

오로라 발생과 관련되는 자기권-전리권 상호작용
연구

Study of magnetosphere-ionosphere coupling during auroral
activity



경희대학교산학협력단

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “오로라 발생과 극지 고층대기 교란 및 기후 변동성과의 상관관계 규명” 과제의 위탁연구 “오로라 발생과 관련되는 자기권-전리권 상호작용 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자	:	지 건 화
위탁연구기관명	:	경희대학교
위탁연구책임자	:	김 관 혁
위탁참여연구원	:	권 종 우
“	:	김 동 희
“	:	이 재 희
“	:	박 이 경

요 약 문

I. 제 목

오로라 발생과 관련되는 자기권-전리권 상호작용 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

태양활동에 의한 자기권-전리권 섭동 시 장보고 기지에 설치된 전리권/고층대기 관측장비를 이용하여 극 전리권/고층대기 특성 조사.

III. 연구개발의 내용 및 범위

- 지자기 폭풍 기간의 전리권/고층대기 특성 연구
- 극 고요한 우주환경에서의 전리권/고층대기 특성 연구
- 장보고 기지에서 관측된 Pc1 파동 발생 및 전파 특성연구

IV. 연구개발결과

- 지자기 폭풍 기간의 극 전리권 소멸 원인 규명
- 극 고요한 우주환경에서의 극 전리권 소멸 원인 규명
- 극 지역 발생 Pc1 파동의 공간 분포 특성 이해

V. 연구개발결과의 활용계획

- 장보고 기지에 설치된 전리권 관측 자료를 이용한 남극 우주환경 관측 네트워크 구축
- 전리권/고층대기 전문인력 양성 및 위성 전리권 탐사에 활용

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Study of magnetosphere-ionosphere coupling during auroral activity

II. Purpose and Necessity of R&D

Using multi-instruments installed at Jang Bogo station, we examine how the magnetosphere and ionosphere respond to the solar activity.

III. Contents and Extent of R&D

- Study of characteristics of ionosphere/thermosphere during a magnetic storm interval
- Study of characteristics of ionosphere/thermosphere under quiet geomagnetic conditions
- Study of Pc1 waves observed at Jang Bogo station

IV. R&D Results

- Understanding where and how polar ionosphere is depleted during a magnetic storm interval.
- Understanding the occurrence of polar holes under quiet geomagnetic conditions
- Understanding the spatial occurrence and generation mechanism of Pc1 pulsations

V. Application Plans of R&D Results

- Build a network monitoring antarctic ionospheric variations using multi-instruments installed at Jang Bogo station
- Education of young students and contribute to space technology for space mission in the ionosphere

목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌



제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 목적

대규모 태양활동에 의한 근 지구 우주환경 격변 시 지구 자기권이 크게 섭동 되어 극 지역에서 오로라가 발생한다. 이 기간 지구 자기권 정지궤도 위성 자료와 남극 장보고 기지 전리권 자료를 이용하여 언제, 어디서, 어떻게 극 전리권이 자기권 섭동에 의해 교란되는지 인과 관계를 조사한다. 또한 장보고 기지에서는 극 고요 우주환경 시 남극 전리권 소멸 현상이 자주 관측되었다. 장보고 기지 전리권 자료 분석을 통해 이러한 극 고요 전리권 소멸의 원인이 무엇인지 규명한다. 본 과제에서는 장보고 기지에 설치된 다중 전리권/고층대기 관측장비 자료를 이용하여 태양활동에 의한 근 지구 우주환경 섭동 에너지의 자기권-전리권 연동 현상 이해를 목적으로 한다.

제 2 절 연구과제의 필요성

과제의 최종 연구목표인 “오로라 발생과 관련되는 자기권-전리권 상호작용 이해”를 위해 본 과제에서는 극지연구소 남극 장보고 기지에서 운용되는 오로라 관측장비 (All Sky Camera: ASC), 전리권 우주환경 관측장비 (Fabry-Perot Interferometer: FPI, Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar: VIPIR), 우주환경 자기장 측정기 (Search-coil magnetometer: SCM, delta Inclination delta Declination magnetometer: dIdD) 자료와 천리안위성 2A호 (GEO-KOMPSAT-2A: GK2A) 정지궤도 자기장 자료와 입자 자료를 사용하여 장보고 기지에서 오로라 발생 시 전리권-자기권 우주환경 변화의 상관관계를 조사한다.

오로라 현상은 자기권으로 유입된 태양풍 입자가 지구 자기장을 따라 자기권에서 지구로 유입되어 극지방 상층대기와 충돌함으로써 발생하는 대규모 방전 현상이다. 극지방 상공에서 위성에 의해 관측을 하면 오로라는 지자기극을 중심으로 타원형의 띠 모양으로 분포한다 (그림 1 참조). 강한 오로라 현상은 밤 지역에서 발생하며 약 1~3시간 주기로 밝아졌다가 다시 어두워지는 현상이 관측되는데 이러한 현상을 오로라 서브스톰이라 정의한다. 특히 지자기 폭풍(magnetic storm)이 진행될 때 오로라 서브스톰 현상은 빈번히 나타난다.

태양풍 에너지는 지구 자기장과 행성간 자기장의 재결합을 통해 지구 자기권 꼬리지역에서 축적되며 임계점에 도달하면 폭발적으로 에너지를 방출한다. 이러한 현상을 자기권 서브스톰이라 하며 급격한 오로라 발생이 관측된다. 오로라 발생의 원인이 되는 우주환경 입자는 서브스톰 발생 시 꼬리 전류 붕괴에 의해 일부 자기권 전류가 이른 새벽 지역에서는 지구 자기

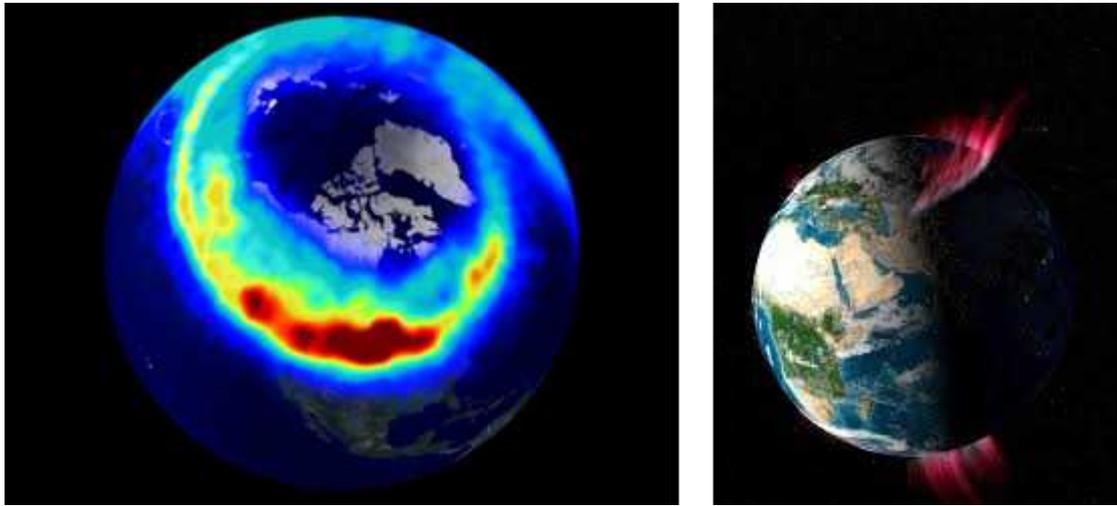


그림 1: (왼쪽) 위성에서 관측된 오로라. (오른쪽) 밤 지역의 연자기력선 전류를 따라 지구로 유입되는 전자에 의해 발생된 오로라.

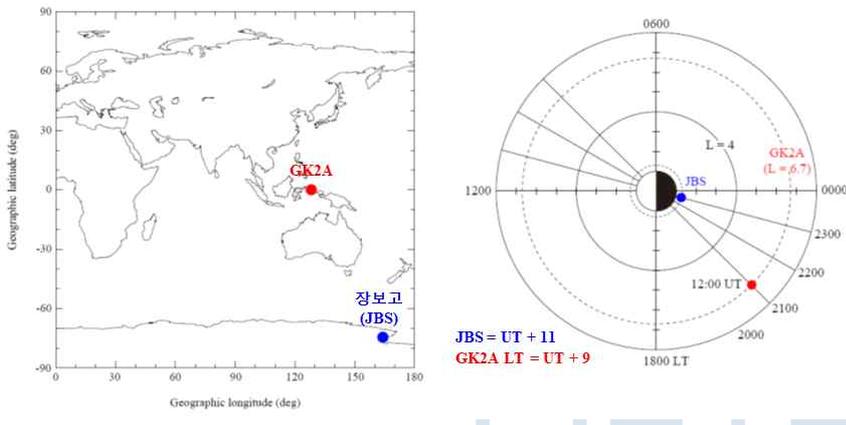


그림 2: (왼쪽) 지구 중심 좌표계로 나타낸 GK2A 정지궤도 위성과 장보고 관측소 위치. (오른쪽) 12:00 UT의 GK2A와 장보고 기지 지방시. 두 관측점은 두 시간 지방시 차이가 있다.

장을 따라 지구 방향으로 흐르고 자정 전 지역에서는 지구로부터 자기권으로 흐르는 연자기력선 전류(field-aligned current)에 의해 이동한다. 그러므로 극 지역 오로라 활동의 시·공간적 변화는 자기권 밤 지역에서의 연자기력선 전류의 시·공간적 변화에 크게 영향을 받는다.

우주환경 오로라 연구에서 주 관심 분야는“지구 자기권에서의 입자·자기장 섭동 에너지가 어떻게 지구에 전달되는가?”이다. 이러한 연구 분야는“자기권-전리권 연동”으로 알려져 있으며 현재 많은 연구그룹에서 위성과 지상 자료를 이용한 국제 공동연구가 진행되고 있다. “자기권-전리권 연동”연구를 위한 가장 이상적인 관측 네트워크는 같은 지방시에서 방사 방향의 거리에 따른 우주환경 물리 인자를 측정하는 것이다. 본 과제에서는 천리안위성 2A호(GEO-KOMPSAT-2A: GK2A) 정지궤도 자기장·입자 자료와 극지연구소 남극 장보고(JBS) 기지의 오로라, 전리권 우주환경 자료를 이용하여 오로라 발생과 관련되는 자기권-전리권 상호작용 이해 연구를 수행한다. GK2A와 장보고 관측소는 정확히 같은 자오면에 위치하지는 않지만 두 관측지점의 지방시 차이가 크지 않아 (약 2시간 차이, 그림 2 참조) “GK2A-JBS”네트워크는 정지궤도에서의 자기권 우주환경 변화와 남극 장보고 기지에서의 오로라 발생 인과관계 연구에 중요한 자료를 제공할 것으로 기대된다.

제 3 절 연구개발 범위

1. 지자기폭풍 기간 동안 고위도 오로라 발생과 전리권 우주환경 변화 이해
 - 2019년 3월 이후 지자기 폭풍 이벤트 조사: 지자기 지수를 이용한 자기권-전리권 우주환경 변화 조사, Dst 자기폭풍 지수: 2019년 5월 지자기 폭풍 이벤트, AL 오로라 지수: 서브스톰 발생, Kp 지수: 자기권 섭동 정도
 - GK2A 정지궤도 자기장 자료 지구 쌍극자 VDH 좌표 변환: GK2A 자기장 자료는 ESA/기상청에서 지구중심 PEN 좌표제공. 정지궤도 우주환경 연구를 위해 지구중심 좌표에서 지구쌍극자 (VDH) 좌표 변환이 요구됨. 2019년 3월 이후 GK2A 자기장 자료를 VDH 좌표로 변환하였음.
 - 장보고 기지 ASC, VIPIR, FPI 고층대기 관측장비 자료와 GK2A 자기장, 입자 자료 비교: 2019년 5월 자기폭풍 기간동안 장보고 기지에서 관측된 ASC, VIPIR, TEC 자료와 GK2A 자기장/입자 자료를 분석, 스톰기간 남극 F2 층의 소멸현상을 확인, TIEGCM 모델 자료를 이용
2. 고위도 연자기력선 전류 변화와 남·북극 고층대기 및 오로라 분포 차이점 이해
 - Swarm 자기장 자료 조사: 2014-2017 Swarm-B 위성 자기장 자료통계 분석, 고도 ~500 km에서의 남·북반구 지구 자기장 세기 비대칭성 확인
 - 장보고 기지 고층대기 자료 조사: 장보고 기지 전리권 다중 관측장비를 이용한 남극 전리권 F-2층 특성 연구, 자기폭풍 기간의 남극 F-2층 소멸연구, 극고요 우주환경 기간의 남극 F-2층 소멸연구
 - GK2A 자기장·입자 자료 조사: 장보고 기지 상공 남극 F-2층 소멸 기간 GK-2A 정지궤도 위성 자기장 및 플라즈마 입자 자료 분석, 정지궤도 자기장 섭동현상과 남극 F-2층 소멸의 인과관계 확인
3. 남극 Pc1-2 지자기 파동 발생 시 전리권 우주환경 변화와 극고요 우주환경에서의 중성대기 특성 연구
 - 장보고 기지 서치코일 자기장 측정기 자료를 이용한 Pc1-2 지자기 파동 발생과 행성간 자기장 방향 의존성 조사
 - Kp 지수와 남극 PC 지수에 대한 장보고 기지 FPI 중성대기 바람 온도 통계 조사

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 관련분야 기술개발 현황

극지연구소는 남극 장보고 과학기지, 세종 과학기지에 다중 전리권/고층대기 관측장비 (VIPIR, 오로라 이미지 관측 장비, FPI 등) 및 자기권 전자기 파동 관측을 위한 서치코일 자기장 측정기를 운영하고 있다. 장보고 과학기지는 자기권 극관 지역과 오로라 발생 지역의 경계에 위치하여 우주환경 변화와 극 지역 전리권/고층대기 연동 현상 및 오로라 활동 연구를 수행할 수 있는 관측장소이다. 남극 과학기지에 기 설치된 자기권-전리권 관측 장비로부터 측정된 자료들은 태양풍 변화에 의한 지구 자기권-전리권 연동 연구에 활용될 수 있다.

태양활동에 의한 우주환경 변화 연구는 여러 국가기관 연구그룹 (극지연구소, 국립천문연구원, 한국천문연구원, 기상청 국가기상 위성센터)에서 수행되고 있으며 최근 공군, 육군에서도 우주분야 예산이 책정되어 국가 차원에서 우주환경에 의한 재난방지 우주환경 예·경보 사업을 진행하고 있다. 국립천문연구원은 전리권 측정기, 지전류 측정기, 우주환경 자기장 측정기, 태양풍 측정기를 이용하여 태양폭발에 의한 우주전파환경 감시 사업을 수행하고 있으며 NASA 및 NOAA SWPC와 우주환경 관련 국제 협력 사업도 추진 중이다. 최근에는 위성 사업에도 관심을 가지고 있어 지상 우주환경 관측 뿐만 아니라 우주공간에서의 직접 관측을 통해 우주 재난 방지를 위한 우주환경 예·경보 사업을 계획하고 있다.

