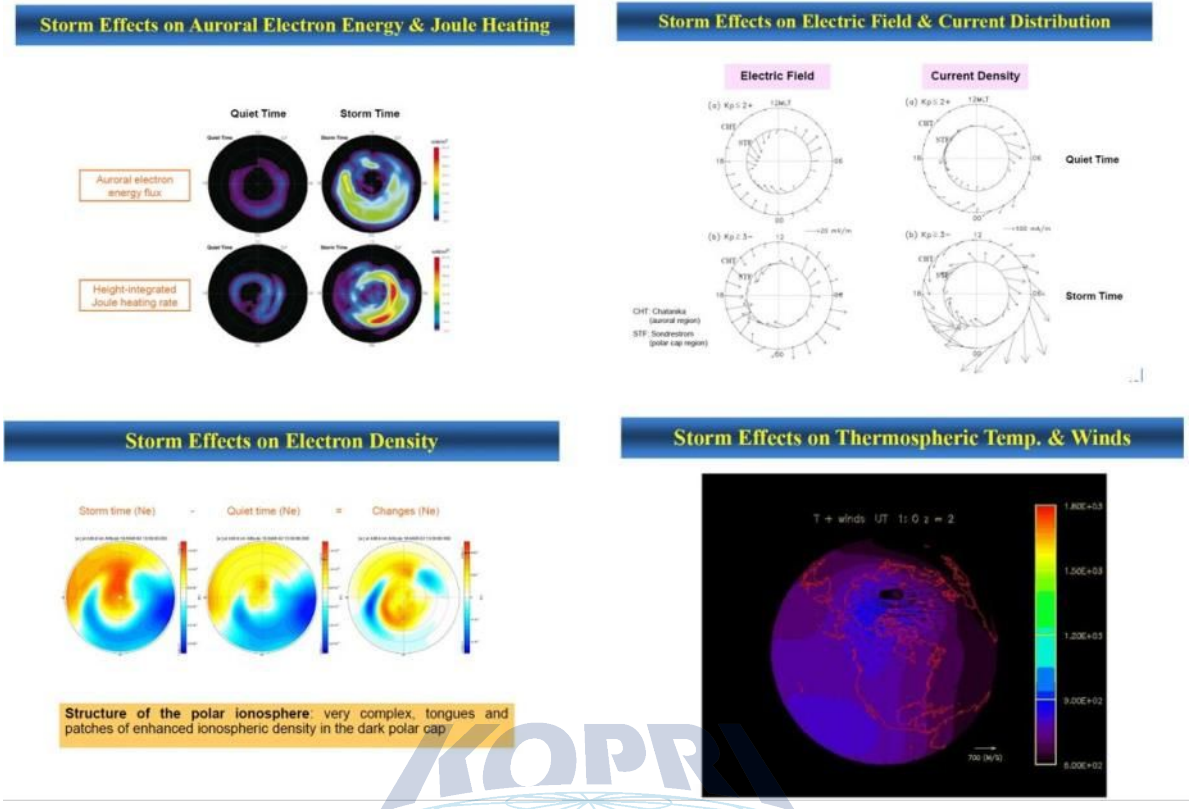


Fig 17 Geomagnetic storm effects on Ionosphere and Thermosphere

극지연구소

라. 지자기폭풍에 의한 극지 전리권-열권 변화

- 태양풍의 충격파에 의해 지구자기장에 큰 교란이 발생하게 되는데, 이것을 지자기 폭풍이라 정의
- 지자기폭풍기간동안에는 극지 전리권과 열권에서 큰 변화가 발생. 예를 들면 전리권의 전자밀도 증가하거나 열권 온도가 증가

마. 행성 간 공간 자기장 변화에 따른 극지 전리권-열권 변화

- 태양에서는 태양풍뿐만 아니라 자기장도 방출. 이 자기장은 행성간 공간을 채우고 있다는 뜻에서 행성간 자기장이라 정의
- 태양풍에 수반된 자기장의 방향에 따라 극지 전리권 및 열권의 변화가 다르게 나타남.
- 행성간 자기장의 방향이 남쪽으로 향한 채 지구에 도달하면 대규모의 교란현상이 발생하지만 북쪽을 향할 때는 지구에 별 영향을 미치지 못함.

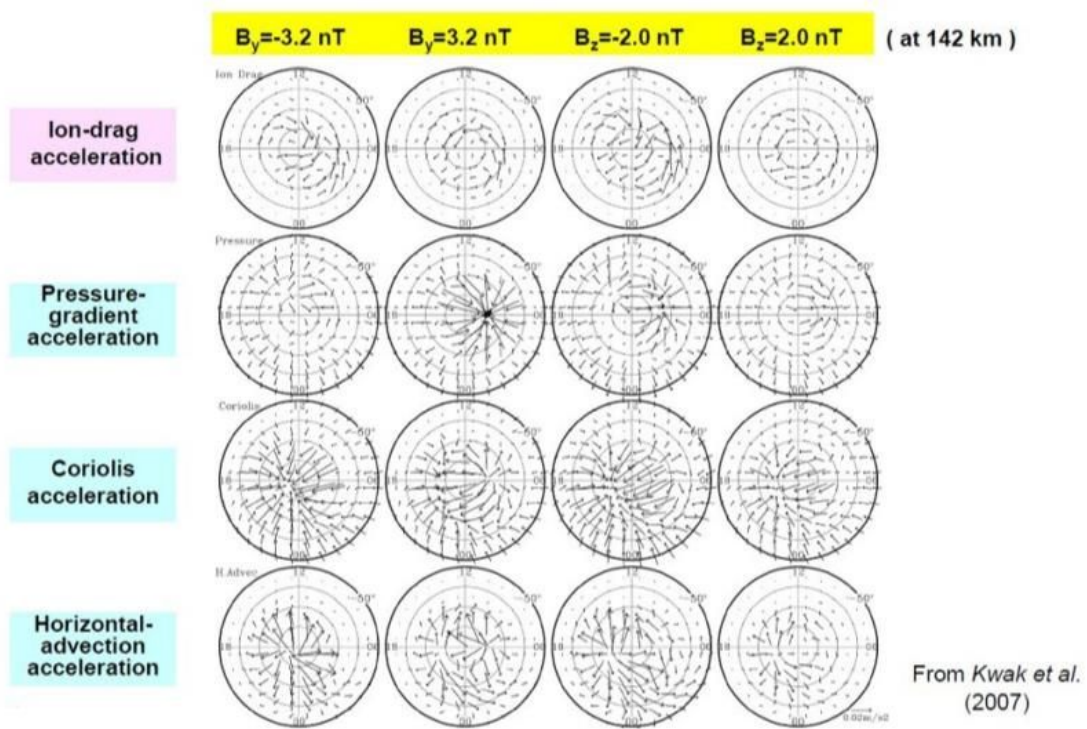


Fig. 18 Dependence of momentum forcing on IMF



3. 극지 고층대기와 지자기 폭풍

가. 개요

- 태양에서 CME와 같은 태양 폭발이 발생하면 1-2일후에 태양풍의 충격파에 의해 지구자기장에 큰 교란이 발생하는데, 이것을 지자기폭풍이라 정의
- 이러한 지자기폭풍 기간 동안 고층대기 전리권에서는 적도 이상 현상과 같은 다양한 변화를 경험

□ 적도 이상 현상 (Ionospheric equatorial anomaly)

- 고층대기 전리권의 전자밀도는 전기장과 열권 바람에 의해서 변화.
- 전기장에 의한 전리권의 전자밀도는 주로 적도 부근에서 발생. 약 120 km 고도에서 중성대기 바람에 의한 발전현상으로 전기장이 발생되고, 이 전기장은 지구 자기장을 따라 약 300 km 고도의 전리권으로 전달되어 적도의 수평기장과 함께 전자밀도를 수직으로 상승
- 높은 고도로 이동한 전자밀도는 중력에 의해 적도에서 지구 자기장을 따라 양쪽으로 다시 하강하게 되어 전리권 적도 이상 현상을 형성

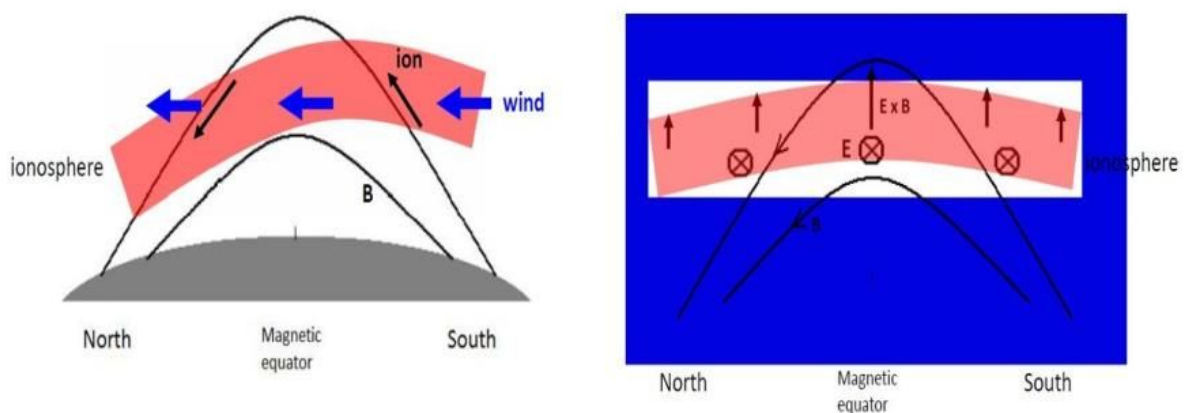


Fig. 19 Process of ionospheric equatorial anomaly

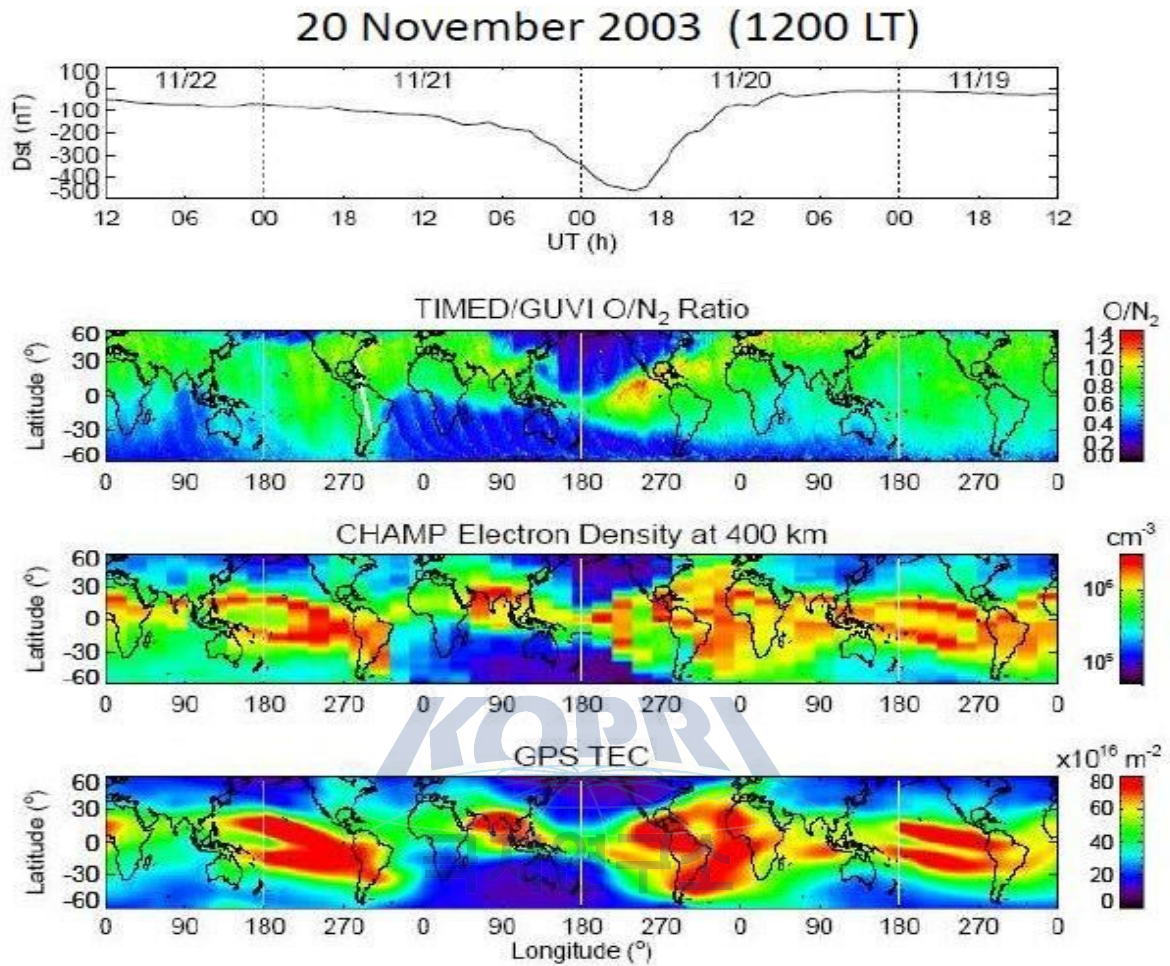


Fig 20 Variation of ionosphere during 20 Nov. 2003

나. 지자기폭풍동안의 전리권 변화

- 2003년 11월 20일에 발생한 강한 지자기폭풍동안 여러 위성의 관측데이터로부터 전리권의 전자밀도가 크게 증가한 것을 확인
2003년 11월 20일 지역시 12시에 TIMED/GUVI에서 관측된 O/N₂ ratio값, CHAMP위성에서 관측된 전자밀도, GPS 위성으로부터 추정된 TEC 값에서 모든 데이터 값이 크게 증가한 것을 볼 수 있음.
- 같은 이벤트 동안 DMSP 위성에서 관측된 이온밀도와 에너지 플럭스 값을 보여주고 있음. 두 데이터 값 모두 크게 증가한 것을 볼 수 있음.

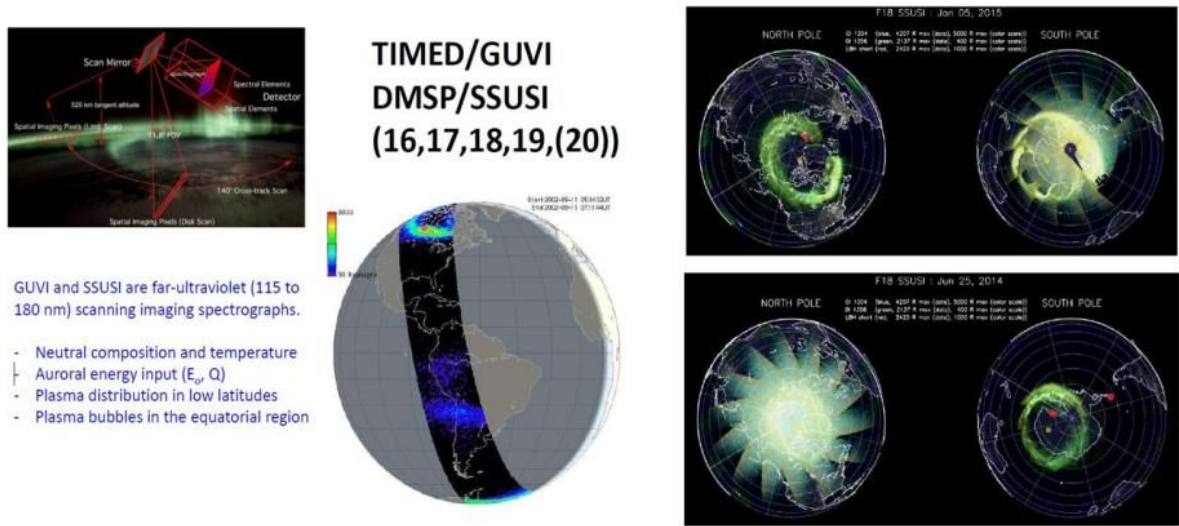


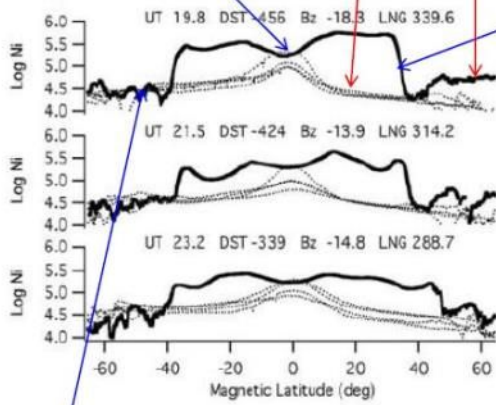
Fig. 21 A example of data observed from GUVI and SSUSI measurements

KOPRI 극지연구소

다. 지자기 폭풍 동안의 극지 전리권 변화 연구

- 극지 전리권은 우주환경과 직접적으로 연결된 지역적 특성으로 인하여 지자기폭풍기간동안 큰 변화가 발생
- 북극 다산기지와 남극 장보고, 세종기지의 지리적 특성을 고려하여, 지상 관측 장비에서 얻은 데이터를 활용하여 지자기폭풍동안 태양풍뿐만 아니라 지구 자기권에서 유입된 고에너지에 의한 극지 전리권 변화 연구를 수행 할 수 있을 것으로 기대
- 지상 관측 장비뿐만 아니라 위성에서 관측된 데이터를 활용하여 지자기폭풍 기간 동안 고위도-중위도-저위도까지의 전리권 변화 연구를 수행할 수 있을 것으로 기대

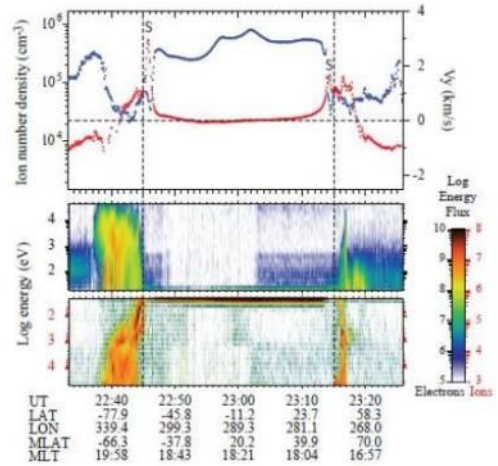
Electric field effect Quiet time Storm time



Neutral wind effect

Neutral composition effect

DMSP observation at an altitude of 840 km during the Nov. 20 2003 storm.



[Sarah Park et al., JGR, 2012]

[Heelis et al., JGR, 2007]

Fig. 22 Variation of ionosphere during 20 Nov. 2003

극지연구소

4. 극지 고층대기 연구를 위한 위성관측

가. 소형 인공위성 (small satellite)의 이점

- 작은 크기와 질량 → Piggy-back 또는 다양한 발사 가능
- 적은 비용 (cost-effective)
- 새로운 기술 시범을 위한 이상적인 시험대 (test-bed)
- 입증된 첨단 기술의 빠른 적용 가능
- 반복적이고 빠른 미션 실행 가능
- 우주과학/우주생물/우주물리 등에 적용 가능

□ ESA (European Space Agency)의 소형 인공위성

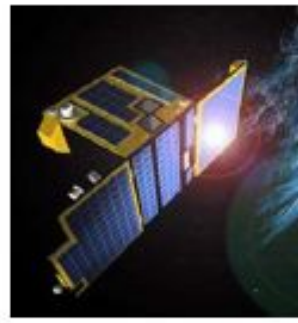
- Proba-1 : 기술 시범, 고해상도 영상분광계
- Proba-2 : 기술 시범, 태양 UV 이미지 및 flux
- DEMETER : 이온권에서 관측된 전자기 신호 파형 결정
- Parasol : 편광 및 다방향 반사도 측정
- PARAINS : TLE (Transient Luminous Events, 고층대기 극한방전 현상)와 TGF (Terrestrial Gamma Ray Bursts)를 감지하기 위해 스톱 영역 관측
- CHAMP : 지구과학 및 대기의 연구와 응용을 위한 소형 인공위성 미션
- SWARM : 지구 자기장 연구를 위한 3개의 독자적인 인공위성군



Fig. 23 Small satellites developed by SaTReC



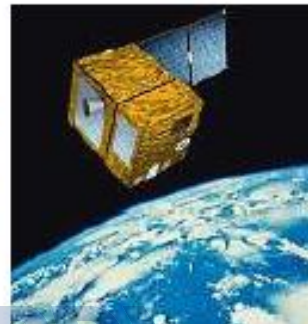
Proba-1



Proba-2



DEMETER



Parasol



TARANIS



CHAMP



SWARM

Fig. 24 Small Satellite Series by ESA

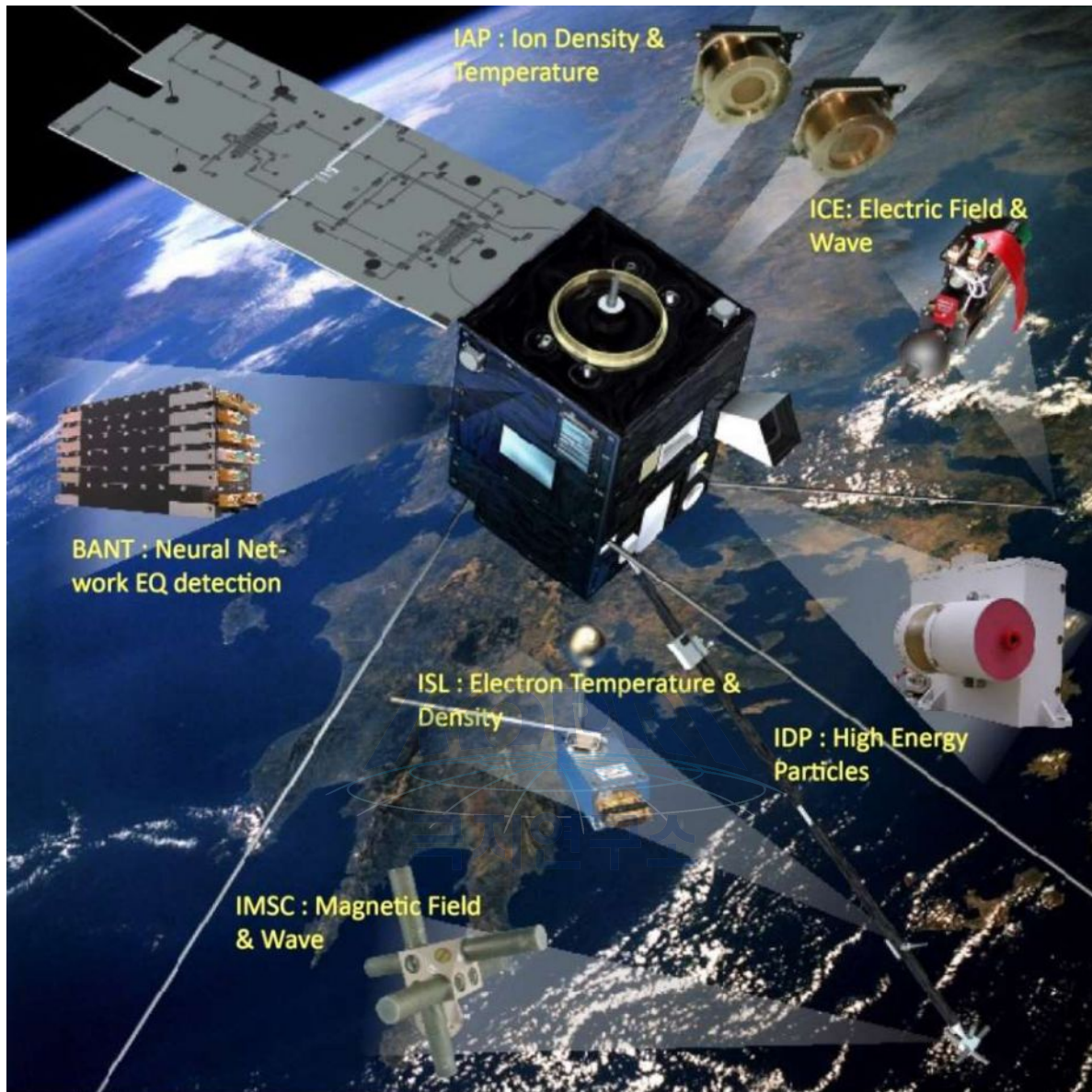


Fig. 25 DEMETER Satellite

나. 인공위성 예시

□ DEMETER (Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from the Earthquake Regions) 인공위성

- ICE : 전리층 전기장 측정
- IMSC : 전리층 자기장 측정

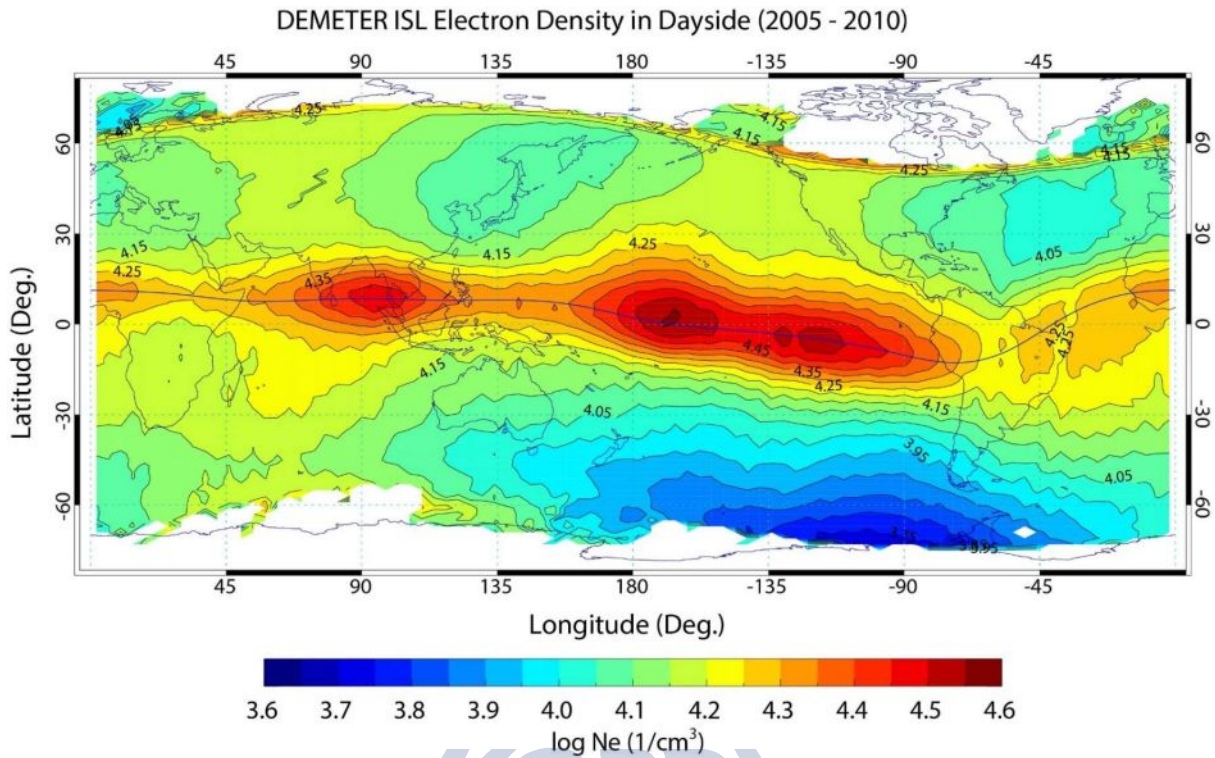


Fig. 26 The global map of the electron density for the daytime measured by the ISL instrument. The contour was drawn in logarithmic scale of the Ne based on the averaged values of the entire mission of DEMETER (2005–2010). The blue curve along the equator region presents the geomagnetic dip equator (Ryu *et al.*, 2014).

- ISL : 전리층 bulk plasma parameter (전자 밀도, 온도)
- IAP : 전리층 플라스마 상태 (밀도, 성분) 분석
- IDP : energetic ion (70 keV - 500 keV)의 flux 측정

□ CHAMP 기기

- 2000-2010년 사이의 측정값을 제공함.
- IDM (Ion Drift Meter)은 문제가 있어 제공하고 있지 않음.
- PLP (Planer Langmuir Probe)와 FGM (Fluxgate Magnetometer) 자료는 이온층 연구에 사용됨.
- 400km 극궤도로 DEMETER와 같은 시기에 저궤도 환경자료를 제공하여 비교 분석연구에 유용함.

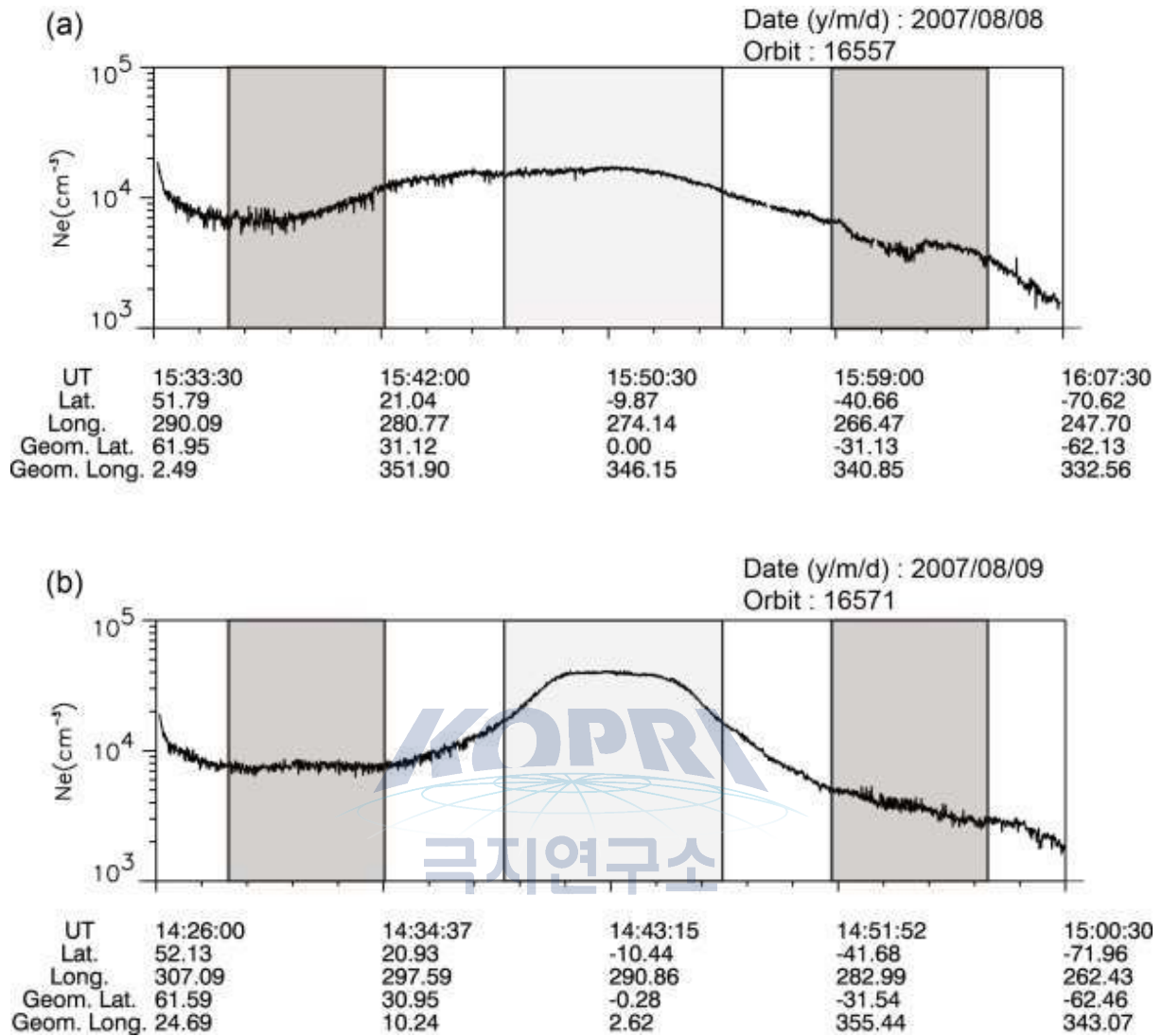


Fig. 27 Examples of the electron density profiles measured by DEMETER: (a) Orbit 16557 on 8 August 2007 with nominal EIA enhancements and (b) Orbit 16571 on 9 August 2007 with enhanced equatorial plasma density. The dark grey boxes indicate the midaltitude (geomagnetic latitude: 30°–50°S and 30°–50°N), while the light grey box indicates the equatorial region (geomagnetic latitude: 15°S–15°N) (Ryu *et al.*, 2014).