한국천문연구원은 전리권 위성 개발을 수행하고 있으며 위성에서 오로라 관측을 통해 시공간적인 오로라 활동 연구를 수행할 예정이다. 또한 천문연구원은 우주환경 예·경보 센터를 구축하였으며 우주환경 모델 및 관측 자료를 이용하여 우주환경 감시사업을 진행하고 있다. 특히 우주환경 고에너지 입자 기원에 대한 가속 및 유실 연구를 주로 수행하고 있으며 현재 내부 자기권에서 운용 중인 미국 NASA의 Van Allen Probes 위성 자료 수신을 위해 한국천문연구원 본원에서 대형 안테나를 운영 중이다. 보현산 관측소에서 우주환경 자기장 변화를 관측하는 자기장 측정기 장비를 일본으로부터 구매하여 2007년에 설치하여 현재 운영 중이다. 기상청 국가기상 위성센터는 2018년 12월 천리안 위성 2A를 발사하여 현재 한반도 상공 정지궤도에서 운영중에 있다. 천리안 2A 정지궤도 위성에는 우주환경 자기장·입자 탑재체가 실려 있어 한반도 상공에서의 우주 환경 변화를 감시한다. 우주환경 자기장 측정기는 유럽 ESA에서 개발하여 제공하였으며 입자 측정기는 경희대학교 우주탐사학과에서 개발하였다. 입자 측정기의 에너지 관측 범위가 수 MeV의 전자입자 측정이 가능하여 위성 자료를 파동과 입자의 상호작용 연구에 사용할 수 있으며 입자의 가속 메카니즘 및 유실 연구에 활용될 것으로 기대된다.

근지구 우주환경 분야와 관련된 기초연구는 경북대학교, 경희대학교, 충남대학교, 충북대학교 등에서 수행되고 있다. 경북대학교의 경우 우주환경 변화와 태양활동 상관관계 연구를 진행하고 있으며 충남대학교에서는 주로 전리권 연구를 수행하고 있으며 최근 자기권 전문가를 영입하여 자기권 내에서 입자와 파동 상관관계 연구를 진행하고 있다. 충북대학교는 자기권 내에서의 상대론적 전자 운동학적 특성 연구를 수행하고 있다. 자기권에서의 태양활동에 의한 근지구 우주환경 교란 연구는 본 과제의 주관연구기관에서 가장 활발히 진행하고 있다.

우주환경 기술 분야의 경우 위성용 고에너지 입자측정기는 한국천문연구원, KAIST, 경희대학교 등 국내 우주과학관련 기관 및 대학에서 개발하였다. 한국천문연구원의 경우 SNIPE 큐브셋 저위도 위성에 고에너지 입자 측정기를 탑재하여 오로라 활동 및 전리권 우주환경 변화 연구를 수행 할 예정이다. 경희대학교에서는 기상청-항공우주연구원과 공동으로 고에너지 입자 측정기를 개발하였으며 천리안 2A위성에 탑재하여 현재 한반도 정지궤도 상공에서 우주환경 변화를 감시하고 있다. 자기장 측정기의 경우 경희대학교 충북대학교 센서피아 산업체에서 위성 자세제어 및 우주환경 관측을 위해 개발하고 있다.

제 2 절 국외 관련분야 기술개발현황

우주 선진국에서는 태양폭발에 의한 위성운용 및 통신, 항법, 지상의 장거리 전력망과 통신망, 그리고 무선 통신 등에 심각한 장애를 일으키는 사례들이 보고되고 있으며 우주환경 예·경보 프로그램을 국가 차원에서 운용하고 있다. 태양폭발에 의한 자기권 섭동은 전리권 밀도 변화에 큰 영향을 주고 이로 인한 통신장애 및 위성 운영 장애가 발생한다. 이러한 이유로 우주환경 예·경보 프로그램은 다수의 위성과 지상관측에서 태양활동에 의한 지구 자기권, 전리권, 고층 대기에서의 물리적 변화를 조사하고 있으며 태양-지구계 연동된 시스템에서의 제 물리현상들을 이해하기 위해 국제 협동연구들이 진행되고 있다.

지상관측 장비는 위성사업에 비해 적은 예산으로 운용될 수 있다. 위성사업의 경우 막대한 비용이 요구되고 운용기간이 길지 않아 지상관측 장비를 이용한 우주환경 연구가 미국, 일본, 중국, 유럽 국가 등에서 활발히 진행되고 있다. 특히 극 지역의 경우 우주환경 변화가 가장 활발하게 발생하므로 자기장 측정기, SuperDARN, 오로라 관측장비 등을 이용하여 다양한 자기권-극지 전리권·고층대기 연동 연구를 수행하고 있다. 우주 선진국들은 이러한 우주환경 관측장비를 직접 개발할 수 있는 원천기술을 확보하고 있다.

제 3 절 국·내외 기술개발현황에서 차지하는 위치

지구 자기권에서의 제 물리 현상들은 태양 활동과 연계되어 발생하며 섭동된 물리량들은 자기권 지역에서만 한정되지 않고 지구 자기력선을 따라 전리권과 지상으로 전파되어진다. 따라서 “자기권-전리권” 연구는 “태양-지구계” 연동 물리계 이해를 위해 중요한 연구주제이며 국제 근지구 우주환경 물리 커뮤니티에서 많은 관심을 받는 분야이다. 본 과제 연구책임자는 다양한 우주환경에서 위성 및 지상 자료를 이용한 자기권-전리권 연동 연구를 수행하였으며 다수의 연구 결과를 국제학술지에 발표하였다. 이전 연구와 달리 본 과제에서는 남극 극관 지역 및 오로라 발생 경계 지역에서의 전리권 관측장비를 이용하여 격변 우주환경과 극 고요 우주환경에서 어떻게 극 전리권이 우주환경 변화에 반응하는지 연구를 진행하였다. 현재 우리나라에서는 자기권-전리권·고층대기 연동 연구가 거의 수행되지 않고 있다. 본 연구사업에서 수행된 전리권-자기권 연동 연구는 우리나라 전리권 우주환경 연구에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 지자기 폭풍 기간의 전리권/고층대기 특성 연구

1. 연구내용

남극 북부빅토리아 랜드의 테라노바 만 (지리적 좌표: 4.62°S, 164.22°E, 지자기 좌표: 79.9°S, 53.6°W)에 위치한 장보고 기지에서는 전리권상태를 VIPIR (Vertical Incident Pulsed Ionospheric Radar)를 이용해 2015년부터 관측해왔다. 극지방의 전리권은 저위도 및 중위도와 비교하여 뚜렷한 특징을 가지고 있음이 잘 알려져 있고, 그림 3은 장보고 기지에서의 여름과 겨울 동안의 전리권 전자 밀도의 전형적인 일변화를 보여준다.

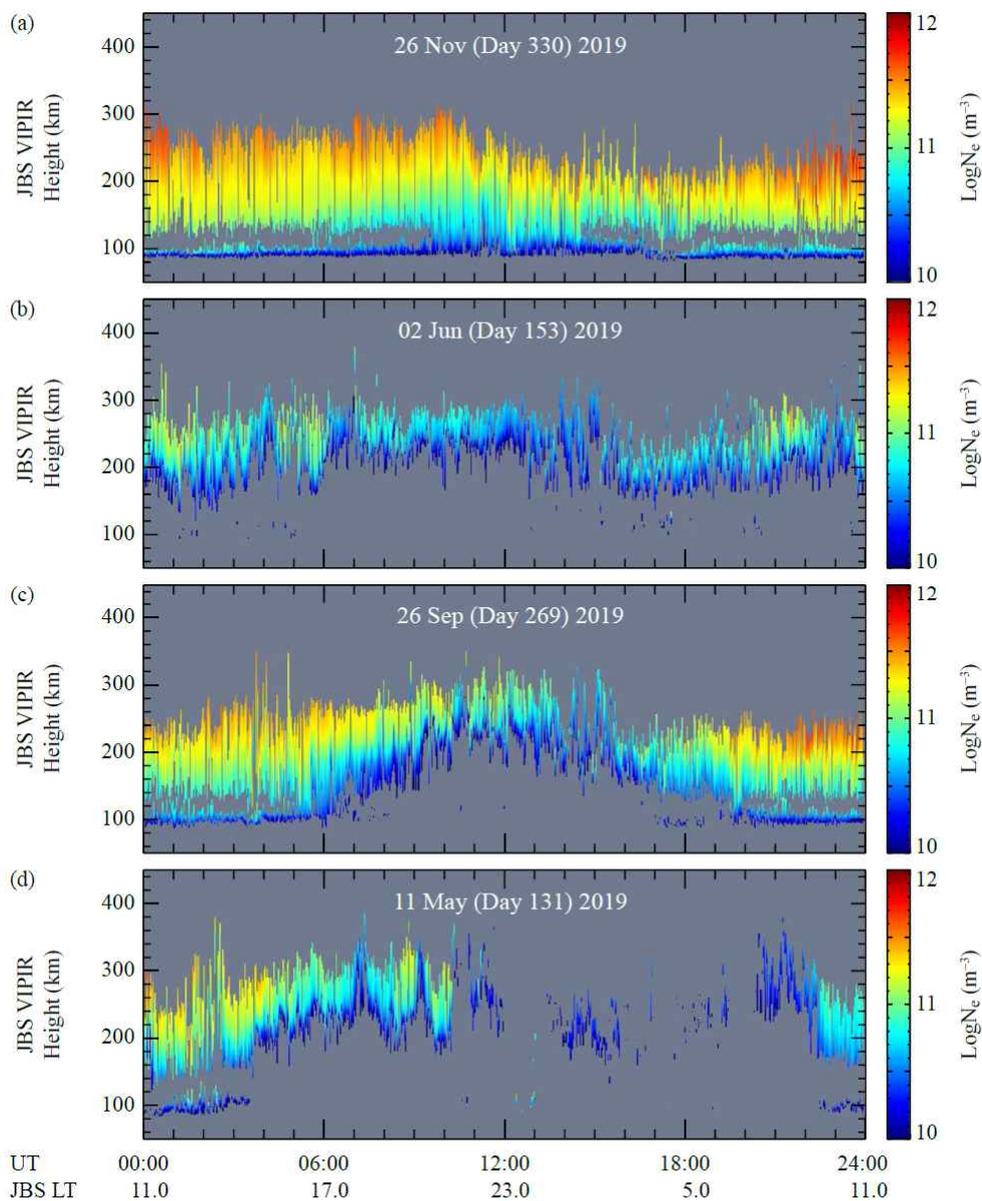


그림 3: 장보고 기지 VIPIR를 통해 얻어진 전자 밀도 정보의 예시

장보고 기지는 백야가 11월부터 1월까지, 극야가 5월부터 7월까지 지속되며, 그림 3a는 백야,

그림 3b와 그림 3d는 극야, 그림 3c는 낮과 밤이 모두 있는 기간의 자료이다. 하절기에는 VIPIR가 지속적으로 전리권 E층(<100km)을 관측하지만(그림 3a) 겨울철에는 E층의 에코가 명확하지 않다. (그림 3b, 그림 3d) 이러한 계절적 차이는 극 전리권에서의 일사량의 영향으로 인해 발생한다. 동지 때와는 대조적으로, 전자 밀도의 일간 변화는 추분에 명확하게 나타나며, 추분에 가까운 기간인 그림 3c와 같이 낮 동안은 F층에서의 전자 밀도가 10^{12} m^{-3} 까지 오르고, 밤에는 10^{11} m^{-3} 까지 감소한다. 가장 높은 밀도의 높이 변화는 낮일 때 낮고, 밤일 때 높아진다. 또한 겨울 기간에 때때로 몇 시간 동안 전자 밀도자료의 부재가 나타났는데, 그림 3d가 2019년 5월 11일의 그러한 전자 밀도 부재 관측 사례를 보여준다.

극지방 전리권 전자 밀도 고갈은 몇 가지 유형이 있는데, 이 중 하나는 자기 위도 약 70° (경도를 따라 길쭉한 모양에서 $5-9^\circ$ 너비)에서 발생하는 고위도 전리권 골짜기(trough)이다. (Rodger et al., 1992) 고위도 골은 이온 마찰에 의한 가열과 관련이 있으며, 이온의 온도 향상과 함께 나타난다. (Vanhamald et al., 2016; Voiculescu et al., 2016) 다른 형태의 감소 경우인 극 구멍(polar hole)은 자기 위도 80° 이상에서 발생하며 (Brinton et al., 1978) 조용한 지자기 조건에서 뚜렷해지고 대류 또는 순환과 관련돼 있다.

본 연구에서는 다양한 전리권 및 열권 매개변수와 전자 밀도 감소 현상을 설명하기 위해 2019년 5월 11일에 있었던 중간 정도 규모의 지자기 폭풍 동안 발생한 심각한 밀도 감소 이벤트에 초점을 맞췄다. 해당 기간에 지자기 폭풍이 진행되는 동안 11시간 이상 오래 지속되는 F층 밀도 감소를 관측했다. 지자기 폭풍에 대한 극 전리권 및 열권의 반응은 장보고 기지에 설치된 VIPIR, 패브리-페렛 간섭계 (Fabry-Perot Interferometer, FPI), GPS 수신기, 자력계와 장보고 기지에서 서쪽으로 지방시 2.5 시간 정도 거리에 위치한 지상정지궤도 위성 GK-2A에서 얻은 데이터를 이용하여 조사했다.

2. 연구결과

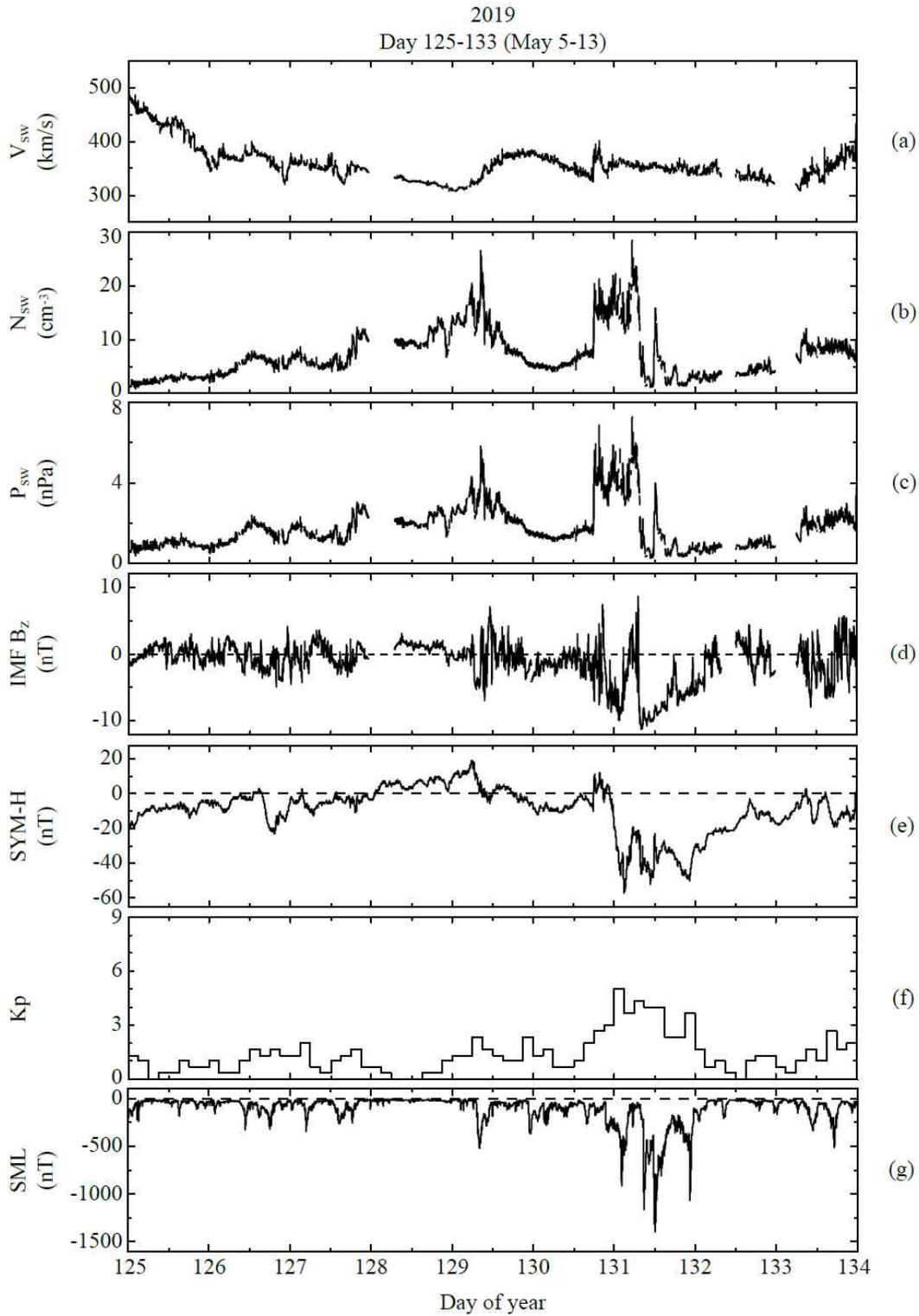


그림 4: 2019년 5월 5일에서 13일의 장보고 기지에서의 전리권 상태. (a) 태양풍 속도, (b) 태양풍 밀도, (c) 태양풍 동압력, (d) IMF B_z 성분, (e) SYM-H, (f) Kp 지수, (g) SML 지수

그림 4a-4g는 중간규모 지자기 폭풍이 있던 2019년 5월 11일 (131일)을 포함하는 2019년 5월 5일에서 13일까지의 9일 동안의 태양풍 속도 V_{sw} , 수 밀도 N_{sw} , 동압력 P_{sw} ($m_p N_{sw} V_{sw}^2$, m_p 는 양성자질량), GSM좌표의 행성간 자기장(Interplanetary Magnetic Field, IMF), SYM-H,

Kp, SML 지수와 같이 다양한 태양풍 매개변수를 보여준다. 태양풍 매개변수는 Wind 위성이 태양 방향 $\sim 203\text{--}213 R_E$ 에 위치할 때 얻은 자료를 bow shock으로 이동하여 얻었다. (Wilson et al., 2021) 그림 4a에서 129일 (5월 9일) V_{SW} 가 $\sim 307\text{ km/s}$ 에서 $\sim 378\text{ km/s}$ 로 증가하고, 이날 그림 4b의 N_{SW} 와 그림 4c의 P_{SW} 이 증가하고, 약 0.5일 후에 V_{SW} 의 정점이 뒤따르며, 그림 4d의 IMF B_z 는 +5와 -5 nT 사이의 물결 모양 변화를 보여준다. 이러한 태양풍과 IMF B_z 의 변화는 전형적인 corotating interaction region (CIR)와 관련된 신호이다. (Tsurutani, Ho, et al., 1995; Tsurutani, Gonzalez et al, 1995) 130일 (5월 10일)의 그림 4b의 N_{SW} 의 급격한 증가는 행성간 충격파가 관측된 것을 뜻하고 충격파 통과 시점에 P_{SW} 는 ~ 1.5 에서 5.6 nPa까지 계단식 증가를 보였다. 이후 14시간동안 4~6 nPa 사이의 증가된 값으로 유지됐다. P_{SW} 가 131일에 지자기 상태를 교란 시켰고 ($K_p > 3$)(그림 4f 참조), P_{SW} 의 변동은 대부분 N_{SW} 의 변동으로 인해 발생한 것이다. (그림 4b, 4c). 충격파 통과 이후 IMF B_z 는 이전보다 큰 남쪽 방향의 자기장 성분을 가진다. (-10 nT) 교란이 일어나는 동안 강화된 자기권 대류로 인해 2019년 5월 11일 (131일)에 중간 규모 지자기 폭풍 (그림 4e의 SYM-H=-57, 그림 4f의 $K_p = 5$)과 오로라 전자 제트 활동이 발생했다. (그림 4g)



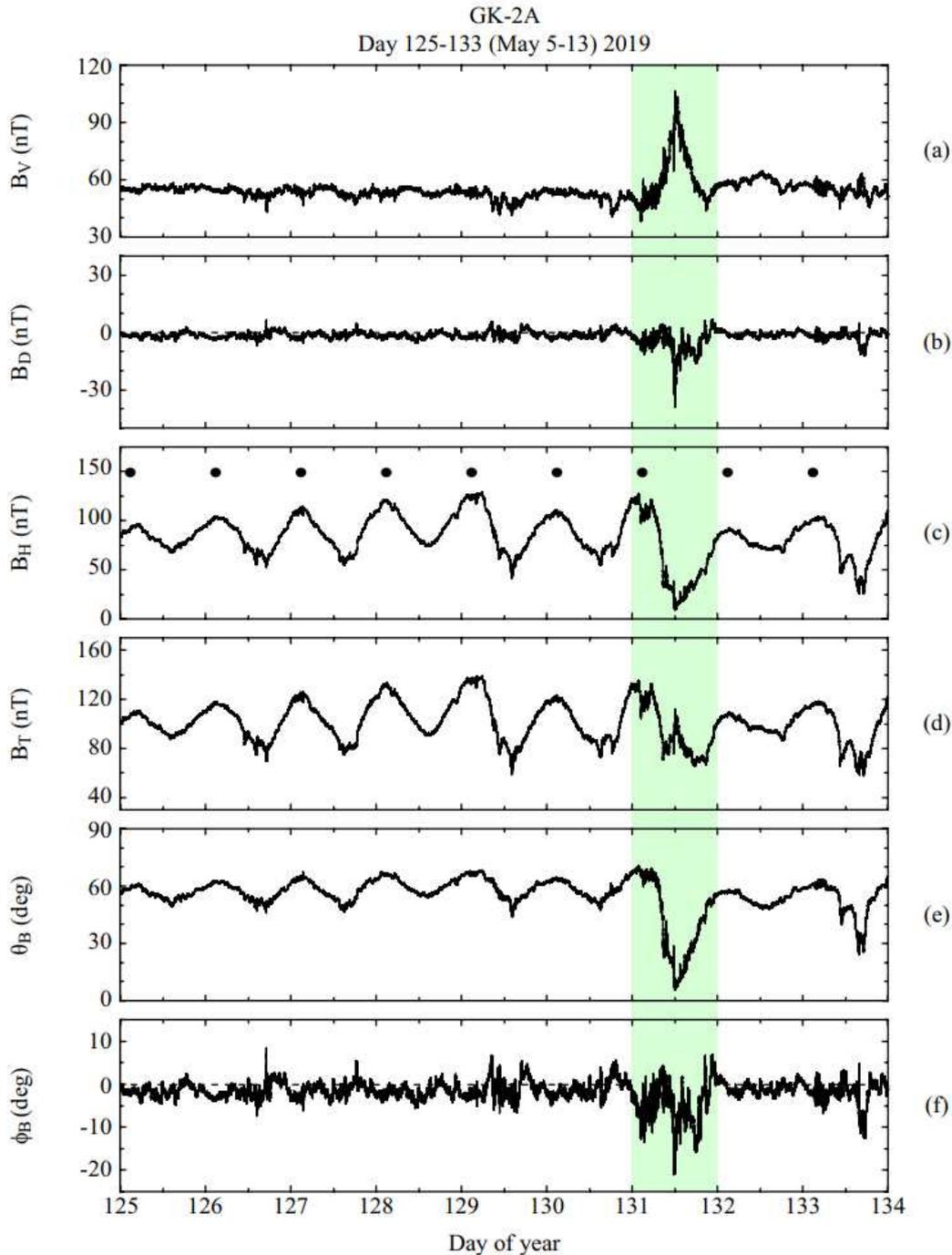


그림 5: 9일간의 GK-2A 자기장 자료 (a) 방사 방향 성분, (b) 방위각 방향 성분, (c) 남북 방향 성분, (d) 전체 자기장, (e) 고도각, (f) 방위각

그림 5a-5d는 GK-2A가 9일 동안 정지궤도에서 측정한 자기장 데이터이다. 데이터는 쌍극자 VDH 좌표계로 표시된다. 고도각과 방위각은 $\theta_B = \sin^{-1}(B_H/B_T)$, $\phi_B = \tan^{-1}(B_D/B_V)$ 로 정의된다. 그림 5c의 점은 GK-2A의 정오를 나타낸다. 지구정지궤도의 자기장 세기(B_T)는 정오 부근에서 최댓값을 갖고 자정 부근에서 최소값을 가지는 전형적인 일변화를 보인다. 이런 변화는 남북 방향 성분에서도 볼 수 있는데, 자기장의 일 변화가 낮지역의 자기권계면 표면 전류와 밤지역의 꼬리 전류 때문이다. 이러한 변동은 B_V (지구에서 나가는 방향이 양수)와 B_D (동쪽 방향이 양수)에서는 보이지 않는다. B_V 와 B_D 는 대부분의 시간 동안 거의 일정한 값을 가지다가 131일 (초록색 음영)에 크게 교란된다. B_V 는 약 104 nT까지 빠르게 증가하지만 B_D 는 교란된

날의 밤 시간동안 약 -40 nT로 감소하는데, 이는 위성이 이때 자기 적도 아래 (MLAT = -9°)에 위치하기 때문이다. B_H 는 고도각 Θ_B 가 약 8°로 최소일 때 약 11 nT까지 감소한다. 이러한 자기장 변화는 자기장이 길게 느리나 부폭풍 성장 단계에 있기 때문에 나타나는 것으로 예측된다. 131일 중간에 자기장 모양이 꼬리 형태에서 쌍극자 형태로 변화하면서 B_V 가 감소하고 B_H 가 정상 형태로 다시 증가한다. 이 정지 자기장이 변형되는 것은 부폭풍이 확장되기 시작함을 나타내며, SML 지수에서 확인할 수 있다. (Gjerøev, 2012; Newell & Gjerloev, 2011).

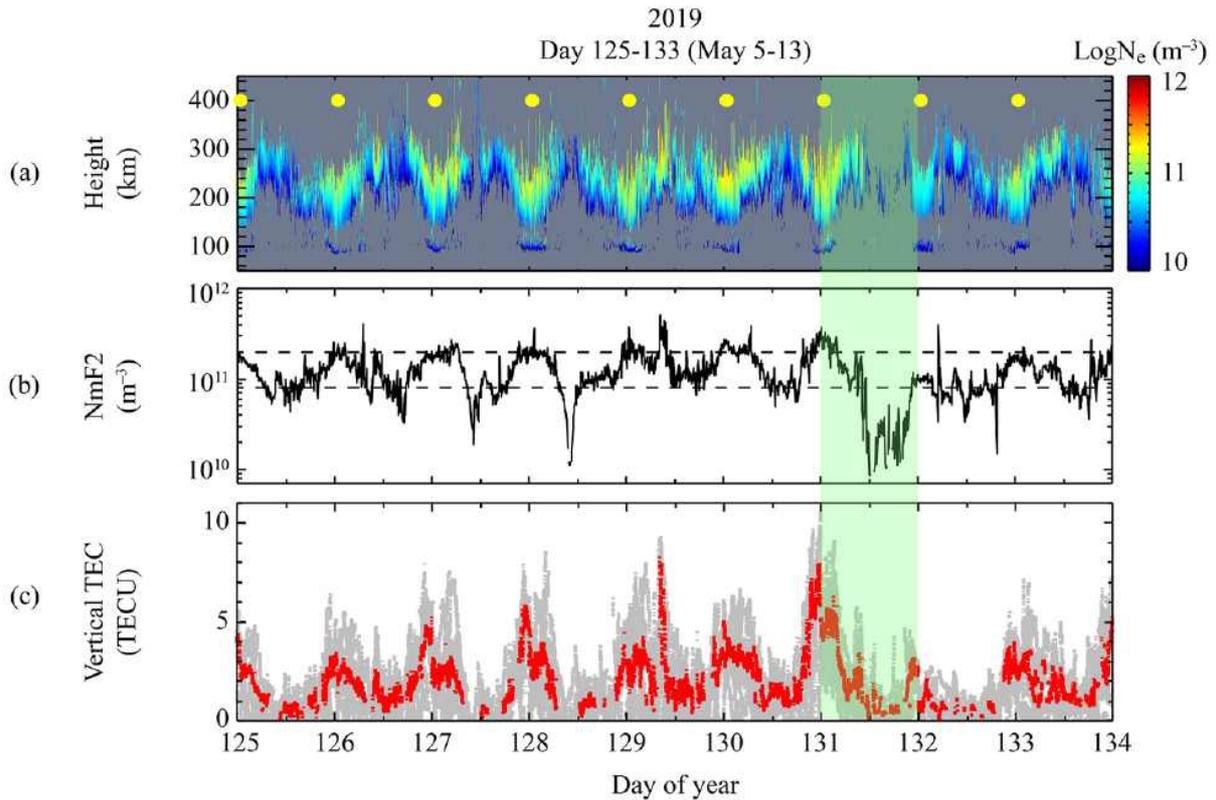


그림 6: 2019년 5월 5일에서 5월 13일까지의 장보고 기지 전리권 상태. (a) 전자 밀도, (b) 장보고 기지 다이내존데에서 측정된 F2층에서의 전자 밀도, (c) 수직 방향 총전자함량 (ν TEC)

그림 6a는 그림 4a에서 보인 9일간의 장보고 기지 다이내존데로 관측한 전자 밀도의 분포이다. 전자 밀도는 오른쪽 색상표로 나타내져 있다. 노란색 점은 장보고 기지에서의 정오를 뜻한다. F층의 높이는 정오 부근에서 약 140 km이고 밤시간에 약 350 km이다. F2층 최고 전자 밀도를 나타내는 NmF2는 그림 6b에 나타나 있고, 두 개의 수평 파선은 각각 $2 \times 10^{11} m^{-3}$ (위) $8 \times 10^{10} m^{-3}$ (아래) 값을 나타낸다. 그림 6a에서 예상한 대로 NmF2는 9일 동안 분명한 일 변화를 보여주고, 정오와 자정에서 각각 최댓값과 최솟값이 관측된다. 129일 08:20 UT 경 자정 이전 구간 (~19.3 LT)에서 300 km 위에서 최대값이 $5 \times 10^{11} m^{-3}$ 로 상승했다. 이 특정 이벤트는 129일 ~07:11 UT에 확인되는 부폭풍 시작의 결과로 보인다 (그림 4g 참조). 부폭풍 활동 기간 동안, 전리권 전류들과 관련 전기장들이 오로라 지역에서 발달한다. 이 전기장들은 F층으로 배경 자기장을 따라 전파되고 평균 시속 2000km 속도로 극관 지역을 향하는 이온화의 수평 흐름운동을 야기한다. 극관의 일반적인 직경은 약 30도(~3,000km)이므로 극관을 가로지르는 시간은 1.5시간이고 이는 ~07:11에 부폭풍이 시작되는 시간과 ~08:20 UT에 NmF2가 증가하는 시간의 시간 차이와 일치한다. 앞서 언급했듯이 이 부폭풍은 지구 자기권을 통과하는 CIR 간