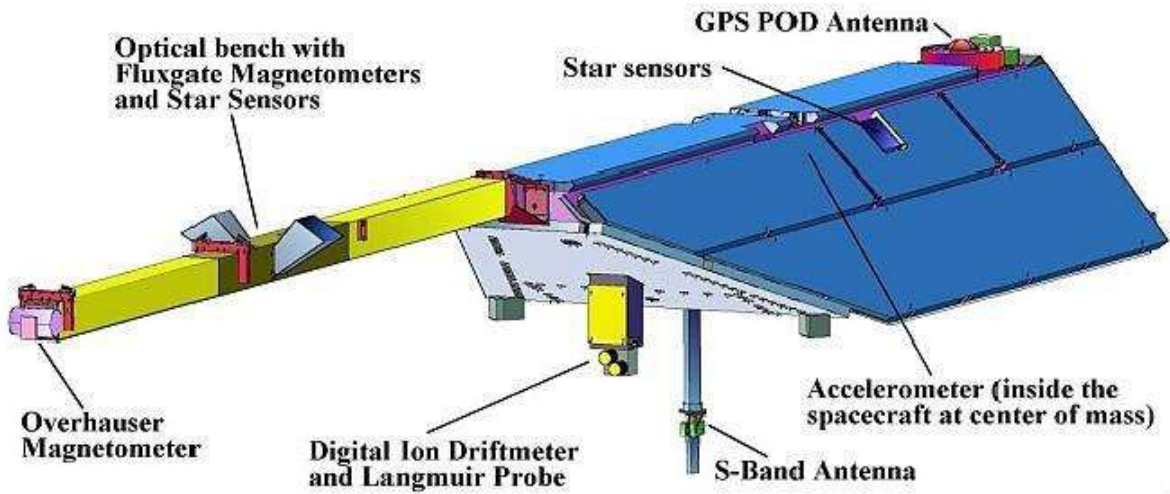


Fig. 28 CHAMP Instrument

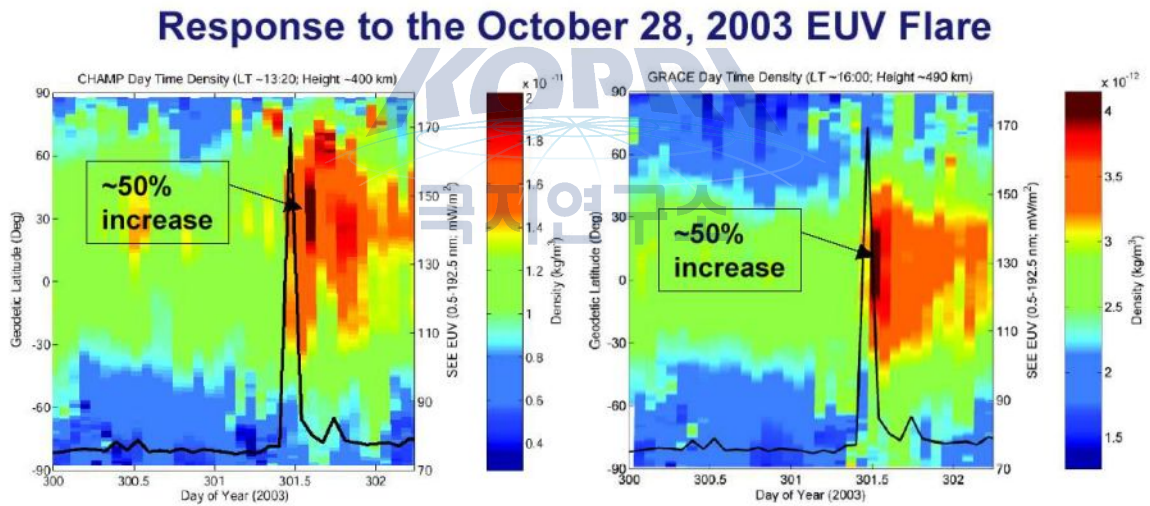


Fig. 29 The response of neutral thermosphere density to a solar flare is revealed for the first time by CHAMP and GRACE.

다. 기기 예시

□ Neutral Wind Meter

- 플레어 및 자기폭풍 시에 중성대기 바람 변화 측정
- 진행방향 및 측면 방향 중성입자 에너지 측정

□ Accelerometer

- 중성대기의 밀도 및 바람 측정
- 현장측정(In-situ)으로 가속계를 이용하여 궤도상의 중성바람 및 밀도를 측정

□ Retarding Potential Analyzer (RPA)

- 전리권의 thermal ion을 관측하는 대표적인 기기
- 위성의 진행방향에 부착되어 이온층 이온들의 열적 밀도와 온도를 측정
- 내부의 하나의 grid에 voltage를 가해 주었을 때 이온의 질량에 따라서 collector로 들어오는 ion current가 다름을 이용하여 측정

□ Ion Drift Meter (IDM)

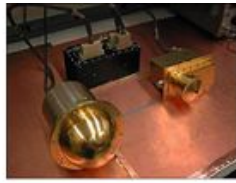
- 위성의 진행방향에 부착되어 이온층 이온의 분포와 이온 표류속도 측정
- 기계적인 구조는 RPA와 매우 흡사하며, 4개의 각 collector로 들어오는 ion의 current의 크기를 비교하여, ion의 입사 각도를 계산하고, 이때 얻어진 값을 RPA에서 얻는 값들과 함께 drift velocity를 구함.

□ Global Ultraviolet Imager (GUVI)

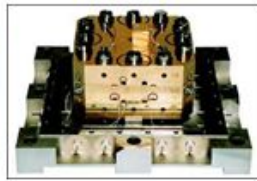
- 전지구 전리층 분포 동시 측정 가능
- 열권의 화학조성 및 온도를 측정하여 전리층 예보 모델의 필수 입력 자료 제공

□ Doppler Interferometer

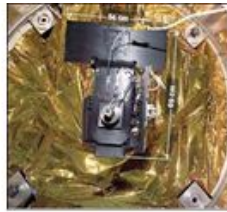
- 간섭계의 원리를 이용해서 중성대기 바람 측정
- 고도에 따른 중성대기의 profile 도출 가능



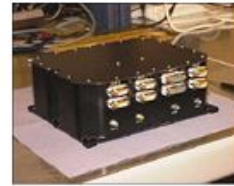
Neutral Wind Meter



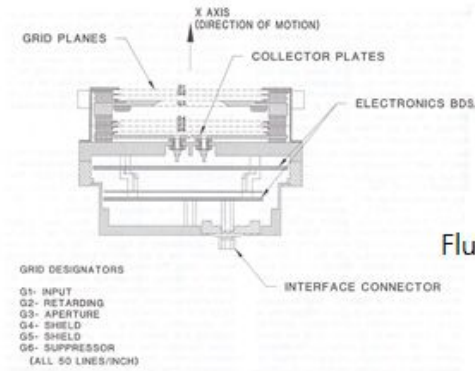
Accelerometer



GUVI



Radio Occultation Meter



RPA, IDM



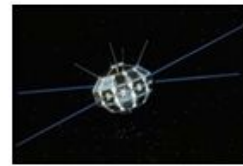
Flux Gate Magnetometer



Search Coil Magnetometer



ESA



Top Side Ionosonde

Fig. 30 Examples by Instrument

극지연구소

□ Radio Occultation Meter

- 전리층 수직 분포 측정
- 총전자량 및 전자 밀도 profile 측정
- 전파두절 (Radio Blackout (R))과 지자기교란 (Geomagnetic Storm (G))값 결정에 관여함.

□ Flux Gate Magnetometer

- 3축 자기장 측정
- 자기장의 갑작스러운 변화 예측이 가능 → 태양폭풍을 사전 예측, 감시가 가능

□ Search Coil Magnetometer

- 자기장 및 자기장 파동 측정
- 자기장의 갑작스러운 변화 예측이 가능 → 태양폭풍을 사전 예측, 감시가 가능

□ Electric Static Analyzer (ESA)

- 저에너지 입자 플럭스 측정
- 태양입자 유입 상태 (Solar Radiation Storm (S))와 지자기교란 (Geomagnetic Storm (G))값 결정에 관여함.

□ Electric Field Meter

- 자기권에서 전달되는 전기장 측정

□ Top Side Ionosonde

- 상부 전리층 수직 분포 측정
- 전파두절 (Radio Blackout (R))과 지자기교란 (Geomagnetic Storm (G))값 결정에 관여함.



5. 극지 고층대기 연구를 위한 위성관측 자료 활용

가. 위성을 활용한 성층권 대기중력파 관측 연구

육상 관측에 주로 의존해왔던 대기중력파 연구가 가졌던 매우 제한된 관측 범위를 위성 탑재체인 Microwave Limb Sounder (MLS)를 활용하여 2000년 이후 범지구 관측이 가능하게 되었다. MLS는 특정 대기층의 접선방향에서 방출되는 전파를 측정하여 그 변화량으로 대기중력파의 세기를 결정하는 방법으로 지상에서 성층권계면 (~60 km)에 이르는 관측영역을 가진다.

지난 연구들에서는 저위도 지역에서의 대기중력파 활동이 태풍과 같은 기상 요소들로 인하여 해양보다 대륙에서 보다 강하게 나타났으며 중위도 지역에서는 여름철보다 겨울철 반구에서 산악지형 상공에서 대기중력파 활동이 크다는 사실을 발견하였다. 이러한 결과들은 대기중력파의 발생원이 주로 표면에 분포하고 있고 표면에서의 바람과 지형 등으로 인해 발생한 파동은 성층권이나 그보다 높은 고도로 전파됨을 시사하는 것이다. 한편 대기파동은 대기 밀도가 고도에 따라 감소하면서 진폭이 증가하므로 대기중력파가 고층대기로 전파되어 중성대기, 전리권에 미치는 영향을 연구하기 위해 다양한 관측 범위를 가지는 관측의 필요성이 제기되었다.

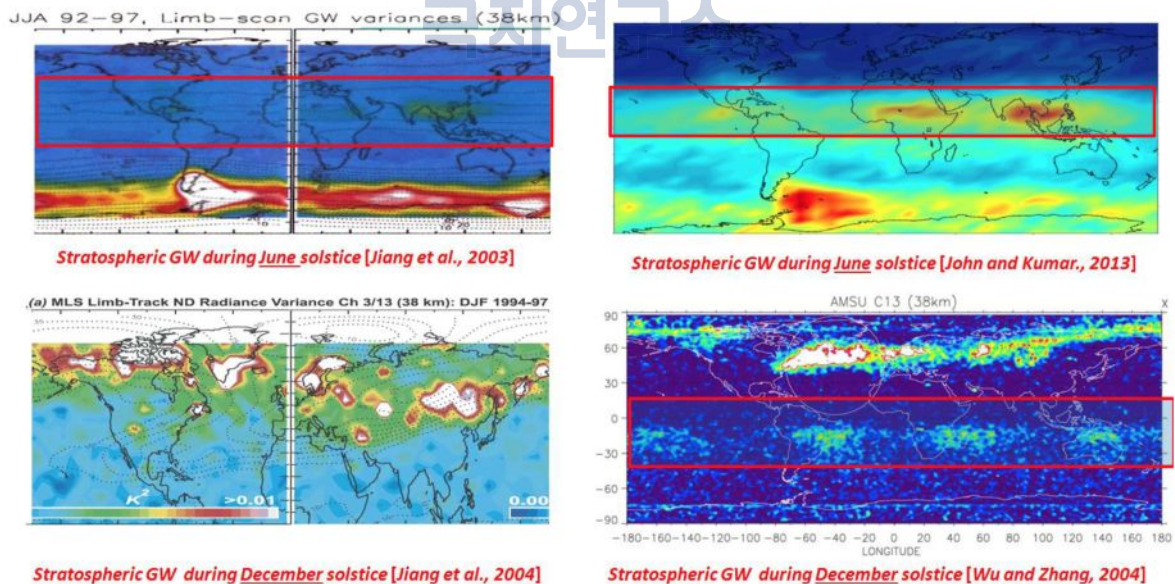


Fig. 31 Global distributions of gravity wave activity as variance at stratosphere (38 km) during June solstice (top) and December solstice (bottom) observed by MLS instrument on satellite (e.g., UARS, AMSU)

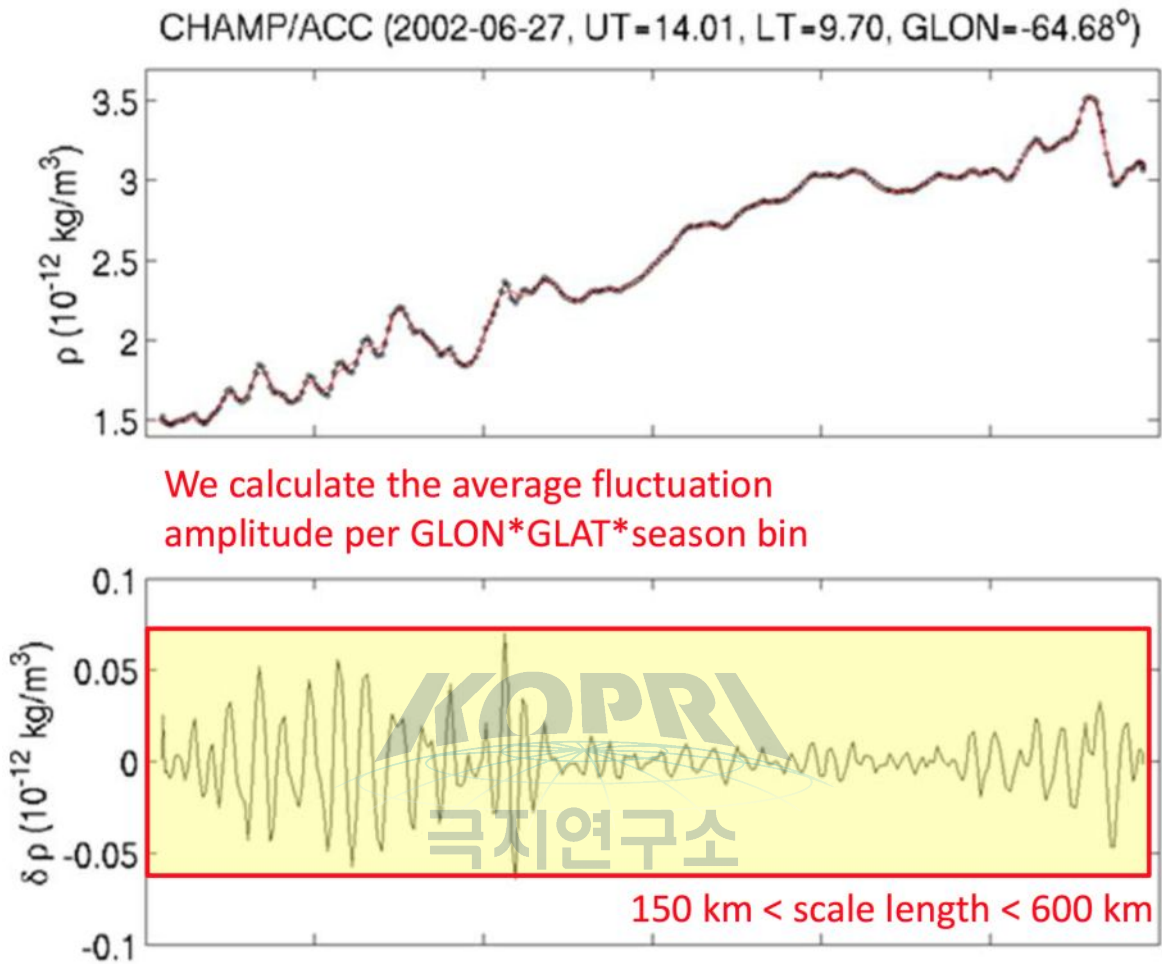


Fig. 32 An illustration of our data processing method. (top) The black solid curve shows the neutral mass density as recorded by the CHAMP/ACC, while the red curve represents background density. (bottom) Density variations normalized by the background density.

나. CHAMP 위성을 활용한 열권 대기중력파 관측 연구

기존 위성 자료를 활용한 대기중력파 연구가 성층권 고도까지 이루어진 반면 CHAMP 위성에 탑재된 Accelerometer에서 측정된 열권의 대기 밀도 자료는 약 300~400 km 고도에서 대기중력파의 전 지구적인 분포를 연구하는 데 활용되었다. CHAMP 위성의 궤도 특성과 High-pass filter 기법을 활용하여 수평 파장 150~600 km 사이의 대기중력파를 검출해냈다.

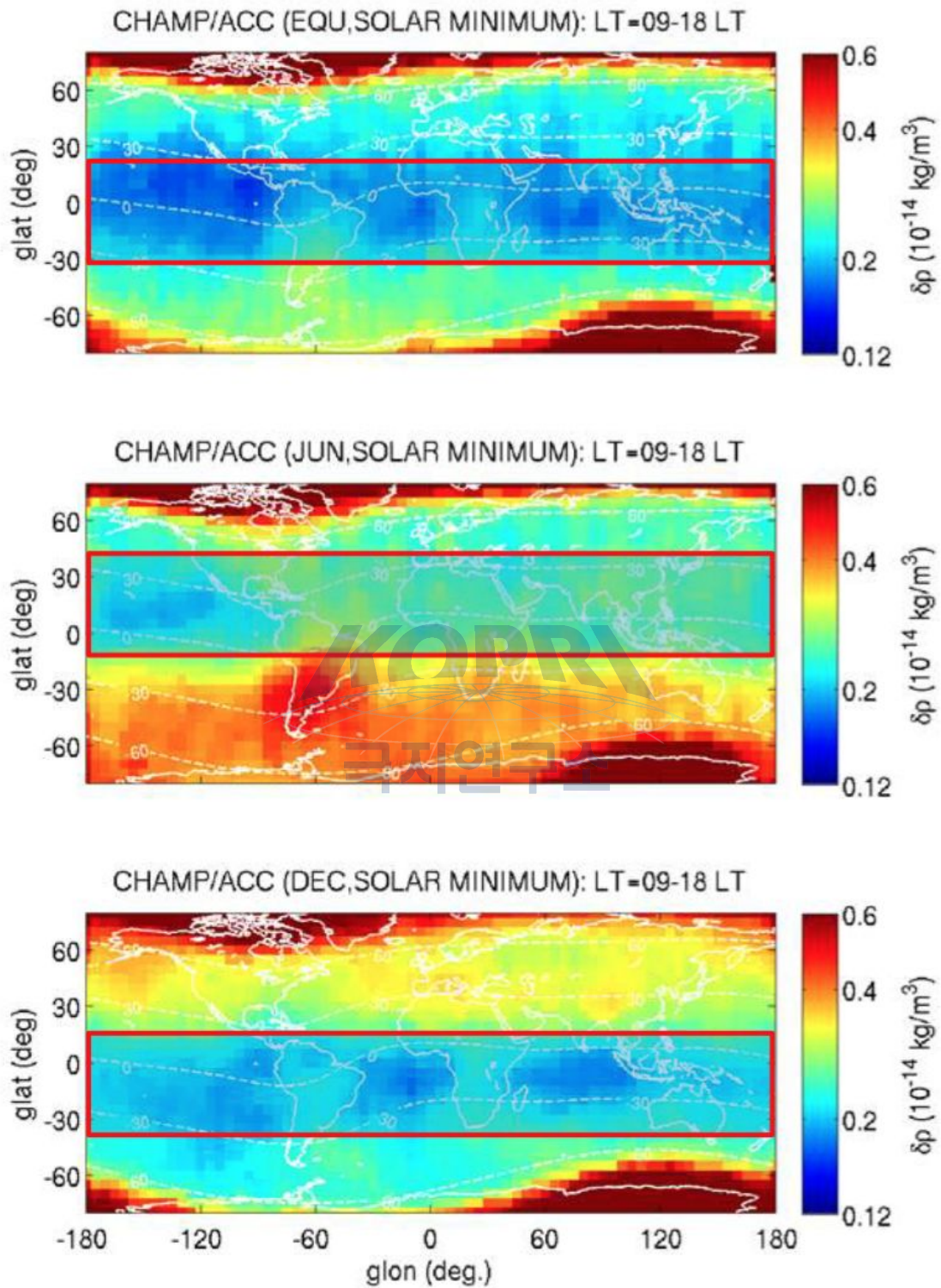


Fig. 33 Global maps of the GW activity for equinox, June solstice, and December solstice during solar minimum years. The dashed curves represent geomagnetic latitudes.

CHAMP 위성으로 관측한 열권에서의 대기중력파 분포는 아래와 특성을 가진다.

□ 고위도 지역

- 지자기 위도 60° 이상 지역에 한정되어 나타나는 중성밀도 증가 현상은 밤시간에서의 서브스톱에 의한 cusp 지역 밀도 이상 현상 (Lühr et al., 2004)

□ 중저위도 지역

- 대기중력파의 세기는 겨울철 반구에서 보다 강함.
- 겨울철 기간 대기중력파 세기의 경도별 변화는 남반구가 북반구보다 큼.
- 6월 안데스 산맥과 남극반도 산맥 부근에서의 대기중력파 세기는 그 어떤 지역 또는 시기보다 강하게 나타남.
- 저위도 여름반구에서는 대륙에서 해양보다 강한 대기중력파가 관측됨. 이러한 경향은 12월 또는 춘추분 시기가 6월보다 두드러짐.

열권에서 관측된 대기중력파 분포는 이전 위성 관측 결과인 성층권 고도에서의 대기중력파 분포와 일치한다. 이는 CHAMP에서 관측한 낮 시간 중저위도 상공에서의 중성대기 밀도 변화가 대류권 또는 성층권에서부터 발생한 대기중력파 또는 2차 파동의 형태로 열권까지 전파되어 나타나는 것으로 해석할 수 있다.

대기중력파의 특성을 열권과 중간권-열권하부(Mesosphere and Lower Thermosphere, MLT) 두 영역 사이의 상관관계를 살펴보기 위하여 CHAMP 위성 자료를 남극세종기지 유성레이더 바람 자료와 비교하였다. 성층권 고도에서의 대기중력파 분포가 열권에서와 일부 다른 이유는 아래 고도에서 발생한 대기중력파가 MLT 영역에서 소멸하여 운동량을 전달하면서 주변 대기의 물리적 상태를 변화시키고 이것이 2차 파동의 형성 원인이 될 수 있기 때문이다 (Fritts et al., 2002; Vadas and Liu, 2013).

CHAMP에서 관측한 300-400 km 에서의 대기중력파는 82-88 km 고도보다 90-98 km 고도에서 보다 좋은 상관관계를 가지는 것으로 확인되었다. 이는 성층권 아래에서 형성된 1차 대기중력파의 소멸이 MLT 영역에서 이루어지고 일부 2차 파동이 1차 파동보다 큰 수평 방향 위상속도를 가지고 열권까지 전파된다는 이전 연구 결과를 지지하는 것이다. 이러한 결과를 바탕으로 대기중력파의 생성과 전파에서 소멸에 이르는 과정을 지표에서 열권까지 관측과 모델을 활용하여 정량적이고 통계적인 방법으로 연구를 할 수 있을 것이다.

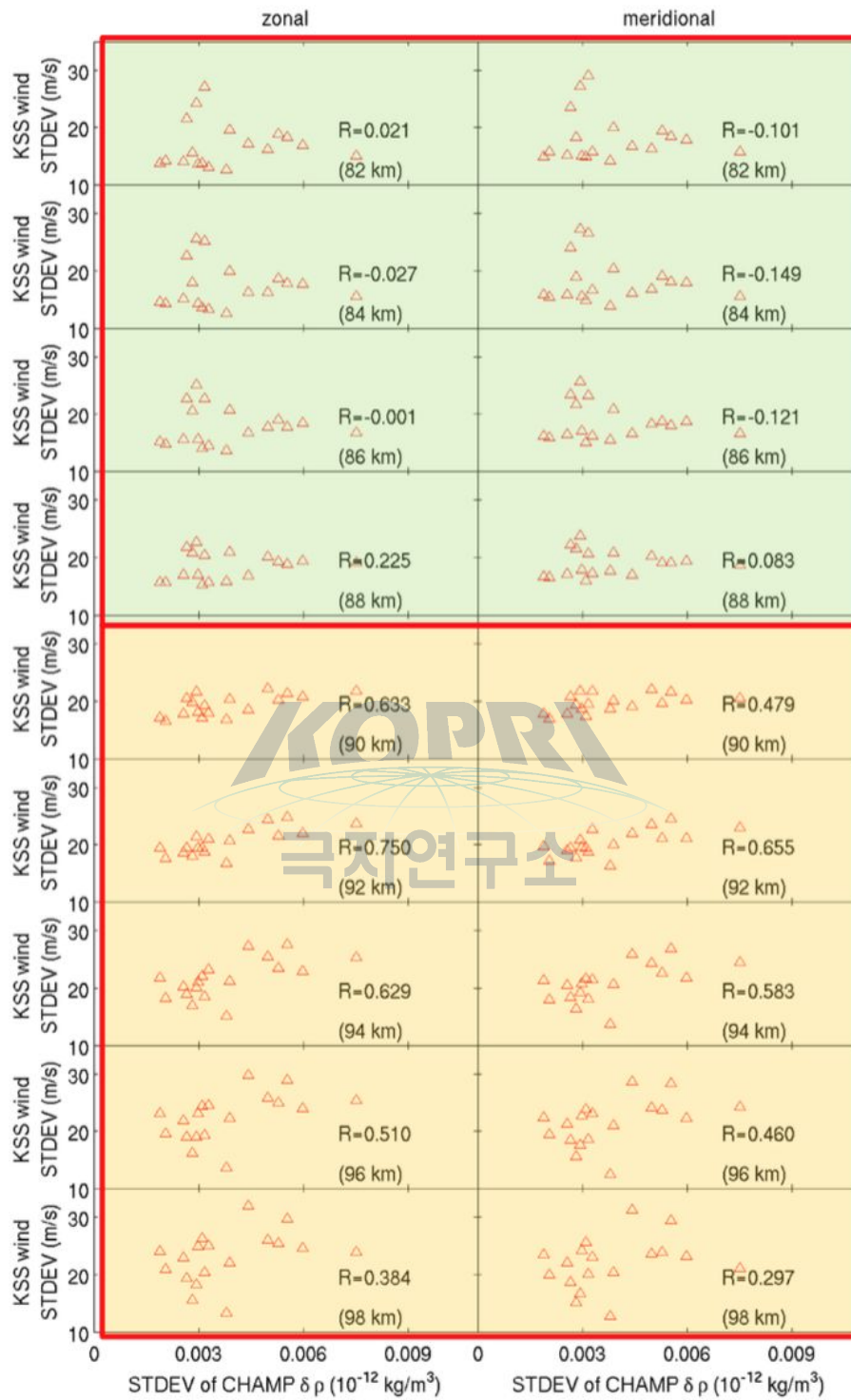


Fig. 34 Correlation coefficients (R) between the KSS GW strength and the CHAMP GW strength from 2007 to 2009. The left (right) column presents zonal (meridional) MLT wind. Each row corresponds to a different altitude range.

6. 극지 고층대기 연구를 위한 GPS/GNSS 활용

가. GPS (Global Positioning System)

- 고도 20,200 km에 있는 인공위성을 이용한 위성항법시스템
- 인공위성과 수신기 사이의 시간을 이용하여 RF (Radio Frequency) 신호를 측정
- 시간이나 장소에 구애를 받지 않고 자료를 받을 수 있음

나. 위도에 따른 GPS 상태

□ 적도지역

- GPS 오차 범위가 가장 큼
- GPS TEC gradient가 가장 큼
- bubble과 scintillation이 잦음

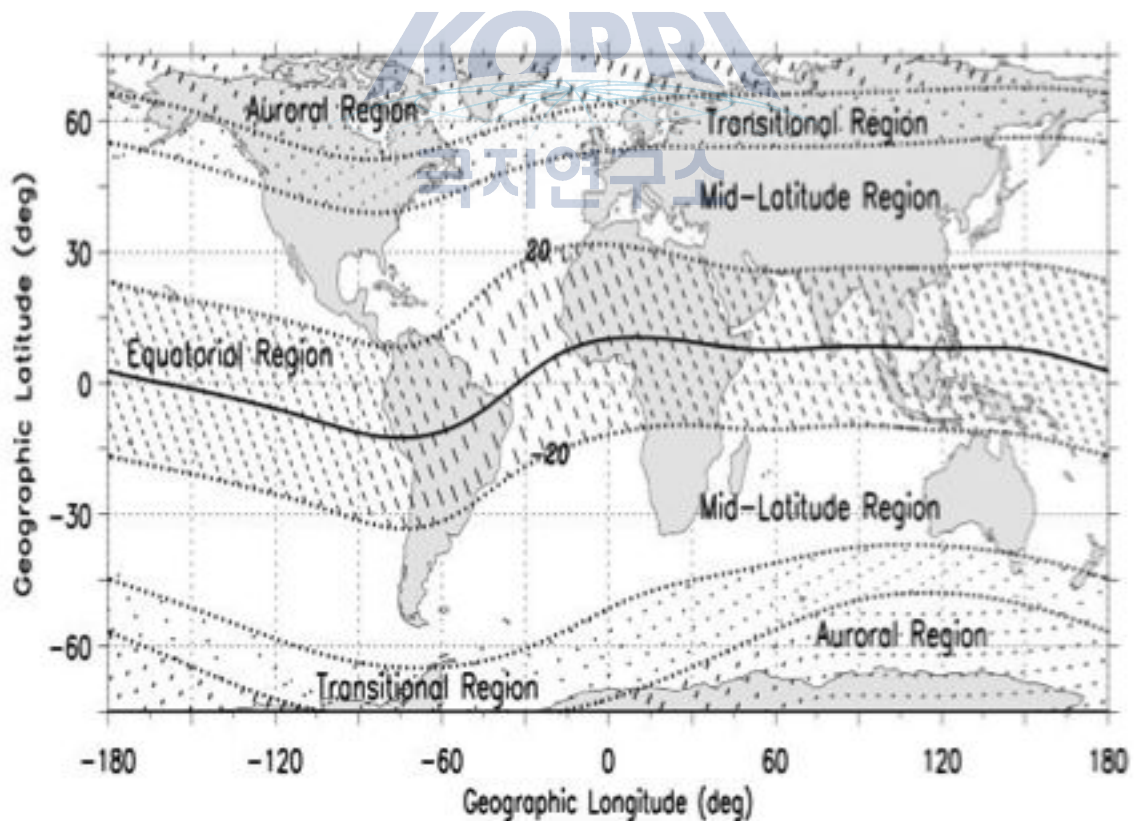


Fig. 35 Regions with latitudes in the upper atmosphere

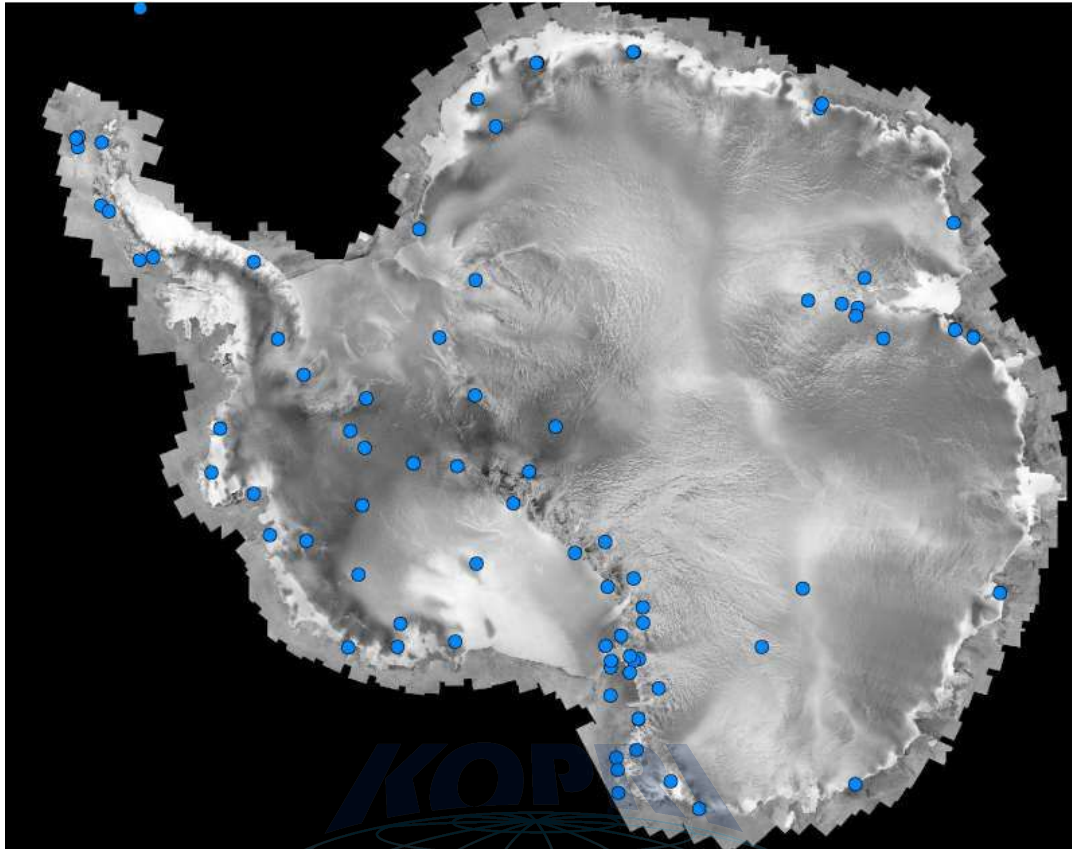


Fig. 36 Planned GPS field deployments in Antarctic (POLENET website)