격과 관련돼 있다. 전자 밀도 감소는 또한 127일 10:22 UT (~21.3 LT)과 128일 09:50 UT (~20.8 LT)에도 발생했다. 131일(초록색 음영)에 중규모 지자기 폭풍 동안 NmF2의 일변화는 이례적이다. 130일 NmF2 폭풍 전과 비교하면, 131일의 NmF2가 정오 근처에서 강화되지만 밤에는 크게 감소한다. 향상된 NmF2는 130일보다 약간 높은 고도에서 나타나는 것 같아 보인다(그림 6a 참조). 반면, 밤 시간의 강한 NmF2 감소는 그림 6a에서 131일에 12시간 동안 지속되는 전자 밀도 감소가 있을 때 나타난다. 불안한 전리권은 다음날인 132일까지 계속되고, 밀도의 수준이 낮과 밤 동안 모두 상당히 감소된 것을 보여준다. 133일에는 전리권 밀도가 지자기 폭풍 이전 수준으로 돌아가는 것으로 보인다. 지상 GPS에서 얻은 수직 총전자함량(TECs)도(그림 6c 참조) NmF2와 대체로 유사함을 보여준다. 장보고 기지에 있는 GPS 수신기는 12개의 GPS 위성을 동시에 추적하고 데이터를 생성한다. 그림 6c는 사용 가능한 모든 위성들의 30초 시간 분해능을 보여준다. 회색은 4개보다 많은 위성을 잡았을 때의 값을 표시한 것이고 빨간색은 30초 동안 사용 가능한 모든 TEC의 중간값이다. 다른 방향의 위성들에서 온 TECs는 값이 크게 다를 수 있으며 회색의 큰 TECs 값 산란은 이를 나타낸다.

TEC 데이터는 NmF2에서와 같이 전형적인 일변화를 보여준다. 지자기 폭풍 전인 130일의 TEC 최댓값의 중간값은 정오 근처에서 ~5 TECU이지만, 지자기 폭풍이 있는 131일에는 ~8 TECU로 증가한다. 즉, 낮 시간 TEC 중간값의 최댓값은 폭풍 기간 동안 폭풍 전보다 약 60% 증가했다. 반면에, 밤 시간 TEC는 130일 ~1.5 TECU에서 131일 ~0.5 TECU로 감소했다. (즉, ~67% 감소) 지자기 폭풍 다음 날(132일) 회복기에, TEC 값은 여전히 하루 종일 아주 낮다. 교란된 TEC는 133일에 지자기 폭풍 전 수준으로 되돌아 갔다.

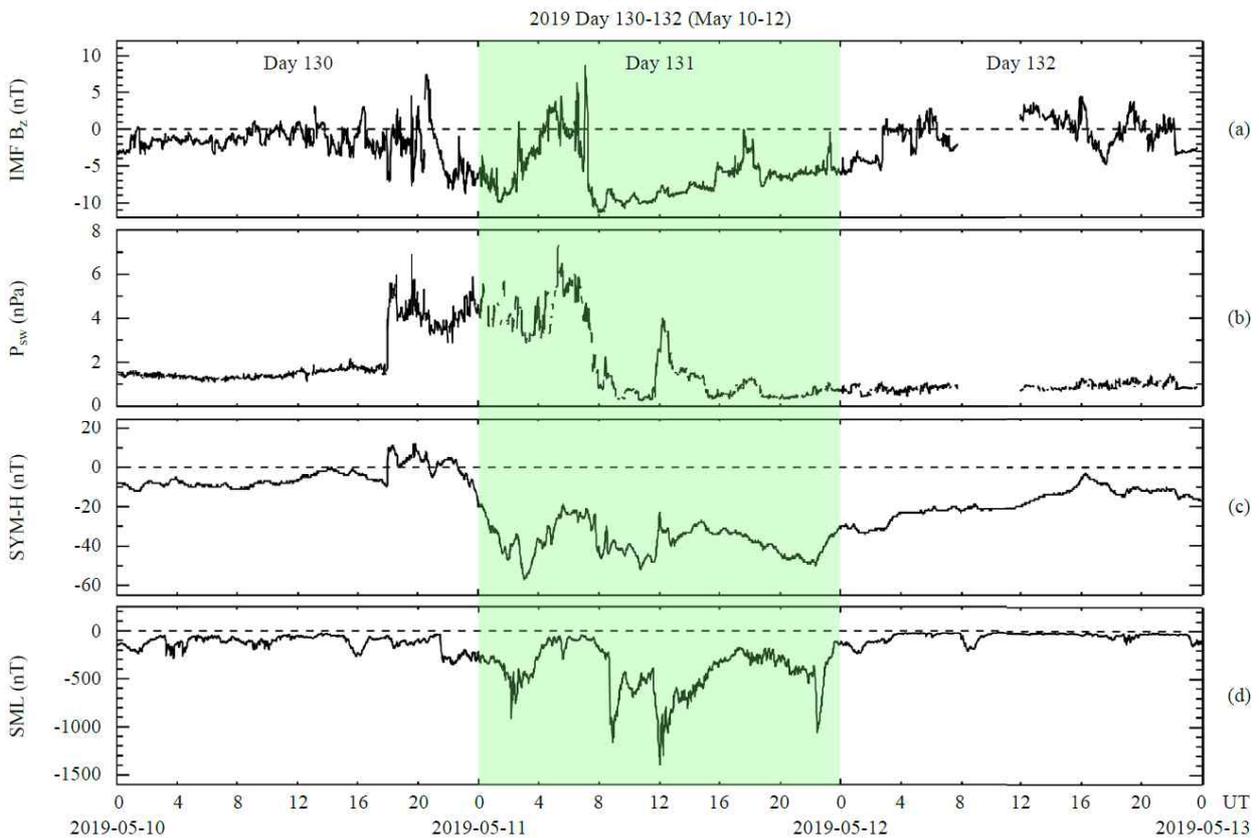


그림 7: doy 130 ~ 132, 3일간의 태양풍 상태의 관측값 ((a) IMF B_z 성분, (b) 태양풍 동압력)과 지자기 지수 ((c) SYM-H 와 (d)SML)

그림 7a-7d는 3일간(130-132일)의 IMF B_z 성분, 태양풍 동압력 Psw, SYM-H 지수, SML 지

수를 보여주고 있다. 중간은 2019년 5월 11일이다. (초록색 음영.) 5월 10일 ~17:50 UT에 P_{sw} 가 1.5에서 5.5 nPa로 갑자기 증가했다. 태양풍 압력의 증가는 지자기 폭풍의 최초 단계가 시작하는 5월 10일 (130일) 17:53 UT에 SYM-H의 급격한 증가를 야기한다. 최초 단계는 4시간 동안 지속되고, 03:03 UT에 SYM-H가 -57 nT로 감소하면서 주단계가 시작한다. 이 SYM-H 감소는 IMF B_z 가 5월 10일 20:37 UT부터 5월 11일 02:19 UT까지 남쪽 방향 선회한 후 -5 nT보다 작은 값을 가질 때의 고리 전류의 강화를 나타낸다. 5월 11일 03:03 UT에서 05:37 UT까지, SYM-H가 -20까지 회복했다. IMF B_z 의 북쪽 방향 선회와 P_{sw} 의 증가로 인해 SYM-H 회복이 시작된다. 회복된 SYM-H는 5월 11일 10:46 UT에 다시 -52 nT까지 감소하고, 11:41 UT에 또 빠르게 회복되고, 이는 P_{sw} 의 급격한 증가와 SML의 급격한 감소와 일치한다. 이는 P_{sw} 증가가 부폭풍을 발생시켰다는 것을 나타낸다. (Lyons et al., 2005). 5월 11일 14:48 UT에서 22:23 UT까지, SYM-H는 점차적으로 -50 nT까지 감소했다. SYM-H의 감소는 남쪽 방향 IMF B_z 가 감소하는 동안 일어났기 때문에 고리 전류의 강화로 인한 것이 아니다.



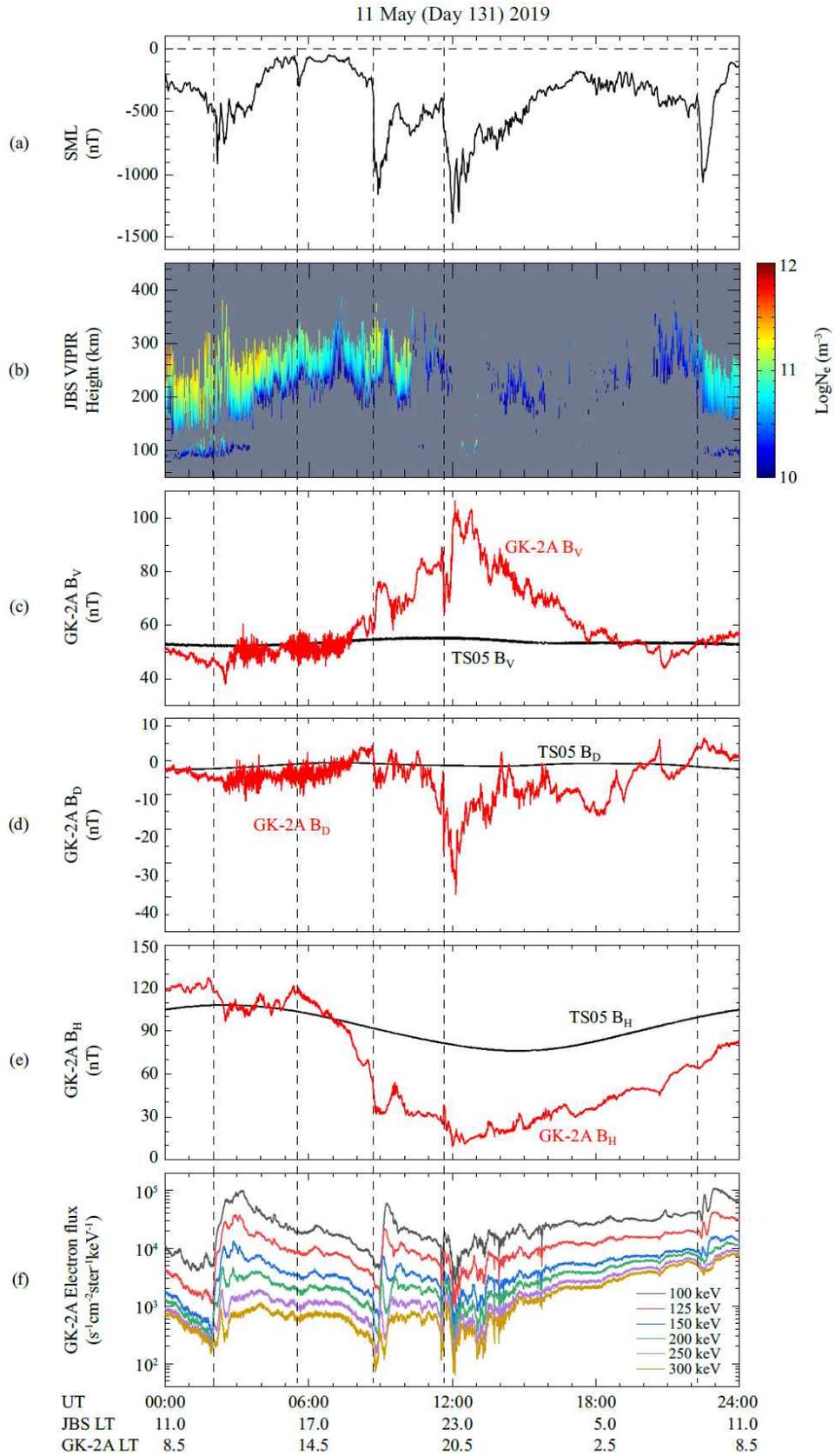


그림 8: 2019년 5월 11일의 시계열 그림. (a) SML 지수, (b) 장보고 기지 위의 전리권 전자밀도 스펙트럼, (c) GK-2A(빨간색)과 TS05(검정색)의 자기장 방사 방향 성분, (d) GK-2A(빨간색)과 TS05(검정색)의 자기장 방위각 성분, (e) GK-2A(빨간색)과 TS05(검정색)의 자기장 남북 방향 성분, (f) 정지 궤도에서의 전자 플럭스

2019년 5월 11일 전리권 밀도 감소와 지구정지궤도 GK-2A 자기장 섭동의 동시 관측 비교가 그림 8에 나와 있다. 위에 언급한 대로, 장보고 기지는 GK-2A 궤도에서 동쪽으로 약 2.5시간 거리에 위치한다. 그림 8a-8f는 (a) 오로라 전자 제트 지수 SML, (b) VIPIR로 측정된 전자 밀도, (c-d) VDH 좌표계로 나타낸 GK-2A 자기장 (빨간색)과 GK-2A 궤도를 따라 고요한 시간의 Tsyganenko and Sitnov (2005) (TS05) 모델 자기장 (검정색)이고, (f) GK-2A에서 관측한 여섯 개의 에너지 채널(100, 125, 150, 200, 250, 300 keV) 고에너지 전자 플럭스이다. 수직 파선으로 표시된 ~02:00, ~05:24, ~11:36, 22:15 UT에 SML 지수가 갑자기 감소한다. 각각의 SML 감소 시에는 주목할만한 전자 플럭스 향상이 동반되고, 전자 플럭스 향상은 부폭풍이 시작되어 전자의 유입이 있었음을 뜻한다. 그림 8f에서 더 높은 에너지의 플럭스 향상이 살짝 더 일찍 발생하고, 이는 지자기 꼬리 근처의 영역에서 GK-2A가 있는 쪽으로 전자가 유입됐음을 뜻한다. 00:00 UT에서 01:50 UT까지 GK-2A가 오전 구간 ($LT \approx 8.5-10.3$)에 있을 때, 관측된 B_H 의 크기는 모델보다 크고 B_V 의 크기는 모델보다 작다. 그림 7b에서 볼 수 있듯이 이 기간에 태양풍 동압력이 강하게 증가했고 그로 인해 B_H 와 B_V 가 자기권 압축으로 인해 변한 것이 관측된 것이다. 이러한 변화는 감소된 자기권 대류에 의한 고리 전류의 영향으로, 지자기 폭풍 시에는 관측과 모델 값이 심각한 편차를 가질 수도 있어 모델 사용에 주의를 필요로 함을 보여준다. 그림 8b에서의 전리권 관측은 대략 10:30 UT ~ 22:00 UT일 때 신호가 거의 되돌아오지 않았음을 보여준다. 이는 전리권 밀도에 강한 감소가 있음을 뜻한다. 이 기간 동안 GK-2A는 저녁지역 ($LT \sim 19$)로 이동하며 음의 B_D 섭동을 관측했다. ~10:30 UT에 시작한 이 감소는 SML 지수의 변경이 없었기 때문에 부폭풍 시작과 연관될 가능성이 없다. 10:30 UT ~ 22:00 UT 동안 B_D 가 -40 nT까지 감소했고, 다시 원래 수준으로 급격히 증가했다. GK-2A는 자기 위도 -9° 에 있었고 11:32 UT에 자정전 구역 ($LT \sim 20$)에 있으므로 이 시간의 갑작스런 B_D 섭동은 관 모양의 전류가 자정전 구역의 남반구 오로라 지역 전리권에서 나와서 생긴 것으로 설명할 수 있다. (Nagai et al., 1990)

행성간 자기장이 남쪽을 향하면 극관 전리권의 지자기장 선은 행성간 자기장과 연결되며 태양풍 속도 V_{SW} 와 남향 IMF에 의해 유도된 행성간 전기장(IEF)은 $E_{SW} = -V_{SW} \times B_{IMF}$ 로 주어지며 새벽지역에서 저녁지역으로 향하는 방향성분을 갖는다. IEF는 자기력선을 따라 극관 전리권까지 이어져 극관을 가로지르는 새벽-저녁 방향으로 전압 차이를 일으킨다. 극지방 상층 대기에 들어오는 에너지는 E_{SW} 의 진폭을 이용해 추정할 수 있다. 극관 전위 강하와 연관된 전리권 전기장은 태양 반대 방향의 플라즈마 대류와 극관 전리층의 전류를 일으킨다. 이온 충돌 주파수가 무거운 산소 이온에 의해 좌우되는 이온 회전 주파수보다 높은 E층($\sim 100-130$ km)에서, 태양 반대 방향 표류 플라즈마와 주변 중성자 사이의 충돌로 인한 상당한 줄 가열 또는 이온 마찰 가열은 무거운 분자 기체(O_2 및 N_2)의 상향 확장을 유도한다(Buonsanto, 1999). 중성 대기의 팽창은 극관 전리권 F층의 확산 평형에서 이탈해 산소 원자(O) 개수 밀도에 대한 질소 분자(N_2) 및 산소 분자(O_2) 개수 밀도의 비율을 감소시킨다(Rishbeth & Barron, 1960; Rishbeth et al., 1987). 감소된 O/N_2 비율은 극관 전리권의 전자 밀도를 감소시킨다(Bjolund et al., 2021). Fuller-Rowell et al. (1994)은 열권-이온권 모델을 사용하여 지자기 폭풍에 대한 상층 대기의 반응을 시뮬레이션했는데, 고위도에서 줄 가열 비율은 폭풍 동안 10배 이상 증가했다. 줄 가열의 증가로 인해 중성자 온도와 중성풍은(neutral temperature and winds) 지자기 폭풍이 시작된 후 몇 시간 내에 상승한다. 온도와 바람은 조용한 시간에 비해 각각 400 K와 600 m/s 이상 증가한다. 극지방의 온도 상승은 분자의 상승 운동을 일으키고, 지자기 폭풍이

시작된 이후 24시간 동안 지속되었다. 상승과 관련된 열원 또한 대규모 중량과를 통해 적도 쪽으로 팽창하여 지구 순환을 일으킨다.

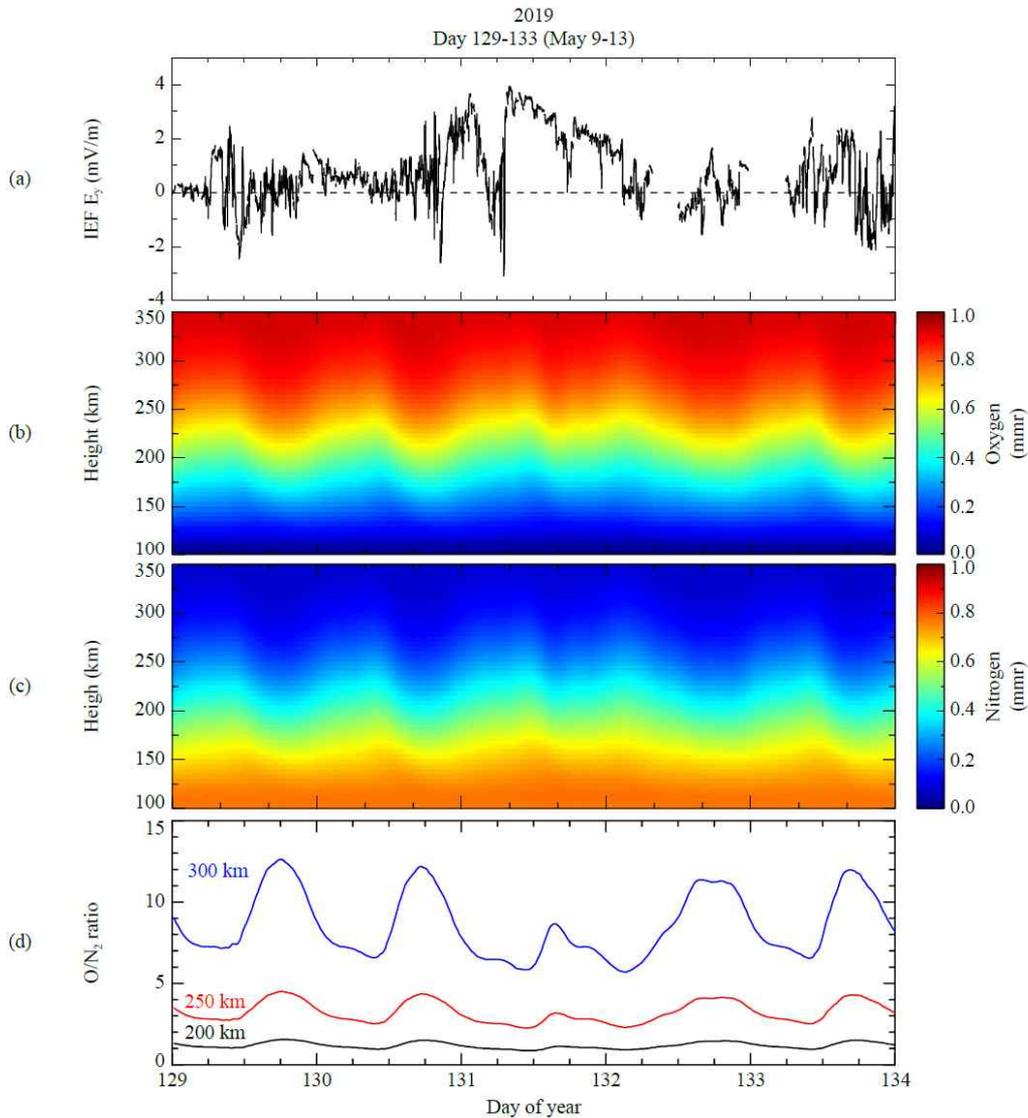


그림 9: (a) 태양풍으로부터 추정된 IEF (interplanetary electric field) 의 방위 각 성분, (b) O 밀도, (c) N₂ 밀도, (d) 129일 (5월 9일)부터 133일 (5월 13일)에 걸친 장보고 기지 상공 F층 각각 고도 200 km, 250 km, 300 km에서의 O/N₂ 비율

TIEGCM 모델의 O/N_2 비율을 사용하여 장보고 기지 상공에서 지자기 폭풍이 있을 때의 F층 밀도 고갈이 ESW와 관련이 있는지를 조사했다. 그림 9는 129일 (5월 9일)부터 133일 (5월 13일) 까지 측정된 IMF B_z 및 태양풍 속도, O 및 N₂ 밀도, 장보고 기지 상공 200km, 250km 및 300km 고도에서의 O/N_2 비율에서 추론된 IEF E_y (새벽에서 저녁 방향의 양의 값)를 보여준다. Weimer (2005)의 극관 전위 모델을 사용하여 TIEGCM 모델을 얻었는데 이 모델은 관측된 태양풍 밀도, 태양풍 속도, IMF B_y 및 B_z 를 기반으로 한다. 131일 (5월 11일)의 폭풍 동안 TIEGCM 모델에서 새벽에서 황혼 방향의 E_{SW} 가 눈에 띄게 강화되었을 때 O/N_2 비율이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 지자기 폭풍 기간에 장보고 기지에서 관찰된 전리권 밀도 감소가 O/N_2 비율의 감소에 기인함을 의미할 수 있다. F층 밀도 감소가 부폭풍 기간 동안 극지

방에서 발생하는 전자 침투의 감소로 인한 것일 수도 있다고 주장할 수 있다. 이에 관해서는 극관 호는 부폭풍 확장 단계까지 지속된 다음 극관 내부에서 사라지기 시작하는 것으로 보고되었다. (Hosokawa et al., 2020) 즉, 전자 침투 부족은 F층 전리권 밀도의 감소로 이어질 수 있다. 하지만 오로라의 발생 시간이 F층 감소 기간보다 짧으므로 우리가 관심 있는 이벤트에 대한 설명이 되지 않다. 부폭풍으로 인한 오로라는 UT 12시에서 13시 동안 1시간 동안 발생하는 반면 F층 감소는 약 12시간 동안 지속된다. 장보고 기지 VIPIR 관측에서 오로라 신호를 확인할 수 있다. 그림 8b에서 12 - 13 UT에 E층 (~100km)에서 반사된 신호를 발견할 수 있다. 전천 카메라 관측에 따르면 이 오로라는 처음에 오로라 타원체에서 발생하여 극 방향으로 확장되는데, 이는 극관 호의 구조(보이지 않음)보다는 오로라 타원체의 확장과 일치한다.

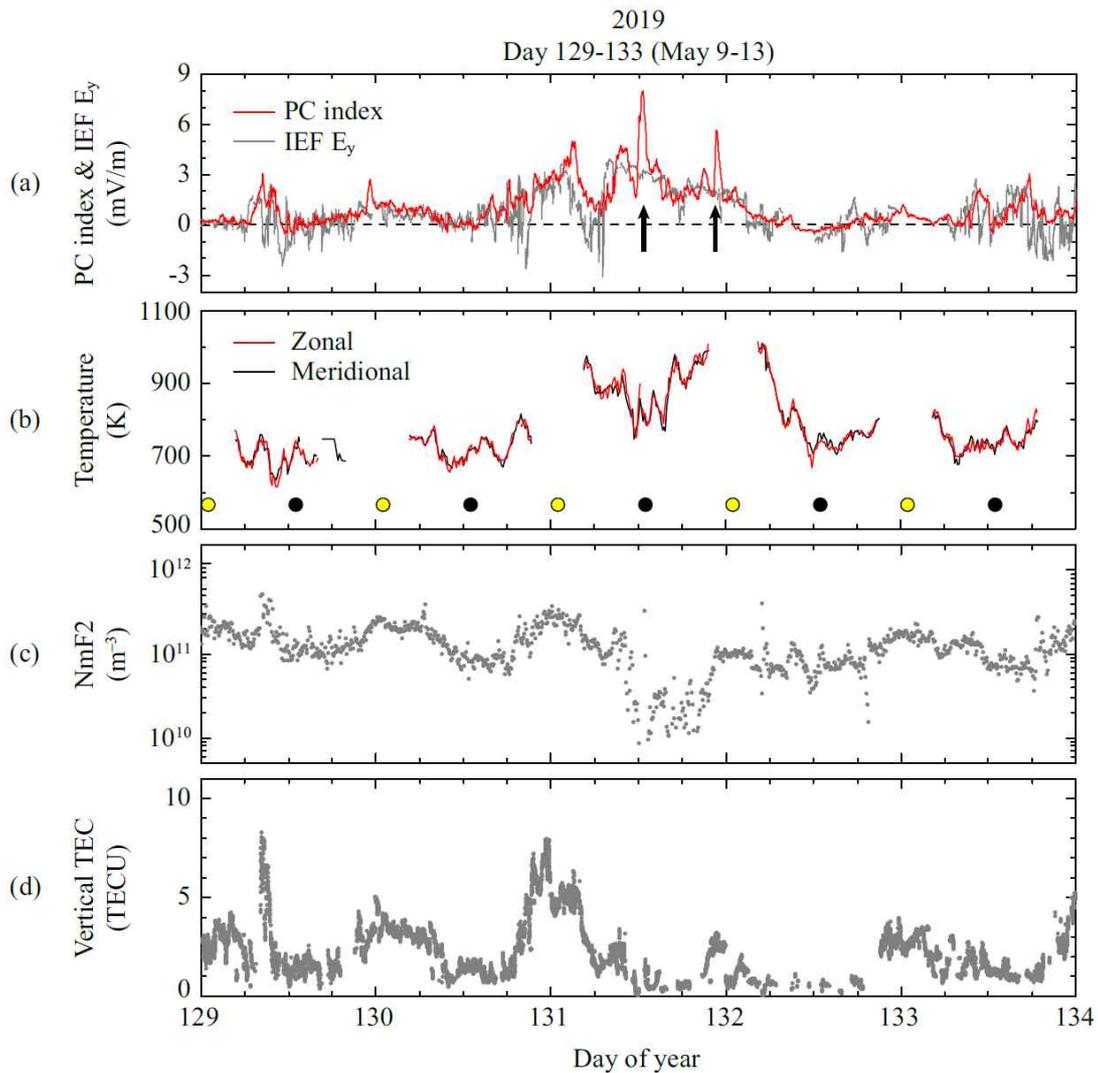


그림 10: 2019년 5월 9일 ~ 13일까지 5일간 장보고 기지 위의 전리권에서 관측한 (a) PC 지수(빨간색)과 IEF y -성분, (b) FPI의 중성 온도 (빨간색-동서 방향 성분, 검은색-자오선 방향 성분), (c) 전자 밀도의 최댓값, (d) vTEC

장보고 기지에서는 전리권 관측을 위한 VIPIR 뿐 아니라 중성 대기를 관측하기 위한 패브리-페릿 간섭계 (FPI)를 운용하고 있다. 시뮬레이션 결과에 따라 O/N_2 비율이 감소한 것이 예상됐고, O/N_2 비율의 직접 측정은 불가능하나, FPI 자료를 이용해 중성 대기의 흐름을 관측하면 간접적으로 이를 계산할 수 있다. 그림 10은 2019년 5월 9일에서 5월 13일까지의 PC 지수와

IEF y-성분, 250 km에서의 FPI로 관측한 동서, 자오선 방향의 온도, VIPIR로 관측한 NmF2, GPS TEC를 보여준다. 그림 10a의 회색 선은 IEF E_y , 빨간색 선은 PC지수를 나타내고 남극 보스토크 기지에서 얻은 데이터를 기반으로 한다. (Stauning, 2013) 검은색 화살표로 나타낸 시간은 PC 지수의 정점을 표시하고, 이는 전자 밀도 감소 및 중성 대기 온도 증가 구간과 일치한다. (그림 10b, 그림 10c 참조) 그림 10b에서 노란색 점과 검은색 점은 각각 장보고 기지의 정오와 자정을 나타낸다. FPI로 관측한 중성 대기 온도는 지자기 폭풍 전후의 조용한 기간에는 650-850 K의 값을 가지고, 131일과 132일에서 새벽-저녁 방향으로 E_{sw} 가 크게 증가한 동안 최대 1000 K까지 온도가 상승함을 볼 수 있다. (Lee et al., 2017) 이 기간은 지자기 폭풍의 주 단계 (131일)와 회복 단계 (132일)에 해당한다. FPI는 고도 250 km에서 산소 원자의 온도만 관찰하기 때문에 FPI에서 온도가 증가된 것이 O/N_2 을 뜻하지는 않는다. 그러나 FPI 관측 결과는 지자기 폭풍 및 부폭풍으로 인해 열권의 중성 대기 온도가 증가하였다는 것을 증명한다.