□ 중위도지역

- 비교적 고요한 편임
- gradient와 scintillation이 큼
- 극지역과 적도지역의 영향을 받음

□ 극지역

- 오로라와 blob이 잦음
- GPS와 HF (High Frequency) scintillation
- 우주 환경에 의한 직접적인 GPS 위치 오차

다. GPS망



Fig. 37 POLENET GPS station component (1005 kg) (Weather station, Iridium antenna, Battery, Solar panel, High speed wind turbine)

□ CHAIN (Canadian High Arctic Ionospheric Network)

- GPS 수신기와 CADI (Canadian Advanced Digital Ionosonde)의 배열
- 실시간 CHAIN 데이터는 GPS의 정밀도 향상과 전리층 morphology에 사용됨
- 대부분의 CHAIN 기기는 태양풍 자기권-전리층 결합 (M-I coupling)을 이해하기 위해 polar cap ionosphere에 위치함

□ POLENET (Polar Earth Observing Network)

- IPY (International Polar Year) 2007-2008년에 극지역을 지나는 측지, 자기, 지진 자료의 범위를 향상하기 위한 다양한 분야 간 협회

□ ICESTAR (Interhemispheric Conjugacy Effects in Solar-Terrestrial and Aeronomy Research)

- 남극과 북극의 지구 자기권, 전리층, 고층대기물리학에서 반구 지역의 차이점과 공통점을 조절하는 구조를 확인하고 정량화함
- 세계적으로 분산된 다수의 지구물리 database를 함께 이어주는 가상의 자료 통

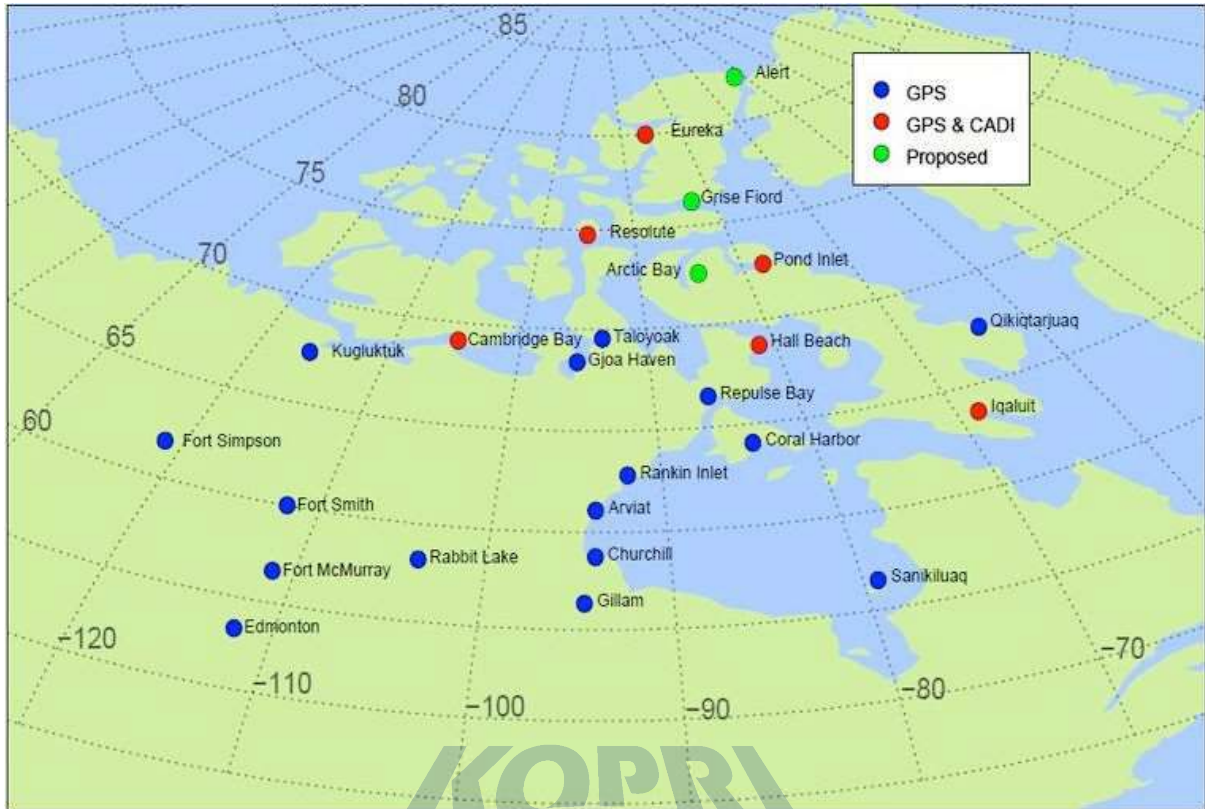


Fig. 38 CHAIN Network Map (<http://chain.physics.unb.ca/chain>)
 로로 발전시킴

극지연구소

□ GRAPE (GNSS Research and Application for Polar Environment)

- GRAPE/SCAR는 지속적인 자료 공유와 모델 개발을 하려고 함
- GWSWF (GPS for Weather and Space Weather Forecast) SCAR Action Group은 날씨와 우주 기상을 연구하기 위해 측지 자료를 사용하려고 ICESTAR 와 POLENET을 이용함
- 고위도에서 GPS/GNSS scintillation과 TEC 감시망 생성 및 유지
- scintillation의 원인과 반구 간 차이점, 비대칭, 공통점을 조절하는 구조를 확인 하고 정량화함
- 우주 기상을 위한 전리층 scintillation 기후 모델 개발
- 대류권 PWV (Precipitable Water Vapor)을 복구하고 지역적 PWV 기후학 개발

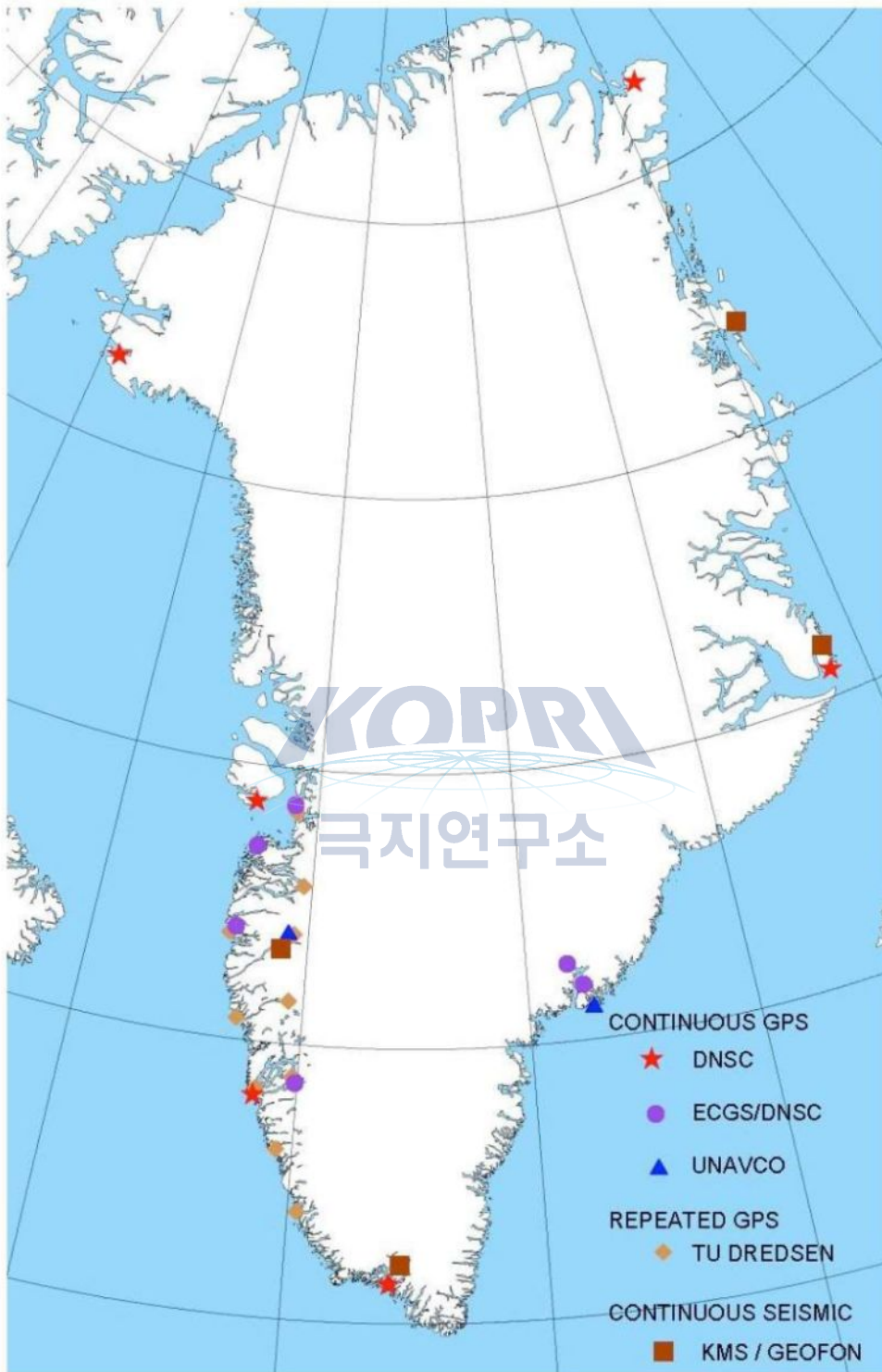


Fig. 39 Planned seismic and GPS field deployments in Greenland (POLENET website)

라. 결론

- GPS/GNSS는 전리층 불규칙에 의한 scintillation과 전리층 구조에 의한 TEC 요동의 정보를 제공할 수 있음 → 항법 적용과 측지학, 지구물리학 등의 분야 간 연구
- GPS/GNSS 전리층 scintillation에 대한 연구는 초기 단계이지만 적용과 연구 분야는 증가함 → KOPRI는 2014년부터 GPS 50 Hz 수신기를 운영했으며, 국제적 프로그램을 통해 망으로의 운영과 위치의 수를 늘려야할 수도 있음
- GPS/GNSS (CHAIN, POLENET, ICESTAR, GRAPE)를 사용하는 국제적 프로그램은 극지방 전리층과 고층대기 물리학을 위해 운영됨 → 국내 GPS/GNSS망과 data portal webpage가 필요함
- 반구의 극지방 전리층은 남/북극의 같은 지역에 설치된 곳에서 자기권-전리층 결합과 관련된 연구가 진행됨 → All-sky imager와 GPS/GNSS 관측
- GPS/GNSS, All-sky imager, Ionsonde, VHF radar와 다른 기기들은 남극과 북극에 쌍으로 같은 위치에 존재해야 함 → 이 자료들은 KOPRI Polar Portal Web에 제공되며 선박/항공과 다른 연구 분야 (항법, 측지학, 대류권 등)에서 우주 기상 (HF & GPS/GNSS)과 관련된다고 여겨짐



7. 극지 중간권-열권하부-전리권 연구

가. 중간권/열권하부/이온권에 영향을 미치는 요소

중간권-열권하부-이온권 (Mesosphere-Lower Thermosphere-Ionosphere, MLTI)은 서로 활발한 상호작용을 하며 외부로부터의 영향에 대해 민감하게 반응하는 영역으로 알려져 있다. 우주로부터 오는 영향에는, 100 km이상의 고도에서 중요한 작용을 하는 자기 대류 (magnetic convection), 100 ~ 300 km의 고도로 유입되는 고에너지 입자에 의한 오로라, 그리고 태양의 갑작스런 활동으로 인한 solar particle event 등으로 나눌 수 있다. 특히 극지방에서 이러한 자기 대류 현상은 자기장에 묶인 플라스마들이 중성대기 성분과 충돌하며 Joule heating이라고 부르는 중성대기 가열 현상을 일으키고 또한 중성바람에도 변화를 주게 된다. 극지방에서 발생하는 이런 현상들의 결과로 그 변화가 TID (Traveling Ionospheric Disturbance)의 형태로 중저위도까지 영향을 미치며 전지구적 규모

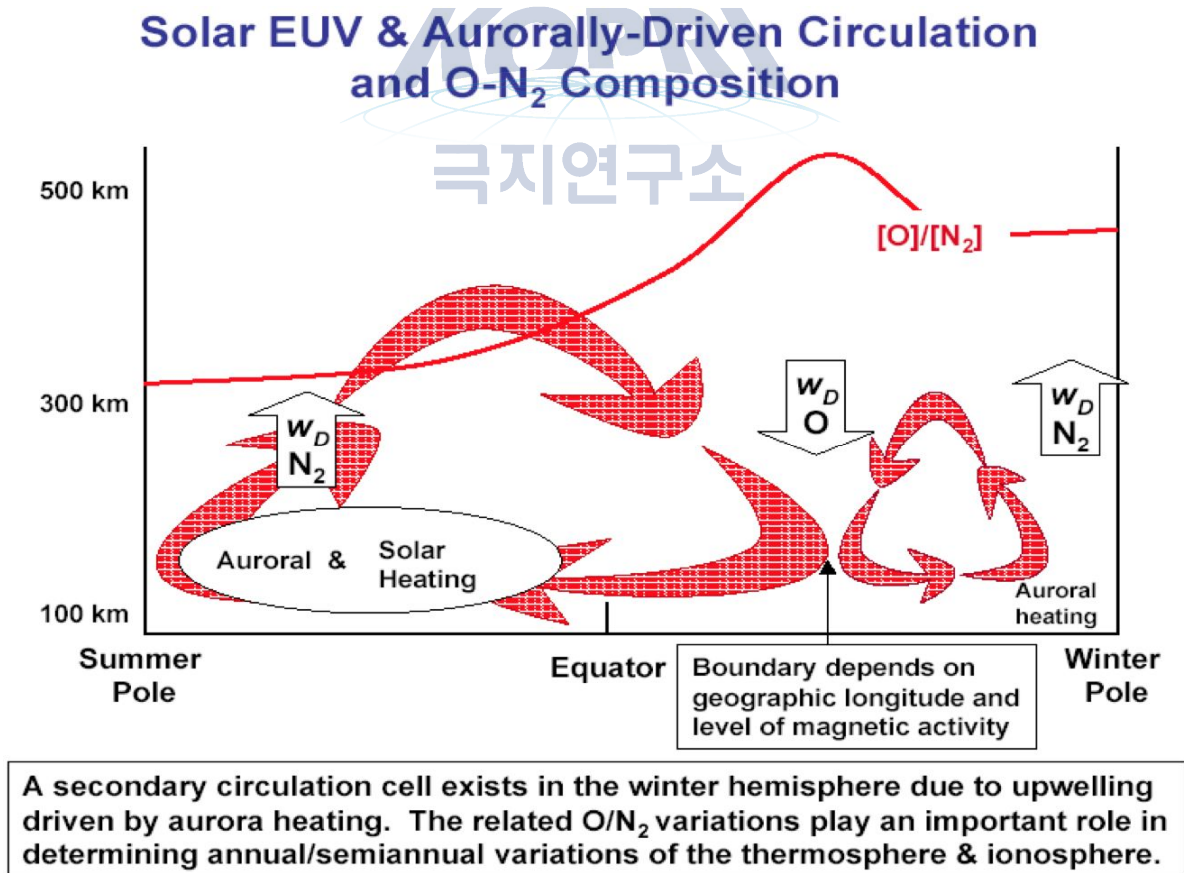
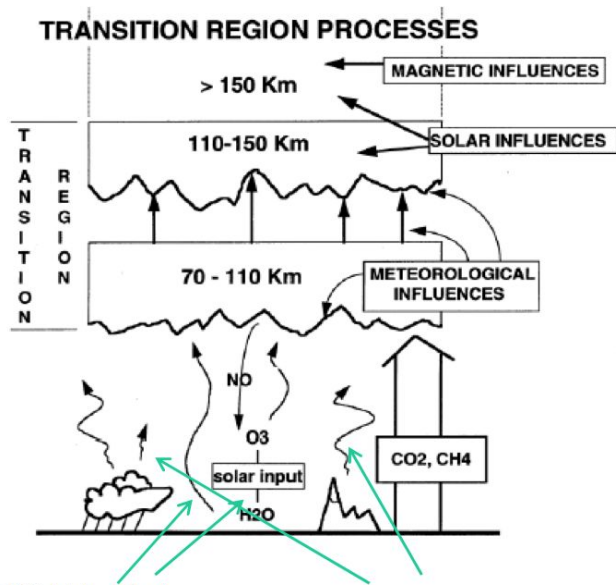


Fig. 40 Simple scheme of large scale circulation in MLTI region.



조석파: 열권까지 대부분 전파

중량파: MLT 에서 운동량을 주면서, 열권 대순환에 영향을 줌.

Fig. 41 The effect from lower atmosphere by atmospheric waves such as tide, gravity, and planetary waves.

의 고층대기 순환에도 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 고도 100~300km 사이에서 발생하는 오로라 현상은 자기장을 따라 극지방으로 유입되는 고에너지 하전입자가 중성대기와 충돌하여 발생하는 현상으로서 극지방 이온권의 전도도 (conductivity)를 높이게 되며 그 결과로 자기 대류가 더 활발하게 일어나고 Joule heating도 증가하는 영향을 미치게 된다. Figure 29는 고층대기에서 나타나는 전지구적 규모의 대기 순환을 간략히 보여주며, 오로라 영역의 heating이 고도에 따른 대기 구성성분비를 변화시켜 거대 규모 순환을 modulation 할 수도 있음을 보여주고 있다.

저층대기로부터는 주로 대기 파동의 형태로 고층대기에 전달되어 MLTI 영역에 중요한 영향을 미치는데, 이러한 대기 파동에는 크게 조석파 (tidal wave), 중량파 (gravity wave), 그리고 행성파 (planetary wave) 등이 있다. 이러한 대기 파동들의 경우, 저층에서는 그 진폭이 크지 않고 대기 밀도가 높기 때문에 관측이 어렵고 대기 밀도가 낮아져서 진폭이 증가하는 MLT (Mesosphere and Lower Thermosphere) 지역에서는 지상관측 장비 (ground-based instrument)를 이용하여 관측이 가능하다.

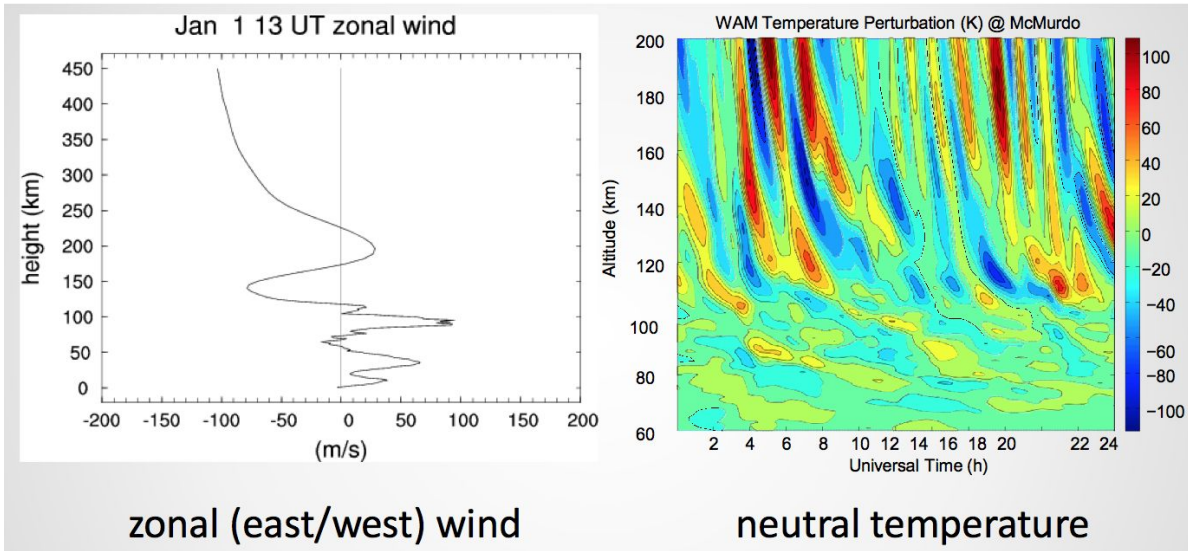


Fig. 42 Zonal wind and neutral temperature perturbation from WAM

□ Tidal wave

조석파는 그 원천이 태양의 가열에 의한 것이기 때문에 주로 1, 1/2, 1/3 day 등의 규칙적인 주기를 가지는 것이 특징이다. 이러한 조석파는 중간권, 열권 및 이온권에서도 잘 관측이 되며 주로 background wind의 패턴에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

□ Gravity waves

대기 중량파는 그 소스가 지표의 특성 및 현상에 따라 매우 다양한데, 그 주기는 보통 수 분에서 수 시간 정도로 알려져 있고, 고층대기로 전파되면서 대기 밀도가 낮아짐에 따라 파동의 진폭이 급격히 증가하게 된다. 이렇게 고층대기로 전파되면서 배경의 중성대기 바람과 상호작용하기 때문에 고층대기의 바람 순환에 불균질한 변화를 야기하고, 주로 MLT 영역에서 파동이 깨지며 가지고 있던 에너지와 모멘텀을 해당 고도에 전달하여 복잡한 현상을 일으키게 된다.

□ Planetary waves

행성파는 주로 지표의 불균질한 thermal balance가 원인이 되어 발생하게 되는

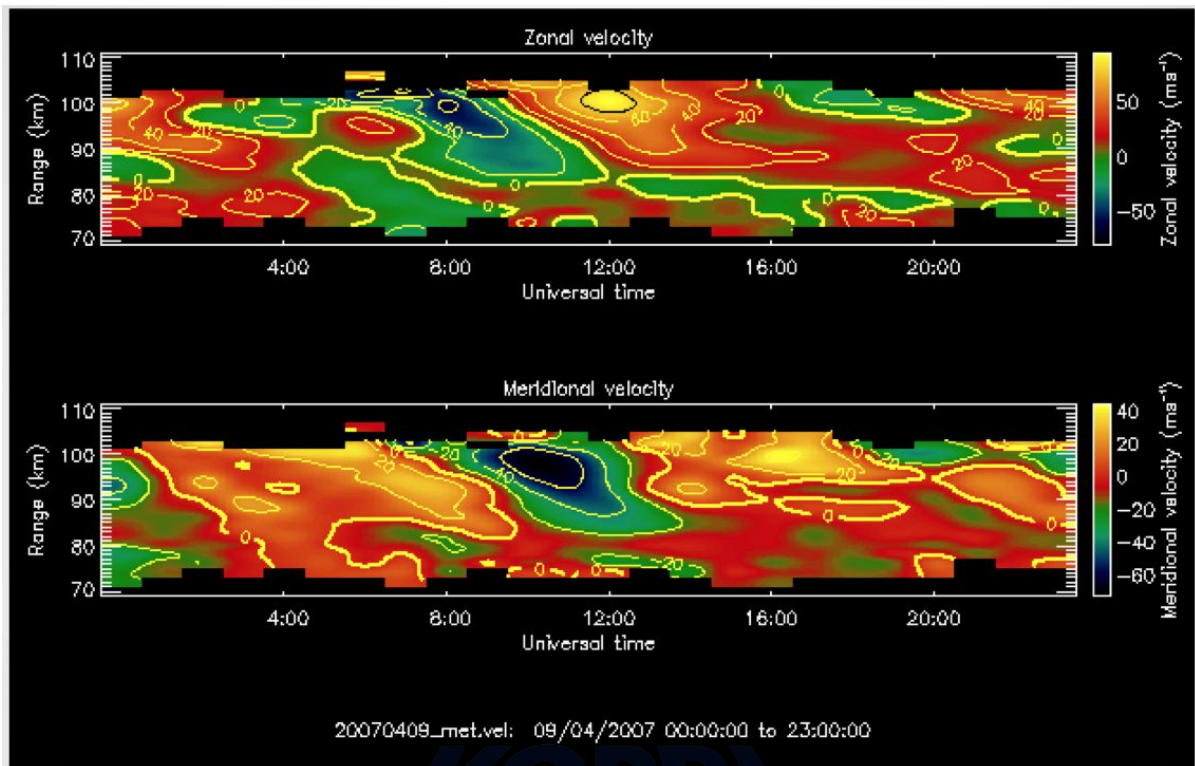


Fig. 43 Zonal and meridional winds measured by VHF meteor radar at King Sejong Station, Antarctica. Semi-diurnal tides are clearly apparent.

극지연구소

데 이 행성파가 발생해서 성층권으로 전파되면 극지역 겨울철에 형성되는 극와류 (polar vortex)와 상호작용하여 중층대기의 순환을 크게 교란 시키게 된다. 극지방에서는 이 행성파의 발생 정도에 따라서 알베도 및 극와류의 세기가 변하기 때문에, 행성파에 의한 성층권 및 중간권의 교란 연구를 통해 행성파의 특성을 연구하는 것이 중요하다.

□ Mesopause temperature

저층대기에서 온난화 효과를 일으키는 온실기체 CO₂의 증가가 중간권 상부의 온도는 감소시킬 수 있다는 연구가 학계에 발표된 이래, 많은 연구자들이 관측적으로 확인하기 위한 시도를 하였지만 여전히 뜨거운 논쟁으로 남아 있고 아주 최근에 들어서 중간권 상부의 온도가 감소했다는 설득에 힘이 실리고 있다. 중간권 상부의 온도 감소가 여부가 중요한 이유는, 원래 매우 온도가 낮은 영역인데다 더 낮아질 경우 온도가 매우 낮은 극지역에서의 대표적 현상인 PMC (Polar Mesospheric Cloud; 극중간권구름), PMSE (Polar Mesospheric Summer Echo) 등

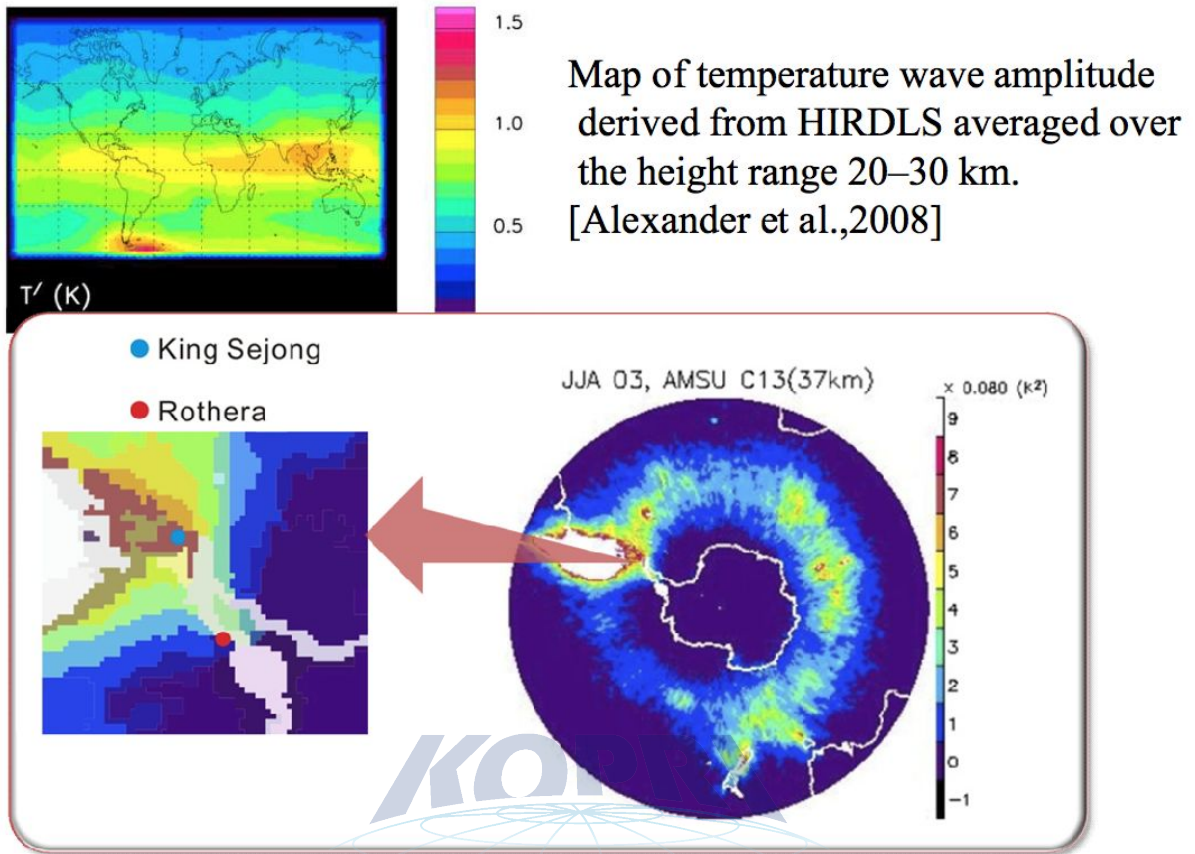


Fig. 44 A map of wave amplitude derived from HIRDLS averaged over the height range 20~30km.

이 공간적으로 점차 중위도까지 내려와 발생할 가능성이 있기 때문이다. 이 여파는 여러 가지 면에서 매우 중요하기 때문에 지속적인 중간권 상부 온도의 모니터링이 매우 중요하다. 남극 세종과학기지에서는 이러한 중간권 상부 온도의 변화를 지속적으로 모니터링하기 위해 유성 레이더를 설치하여 연중 24시간 운영하며 레이더 관측으로 얻은 온도와 위성 온도를 비교 검증하는 연구를 계속 수행하고 있다.

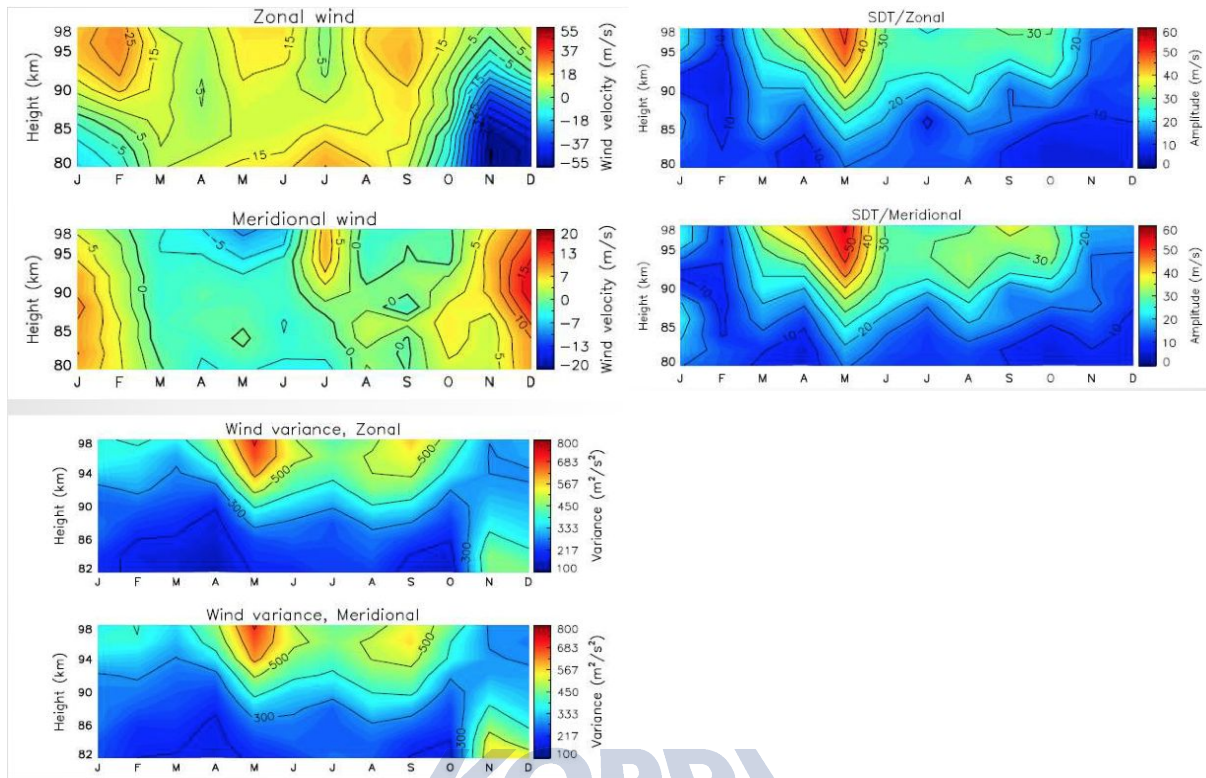


Fig. 45 (Top-left) Monthly zonal and meridional winds observed from KSS. (Top-right) Height-month contour plot of the seasonal variation of the amplitude of the zonal and meridional semidiurnal tide over KSS. (Bottom-left) Height-month contour plots of the monthly mean of median zonal and meridional wind variance (Lee et al., 2013).