11 May (Day 131) 2019
06:00-24:00 UT

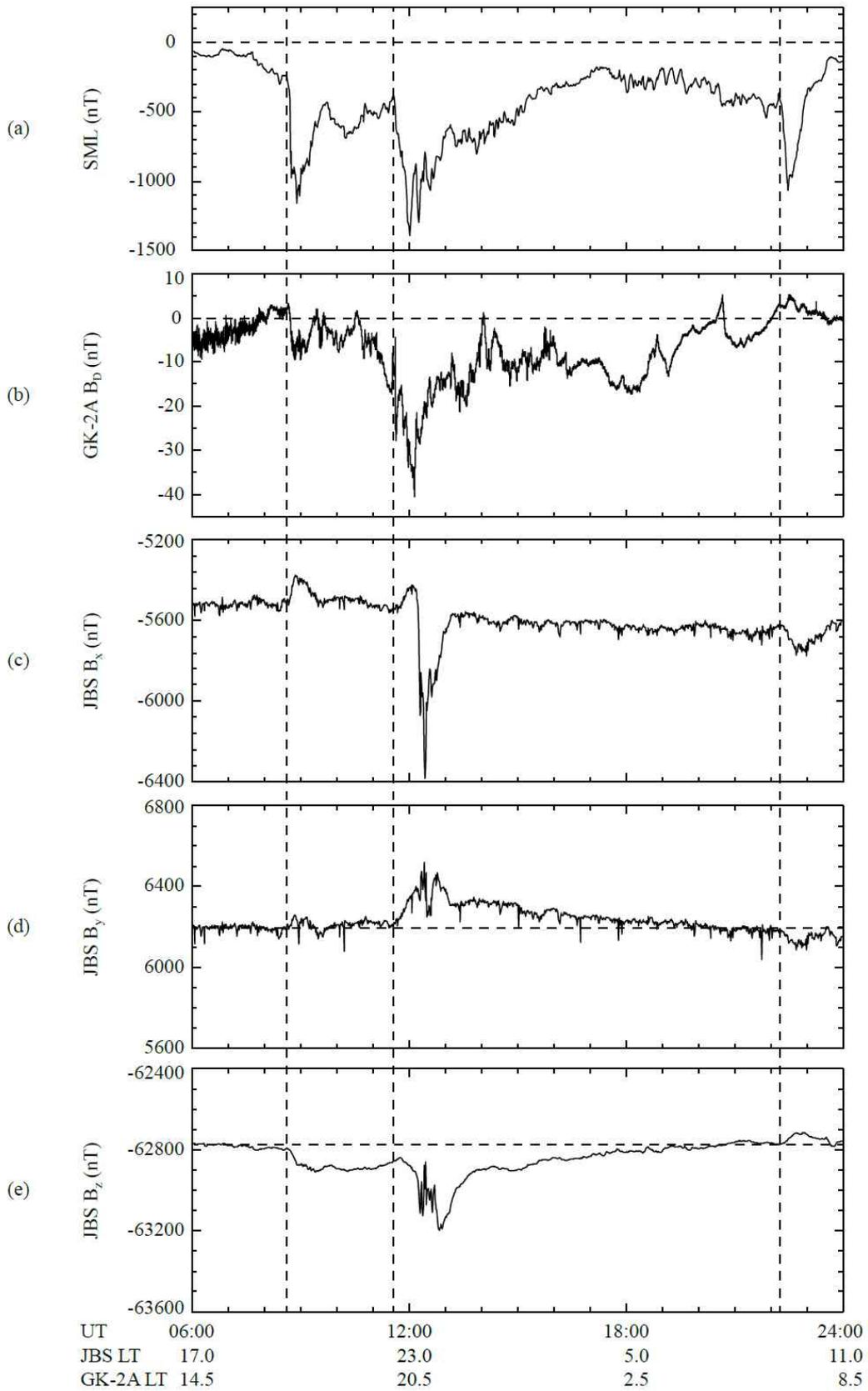


그림 11: 2019년 5월 11일 06 ~ 24 UT까지의 SML 지수와 자기장 변화 비교. (a) SML 지수, (b) GK-2A 에서의 B_d (azimuthal) 성분, (c-e) 장보고 기지에서 관측된 자기장의 북쪽 방향, 동쪽 방향, 아랫방향 성분

그림 11은 부폭풍 활동과 극관 자기장 교란 사이의 관계를 더 자세히 조사하기 위한 것으로 장보고 기지에서 관측된 자기장의 X(북쪽), Y(동쪽), Z(아래쪽) 성분과 SML 지수, GK-2A의 방위각 방향 성분 자기장 B_D 를 나타냈다. 수직 파선은 2019년 5월 11일 지자기 폭풍에 포함된 부폭풍의 시작지점으로 각각 08:40, 11:36, 22:15 UT를 나타낸다. 첫 번째 부폭풍은 B_x 와 B_y 가 각각 140 nT, 59 nT로 증가하고, B_z 에서 62 nT로 감소했다. (그림 11c-11e 참조) 양의 B_x 와 B_y 섭동은 부폭풍 썬기 전류의 중심이 서쪽에 위치함을 뜻한다. (Clauer & McPherron, 1974) 음의 B_z 섭동은 서쪽 방향 전자제트가 장보고 기지보다 아래 위도에 위치한다는 것을 의미한다. 장보고 기지에서 서쪽으로 $LT \sim 2.5$ 만큼 떨어진 GK-2A에서 관측된 B_D 의 급격한 감소는 위성 아래에 오로라 영역 전리권에서 나오는 방향의 자기장에 나란한 전류 때문이다. 11:36 UT에서 자기장의 Y 및 Z 섭동의 진폭은 08:40 UT 때의 섭동 진폭보다 훨씬 크다. 이는 11:36 UT 섭동이 장보고 기지 위치와 부폭풍 썬기 전류 사이의 상대적 위치와, 그림 11a에서 SML로 나타낸 부폭풍 강화와 연관돼 있음을 시사한다. 12:10 UT에도 B_x 에서 큰 음의 값 변동이 일어났는데, 이는 전리권에서 나오는 자기장과 나란한 전류의 위치가 장보고 기지를 기준으로 동쪽에서 서쪽으로 변했기 때문일 수도 있다. 자기장의 큰 섭동과 동시에 발생한 GK-2A의 큰 B_D 섭동은 장보고 기지 상공 전리권 감소($\sim 10:30-22:00$ UT)와 거의 일치한다. 따라서 2019년 5월 11일의 극지방 전리권 감소는 부폭풍과 관련된 전류가 밀접한 관련이 있을 수 있다고 결론 내릴 수 있다.



제 2 절 극 고요한 우주환경에서의 전리권/고층대기 특성 연구

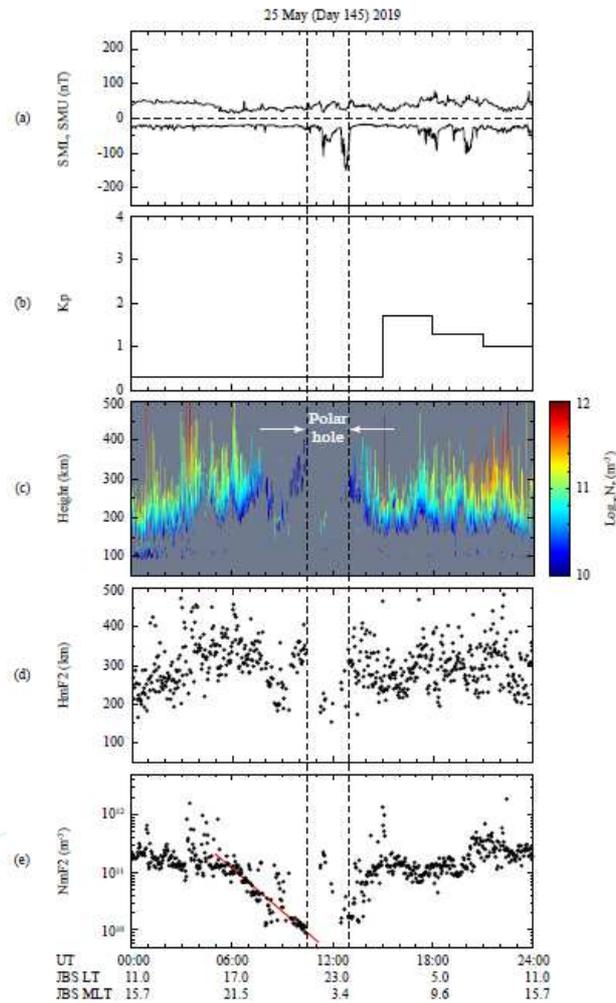


그림 12: 2019년 5월 25일 (a) SMU/SML 오로라 지수 (b) Kp 지수 (c) VIPIR 전자밀도 (d) HmF2 (e) NmF2

그림 12는 2019년 5월 25일 남극 장보고 과학기지에서 관측한 “polar hole”이벤트와 지자기 조건을 나타낸다. 오로라 지수 SMU/SML와 자기권 섭동지수 Kp는 그림 12a와 12b에 각각 나타내었다. 11시와 21시 사이에 오로라 SML 지수가 여러 번 감소를 확인할 수 있으며 그 크기가 -46 nT에서 -150 nT로 전형적인 서브스톰 발생시 관측되는 오로라 지수 크기보다 적은 양으로 관측되었다. 이러한 현상은 아주 적은 서브스톰 또는 “pseudobreakup”으로 밤지역 지구 자기권이 고용한 상태로 있음을 의미한다. 자기권 섭동지수 Kp로 확인할 수 있는데 Kp지수 값이 00:00-15:00 UT 동안 매우 낮은 레벨인 0+로 관측되었고 15:00-18:00 UT에 2-로 약간 증가했는데 이는 13:00 UT 근처에 발생한 약한 서브스톰 영향으로 자기권 섭동이 증가했다고 판단된다. 18:00 UT 이후 Kp 지수는 18:00-21:00 UT 기간 1+ 그리고 21:00-24:00 UT 1로 다시 감소하였다. 이러한 지자기 지수를 통해 지구 자기권이 극 고요한 상태 즉 자기권이 기저 상태로 있음을 알 수 있다.

그림 12c는 남극 장보고 과학기지에 설치된 VIPIR 장비(JVD: Jang Bogo station VIPIR with Dynasonse)로 관측된 전자밀도의 높이 분포를 나타낸다. 전자밀도 프로파일은 수직 높이를 따라 전자 수 밀도를 나타내기 위해 색상으로 표시하였다. 전자 밀도 프로파일의 컬러 디스플레이에서 00:00-07:30 UT까지 시간과 높이 모두에서 밀도가 부드럽게 전환되는 것을 볼 수 있다. 즉, 극지방 F-영역의 높이는 00:00 UT(정오 근처)의 ~150 km에서 UT 07:30의 ~350 km까지 다양하다. 07:30-10:30UT 동안 JVD는 ~200~350km의 고도에서 작은 전자 밀도 ($Ne < 5 \times 10^{10} m^{-3}$) 변화를 측정했다. JVD에 의해 측정된 전리층 시그니처는 10:30 UT에 갑자기 사라졌고, 전자 수 밀도의 연속적인 밴드 구조가 UT = 13:00 이후에 다시 나타났다. 10:30-13:00 UT (수직 파선으로 표시)의 간격은 JVD가 F-층을 지속적으로 감지하지 못한 경우를 이 연구에서 "폴라 홀" 이벤트라고 한다. JVD에 의한 F-층 반향의 감지는 전자 밀도가 $Kp = 0+$ 인 안정된 조용한 조건에서 ~2.5시간 간격 동안 $10^{10} m^{-3}$ 아래로 떨어졌음을 나타낸다. 극지 구멍 간격 동안 11:00 UT와 12:00 UT 사이에 밀도가 $10^{11} m^{-3}$ 이상인 200 km 바로 아래에서 과도 에코가 있었다. 이러한 일시적 에코는 SML 인덱스에서 식별된 약한 서브스톰 활동과 연관될 수 있다.

그림 12d는 JVD에서 얻은 F2-층의 최대 이온화 높이(HmF2)를 보여준다. HmF2는 JBS가 정오부터 늦은 오후까지 이동함에 따라 00:00 UT의 약 200km에서 06:00 UT의 400 km까지 다양하다. 06:00에서 09:00 UT까지 피크 높이는 ~200 km로 감소하고, 극지 구멍이 시작된 09:00에서 10:30 UT까지는 점차 다시 ~350 km로 증가한다. 폴라홀이 끝나는 시간(13:00 UT)에 HmF2는 250~400 km 사이에 분포한다. Sojka et al. (1981)은 극지 구멍의 HmF2가 외부보다 ~50-100 km 낮다고 예측했다. 극지 구멍 내부에서 JVD는 약 200km의 F층 에코를 감지했고, 따라서 우리의 관측은 Sojka et al. (1981)에 의해 보고된 이전 관측과 유사하다.

그림 12e는 F2층 최대 플라즈마 주파수에서 추정된 F2층 피크 전자 밀도(NmF2)를 보여준다. 대부분의 NmF2 값은 00:00-06:00 UT 간격 동안 $\sim 1.0 \times 10^{11} m^{-3}$ 과 $\sim 3.0 \times 10^{11} m^{-3}$ 사이에 분포하고 ~06:00 UT에서 NmF2의 급격한 감소가 발생했다. 이러한 전자밀도 감소는 폴라 홀의 시작 시간 보다 4.5 시간 빠르다. 13:00에서 15:00 UT까지 NmF2는 $\sim 10^{11} m^{-3}$ 로 회복되었고 15:00에서 24:00 UT까지 Polar hole 외부에서는 대부분 전자밀도가 $8.0 \times 10^{10} m^{-3}$ 와 $4.0 \times 10^{11} m^{-3}$ 사이에 머물러있다. 오후 (01:00-06:00 UT)에서 관측된 NmF2 값은 자정 이후 (15:00-19:00 UT)에서 측정된 값과 비슷하다. 이것은 태양 복사가 극야기간 동안 JBS 위의 전리층 형성에 작은 역할을 했음을 의미한다.

그림 12e에 나타낸 빨간색 직선은 지수 피팅 방법으로 UT 06:00부터 10:20까지의 관측 데이터를 사용하였다. 지수 함수는 $A_i \exp(-kt)$ 로 정의되며, 여기서 A_i 는 06:00 UT에서 NmF2의 값이고, k 는 자유 매개변수이며, t 는 06:00 UT에 상대적인 시간이다. 지수함수 피팅으로부터 시간에 대한 NmF2의 지수 의존성은 $k = 14$ 를 제공하며, 이는 1.7시간의 e-폴드 붕괴 시간에 해당한다. $10^{11} m^{-3}$ 의 F-영역 전자 밀도가 폴라 홀에서 $10^{10} m^{-3}$ 미만의 값으로 감소되기 때문에 약 2~3 e-접힘 밀도 감소(즉, ~3.5-5.0 hr)가 필요하다.

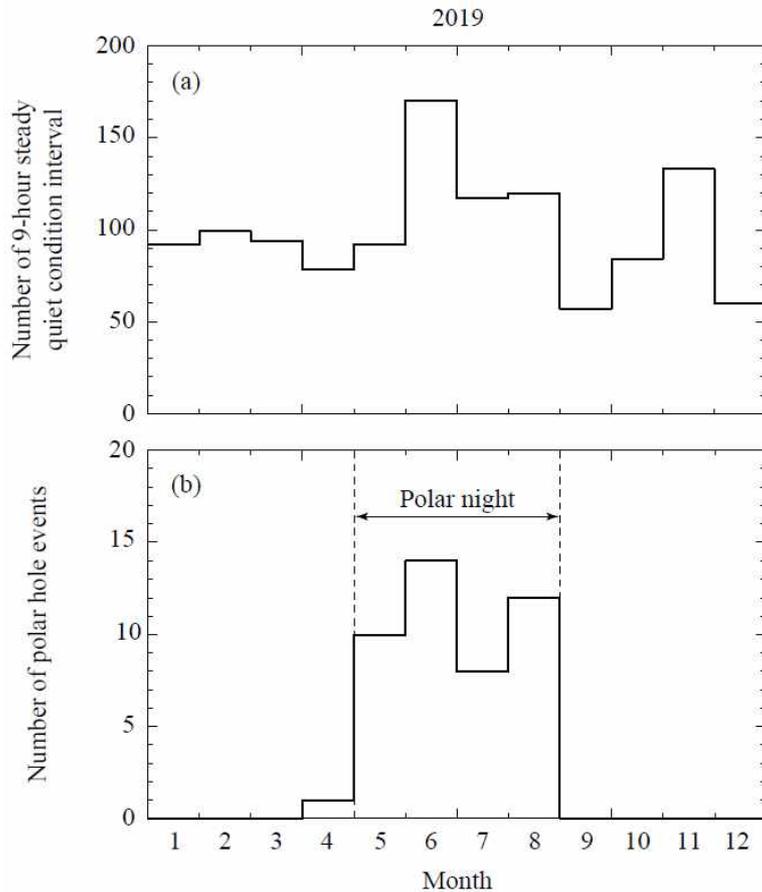


그림 13: 2019년 동안 (a) Kp 지수가 9시간 동안 1+이하인 안정된 고요한 지구 자기권 분포 (b) 폴라 홀 이벤트 분포

조용한 지자기 조건에서 폴라 홀이 발생하는 것으로 알려져 있다. 극지에서 측정된 폴라 홀 이벤트를 식별하기 위해 2019년에 JVD 관측 자료를 사용하였다. 데이터 처리의 첫 번째 단계는 안정되고 조용한 지자기 조건의 기간을 선택하는 것이다. 그림 13a는 9시간 동안 Kp 값 $\leq 1+$ 로 정의되는 안정된 조용한 조건에 대한 계절 분포를 보여줍니다. 조용한 자기권 기간 발생이 약간 편향되어 있다. 2019년 6월에는 더 많은 조용한 간격이 있지만 모든 달은 많은 수의 조용한 기간(> 60)이 관측되었다.

극 고요한 기간이 선택되면 폴라 홀을 식별하기 위해 아래의 절차를 사용했다. 첫 번째, 색으로 구분된 전자 밀도 분포와 JVD로 측정된 NmF2 값을 육안으로 검사한다 (예: 그림 12c 및 12d). 두 번째, JVD 데이터에서 부드러운 전환이 사라지는 것은 NmF2 값 $\sim 4.0 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ 보다 1시간 이상 낮게 나타나야 한다. 극지 구멍에 대한 이 임계값은 이전 연구 (예: Jenner et al., 2020; Makarevich et al., 2015)의 임계값과 비슷하다. 마지막으로, 폴라 홀 이벤트가 조용한 조건과 연관되기 위해 최대 Kp는 폴라 홀 이벤트 이전의 두 3시간 Kp 값 (6시간)에 대해 $\leq 1+$ 조건이었다. 이 절차에서 우리는 45개의 폴라 홀 이벤트를 확인했다. 그림 13b는 45개의 폴라 홀 이벤트의 계절별 발생 분포를 보여줍니다. 5월부터 8월까지 장보고 기지는 극야 기간에 해당되며 이 기간동안 44개의 폴라 홀 이벤트($\sim 98\%$)가 발생하였다.

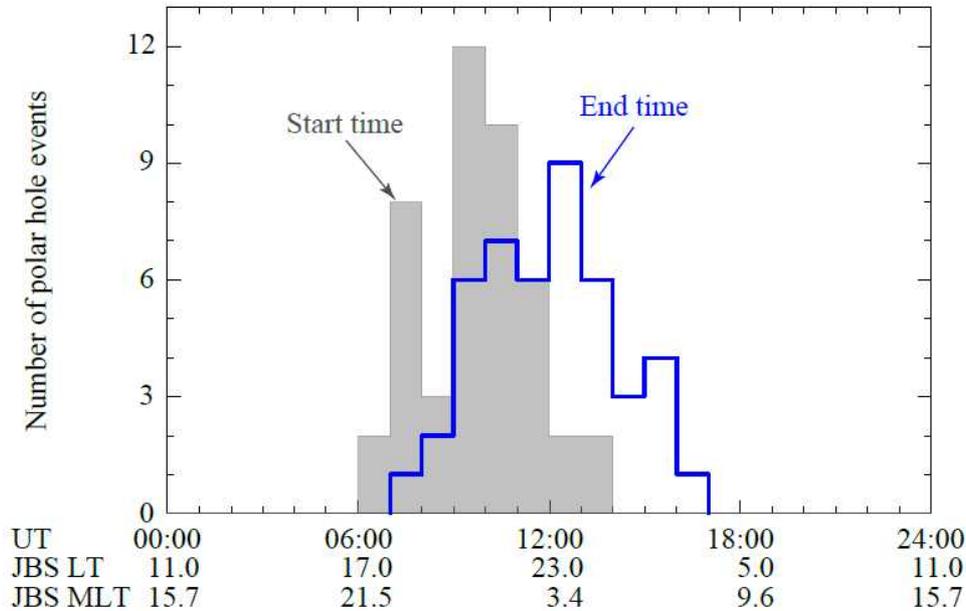


그림 14: 45개 폴라 홀 이벤트 지방시 분포. 회색 히스토그램은 폴라 홀 이벤트 시작 시간, 파란색 히스토그램은 폴라 홀 이벤트 종료 시간.

그림 14는 45개의 폴라 홀 이벤트의 자기 지방시(magnetic local time: MLT) 발생 분포를 보여줍니다. 회색 및 파란색 히스토그램은 각각 폴라 홀 이벤트의 시작 시간과 종료 시간의 이벤트 수를 나타냅니다. 모든 이벤트는 MLT = 1-3시간에서 최대 발생과 함께 광범위한 야간 자기 현지 시간(MLT = 22-06시간)에 걸쳐 시작되었습니다. 폴라 홀 이벤트는 MLT = 23-09시간 범위에서 종료되었으며, 그 중 ~82% (45개 중 37개)가 06 MLT 이전에 종료되었습니다. 주간 MLT에 대해 매우 비대칭인 이 MLT 의존성은 어두운 극관을 가로지르는 느린 태양 반대 방향으로 흐르는 플라즈마 대류로 인해 플라즈마 체류 시간이 길어질 수 있습니다. 우리의 지상 기반 관측은 Brinton et al. (1978)의 이전 위성 관측과 일치합니다. Brinton et al.은 위성 자료를 이용하여 O⁺ 밀도로 식별되는 폴라 홀 이벤트가 주로 21에서 06 MLT 사이에 발생한다는 것을 관측했다.

그림 15는 겨울 극 F 영역 전리층에서 관측된 45개의 폴라 홀 이벤트의 지속 시간에 대한 발생 히스토그램을 보여준다. 0에서 1시간 사이의 지속 시간에 이벤트가 없는 것은 선택 기준 때문입니다. 즉, 본 연구에서 정의된 폴라 홀 이벤트는 1시간 이상 지속되어야 한다. 지속 시간의 발생은 1시간에서 5.5시간 사이에 분포하며, 그 분포는 1.5시간에서 최대 발생으로 2시간 이내에 이벤트들이 주로 분포하고 있다.

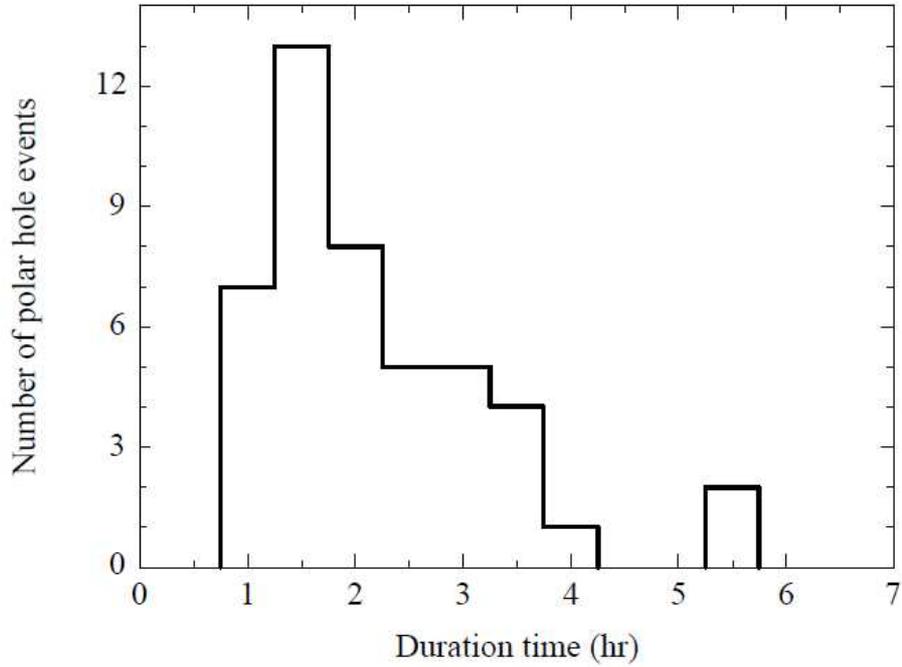


그림 15: 폴라 홀 이벤트 지속 시간에 대한 히스토그램

그림 12e에서 우리는 NmF2의 기하급수적 감소가 폴라 홀 현상이 시작되기 4.5시간 전에 시작되었음을 보여주었다. 그림 12에 제시된 폴라 홀 전에 발생하는 이러한 급격한 밀도 지수 감소는 유일한 경우가 아닙니다. 그림 16은 각각 2019년 6월 11일과 6월 17일에 관측된 두 가지 다른 예를 보여줍니다.

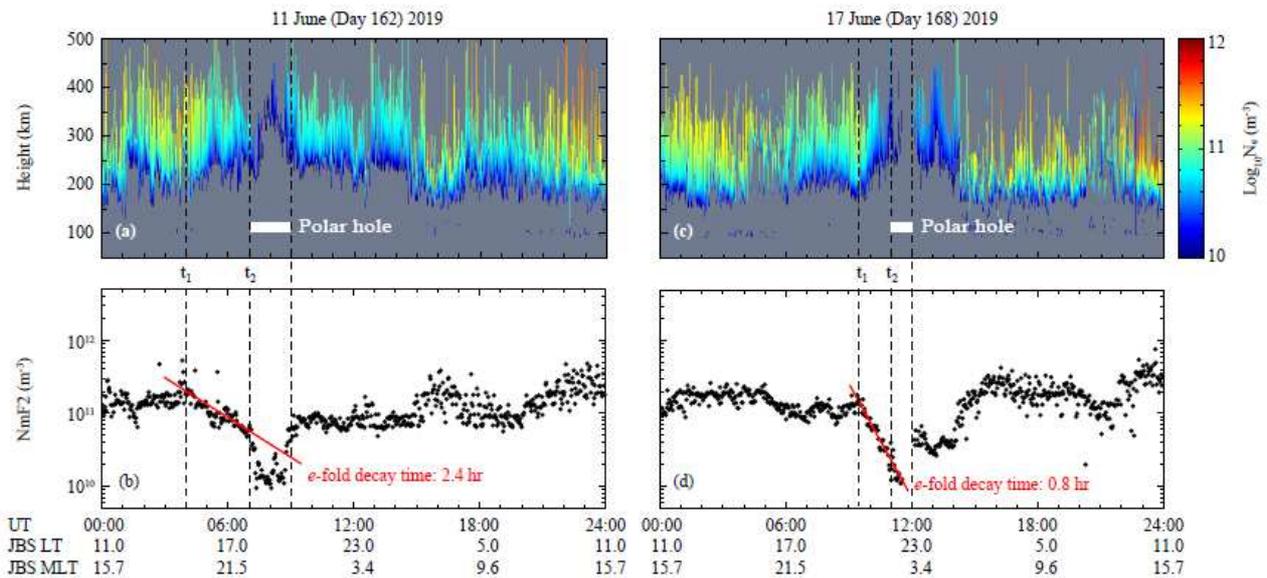


그림 16: 2019년 6월 11일 (a) JVD 관측 자료 (b) NmF2. 2019년 6월 17일 (c) JVD 관측 자료 (d) NmF2.

그림 16a는 6월 11일 이벤트의 폴라 홀(흰색 가로 막대로 표시됨)이 UT(t2) 07:00 경에 시작되었음을 보여줍니다. 그림 12의 이벤트와 달리 폴라 홀 이벤트 동안 극 전리층이 완전히 사라지

지 않았습니니다. 즉, JVD는 10^{10} m^{-3} 이상의 NmF2 값을 측정했습니다. 그러나 색상으로 구분된 JVD 데이터는 ~07:00 UT에서 갑자기 사라지고 $\sim 4.0 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ 미만의 NmF2 값으로 1시간 이상 지속됩니다. 04:00 UT(t_1)에 NmF2 값은 $\sim 2.0 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 이며 감소하기 시작했습니다 (그림 16b). t_1 과 t_2 사이의 데이터에 대한 NmF2 값과 t_1 에 대한 시간의 지수 피팅($A_i \exp(-kt)$, 빨간색 선으로 표시됨)은 $A_i = 2.0 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 및 $k = 10$ 을 산출합니다. 2.4시간의 e-fold 감쇠 시간, t_2 직후에 플라 홀 내부의 NmF2 값은 기울기 아래 $1.0 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ 와 $3.0 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ 사이에 빨간색으로 분포되어 전자가 주변 전자보다 플라 홀 내에서 더 빠르게 붕괴되고 있음을 나타냅니다. 구멍. 6월 17일 플라 홀 이벤트에서 플라 홀의 시작은 UT 11:00에 확인되었습니다 (그림 16c). 09:30 UT에 시작되는 가파른 NmF2의 지수 감소가 있었는데, 이는 플라 홀 이벤트 시작보다 1.5시간 앞당겨졌습니다 (그림 16d). 기울기는 $k = 28.9$ 인 지수 피팅에 의해 결정되며, 이는 6월 11일 이벤트보다 짧은 ~ 0.8 시간의 e-fold 붕괴 시간에 해당합니다. 지수 NmF2 감소와 유사한 기능이 12:00에서 13:00 UT 기간에 관측되었다.