나. 극지연구소에서의 고층대기 관측

현재 극지연구소에서는 남극에 설립해 운영하고 있는 세종과학기지 및 장보고 과학기지 등 두 개의 월동 기지와 북극 다산과학기지 및 스웨덴 키루나에 위치한 Esrange Space Center에 고층대기 관측용 장비들을 설치하여 운영해 오고 있다.

□ 남극 세종과학기지 (62S, 58W)

- 유성레이다 : 2007년도 3월에 관측을 시작한 유성 레이다는 플라즈마가 특정 조건이 맞으면 전파를 반사시키는 원리를 이용하여 지구대기에서 형성되는 유성흔을 관측하는 장비이다. 관측 범위는 대부분의 유성이 소멸되는 영역인 고도 약 70km~110km 사이이며, 관측을 통해 80~100km 영역의 중성대기 바

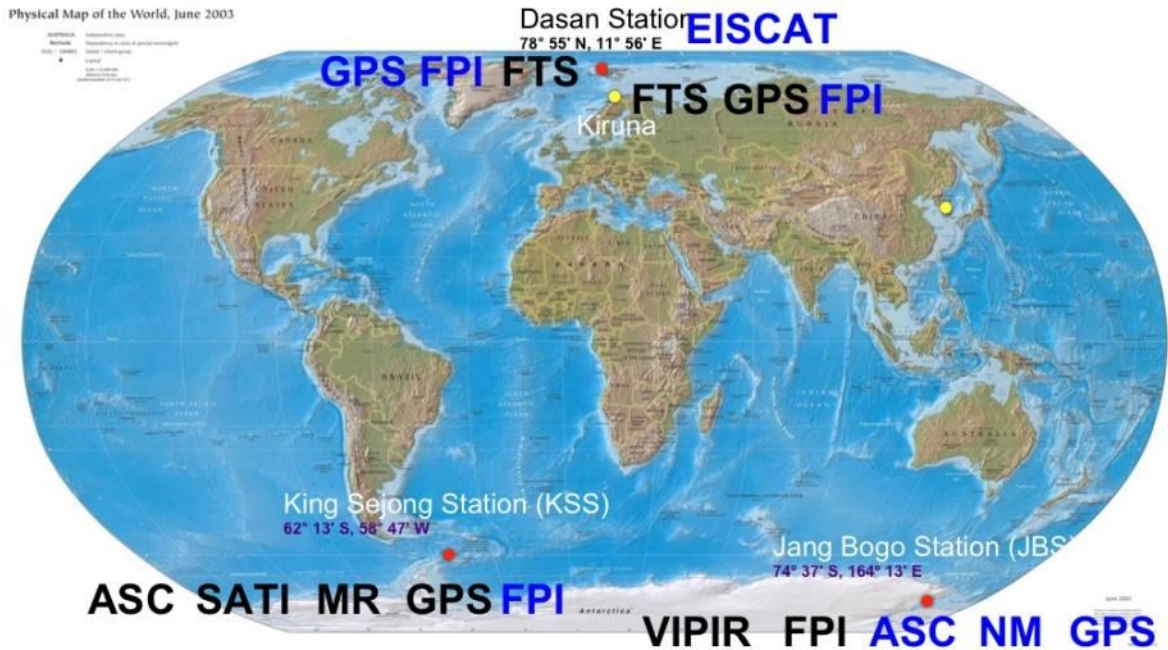


Fig. 46 KOPRI instruments installed at arctic and antarctic stations for the observation of polar upper atmosphere.



람을 제공하고 고도 약 90km에서의 온도를 얻을 수 있다. 뿐만 아니라 유성 개수, 속도, 확산 계수 등 많은 정보들을 제공하기 때문에 고층대기, 특히 MLT 영역을 연구하는데 매우 유용하기 때문에 현재 전 세계적으로 그 활용성이 매우 가파르게 증가하고 있다. 또한 유성 레이더는 레이더 기기이기 때문에 광학장비와는 달리 연중 24시간 계속해서 관측을 수행할 수 있으며, 세종기지 유성 레이더는 지난 2007년 이후 현재까지 지속적으로 운영해 오고 있는데, 레이더의 성능이 매우 좋기 때문에 외국의 많은 연구자들이 큰 관심을 보이고 있다.

- SATI (Spectral Airglow Temperature Imager) : 2002년 2월에 설치되어 운영하고 있는 SATI는 고도 약 87km와 94km에서 방출되는 대기광을 관측하여 해당 고도의 온도 및 대기광의 세기를 제공하는 광학 관측 장비이다. 광학 관측장비는 달이 없는 맑은 밤에만 관측이 가능하기 때문에 세종기지 SATI는 보통 3월에 관측을 시작하여 10월에 관측이 종료되며 매달 달이 뜨는 기간에는 관측을 수행하지 않는다.

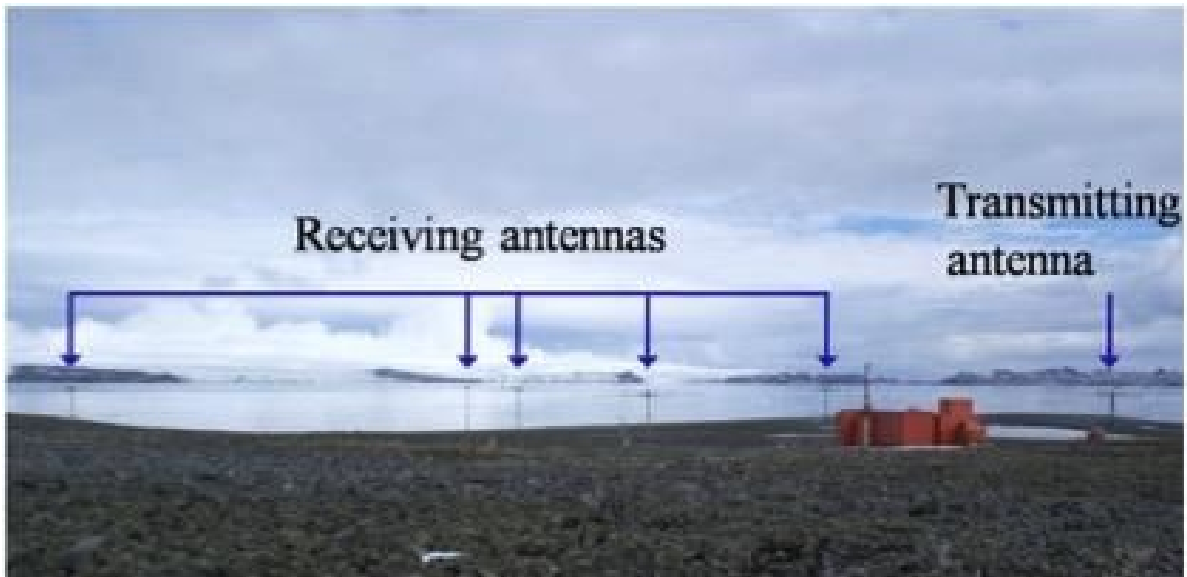


Fig. 47 VHF meteor radar installed at King Sejong Station, Antarctica



Fig. 48 SATI at King Sejong Station, Antarctica

- 전천카메라 (All-Sky Camera) : 국내의 보현산 천문대에 설치하여 운영해 오던 전천카메라를 2007년 2월에 세종과학기지로 이전/설치하여 운영하다가 기기의 노후화로 인해 2009년 2월 같은 기능의 신제품을 동위치에 설치하여 운영해 오고 있다. 전천카메라는 4개의 간섭필터 이미지와 1개의 무필터 이미지를 획득하고 있는데, 간섭필터를 이용하면 특정 파장 (630nm, 557.7nm, 879.5nm)의 빛만 통과시켜서 특정 파장만의 이미지를 생성할 수 있다. 세 파장은 산소원자인 OI (630nm, 557.7nm)과 산소분자인 O2 (879.5nm)로부터 방출되는 대기광이고, OH Meinel band의 대기광을 관측하는 필터도 사용하고 있다.



Fig. 49 All-Sky Camera at King Sejong Station, Antarctica

- GPS/TEC scintillation monitor : 이 장비는 2015년 2월에 설치했는데, 갑작스런 태양활동에 의해 지구 전리권이 교란되는 정도를 관측하는 장비이다.

□ 남극 장보고과학기지 (74S, 164E)

- 페브리-페로 간섭계 (FPI, Fabry-Perot Interferometer) : FPI는 2014년 2월 장보고과학기지가 개소할 때 설치를 완료했으며, 고도 약 250km, 95km, 87km의 중성대기 바람과 상대 온도변화를 관측해 오고 있다. 장보고과학기지는 지리적/지자기적 위도가 매우 높기 때문에 열권-이온권이 매우 활발한 상호작용을 하기 때문에 열권 바람의 변화를 관측하는 것이 매우 중요한 지역이다.
- 전리권 레이더 (VIPIR, Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar) : 2015년 2월에 설치한 VIPIR는 전리권의 전자밀도와 이온속도를 관측하는 장비이며 기존의 ionosonde에서 하드웨어 및 소프트웨어가 업그레이드 상당히 업그레이드되어 시공간적 분해능이 월등히 높은 기기이다. 전리권 전자밀도와 이



Fig. 50 Fabry-Perot Interferometer (FPI) installed at Jang Bogo Station, Antarctica



Fig. 51 VIPIR (Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar) at JBS, Antarctica

온속도를 관측하는 VIPIR와 중성대기 바람과 온도를 관측하는 FPI를 함께 운영하여 극지 고층대기에서 발생하는 열권-이온권 간 상호작용을 활발히 연구할 수 있다.

□ 북극 다산과학기지 (79N, 12E)

- 페브리-페로 간섭계 (FPI) : 북극 다산과학기지도 2015년 10월에 FPI를 설치하여 운영하고 있는데, 북극 다산과학기지도 지리적/지자기적 고위도에 위치하고 있기 때문에 남극 장보고과학기지의 FPI 연구와 연계하여 남/북극 고위도 고층대기 중성바람의 비교/분석 연구를 수행할 수 있다.

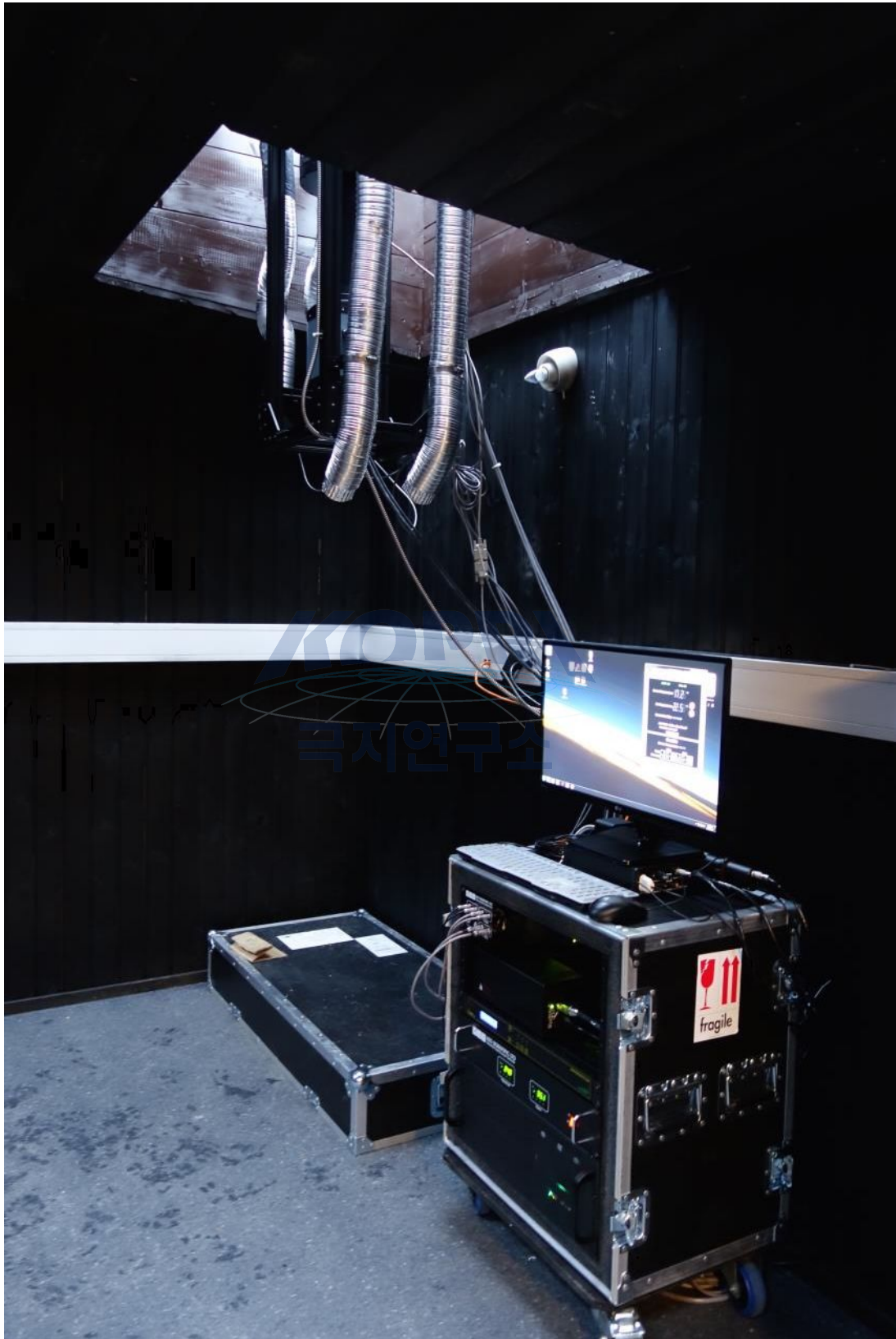


Fig. 52 Fabry-Perot Interferometer installed at Dasan Station, Arctic.



Fig. 53 Fourier-Transform Spectrometer installed at Dasan Station.

극지연구소

- 적외선 간섭계 (FTS, Fourier Transform Spectrometer) : 2003년 3월에 북극 다산과학기지에 설치한 FTS는 고도 약 87km에서 방출되는 대기광을 관측하여 당 고도의 온도를 제공하는 기기이다. 이 자료는 관측기간이 1 solar cycle인 12년을 넘었기 때문에 자료 자체도 매우 유용하며 FPI에서 관측하는 상대온도를 함께 활용하여 상호 검증 연구를 수행할 수 있다.
- GPS/TEC scintillation monitor : 이 장비는 2015년 2월에 설치했는데, 갑작스런 태양활동에 의해 지구 전리권이 교란되는 정도를 관측하는 장비이다.

□ Esrange Space Center, 스웨덴 키루나 (68N, 21E)

- 적외선 간섭계 (FTS, Fourier Transform Spectrometer) : 2002년 10월 ESC에 설치한 FTS는 다산기지의 것과 동일한 장비로 고도 약 87km에서의 온도를 제공하는 기기이다. 이 자료 또한 관측기간이 1 solar cycle인 12년을 넘었기 때문에 자료 자체도 매우 유용하며, 다산과학기지의 위치와 비슷한 경도를 가지고 위도만 10도 정도 낮기 때문에 극지방에서부터 중저위도로 전파



Fig. 54 GPS receiver installed at Dasan Station.

되는 어떤 현상을 관측하기에 적합한 위치에 있다.

- GPS/TEC scintillation monitor : 이 장비는 2015년 2월에 설치했는데, 갑작스런 태양활동에 의해 지구 전리권이 교란되는 정도를 관측하는 장비이다.

다. 향후 계획

앞서 기술한 극지연구소의 고층대기 관측 인프라 외에 올해부터 내년에 걸쳐 추가로 설치할 연구 장비들은 다음과 같다.

- 남극 장보고과학기지 : pASC (proton aurora 관측용), ASC (대기광 관측용), GPS/TEC scintillation monitor, 중성자 모니터, 썬치코일 자력계
- 남극 세종과학기지 : FPI (Palmer 기지에서 이전)
- 스웨덴 키루나 : FPI
- 노르웨이 룽이어비엔 : pASC (Proton aurora 관측용)

라. MLTI 관련 연구주제들



Fig. 55 FTS installed at Esrange Space Center, Kiruna, Sweden



Fig. 56 GPS receiver installed at ESC, Sweden

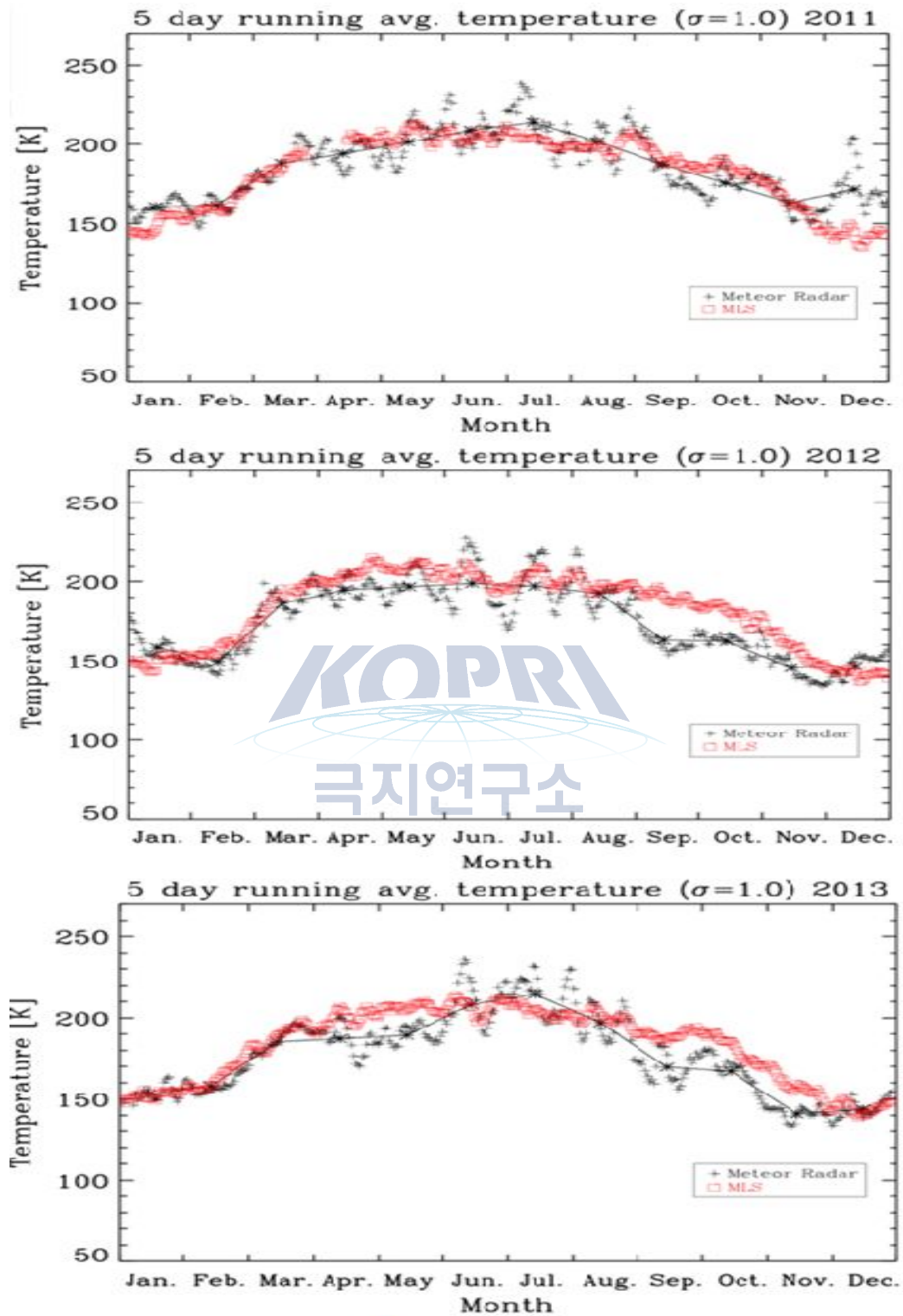


Fig. 57 Annual temperature variation derived from meteor radar at KSS during 2011 to 2013 (black). The temperatures from Aura/MLS are superimposed with red squares.

□ 저층대기와의 연계성

- Tides : 고위도에서는 그 영향이 매우 크기 때문에 연변화 및 계절변화에 대한 신뢰도 높은 연구가 필요하며, 특히 극지방에서 발생하는 SSW (Sudden Stratospheric Warming)와의 관계를 명확히 규명하는 연구가 필요
- Gravity waves : 중량파는 중간권 dynamics에 매우 중요하며 필수적이기 때문에, 이 GW에 의한 eddy transport 및 turbulence의 특성이 어떤지 그리고 특히 남극 반도에서의 위치별 차이가 어떤지에 대한 연구가 필요하며 발생 및 전파 경로를 연구할 수 있는 자료를 지속적으로 축적하는 것도 매우 중요함.
- Planetary waves : SSW가 발생하면 중간권이 어떤 형태로 반응하는지에 관한 것과 특히 남반구에서 드물게 발생하는 minor SSW의 영향에 대한 연구 필요

□ 중간권-열권하부/이온권 연계성

- Tide 및 GW에 의한 정량적 영향을 산출하여 TIGCM 모델의 하부 경계값으로 활용하게 되면 모델 결과의 신뢰도가 높아질 것임.
- 남극 세종과학기지 인근은 대기 중량파 활동이 매우 활발한 영역으로 알려져 있기 때문에 지속적인 통계 연구가 필요하고 특히 대기 파동들이 열권-전리권까지 전달되는지를 관측적으로 확인하는 것도 매우 중요함.
- 우주로부터 들어오는 aurora 및 cosmic ray 입자들에 의한 NO_x 생성 및 중저층 대기의 대기성분 조성에 미치는 영향에 관한 연구가 필요
- 현재까지 대략 100km 고도에 형성되는 것으로 알려진 turbopause의 특성에 관한 연구도 필요.

마. 결론

극지연구소에서 운영하고 있는 남북극 기지들은 기지를 운영하는 과학적 목적을 달성하기 위해서, 기기들의 안정적인 운영을 통해 지속적이고도 다양한 관측 자료들이 많이 축적되어야 그 활용도가 배가 될 수 있을 것이다. 이러한 자료들은 태양주기 이상의 장기간 고층대기 변화 연구에 필수적이고, 전 지구적 관측을 수행하는 위성 자료를 검증하는데도 반드시 필요하기 때문이다. 물론 광학관측 장비들은 맑은 날 야간에만 관측할 수 있는 한계가 있긴 하지만 남극 기지에서는 가치 있는 극지방 자료를 얻을 수 있으며, 비교적 저예산으로도 구축이 가능한 장점이 있다. 반면에 레이더 장비는 연중 24시간 관측이 가능하고 활용도가 상당히 높지만 비교적 고 예산이 필요하고 유지 관리에 신경을 많이 써

서 자료 공개기가 없도록 관리 하는 것이 매우 중요하다. 이러한 자체적인 인프라 구축 및 자료 확보와 동시에 국제 관측망 프로젝트에도 적극적으로 참여하여 우리의 자료를 공유하고 타 지역의 자료를 활용할 수 있는 기반을 만들어서 전세계적으로 분포하고 있는 각각의 기기 네트워크를 활용한 국제공동연구에도 참여하는 것이 필요하다.



8. 극지 고층대기에서의 대기중력파 연구

가. 대기중력파 (Atmospheric Gravity Waves, GWs)

□ 대기중력파의 원천, 전파 및 파괴

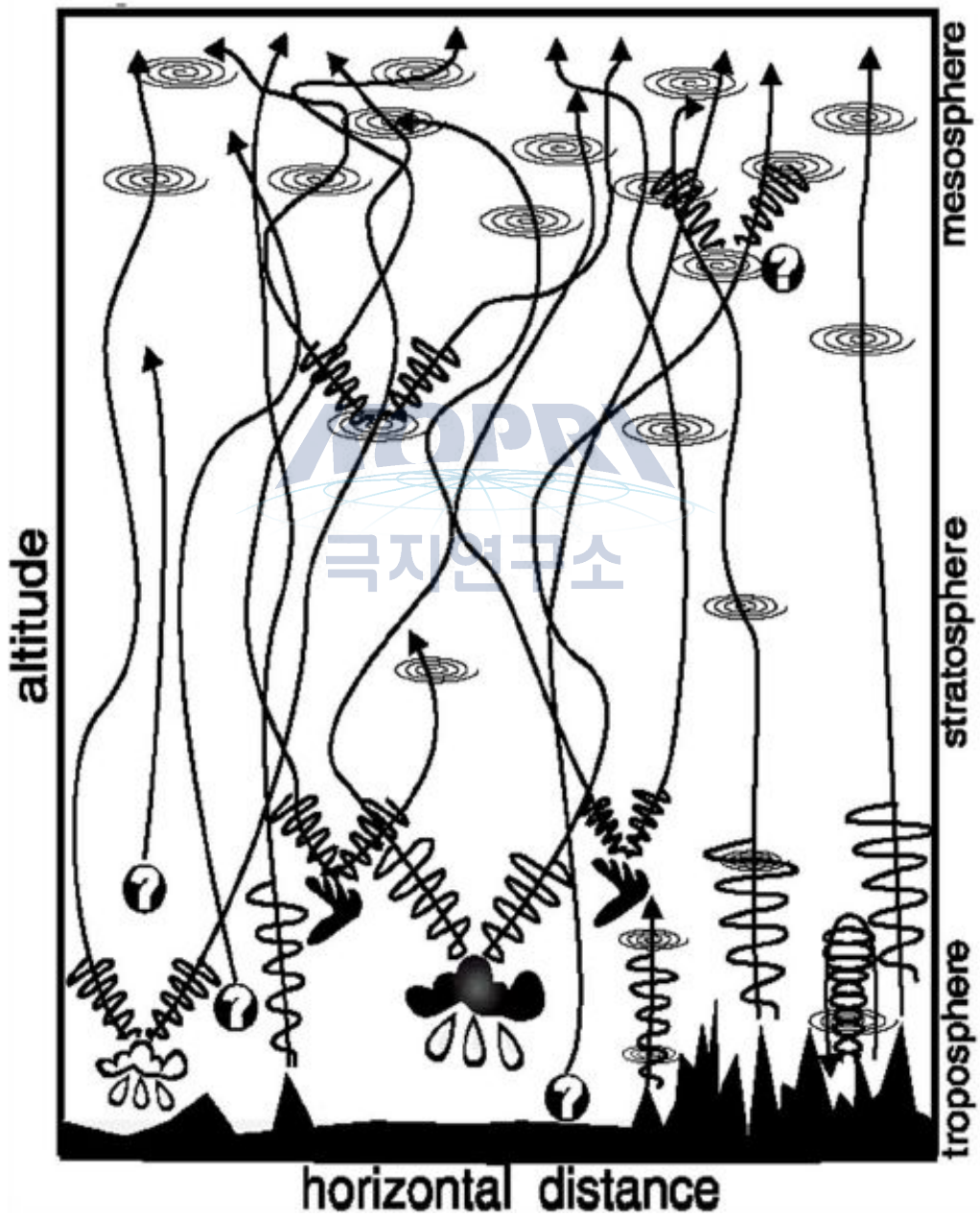


Fig. 58 Schematic of various sources and propagation properties of gravity waves (Kim, Chun, Eckermann, 2003, Atmos.-Ocean)

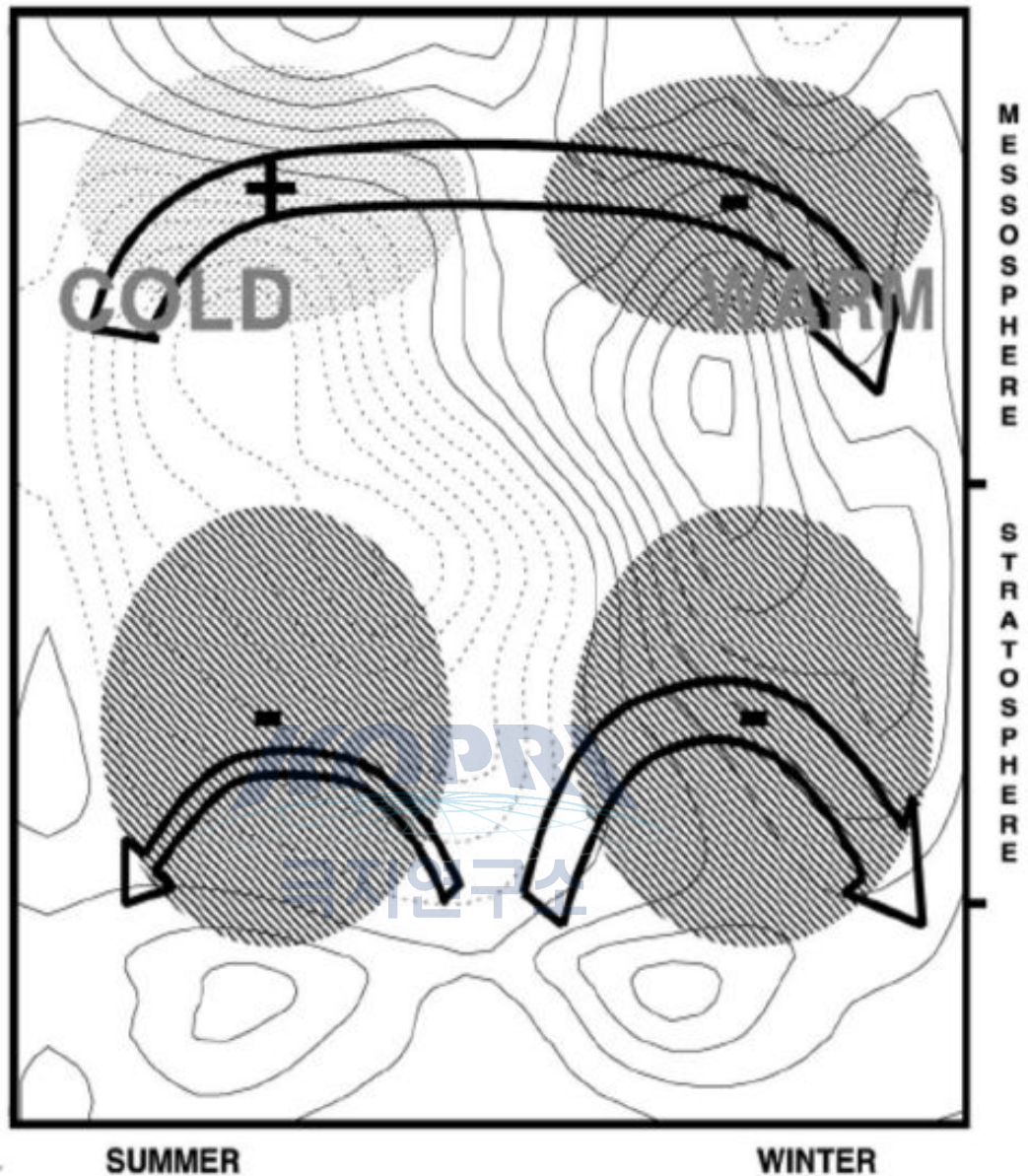


Fig. 59 Meridional circulations in the middle and upper atmosphere induced by gravity wave momentum forcing (Fritts and Alexander, 2003)

- 대기중력파는 산악, 대류, 및 제트/전선 시스템과 같은 대류권 원천에 의해서 발생하며 성층권이나 중간권에서는 파괴되거나 소산되는 중력파의 이차적으로 유도하는 중력파가 고층대기로 전파
- 연직으로 전파하는 중력파는 중간대기 (middle atmosphere)로 운동량과 에너지를 전파시키며, 파동 붕괴 (wave breaking)나 임계고도 여과 (critical-level filtering)등의 파괴 및 소산과정을 통해 중간 대기의 대규모 흐름에 운동량 및 에너지를 전달

- 중력파는 복사평형으로 결정되는 온도나 바람의 남북 및 연직 구조를 역전시킬 정도로 중간-고층대기의 바람과 온도에 상당한 영향을 끼침 (Lindzen 1981).
- 중력파는 현재의 기후 모델에서 충분히 분해되지 못하기 때문에 모수화 (매개변수화)되어야 함 (Kim et al. 2003).

□ 중력파 항력에 의한 자오면 순환

- 중간권에서, 중력파 항력은 여름 극지 역에서는 상승기류, 겨울 극지역에서는 하강기류를 유도하는 단일 세포의 전 지구적 자오면 순환을 유도하고, 상승 및 하강 기류는 단열 냉각 및 승온을 각각 유도하여 복사평형에 의한 온도 분포와 상당히 다른 온도의 남북 구조를 야기함 (Andrews et al. 1987; Garcia and Boville 1994; Fritts and Alexander 2003).
- 성층권에서, 중력파 항력은 행성파의 항력과 함께 열대지역에서 중위도 지역에 걸쳐 존재하는 Brewer Dobson 순환 (BDC)을 일으키는데 상당 정도로 기여함.

□ BDC의 발생에 있어서의 행성파와 중력파의 효과 (Butchart et al. 2010, JCL)

- 중력파는 북반구 겨울철 70 hPa에서 상향 질량 속의 장기간 트렌드에 대해서 약 40-59%를 기여할 수 있음.
- 기후변화로 인해 하부성층권의 아열대 제트가 강화되고, 이로 인해 더 많은 중력파가 서쪽 방향 운동량을 상층으로 전달할 수 있기 됨. 이러한 기후변화의 결과로 인해 더 많은 행성파와 중력파가 성층권으로 전파될 수 있는 상황이 발생.

나. 중력파 관측

□ 중력파 관측에 활용되는 관측의 종류

- 레디오존데 (Radiosonde) : Guest et al. 2000; Wang and Geller 2003; Zhang and Yi 2005; Chun et al.. 2006; Ki and Chun 2011
- 레이더 (MU Radar, MF Radar, VHF Radar, Meteor Radar) : Eckermann and Vincent 1993; Sato et al. 1993; Lee et al. 2013; Dhaka et al. 2014
- 비행기 (Aircraft) : Fritts and Nastrom 1992
- Super pressure balloons : Hertzog et al. 2008, 2012
- 인공위성 (Satellite)
- Micro Limb Sounder (MLS) : Wu and Walters 1996; Wu and Jiang 2002; Choi et al. 2009

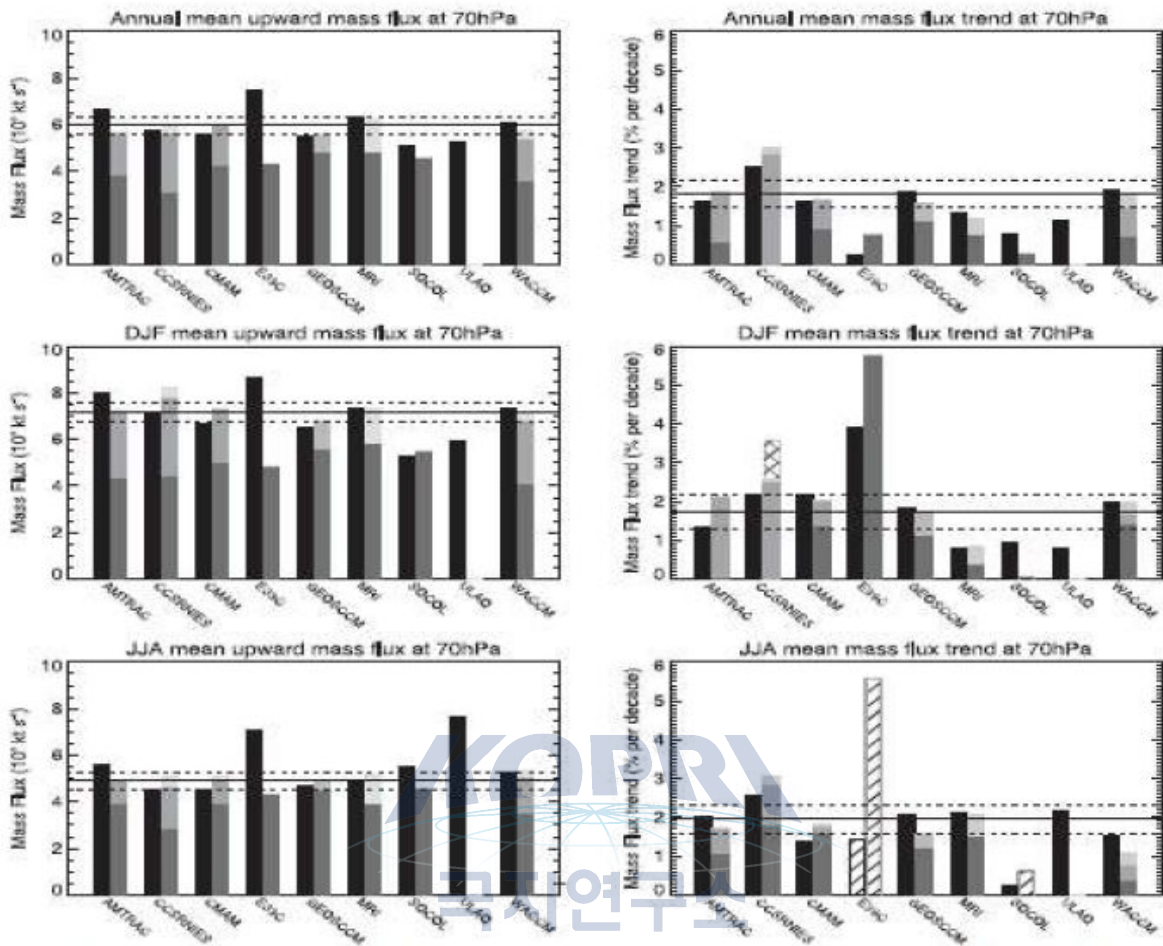


Fig. 60 Contribution of planetary waves (dark grey) and gravity waves (light grey) to BDC in the 21st century experiments conducted using climate models with chemical processes.

- Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes (CRISTA) : Ern et al. 2004, 2006.
- Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER) : Ern et al. 2011, 2014.
- High Resolution Dynamics Limb Sounder (HIRDLS) : Alexander et al. 2008; Wright et al. 2011; Jia et al. 2014.
- Atmospheric Infrared Sounder (AIRS) : Gong et al. 2012; Choi et al. 2012; Hoffman et al. 2013.

□ 인공위성에서 관측된 중력과 운동량 속

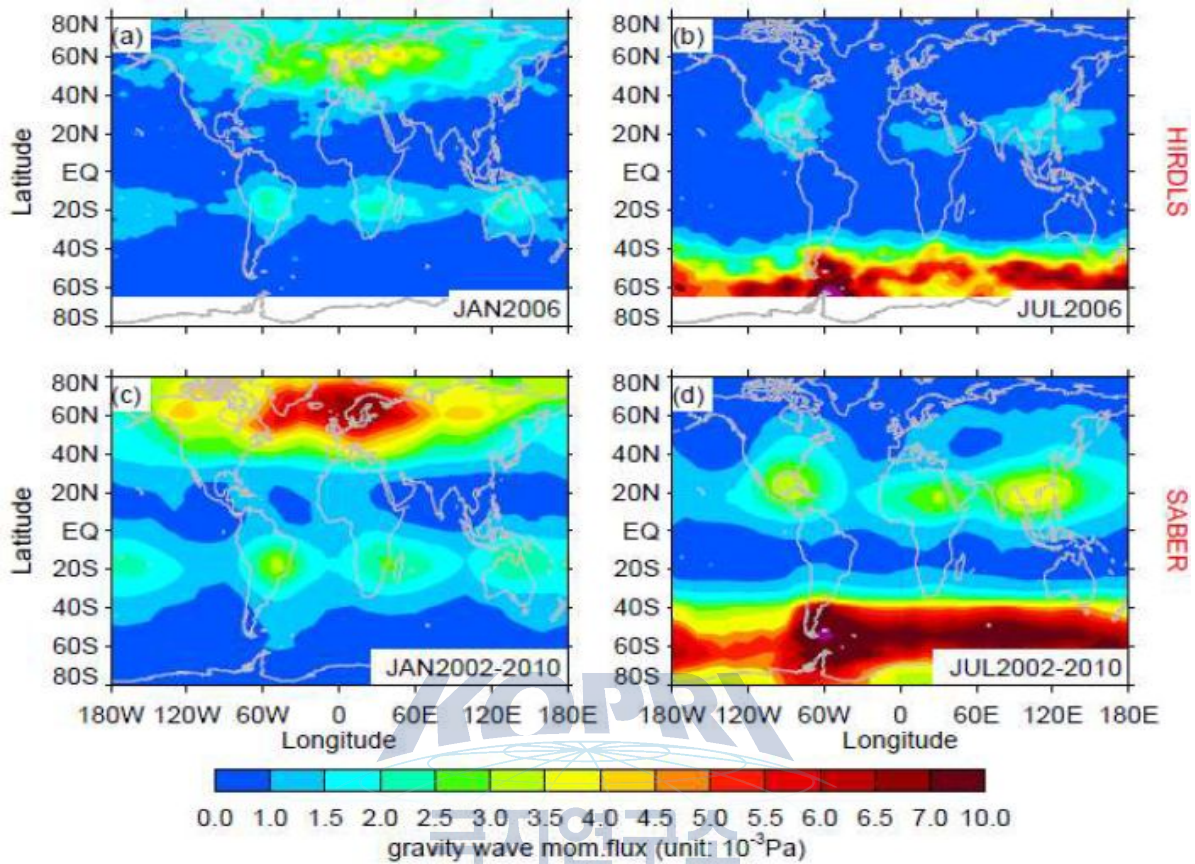


Fig. 61 Global distributions of gravity wave momentum flux derived from (top) HIRDLS and (bottom) SABER for January and July (Jia et al. 2014, Annal. Geophys.)

- 인공위성에서 관측된 온도의 섭동으로부터 선형 중력과 이론을 이용하여 추정된 중력과 운동량 속 (Ern et al. 2004, JGR).
- 중력과 온도 섭동과 수평 및 연직 바람 섭동간의 분산관계와 WKB 이론 및 mid-frequency 근사를 가정
- 온도 섭동은 연직 상향으로 전파하는 중력파에 의한 것으로 가정하지만, 이러한 가정은 오차를 유발할 수 있음 (Kim et al. 2012, ACP).

□ Super pressure balloon으로 관측된 중력과 운동량 속

- Super pressure balloon은 높은 고도에서 오래 동안 (수개월 이상) 머무를 수 있으며, 등밀도면을 따라 바람에 의해 이루어져 감에 따라 준-라그랑지안 (바람의 흐름을 따라가는) 관점에서 중력과 섭동을 관측할 수 있음.

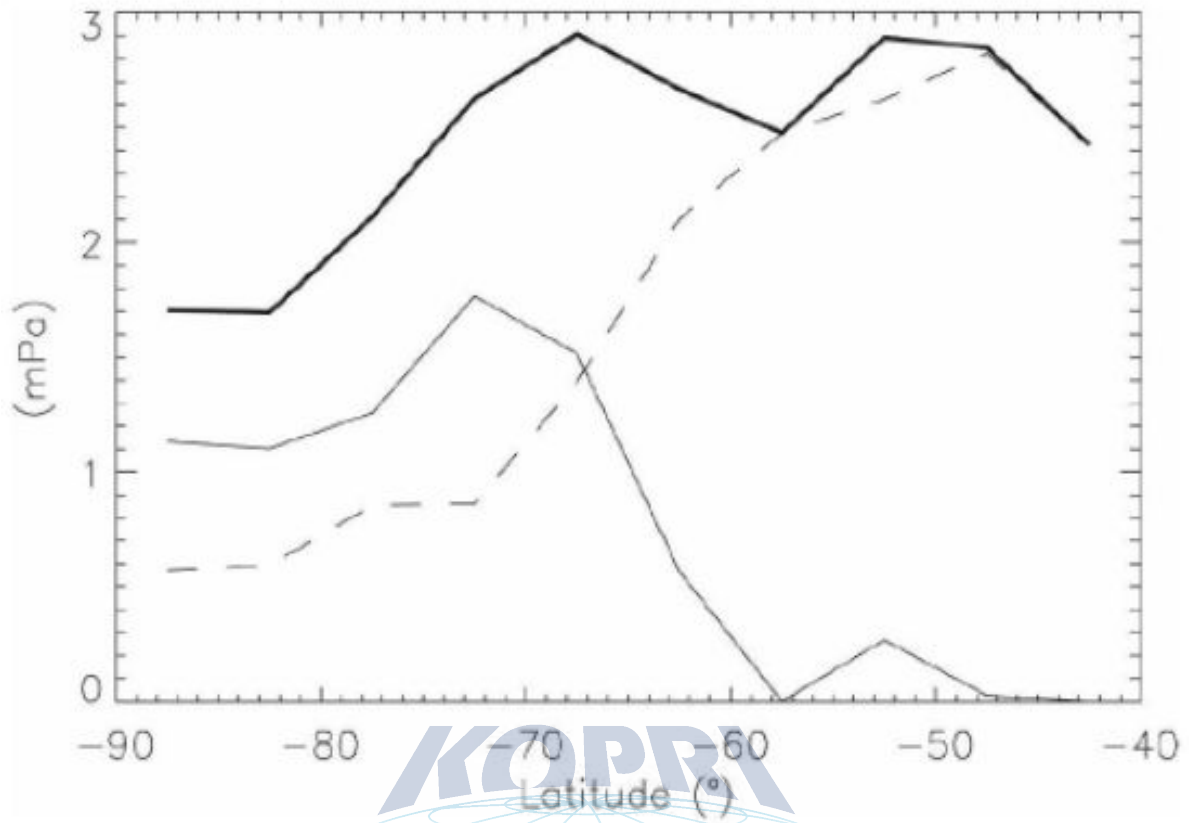
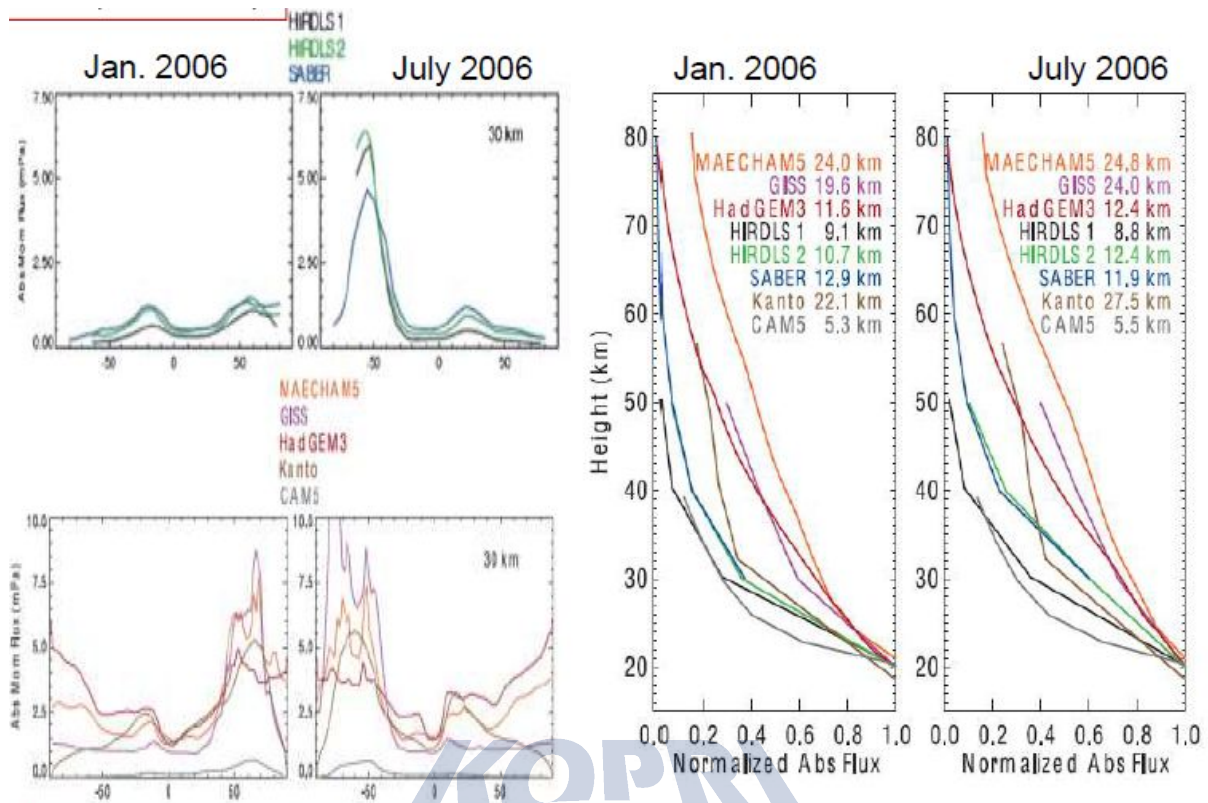


Fig. 62 Latitudinal distribution of density-weighted absolute values of orographic (solid) and nonorographic (dash) gravity wave momentum flux. (Hertzog et al. 2008). Thick solid line represents the sum of orographic and nonorographic momentum fluxes.

- Vorcore 집중 관측 기간 동안에, 27개의 superballoon이 남극 McMurdo (77.8°S, 166.7°E) 기지에서 2005년 9월 5일부터 10월 28일까지 관측
- 가장 긴 관측을 수행한 super balloon은 약 4개월 (109일)을 관측하였고, 마지막 관측은 2006년 2월 1일에 (남반구 여름) 종료

□ 중력과 모수화의 인공위성 관측과 모델 결과 비교 (Geller et al. 2013, JCL)

- 모델의 결과가 대체로 다양한 인공위성 관측 결과와 유사
- 남반구 겨울 극지역에 강한 파동 운동량 속이 발견
- 특히 극지역에서, 모델에 포함된 중력과 모수화가 가정하는 중력과 운동량 속은 실제 관측에 비해서 2-3배 가량 과대평가 하고 있음.



MAECHAM5: 1.875 x 1.875, 1 hPa (95 layers: $\Delta z \sim 770$ m above 100 hPa)
GISS: 2 x 2.5, 0.1 hPa (40 layers: $\Delta z \sim 1-4$ km in the Stratosphere)
HadGEM3: 1.25 x 1.875, 84 km (85 layers)
HIRDLS : 84S-80N (~ 100 km horizontal, ~ 1 km vertical)
SABER : 82S-82N (~ 200 km horizontal, ~ 2 km vertical)
Kanto: 0.5625 x 0.5625, 85km ($\Delta z \sim 300$ m in the Stratosphere and Mesosphere)
CAM5: 0.23 x 0.31, 2 hPa (30 layers, above 25 km very coarse vertical resolution)

Fig. 63 Comparison of observed and modeled gravity wave momentum fluxes.

다. 중력파 항력 모수화

□ 중력파 항력 모수화

- 중력파 항력 모수화는 원천고도 (source level)에서의 중력파 운동량 속 스펙트럼의 지정, 중력파의 전파, 그리고 중력파의 소산 (임계고도 여파, 파동 포화, 복사 냉각)의 세 부분으로 나뉘어 짐.
- 운동량 속 스펙트럼의 지정과 관련해서는 임의적인 배경 스펙트럼을 사용하는 방법 (Kim et al. 2013)과 각 중력파 원천을 개별적으로 고려하는 방법 (WACCM5)으로 나뉘어 짐.

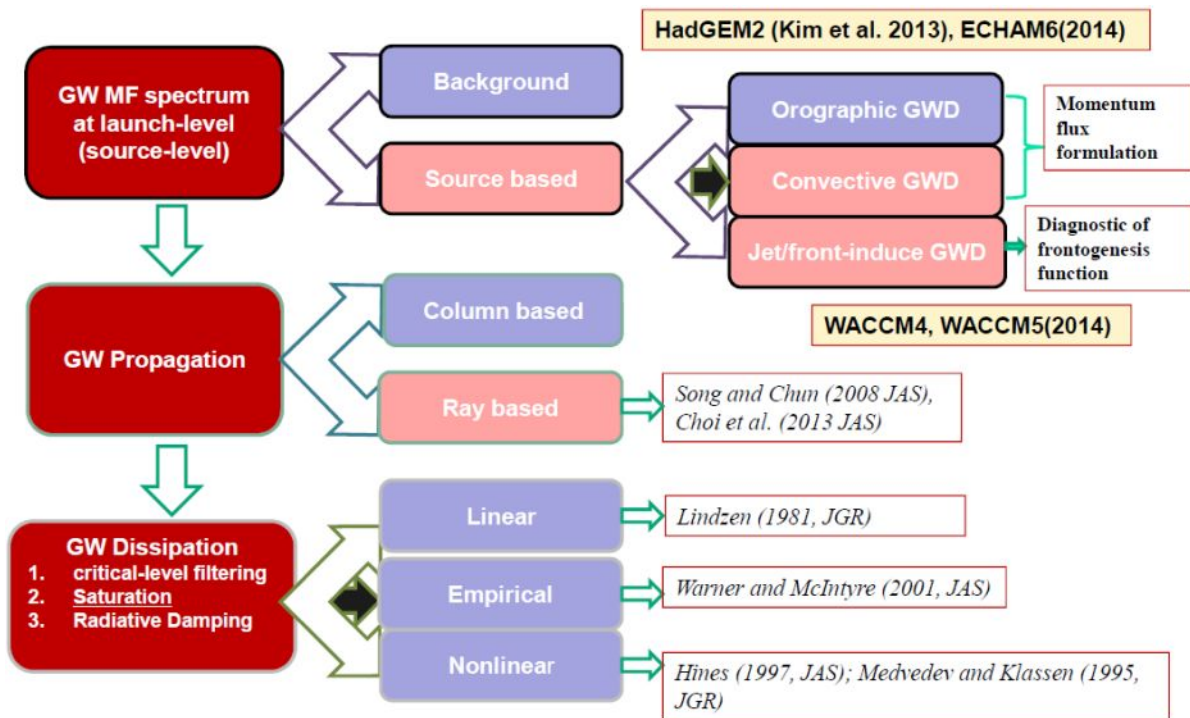


Fig. 64 Schematic of the components of gravity wave parameterization

- 파동 전파는 중력파가 연직으로만 전파하는 전통적인 방법과 파동이 수평적-시간적으로 전파하는 방법(Song and Chun 2008; Choi et al. 2013)으로 나뉘어 짐.
- 파동의 소산은 선형이론에 기반한 방법 (Lindzen 1981), 경험적 포화 스펙트럼을 이용하는 방법 (Warner and McIntyre, 2001), 그리고 비선형적 파동 상호작용을 이용하는 방법 (Hines, 1997; Medvedev and Klassen 1995)으로 나뉘어 짐.

□ WACCM 3.5의 중력파 항력 모수화 결과

- 산악, 대류, 전선-제트에 의한 중력파 항력 중에서 전선-제트에 의한 중력파 항력이 가장 강함, 여름반구에는 양수 (서풍 가속), 겨울반구에는 음수 (서풍 감속)의 값을 가짐.
- 전선-제트에 의한 중력파 항력이 중요할 수 있기는 하지만, 전선-제트 중력파 운동량 속의 크기에는 상당한 불확실성이 있음. 실제로 전선-제트 중력파 모수화에서 가정하는 중력파 운동량 속은 발생 메커니즘을 통해서 계산되기 보다는 관측된 바람과 온도의 구조를 모델이 표현할 수 있도록 임의적으로 결정

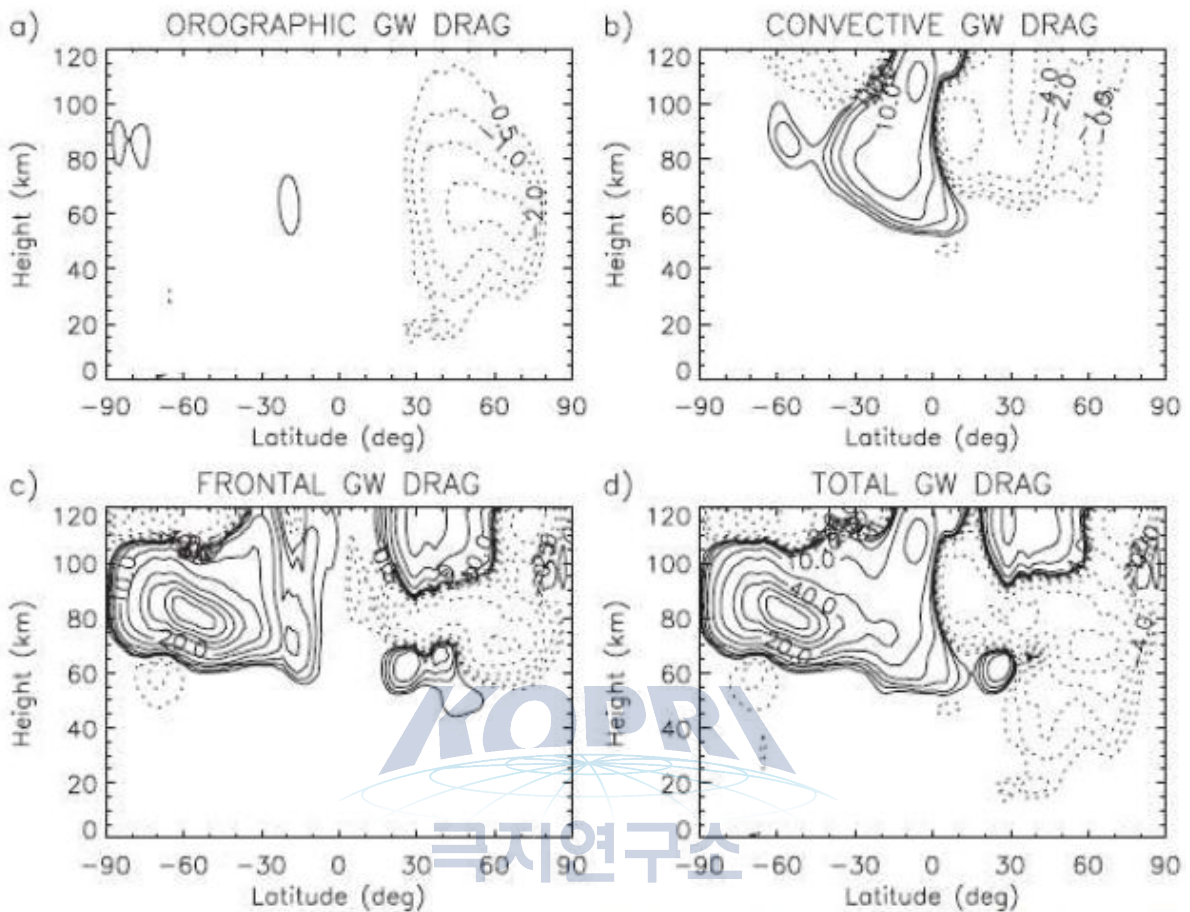


FIG. 6. (a) Orographic, (b) convective, (c) frontal, and (d) total GW drag averaged over DJF in WACCM3.5. Contour intervals are ± 0.5 , ± 1 , ± 2 , ± 4 , ± 10 , ± 20 , ± 40 , ± 60 , ± 80 , and $\pm 100 \text{ m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$.

Fig. 65 Gravity wave momentum forcing induced by mountain, convection, jet stream in the Northern Hemisphere winter season and their sum (Richter et al. 2010, JAS).

□ 전선-제트 중력과 모수화

- 산악과 대류 현상과 같이 대기 밖에 존재 존재하는 파동의 원천과 달리, 대기 흐름 안에서 내부적으로 발생하는 전선-제트 중력과의 모수화를 개발하는 것은 상대적으로 더 어려움.
- 현재, 전선-제트 중력과 운동량 속을 명시적으로 표현하는 방정식이 없음. 이는 전선-제트 중력과의 발생 메커니즘에 대한 이해 부족으로 인함.
- 현재 사용되는 전선-제트 중력과 모수화
 - WACCM4 (Richter et al. 2010, JAS), WACCM5 (Richter et al. 2014, JGR)

- Charron and Manzini (2002, JAS: ECHAM)의 방법론 따름.
- 600 hPa에서 Frontogenesis function (FF)을 계산
- 470 hPa에서 FF가 임계값 [= 0.045 K²/(100 km² hr)]이 넘어가면 중력파가 발생하는 것으로 가정함.
- 전선-제트 중력파는 가우시안 형태로 가정하고 운동량 속의 크기는 동일.
- 파동의 전파는 Lindzen-type 선형 포화 가설을 이용하여 계산

□ 전선-제트 중력파 발생 진단의 두 가지 방법

- Frontogenesis 함수 (650 hPa) : 구면좌표계에서 frontogenesis 함수의 형태 (Charron and Manzini 2002; Richter et al. 2010)

$$FF \equiv \frac{1}{2} \frac{D|\nabla\theta|^2}{Dt} = - \left(\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial \theta}{\partial \lambda} \right)^2 \left(\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} - \frac{v \tan \varphi}{a} \right) - \left(\frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \right)^2 \left(\frac{1}{a} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \right) - \left(\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial \theta}{\partial \lambda} \right) \left(\frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} \right) \times \left(\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{1}{a} \frac{\partial u}{\partial \varphi} + \frac{u \tan \varphi}{a} \right)$$

- 비선형 균형 방정식 (NBE)의 잔차 (350 hPa) : NBE의 잔차 (ΔNBE , Zhang 2004)는 수평 발산 방정식으로부터 구면 등압면 좌표계에서 유도 (Chun et al. 2013)

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \tilde{V} \circ \tilde{\nabla} D + \omega \frac{\partial D}{\partial P} + D^2 + \frac{\partial V}{\partial P} \circ \tilde{\nabla} \omega = 2J(u, v) + f\zeta - \nabla^2 \Phi - \beta u + X$$

$$\Delta NBE = \underbrace{2J(u, v) + f\zeta - \nabla^2 \Phi - \beta u}_{\text{Major}} + \underbrace{X}_{\text{curvature}} - \underbrace{D^2 - \frac{\partial V}{\partial P} \circ \tilde{\nabla} \omega}_{\text{minor}}$$

□ FF와 ΔNBE 의 계산에 사용된 자료

- 두 가지 (FF와 ΔNBE) 전선-제트 중력파 발생 진단 함수를 비교하기 위해서 MERRA와 ERA-Interim 재분석 자료를 사용하였음.
- 각각은 3시간 및 6시간 간격 자료이며, 수평 해상도는 약 1.25-1.5도, 그리고 연직 방향으로는 MERRA는 0.1 hPa까지 42개 층, ERA-Interim은 1 hPa까지 37개 층으로 이루어져 있음.

	MERRA	ERA-Interim
Period	1980. 1. 1 – 2011. 12. 31 (32 years)	
Time resolution	3 hours	6 hours
Horizontal resolution	1.25°×1.25°	1.5°×1.5°
Vertical resolution	42 levels up to 0.1 hPa	37 levels up to 1 hPa

Fig. 66 Data used for the computation of jet-front gravity wave generation



□ FF와 Δ NBE의 전지구 분포 (600 hPa)

- 모든 계절에 대해서, Δ NBE가 강한 지역은 대체적으로 FF가 강한 지역과 일치함. 단 예외적으로 Δ NBE는 안데스나 로키 지역과 같은 산악지역에서 강하게 나타남.
- FF와 Δ NBE는 대류에 의한 중력파가 강한 지역과 대체로 분리되어서 나타남. 따라서 제트-전선 중력파 모수화가 독립적으로 가능함을 보여줌.

□ 고해상도 기상분석 자료에 나타난 중력파와 전선-제트 중력파 진단 방법의 비교

- 고해상도 분석 자료에서 중력파 추출 방법을 이용 (Fig. 8.11; Kim et al. 2012, ACP)
- 0.25도 해상도 분석장에서 동서남북으로 21개의 격자에 대한 (중위도에서, 대략 250 km 반경) 평균으로 평균류를 정의하고 그 안의 값을 중력파 섭동으로 정의하여 운동량 속을 계산.

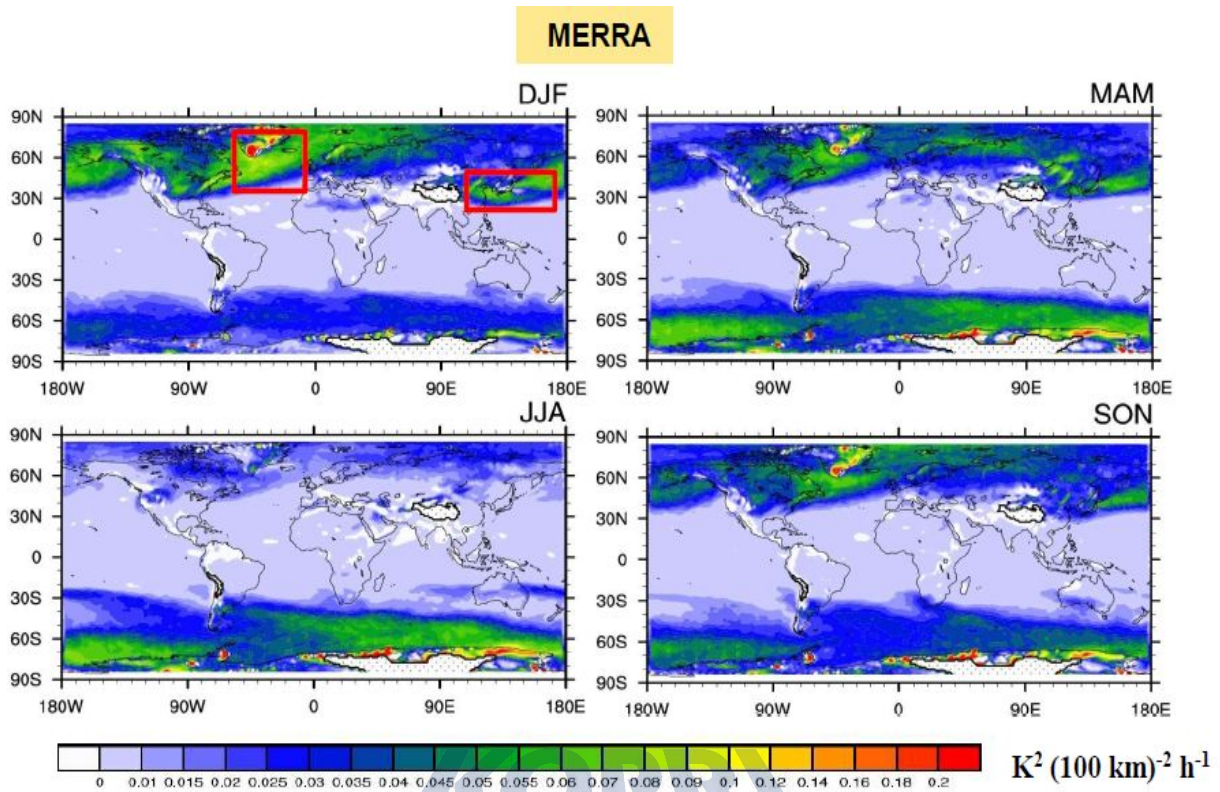


Fig. 67 Global and seasonal distributions of FF computed using MERRA data

□ ECMWF 자료로 계산된 동서 및 남북 운동량 속의 분포

- 2007년 1월과 7월에 대해서 ECMWF 자료로 계산된 동서방향 및 남북방향의 운동량속의 고도별 전지구 분포.
- 하부 성층권 (70 hPa)에서, 1월 중위도 중력과 운동량 속은 대체로 서쪽 방향으로 나타내며, 7월 중위도 중력과 운동량 속도 대체로 서쪽 방향으로 나타남.
- 하부 성층권의 서쪽 방향 운동량 속은 대체로 겨울반구 산악 지역 뿐만 아니라 제트가 강한 스톱 트랙 지역에서 나타남.
- 열대지역에서는 계절에 관계없이 대체로 동쪽 방향 운동량이 나타남.

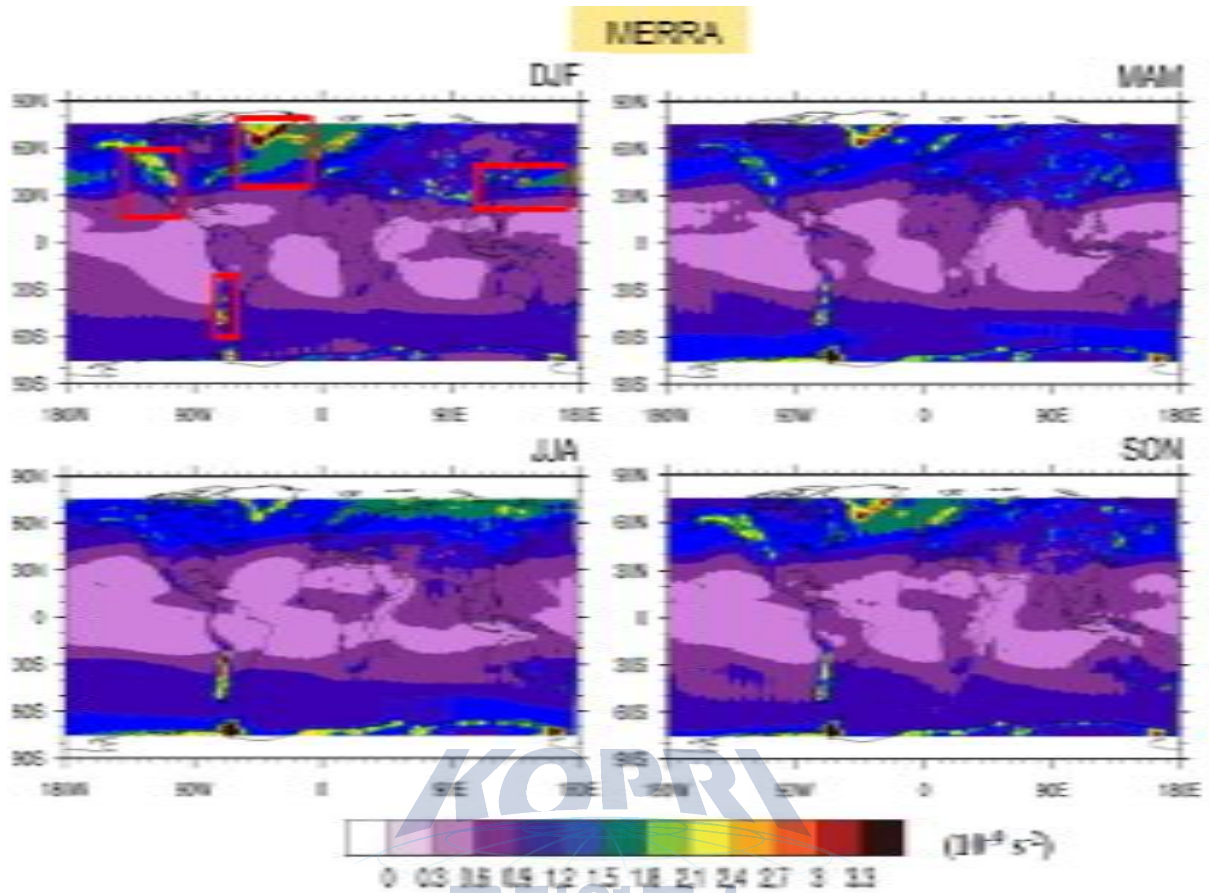


Fig. 68 Global and seasonal distributions of ΔNBE computed using MERRA data

□ ECMWF 운동량 속 절대값 분포와 HIRDLS와의 비교

- 2007년 1월에, ECMWF 결과는 그린란드 남동쪽과 노르웨이 해변 그리고 7월에는 남극 반도와 안데스 남쪽에서 강함 운동량 속이 관측적으로 나타남 (Preusse et al. 2014).
- ECMWF 분석자료 결과는 HIRDLS 관측과의 강한 패턴 상관도를 보이나, 크기는 조금 작게 계산되었음.

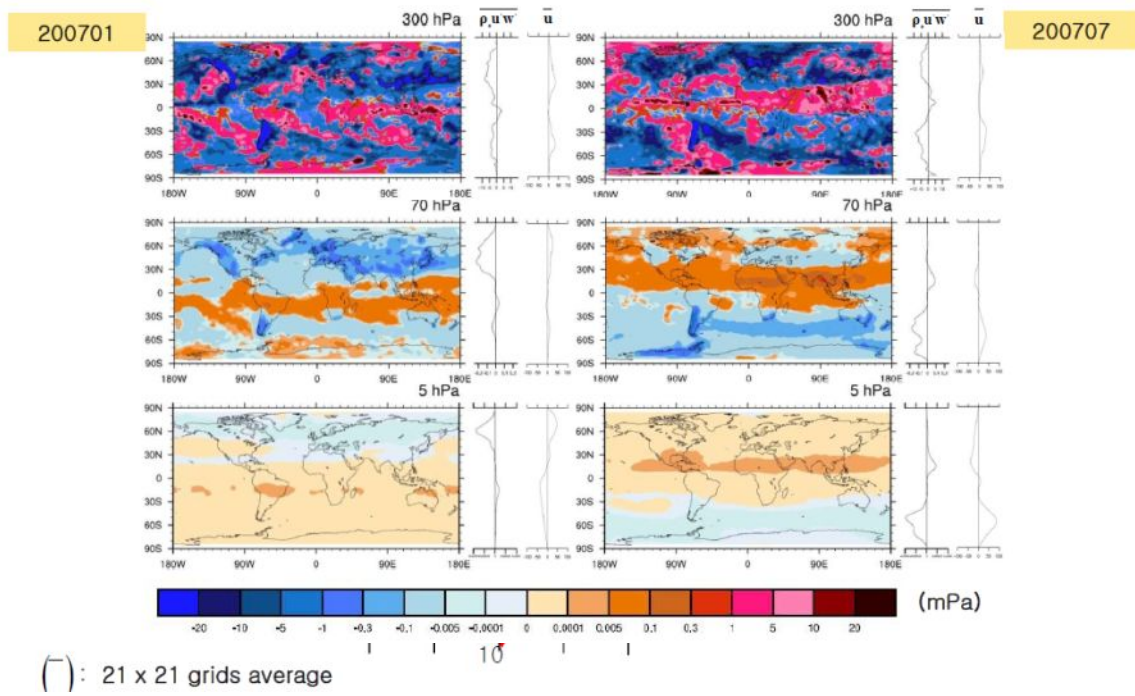


Fig. 70 Zonal gravity wave momentum flux obtained from ECMWF data

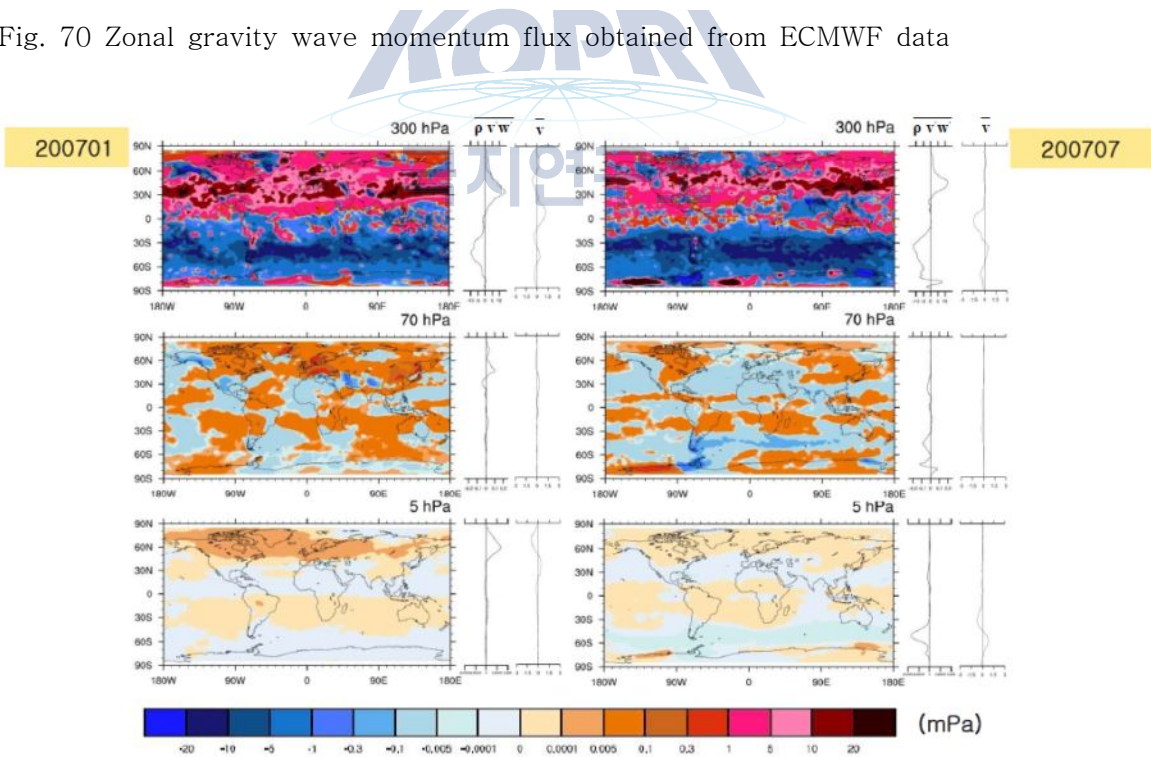


Fig. 71 Meridional gravity wave momentum flux obtained from ECMWF data

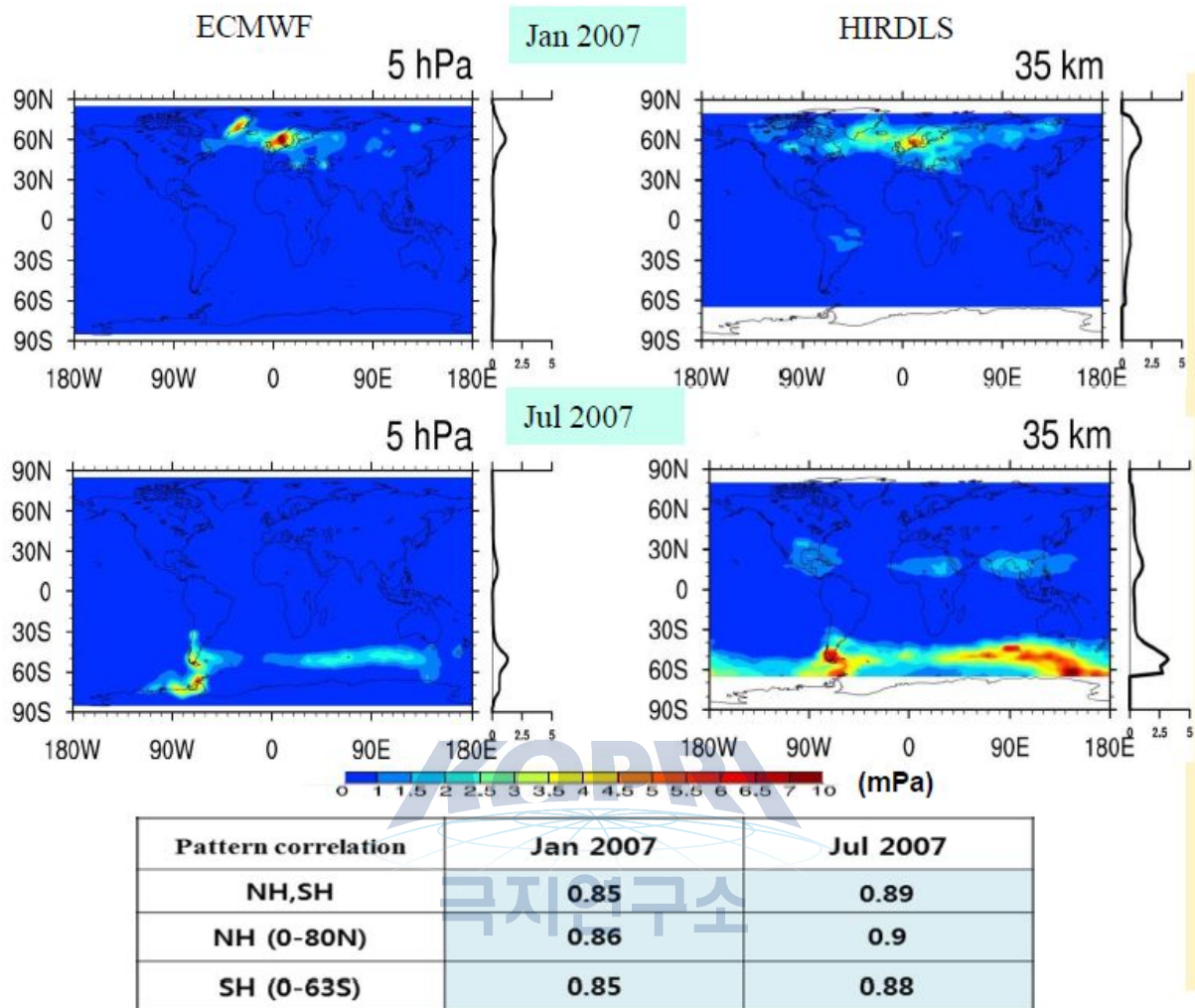


Fig. 72 Comparison with ECMWF GW momentum flux and HIRDLS

□ ECMWF 운동량 속과 FF와 Δ NBE와의 상관성

- FF와 Δ NBE가 ECMWF 동서방향 운동량 속과 강한 공간적 상관성을 보임.

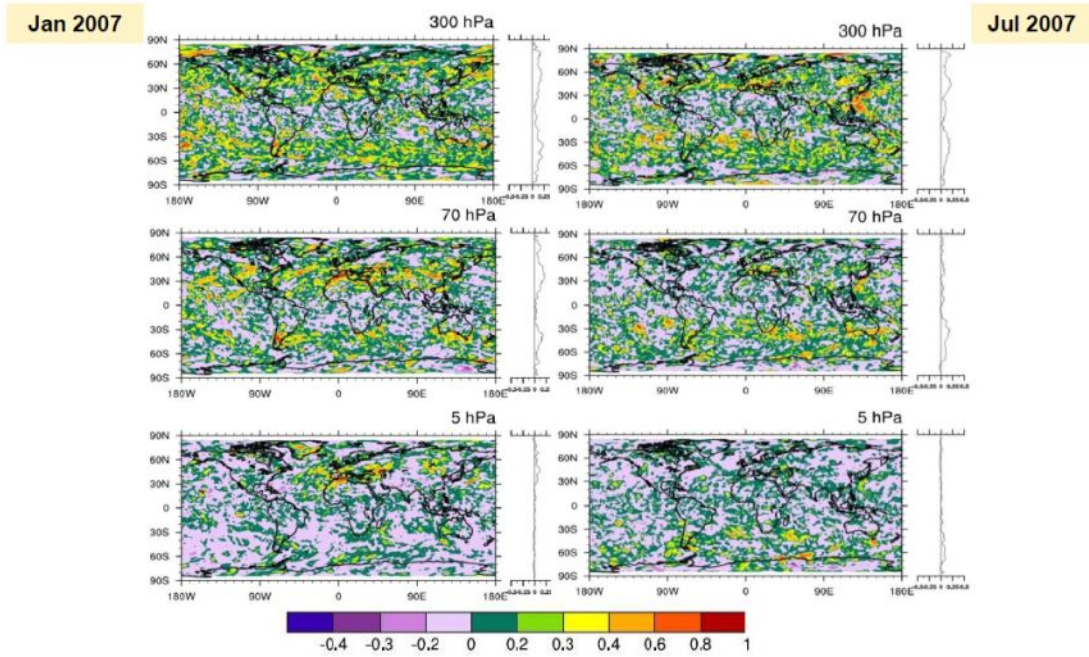


Fig. 73 Correlation of ECMWF zonal momentum flux and FF

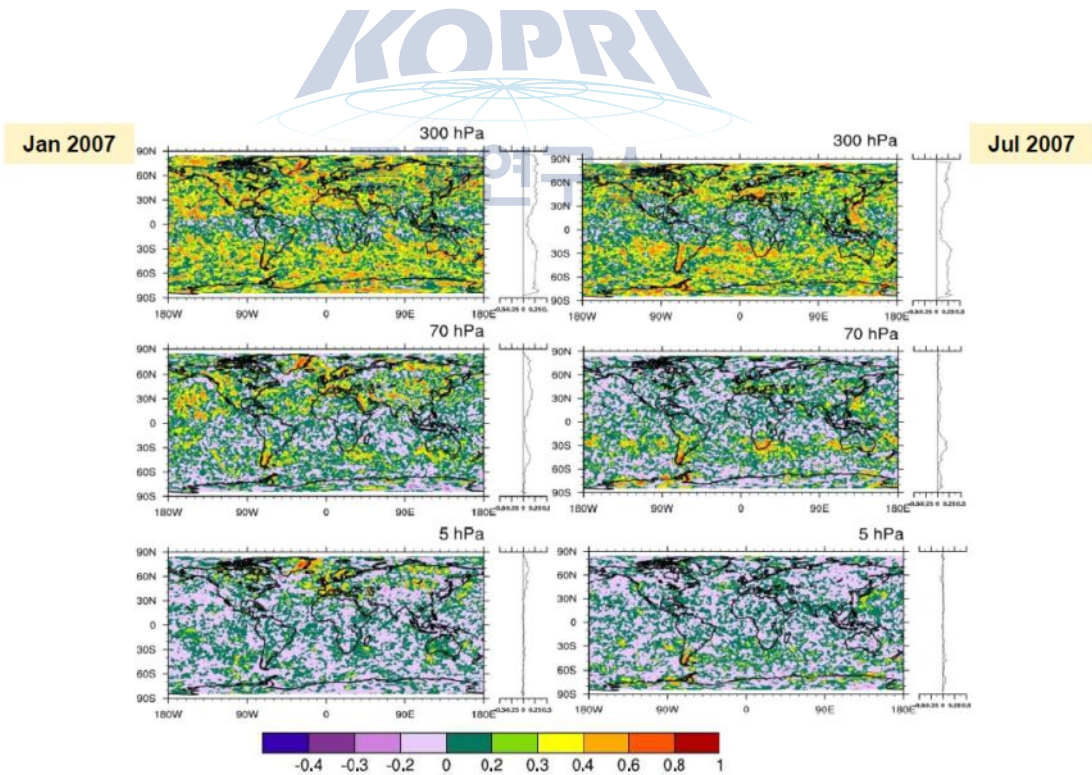


Fig. 74 Correlation of ECMWF zonal momentum flux and ΔNBE

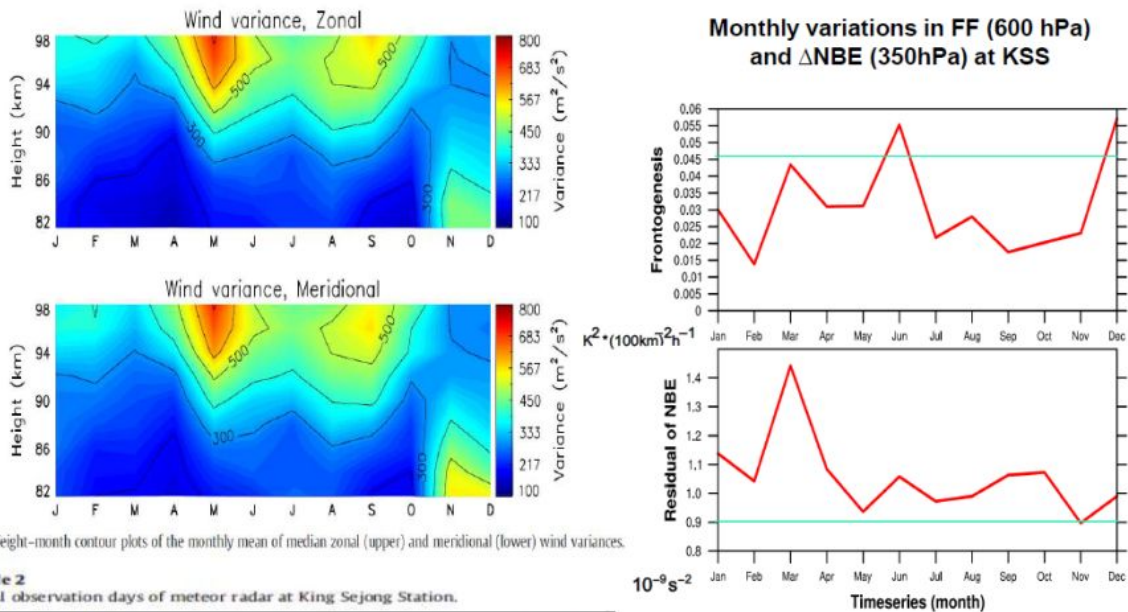


Fig. 5. Height-month contour plots of the monthly mean of median zonal (upper) and meridional (lower) wind variances.

Table 2
Total observation days of meteor radar at King Sejong Station.

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
2007			31	30	31	3	-	-	-	-	25	31
2008	10	-	-	-	8	6	13	31	29	28	28	17
2009	18	28	31	30	31	30	31	31				

Numbers in boldface represent numbers of days used in the analysis.

Lee et al. (2013, JASTP)

Fig. 75 Comparison of gravity wave variances at King Sejong Station and tropospheric FF and ΔNBE

□ 남극세종기지의 유성레이더에서 관측된 중력파

- 단순한 상관성만으로 남극 세종기지에서 관측된 유성레이더 바람에서 유도된 중력파 분산의 원천을 전선-제트 중력파에서 찾기는 어려움.
- 저층 대류권에서의 FF나 ΔNBE 의 계절적 변화와 중간권계면에서 관측되는 유성레이더 중력파 분산을 연관짓기 위해서는 수치 모델링이나 파동전파 특성을 고려한 보다 상세한 비교 연구가 필요

라. 극지역 중력파 연구를 위한 향후 연구 방향

- 극지역 대류권에서 중력파의 주도적인 원천에 대한 연구 및 중간 대기에서의 insitu 원천에 대한 연구가 필요
- 중간 대기 혹은 그 위로 전파하는 중력파는 전파 특성에 관한 연구 필요
- 중력파 원천과 전파에 있어서의 경년 변동에 영향을 주는 요인에 대한 분석
- 중간 대기에서 중력파 항력과 원천 지역에서 중력파 운동량 속의 실제적인 구조에 대한 연구 필요

- 중력과 항력은 SSW와 같은 극지역 대규모 순환에 대한 반응 연구
- 향후 연구를 위해서는 관측 자료로는 레이더, 인공위성 (HIRDLS, SABER, 등) 그리고 모델로는 전지구 모델 (WACCM, HadGEM)이나 지역규모 모델 (WRF)를 사용해야 할 것임.



9. 극지 고층대기와 우주선/고에너지 입자

가. 우주선(Cosmic Ray)

- 우주선은 초신성 폭발이나 충격파에 의해 생겨난 높은 에너지를 지닌 각종 입자와 방사선을 말함.
- 주성분은 90%가 수소 양성자(H^+ : proton)이며 그 외 10% 정도는 전자(electron)와 헬륨 리튬, 베릴륨 붕소 등으로 이루어져 있음.
- 이들은 에너지 범위는 10^{20} - 10^{21} eV 으로 알려져 있으며, 5GeV이하의 에너지를 갖는 우주선도 있는데 이들은 태양폭발에 의해 생성된 것으로 추정함.
- 태양활동에 의해 발생한 우주선은 태양의 플레어(flare) 또는 코로나 질량 방출(CME; Corona Mass Ejection)에 의해 형성되거나 코로나 물질이 분출되면서 생성되는 행성 간 충격파(Interplanetary shock)에 의해 2차적으로 가속된 입자인 것으로 알려져 있음.
- 빛의 속도와 비슷한 속도로 이동하는 우주선은 지구로 유입되어 지구의 대기 속 입자들(주로 N_2 , O_2)과 충돌하여 2차 우주선(Secondary cosmic ray)을 생산함.

◇ Air shower formation in the atmosphere

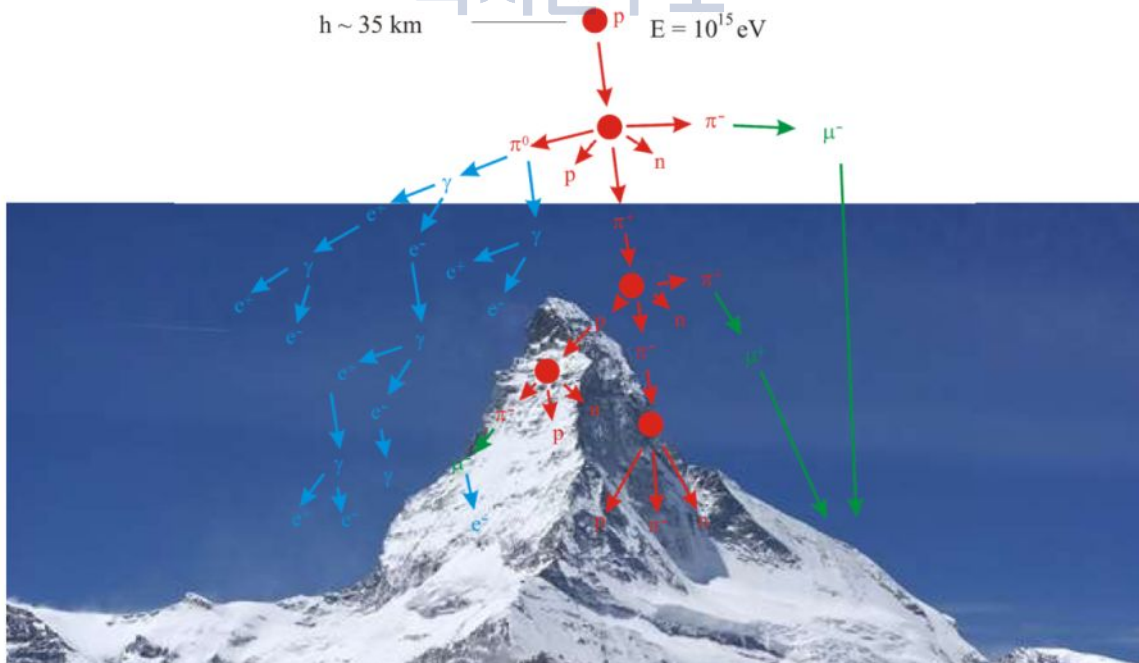


Fig. 76 Air shower formation in the atmosphere

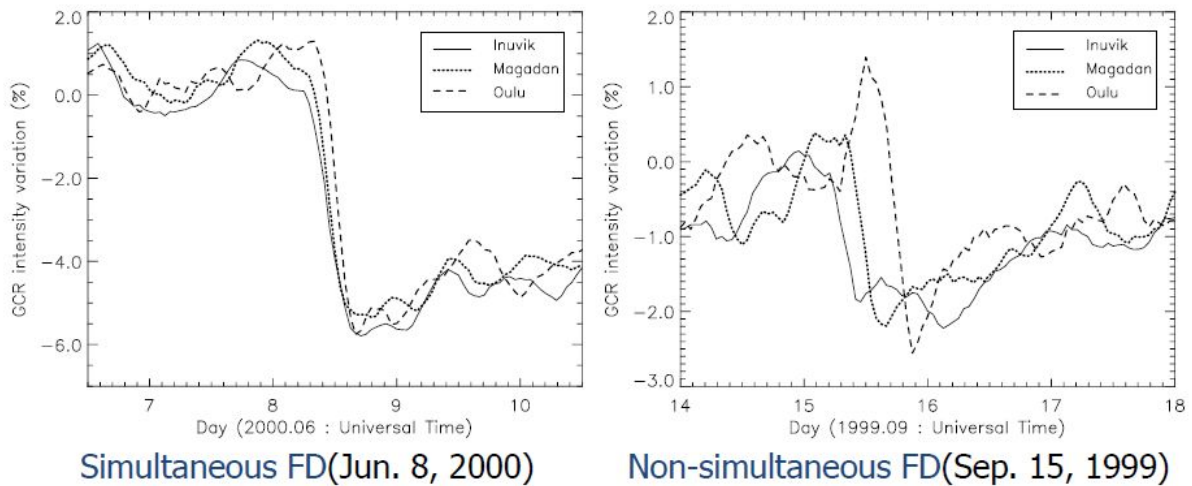


Fig. 77 Difference to simultaneous FD and Non-simultaneous FD

- 1차 우주선이 지표에 이르기 전에 평균 10회 정도 대기 중의 원자핵과 충돌하는데 그때마다 2차 우주선을 생성함.

나. Beginning of neutron monitor science

- 우주선의 관측은 주로 지상에 우주선 중성자 검출기(Neutron monitor)로 우주선의 세기를 관측함.
- 중성자 검출기에 의해서 관측된 우주선 세기는 등방적 분포를 갖지만 지구 외적인 변화와 지구 내적인 변화에 따라 다양한 변화 형태를 보임.
- 우주선 세기 변화에는 태양활동주기, 행성간 자기장(IMF : Interplanetary Magnetic Field)이나 태양풍 구조 변화와 같이 주기적인 변화와, 태양 우주선(Solar Cosmic Ray)의 유입에 의한 우주선 세기 증가 현상(GLE : Ground Level Enhancement) 혹은 지구를 통과하는 행성 간 충격파(Interplanetary shock)나 자기구름(Magnetic cloud)의 차폐에 의한 우주선 세기의 감소되는 포부시 감소(Forbush decrease) 현상과 같은 비주기적인 변화가 있음.

□ Forbush decrease

- 포부시 감소(Forbush decrease)는 수일~1주일 동안 우주선의 세기가 갑자기 감소하는 현상으로, 세기가 급격히 감소하는 주상(main phase)과 감소된 세기가 회복되는 회복기(recovery phase) 형태로 나타남.
- 포부시 현상이 나타나는 이유는 지구를 통과하는 행성 간 충격파가 만들어 내는 강한 자기장에 지구로 유입되는 우주선이 차폐되기 때문임.
- 포부시 현상은 모든 지역에서 동시에 관측(동시 FD)될 수 있고 관측지역에 따라 시

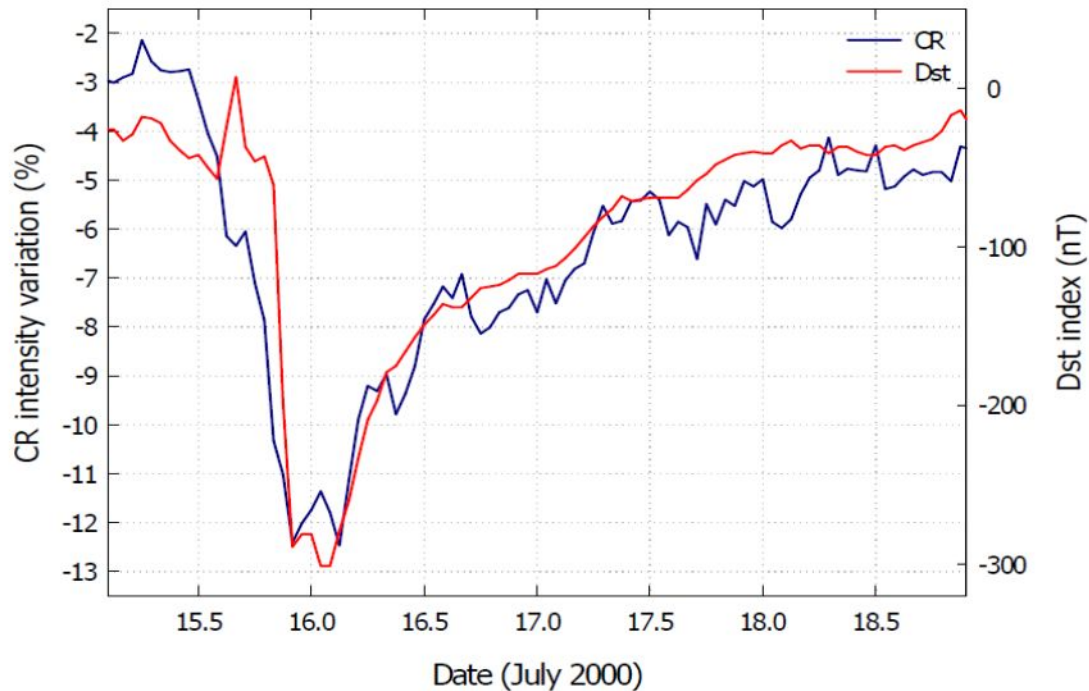


Fig. 78 Geomagnetic storm(Dst index) and Forbush decrease(CR intensity)

간 차이를 두고 우주선 세기가 감소(비동시 FD)되기도 함.

- 2000년 6월 8일 고위도 우주선 중성자 검출기에 기록된 동시 FD 현상의 경우 주상에서 우주선의 세기 변화가 우주선 세기를 관측한 세 지역 모두에서 동시가 감소함.
- 동시 FD 현상은 태양의 코로나 질량방출에서 나온 자기구름의 방향이 지구를 향하여 곧바로 진행할 경우 자기 구름의 중심에 지구가 놓이게 되고 지구를 중심으로 자기 구름이 대칭적으로 분포하게 되어 우주선의 세기가 감소하는 주장이 일치하여 관측되는 것임.
- 그러나 1999년 9월 15일에 관측한 우주선 세기 관측의 경우 주상에서 시간에 따라 감소하는 주장에 차이가 있음.
- 이것을 비동시 FD라 하는데, 이는 지구 주위를 지나는 태양풍 내 자기구름의 강도와 진행방향에 대한 비대칭성 때문임.

□ GOES differential intensity of Solar Proton Event

- 태양 플레어(flare) 혹은 태양 질량 분출(CME)와 같은 태양폭발이 발생할 경

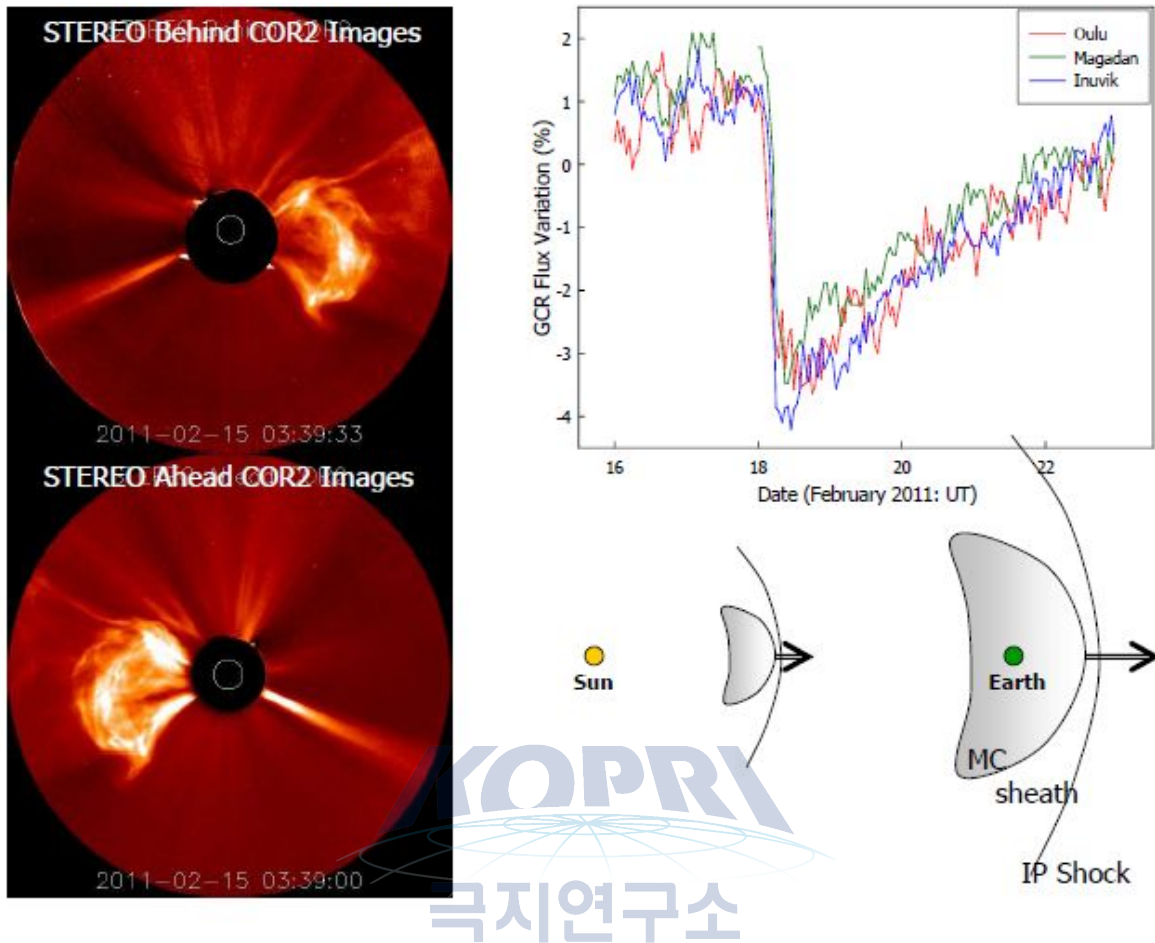
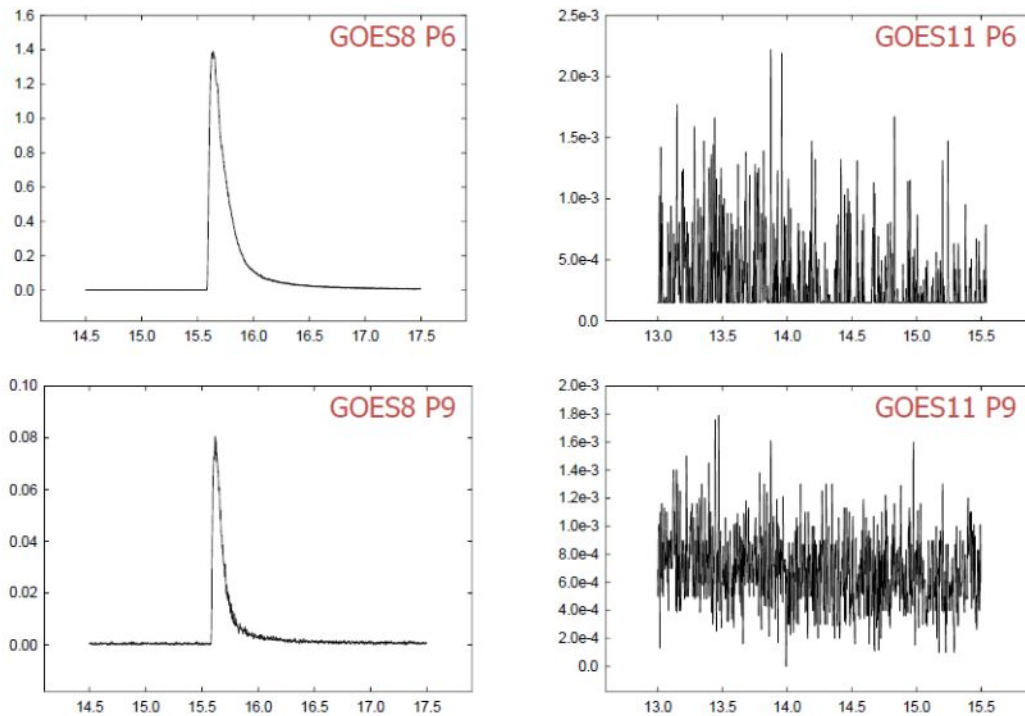


Fig. 79 Simultaneous FD by STEREO satellite

우 태양 양성자 현상(Solar proton event)이 발생하고 가속된 태양의 태양 우주선(Solar Cosmic Ray)이 지구에 유입되어 우주선 세기 증가 현상(GLE : Ground Level Enhancement)이 관측됨.

- GOES-8 위성 P6(80-165MeV)과 GOES-8 위성 P9(420-510MeV)에서 관측한 고에너지 양성자 현상에 의한 우주선 관측은 초신성 폭발 등에 의해 생성된 우주선 보다 낮은 에너지를 가짐.
- 태양 양성자 현상의 양성자 에너지 별 peak값과 우주선 세기 증가 현상의 상호 관계를 살펴본 결과, P9(420-510MeV) 에너지의 양성자의 peak값과 우주선 세기 증가의 상관계수가 0.88로 가장 높았음.



SPE with GLE(April 15, 2001) SPE without GLE(Sep. 13, 2004)

Fig. 80 GOES differential intensity of SPE

극지연구소

□ Prediction of energy spectra of SPEs

- 남극의 Amundsen-Scott station에 위치한 standard NM64 neutron monitor와 “Polar Bare” neutron monitor에서 관측한 우주선의 에너지 반응에 차이를 보임.
- 두 관측에서 우주선 count rate 차이로부터 simple power law spectrum을 유추 하였음.

□ SCR from Solar images by SOHO/EIT

- 2006년 12월 13일 03:36:09UT에 SOHO위성의 태양 이미지에서 solar cosmic ray에 의해 이미지에 노이즈가 발생함.
- Background cosmic ray와 smoothed monthly sunspot number의 비교 결과, 둘 사이에 반비례 관계를 보임.

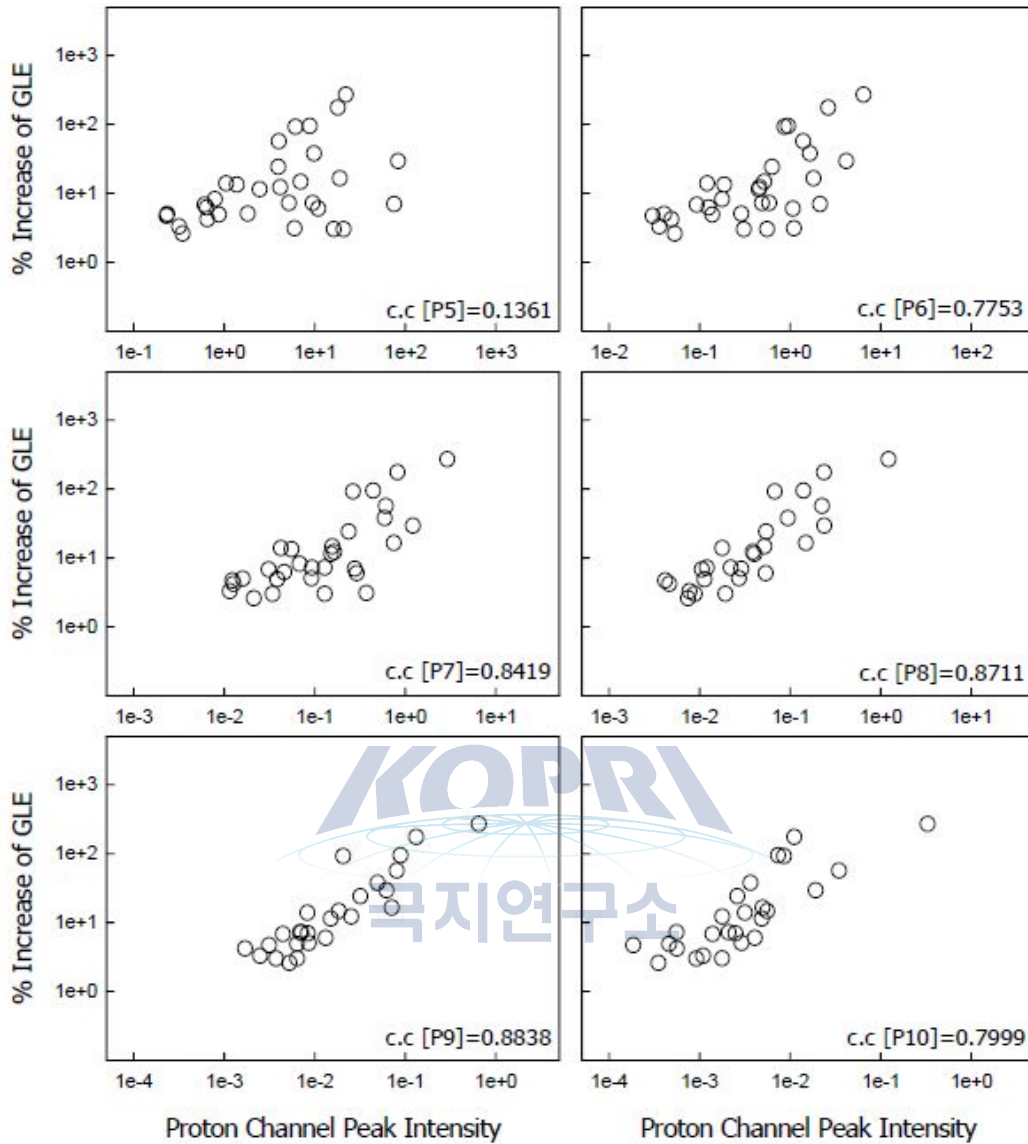


Fig. 81 Peak intensity(SPE) and % increase(GLE)

- Solar proton event가 발생한 2006년 12월 13일에 대해 GOES-11위성에서 관측한 proton flux와 Oulu NM의 우주선 증가 백분율을 비교해 보니 매우 잘 일치함.

다. 극지 우주선 연구를 위한 향후 연구

- 극지역의 우주선 global network data를 활용하여 극지역 우주기상 변화와 기후 변화, 고층대기 변화를 연구 하고자 함.

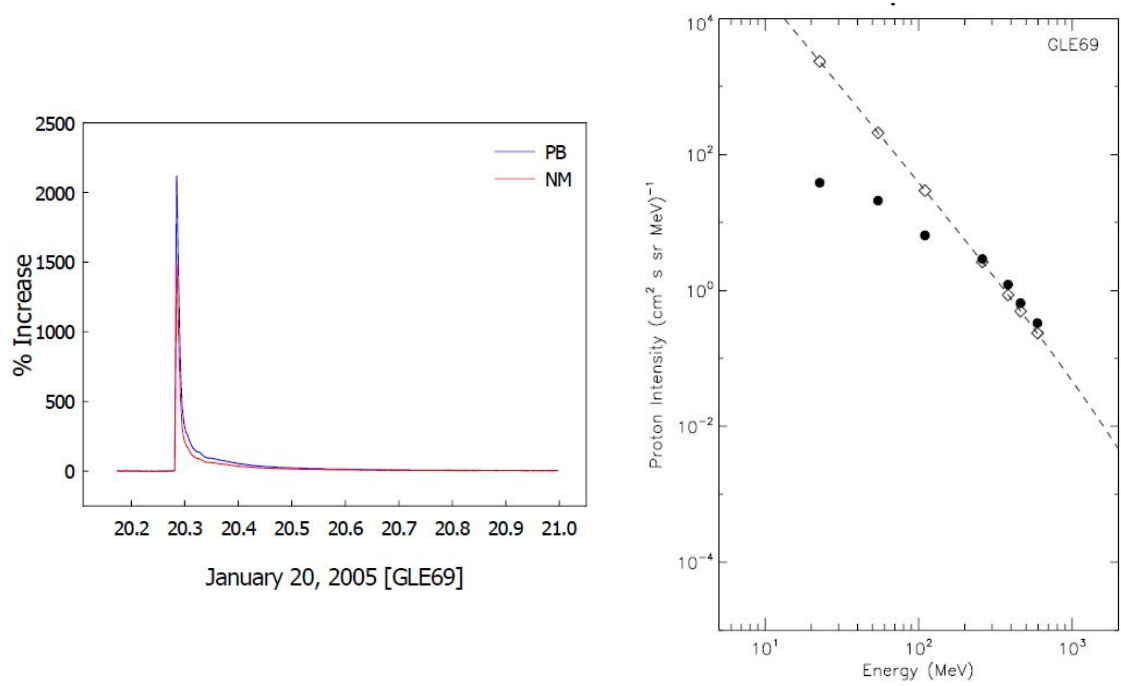
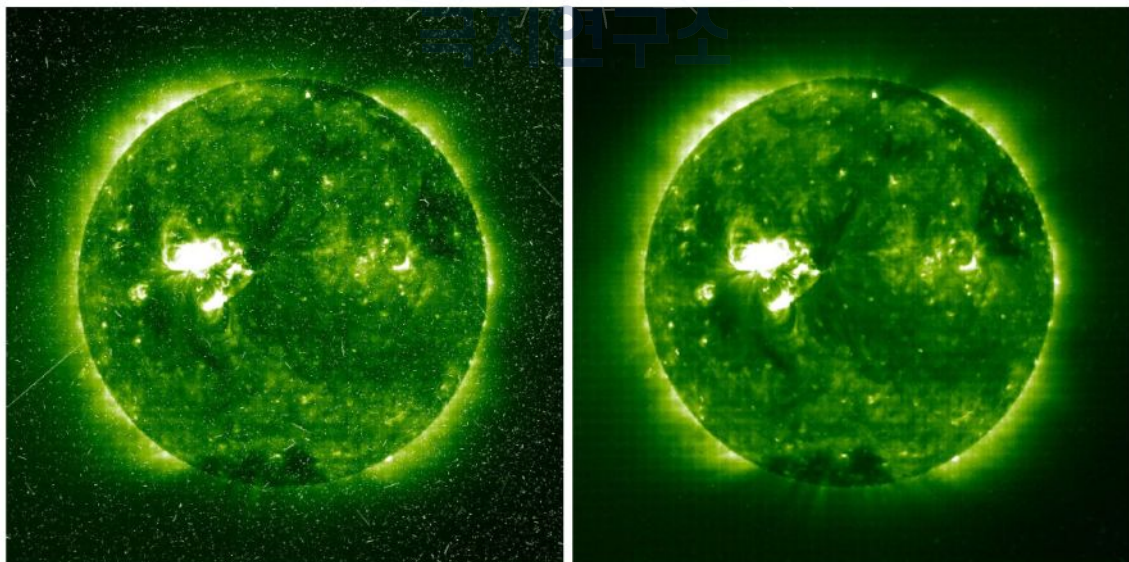


Fig. 82 Different energy responses located at Amundsen-Scott station at South Pole and derive a simple power law spectrum, which is the basis of the extrapolation to lower energy.



Before deleting the track of CR

**After deleting the track of CR
(Counts = 11,026)**

Fig. 83 Solar image taken by SOHO/EIT on 13 December 2006, 03:36:09UT

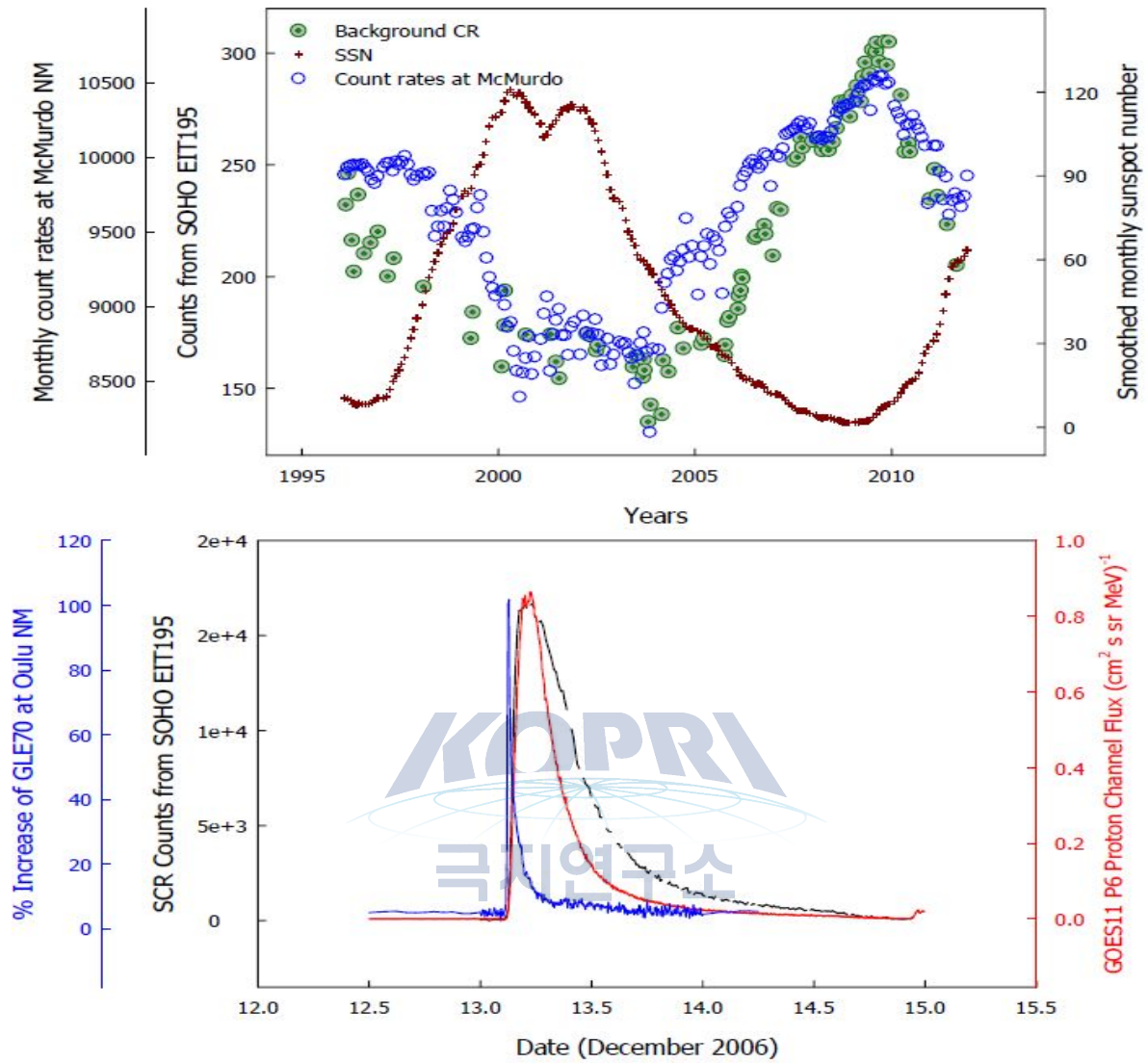


Fig. 84 SCR from solar images by SOHO/EIT

□ 극지 우주선 연구를 위한 향후 연구 상세 내용

- 우주선이 지구 상층대기 변화에 미치는 영향 연구
- 우주선 관측에 대한 global network 구축
- 우주선에 의한 기후변화의 potential responses 연구(우주선과 cloud cover 및 droplet number concentration 상관성 연구)
- 태양풍에 의해 변형된 우주선이 구름 형성과정에 미치는 영향

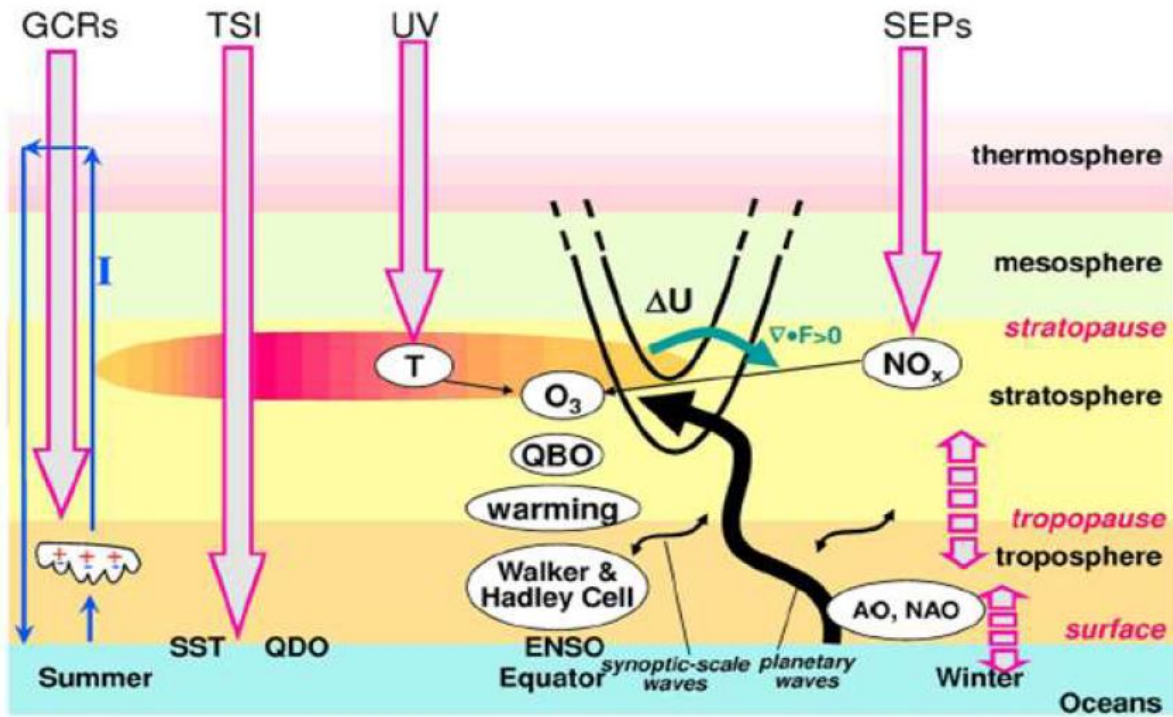


Fig. 85 Sources of variations in upper atmosphere

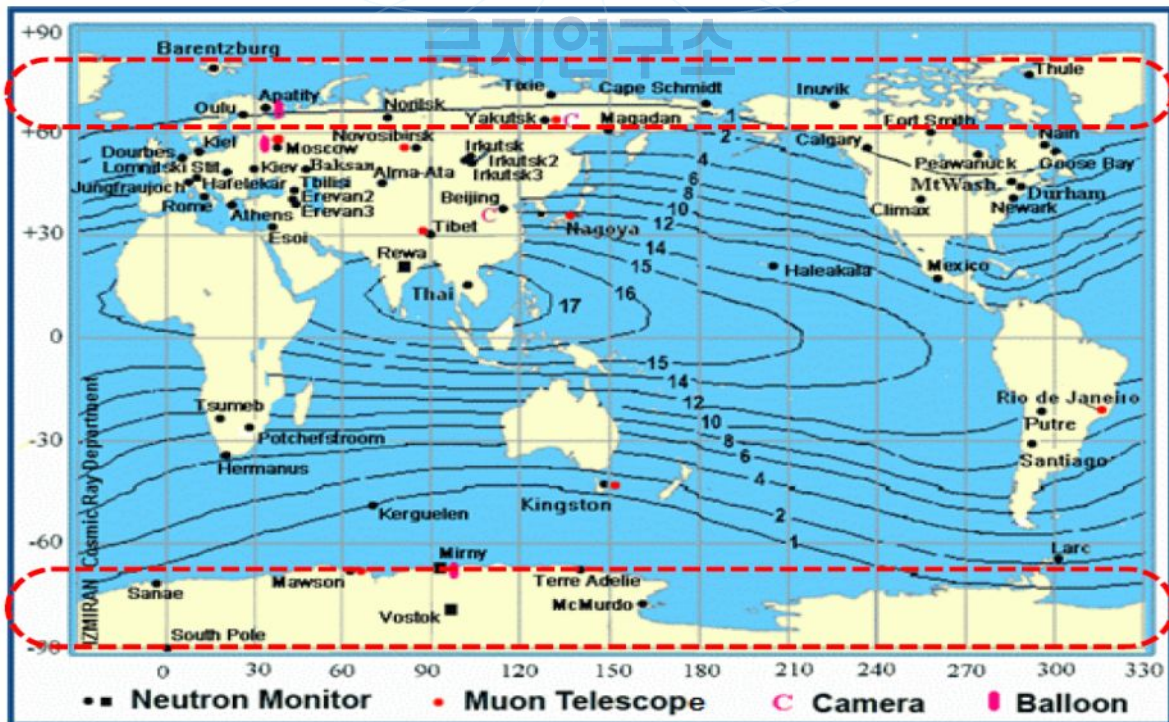


Fig. 86 Global network of CR stations

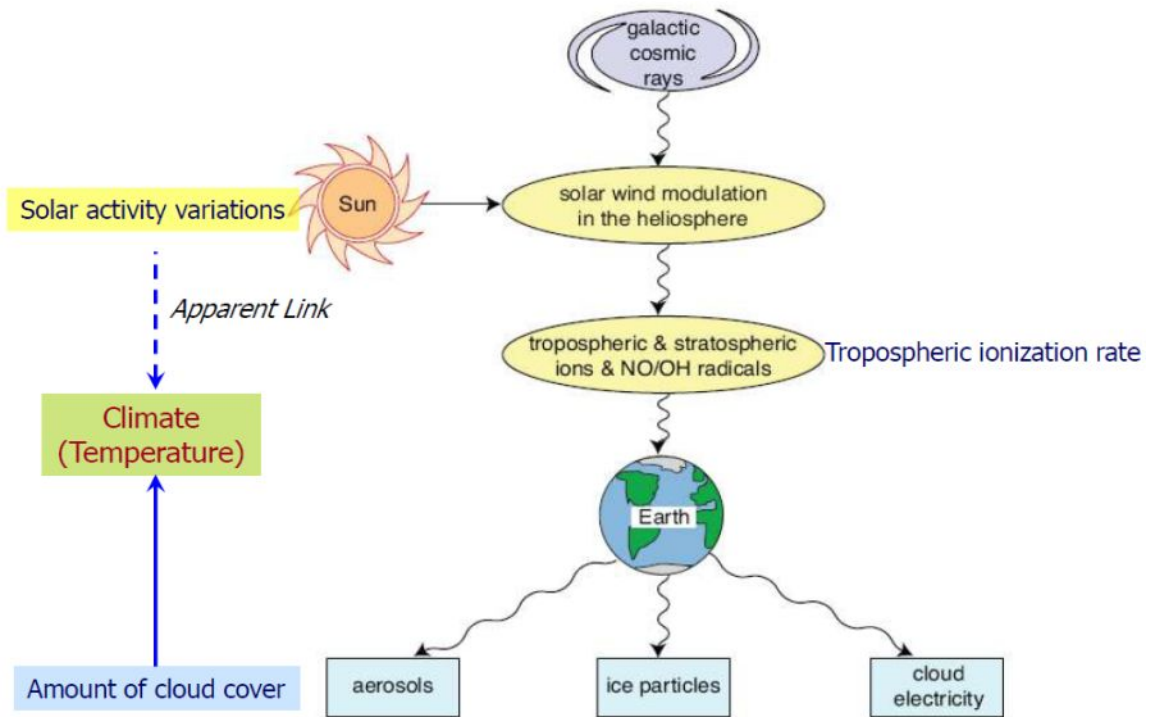


Fig. 87 Cosmic Ray and Climate

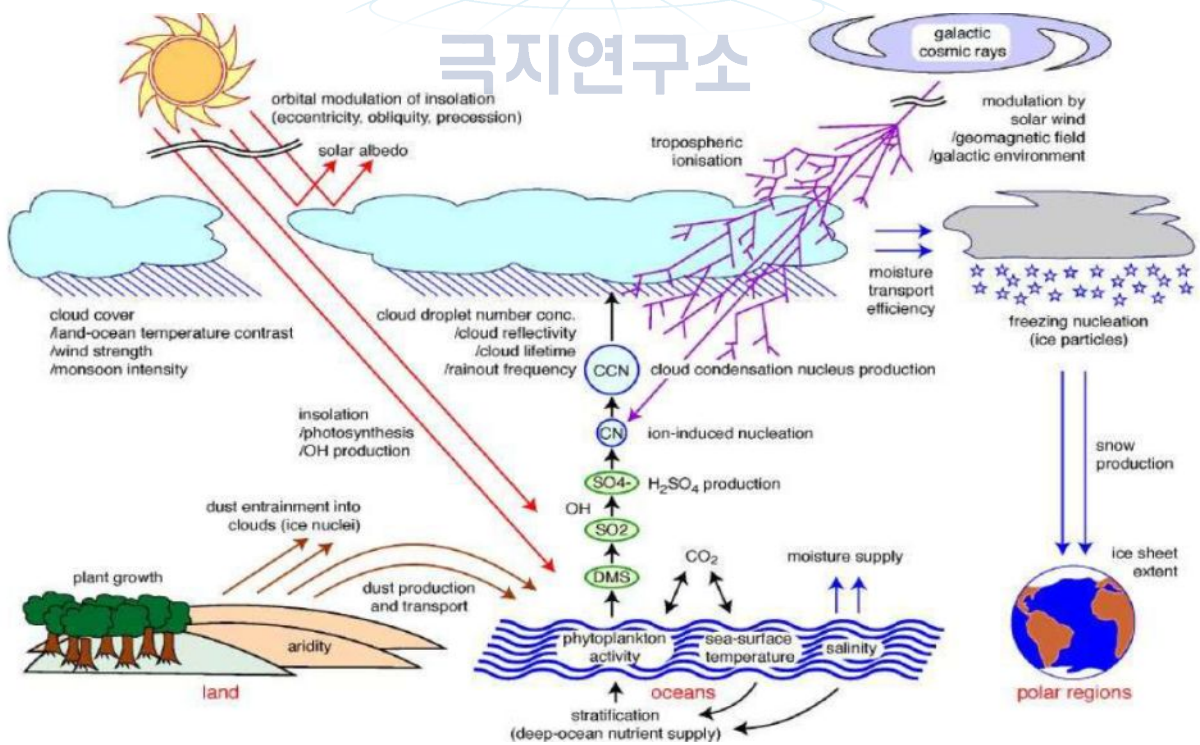


Fig. 88 Cosmic Ray and Cloud

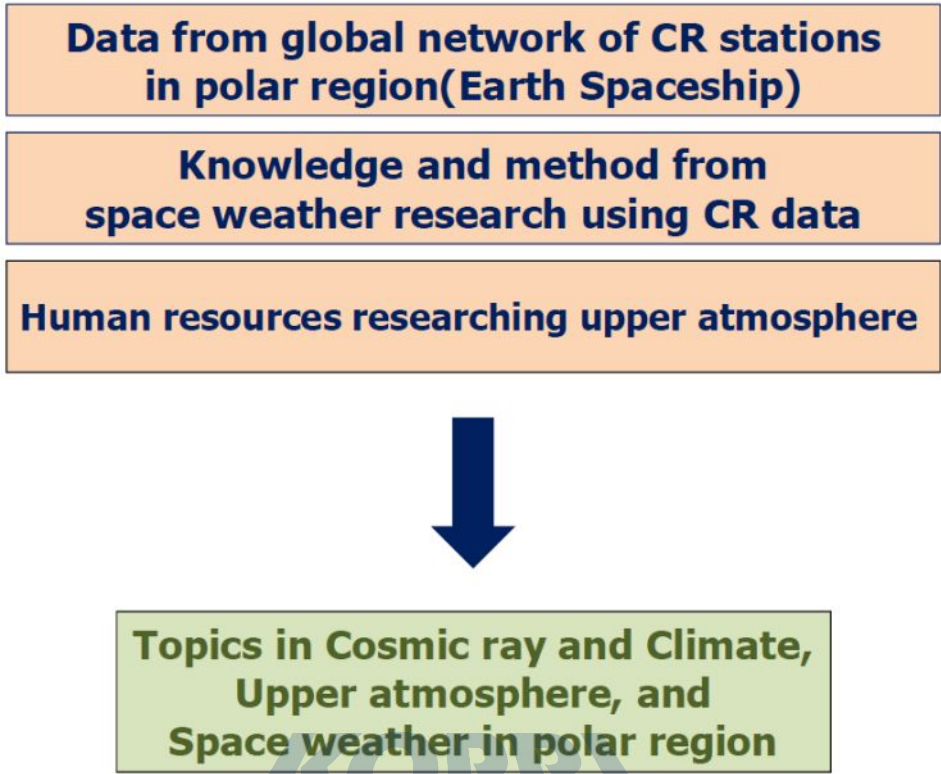


Fig. 89 Research planned by the Cosmic Ray data

극지연구소

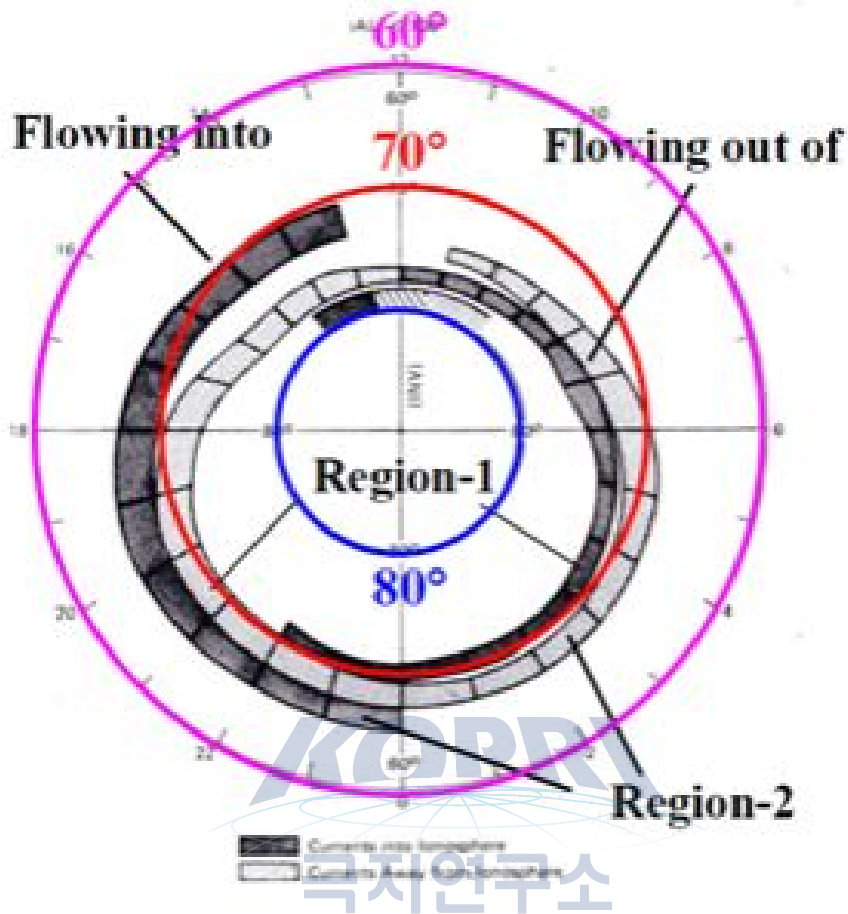


Fig. 90 Statistical distribution of FACs in invariant latitude-MLT coordinates during weakly disturbed conditions ($|AL| < 100 nT$). The FACs flow downward in the dark-shaded zone and upward in the light-shaded zone. [After Iijima and Potemra, 1976.]

나. Field-Aligned Currents (FACs)

- 지구의 자기권과 전리권은 magnetic field lines을 통해 밀접하게 연결되어 있음.
- 극 지역에서 지구의 자기권과 전리층을 이어주는 magnetic field lines을 따라 흐르는 전류가 존재하며, 이를 Field-aligned currents (FACs)라 함.
- 이러한 전류는 주로 전자에 의해 운반되며 에너지, 운동량 교환에 필수적인 요소로 지구의 플라즈마 상태에 큰 영향을 끼침.
- FACs는 Region 1 전류와 Region 2 전류로 나뉨.
- Region 1 전류는 auroral zone의 극 쪽에 해당하며, dawn side에서는 내려오는 방향, dusk side에서는 나가는 방향.

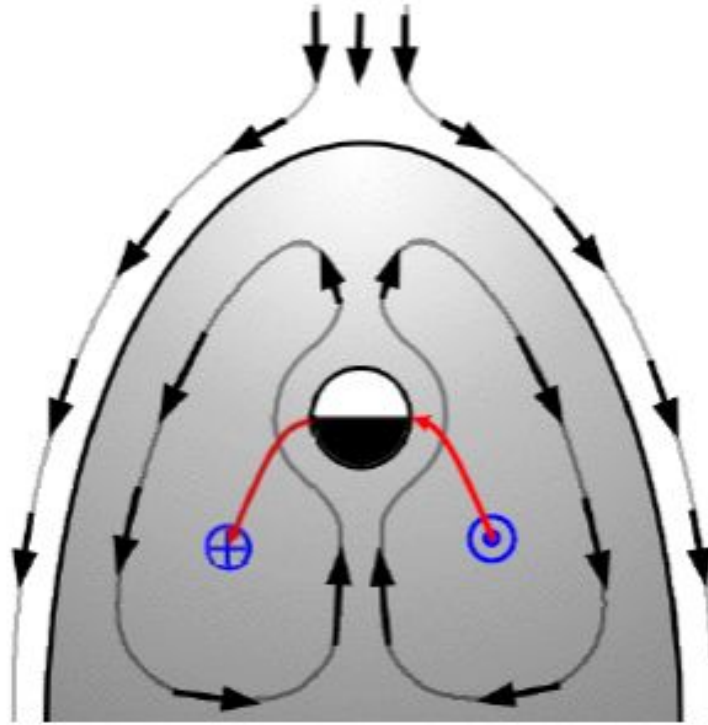


Fig. 92 Magnetospheric two-cell convection

- Region 2 전류는 auroral zone의 적도 쪽에 해당하며, 방향은 Region 1 전류와 dawn, dusk side에서 반대로 나타남.
- 자기권 플라즈마 2세포 순환에서, dusk side의 와도 벡터의 방향은 지 자기력선에 순방향으로 평행하며, dawn side에서는 역방향으로 평행함.
- 따라서 이러한 순환이 약해질 경우, 이는 북반구의 dusk side에서는 지 자기력선에 역방향으로 평행한 FAC를 형성할 것이며, dawn side에서는 지 자기력선에 순방향으로 평행한 FAC를 형성할 것임.
- 이와 같은 결과는 남, 북반구의 전리권의 dusk side에서는 전류가 나오고, dawn side에서는 전류가 들어간다는 것으로 정리될 수 있음.
- dawn side에서는 들어가며, dusk side에서는 나오는 전류는 Region 1 FAC와 일치함.

다. 지자기 교란 (Geomagnetic Field Perturbations)

□ 서브스톰 (Geomagnetic substorm)

- IMF와 지구의 자기력선의 결합으로 생성된 자기력선이 재결합하지 않고 night

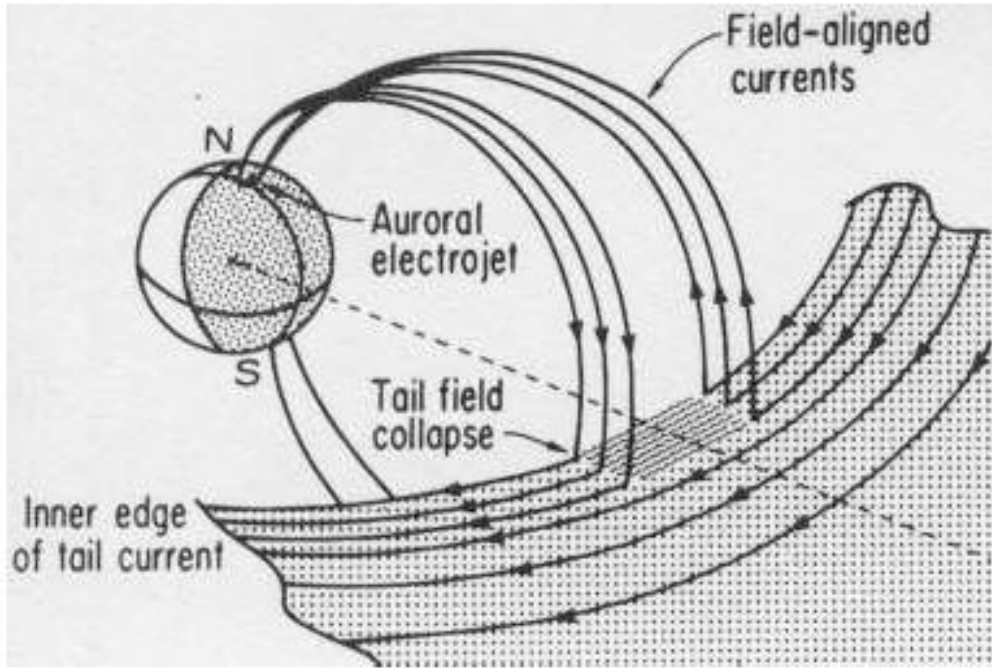


Fig. 93 Substorm current wedge

side의 꼬리부엽에 축적되어 자기력선속 밀도를 증가시키는 경우가 발생함.

- 꼬리부엽의 자기력선속 밀도의 증가는 자기권 꼬리전류의 증가를 야기.
- 플라스마 판의 저항이 갑자기 증가하며 꼬리전류의 흐름을 방해해 전류 와해를 야기.
- 저항이 증가한 꼬리부엽의 플라스마 판을 통과할 수 없는 꼬리 전류는 Night side의 region 1 FACs를 따라 전기저항이 적은 극지 전리층으로 우회함.
- Night side의 region 1 FACs를 따라 극지방에 도달한 전류는 서쪽방향의 Auroral electrojet을 형성.
- Auroral electrojet은 오로라 밝기의 증가 및 지자기의 교란을 야기함.

□ 지상 관측소에서 기록된 서브스톰 동안의 지자기 변화

- 지상 관측소에서 기록된 서브스톰 동안의 지자기 변화를 위도별로 살펴보면, 고 위도에서는 지자기의 감소를 야기하고, 중/저위도에서는 지자기의 증가를 야기 함.

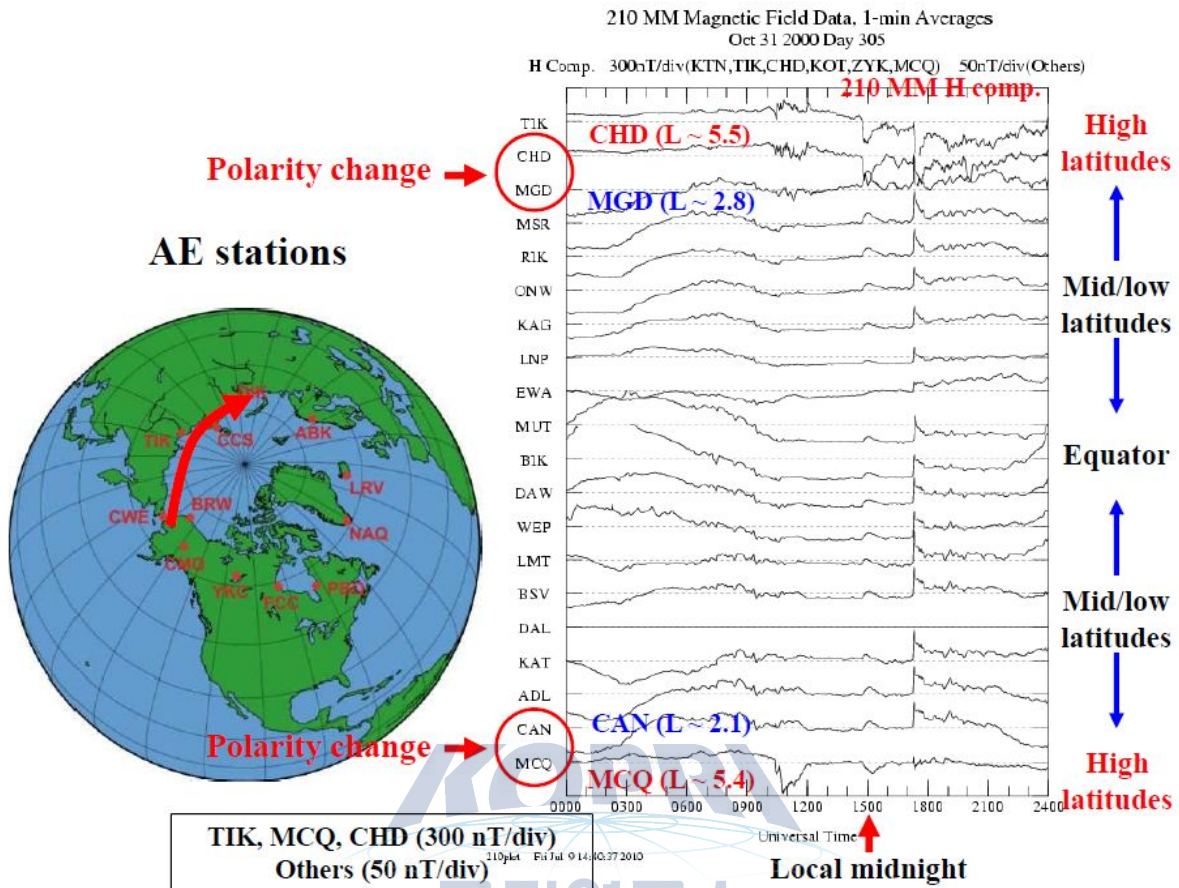


Fig. 94 Observations of geomagnetic field perturbations during substorm event on the ground stations

라. 지자기 교란과 이온층 변화의 상호관계

□ 지구 자기장 변화와 전리권 TEC의 변화

- 2003년 10월 29-31일에 Dst지수가 약 -400nT까지 감소하는 매우 큰 자기폭풍이 발생하였는데, 동 시간에 전리권 TEC도 크게 증가함을 관측
- 지자기위도 45°와 40°에서의 VTEC도 150이상 증가함을 관측.
- 고도 400km 상공의 CHAMP위성이 관측한 MASS density가 dayside(1330MLT)일 때 위도 30°이상의 지역에서 최고 30까지 증가하였고, nightside(0130MLT)에서는 고 위도 60°이상의 지역에서 약 15까지 증가함.
- MSIS model로 모사해본 결과, 관측과 일치하지 않음을 확인.

□ 고위도와 저위도에서의 지자기 변화와 superDARN 자료 비교

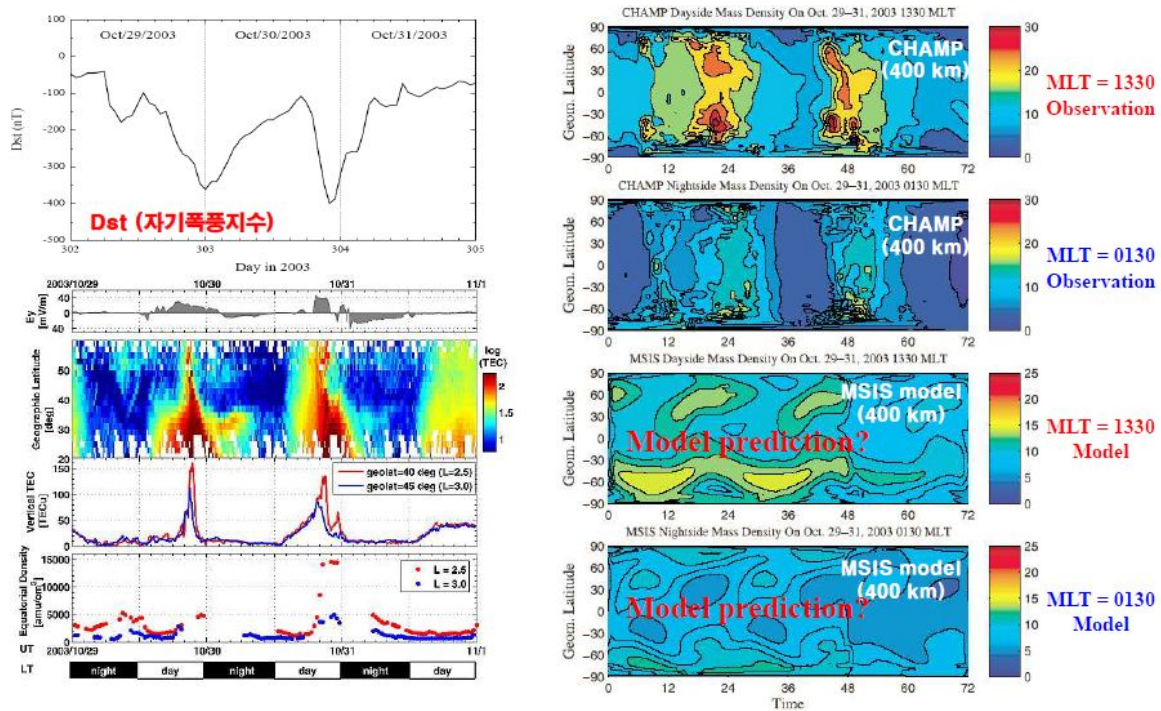


Fig. 95. Magnetospheric, Ionospheric, Upper atmospheric responses to 29-31 October 2003 super magnetic storms

- 2008년 11월 24일에 지상 자력계 관측지역인 CHD(지자기 위도 65°)와 BOH(지자기 위도 30°)에 자기장 H성분에 변화 차이를 보임
- 동 시간 지자기위도 35-85° 사이에 ionospheric plasma velocity를 살펴본 결과 지자기 위도 46°이상의 지역에서는 positive velocity를 보였고, 46°이하의 지역에서는 negative velocity를 보였음.
- 이는 이온층에서의 E Field가 westward로 분포함에 따라 영향을 받은 것임.

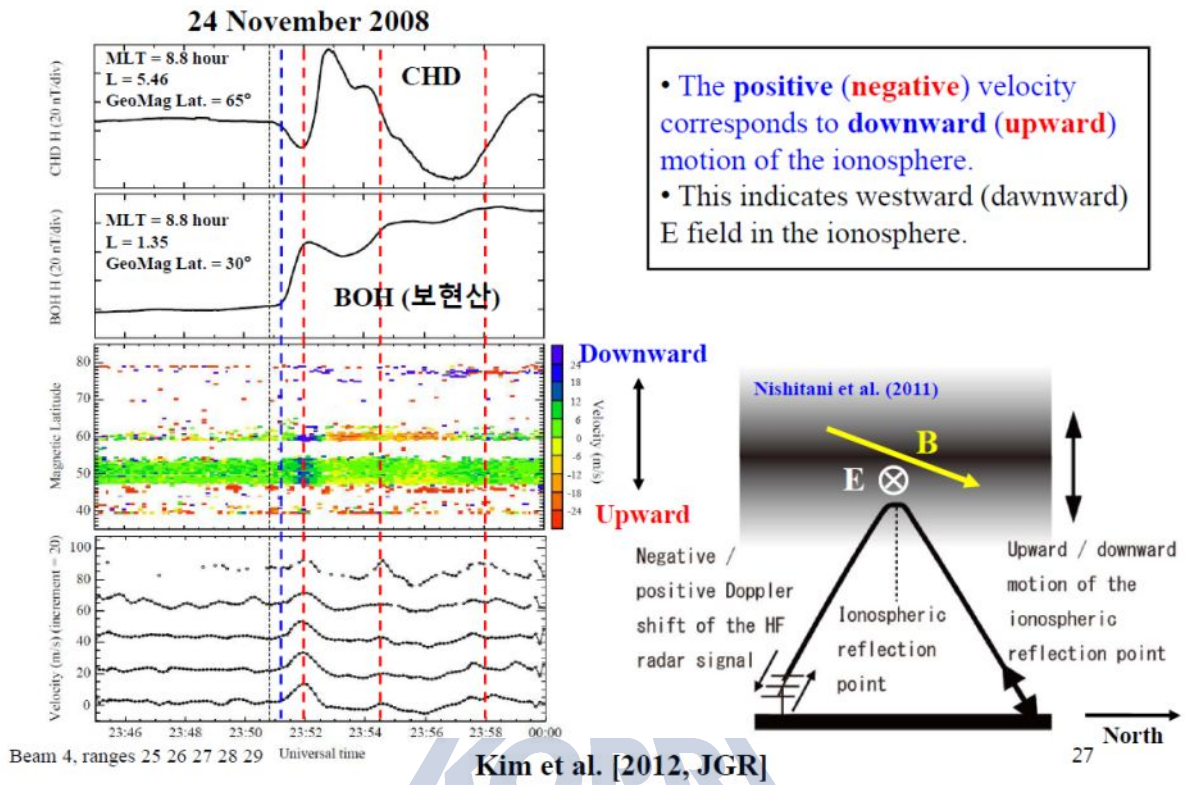


Fig. 96 Comparison of high/low-latitude geomagnetic field and SuperDARN HOKKaido radar data

극지연구소

제 4 장 연구개발결과의 활용계획

1. 본 과제에서 제안된 극지우주환경 및 극지고층대기 연구를 위한 다양한 관측 및 모델 연구 방법을 향후 극지연구소에서의 우주환경/고층대기 연구사업 개발에 활용
2. 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
3. 남북극 지상관측 중심의 우주환경/고층대기 연구의 한계점 극복을 위해 인공위성 관측 및 대형 국제 관측네트워크에 참여 추진



제 5 장 참고문헌

안병호, 지건화 (2014), *극지과학자가 들려주는 오로라 이야기*, 지식노마드, pp. 46-58.

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.

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., Y. H. Kim, Y.-I. Won, B. K. Moon, T. H. Oh (2006), "Observation of temperatures and emission rates from the OH and O2 nightglow over a southern high latitude station", *Adv. Space Sci.*, 38.

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.

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. L ett.*, 29(10), 1429, doi:10.1029/2001GL013753.

Fuller-Rowell, T. J., M. V. Codrescu, R. J. Moffett, S. Quegan (1994), Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms, *J. Geophys. Res.*, 99, 3893-3914.

Heelis, R. A., and W. R. Coley (2007), Variations in the low-and middle-latitude

- topside ion concentration observed by DMSF during superstorm events, *J. Geophys. Res.*, 112, A08310.
- Jee, G., R. W. Schunk, and L. Scherliess (2005), On the sensitivity of total electron content (TEC) to upper atmospheric/ionospheric parameters, *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.*, 67, 1040-1052.
- Jee, G., H.-B. Lee, S. C. Solomon (2014), "Global ionospheric total electron contents (TECs) during the last two solar minimum periods", *J. Geophys. Res.* 119, 2090-2100.
- 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.
- 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.
- Kwak, Y.-S., A. D. Richmond, and R. G. Roble (2007), Dependence of the high-latitude lower thermospheric momentum forcing on the interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 112, A06316, doi:10.1029/2006JA012208.
- Kirkby, J. (2007) Cosmic rays and climate, *Surv. Geophys.*, 28, 333 - 375.
- Kim, J.-H., Y. H. Kim, C.-S. Lee, G. Jee (2010), "Seasonal variation of meteor decay times observed at King Sejong Station (62.22° S, 58.78° W), Antarctica", *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 72, 883-889.
- Kim, J.-H., Y. H. Kim, G. Jee, C. Lee (2012), "Mesospheric temperature estimation

- from meteor decay times of weak and strong meteor trails”, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 89, 18–26.
- Kim, J.-H., G. Jee, C. Lee, Y. H. Kim (2013), “VHF meteor radar at King Sejong Station, Antarctica”, *Adv. Polar Sci.*, 24, 241–247.
- Kunihiko Kodera, Yuhji Kuroda (2002), Dynamical response to the solar cycle, *J. Geophys. Res. Atmospheres* 107, doi:10.1029/2002JD002224.
- 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.
- Lee, C., Y. H. Kim, J.-H. Kim, G. Jee, Y.-I. Won, D. L. Wu (2013), “Seasonal variation of wave activities near the mesopause region observed at King Sejong Station (62.22° S, 58.78° W), Antarctica”, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 105–106, 30–38.
- 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.
- Oh, Su Yeon, Yu Yi, Yong Ha Kim (2008), Globally nonsimultaneous Forbush decrease events and their implications, *J. Geophys. Res. Space Physics* 113, doi:10.1029/2007JA012333.
- Oh, Su Yeon, Yu Yi (2009), Statistical reality of globally nonsimultaneous Forbush decrease events, *J. Geophys. Res. Space Physics* 114, doi:10.1029/2009JA014190.
- Oh, Su Yeon, Yu Yi (2011), Correction to “statistical reality of globally nonsimultaneous Forbush decrease events”, *J. Geophys. Res. Space Physics* 116, doi:10.1029/2011JA017012.
- Park, S., K.-H. Kim, H. Kil, G. Jee, D.-H. Lee, and J. Goldstein (2012), The source of the steep plasma density gradient in middle latitudes during the 11–12 April 2001 storm, *J. Geophys. Res.*, 117, A05313.

- 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.
- 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. and D. G. Torr (1985), Seasonal, diurnal, and solar cyclical flux in the earth's topside ionosphere, -5268.
- Richards, P. G., T. Chang, and R. H. Comfort (2000), On the causes of the annual variation in the plasmaspheric electron density, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 62, 935-946.
- Singh, U. P. and R. P. Sinng (1997), Study of plasmasphere-ionosphere coupling fluxes, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 59, 1321-1327.
- Titheridge, J. .E. (1995), Winds in the ionosphere - a review, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 57, 1681-1714.
- T. Iijima, 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., Y.-M. Cho, B. Y. Lee, J. Kim, J. K. Chung, Y. H. Kim (1999), "Observations of Terrestrial Nightglow (Meinel Bands) at King Sejong Station, Antarctica", *J. Astron. Space Sci.*, 16(2), 149-158.
- 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.
- Won, Y. I., Y.-M. Cho, R. J. Niciejewski, J. Kim (2001), “Observations of OH (3, 1) airglow emission using a Michelson interferometer at 62°S”, *Adv. Space Sci.*, 27, 1165-1170.
- Won, Y. I., Q. Wu, Y. M. Cho, G. G. Shepherd, T. L. Killeen, P. J. Espy, Y. Kim, B. Solheim (2003), ‘Polar cap observations of mesospheric and lower thermospheric 4-hour waves in temperature“, *Geophys. Res. Lett.* 30, 1377.
- 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.



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.