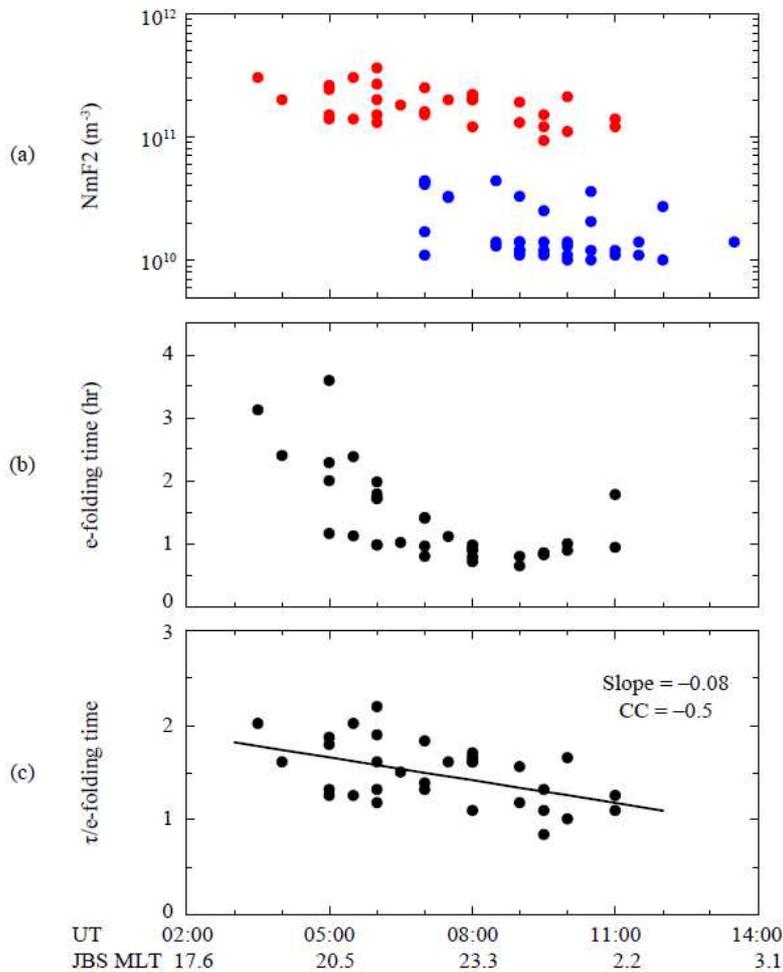


그림 17: (a) t_1 (빨간색 점) 과 t_2 (파란색 점) NmF2 값. (b) e-folding 시간 (c) NmF2 값들이 플라 홀까지 감소하는 시간 비

우리는 45개의 플라 홀 이벤트 중 플라 홀 이벤트가 시작되기 전에 기하급수적으로 NmF2 감소를 나타내는 34개의 이벤트를 확인했습니다. 그림 17a는 34개 이벤트의 t_1 (빨간색 점) 및 t_2

(파란색 점)에서의 NmF2 값을 보여줍니다. 기하급수적 전자 밀도 감소는 $\sim 1 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 및 $\sim 4 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 사이의 NmF2 값으로 UT 03:00에서 11:00 사이에 시작되었습니다. t_1 에서 NmF2 값은 MLT = 17시부터 MLT = 24시까지 자기 지방시에 크게 의존하지 않습니다. 기하급수적 밀도 감소는 20~03 MLT 사이에서 멈췄습니다. t_2 에서 NmF2 값은 대부분 $\sim 1 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ 및 $\sim 5 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ 범위에 분포합니다. 이 값은 플라 홀 300km 고도 근처에서 위성에 의해 관측된 낮은 값보다 두 자릿수 더 큼니다 (Brinton et al., 1978). t_1 과 t_2 에서의 NmF2 값을 자기 지방시에 따라 비교함으로써 NmF2의 지수 감소 시작이 공간 효과가 아니라 시간 효과에 의한 F2 층의 전자 밀도 감소로 제안합니다.

그림 17b는 34개 이벤트의 e-폴딩 시간을 보여줍니다. 전자밀도가 기하급수적으로 감소하기 시작한 t_1 에 표시됩니다. e-폴딩 시간 값은 MLT = 17시와 MLT = 24시 사이에서 0.5에서 4 시 범위로 분포됩니다. e-폴딩 시간은 JBS의 자기 지방시 MLT = 22시로 이동함에 따라 감소한 다음 증가합니다. 그림 17c는 시간 비율 τ /e-폴딩 시간을 보여줍니다. 여기서 τ 는 t_1 에서 NmF2 값이 $4 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ 값으로 감소하는 데 필요한 시간을 나타냅니다. 그림 17c에는 최소 제곱 피팅과 선형 상관 계수(CC)에 의해 결정된 기울기가 포함되어 있습니다. 시간 비율은 $\sim 1 \sim 2$ 범위에 있으며, 이는 NmF2가 기기 밀도 상한인 $4 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ 까지 고갈되려면 1-2 e-폴딩 감소가 필요함을 나타냅니다. 데이터 포인트의 상당한 분산에도 불구하고 τ /e-폴딩 시간 비율은 MLT의 감소 함수임이 분명합니다. 즉, JBS가 저녁(~ 17 MLT)에 가까울 때 비율은 ~ 2 이고 관측소가 자기 지역 자정(~ 24 MLT)으로 이동함에 따라 ~ 1 로 감소합니다.

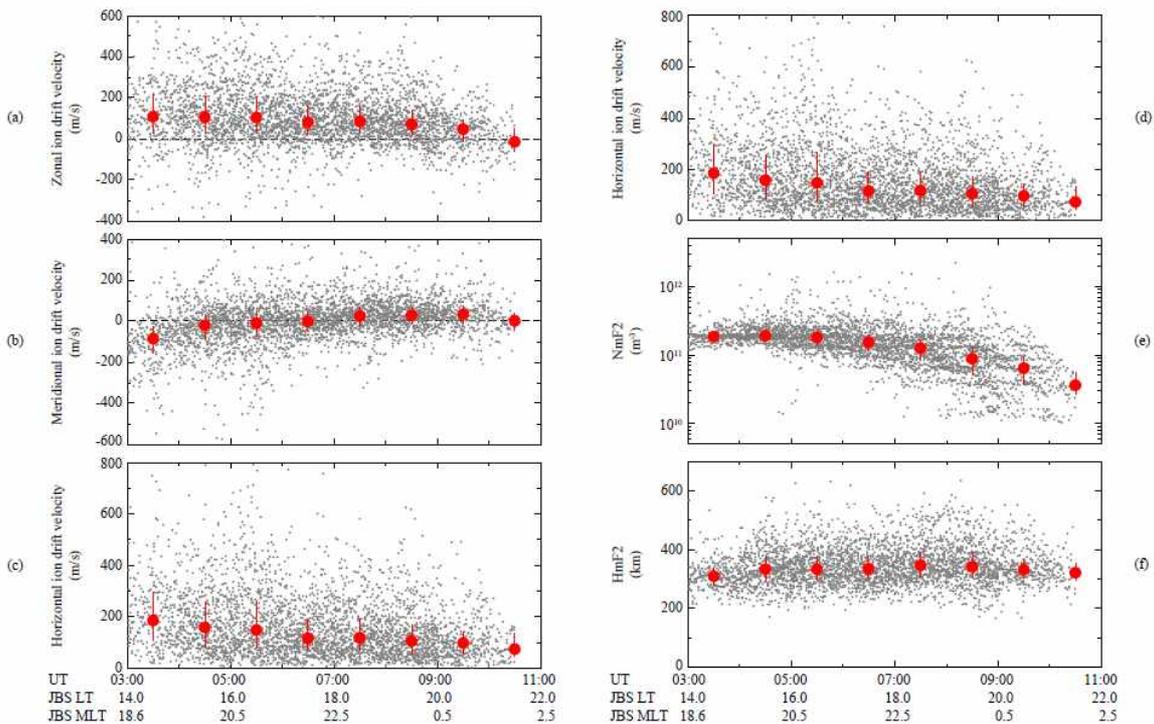


그림 18: 9-11시에 발생한 플라 홀 이벤트 6시간 전의 (a) Zonal ion drift. (b) Meridional ion drift. (c)-(d) Horizontal drift. (e) NmF2. (f) HmF2

그림 18은 9-11시 사이에 발생한 22개 플라 홀이벤트 6시간 전의 장보고 기지 VIPIR 장비로부터 측정된 ion drift, NmF2와 HmF2 값들이다. 작은 회색 점들은 VIPIR 관측자료이고 빨간

색 큰 점들은 1시간 동안 VIPIR 관측 자료의 중간값(50%)을 나타낸다. 각 중간값을 지나가는 직선들은 1-시간 자료들의 25%와 75%에 해당하는 값들이다. 폴라 홀 이벤트들은 극 고층 우주환경 기간에 발생한 이벤트이다. 따라서 작은 이온 drift 속도가 예상된다. Zonal drift 속도 중간값은 동쪽방향으로 100 m/s의 속도로 이동하면서 폴라 홀이 시작되는 시간에 점점 그 값이 작아진다. Meridional drift 속도의 경우 중간값들이 UT: 3-7시까지 음의 값을 보이며 그 이후에 100 m/s 이하의 작은 값이지만 양의 값으로 극성이 바뀌었다. 이러한 현상은 이온 drift가 태양 반대 방향으로 이동하고 있음을 의미한다. 그림 18c-18d는 수평속도를 나타내며 3시 근처에서 200 m/s 폴라 홀이 시작되면서 100m/s 이하로 감소하였다.

그림 18e와 18f는 각각 NmF2와 HmF2 나타낸다. UT: 3-7시 사이에 전자밀도 중간값은 $\sim 2 \times 10^{11} \text{ m}^{-3}$ 이었으며 그 값이 점점 감소하여 폴라 홀이 발생 했을 때 NmF2의 중간값은 $\sim 4 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ 이 되었다. 이러한 전자밀도 감소 현상은 수평 속도 감소 현상과 관련이 있다. HmF2의 경우 중간값들은 300 km 정도로 분포하고 있으며 폴라 홀 이벤트 발생과 HmF2 값의 변화는 확인 할 수 없다. 이러한 관측 결과는 전자밀도 변화가 F2층의 고도 변화와 관계없이 이온 drift 속도와 관계가 있는 것을 의미한다. 즉 이온의 밤 지역 방향의 대류 속도가 작아지면서 이온 재결합에 의해 전자밀도가 감소하였고 폴라 홀 이벤트가 발생되었다고 판단된다.

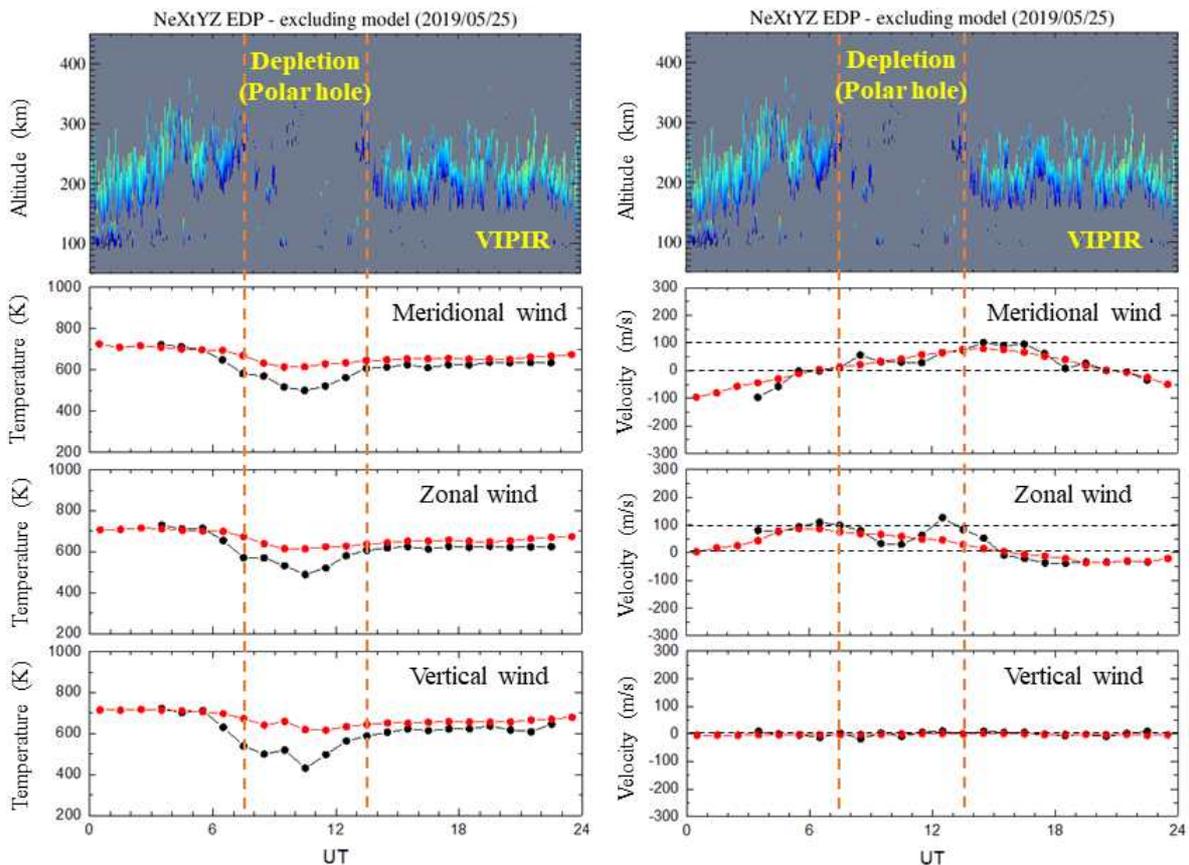


그림 19: 2019년 5월 25일 장보고 기지에서 VIPIR 장비로 관측된 전리권 밀도와 FPI 장비로 관측된 중성대기의 온도/속도 자료

그림 19는 2019년 5월 25일 장보고 과학기지에서 VIPIR 장비로 관측된 전자밀도와 FPI 장비로 관측된 중성대기 온도와 속도 자료이다. 폴라 홀 (급격한 전자밀도 감소) 이벤트는 VIPIR

전자밀도 자료에서 확인할 수 있으며 두 개의 수직 점선으로 표시하였다. FPI 자료에서 검정색 점들은 2019년 5월 25일 관측자료이고 빨간색 점들은 폴라 홀 이벤트가 발생하지 않은 Kp 지수가 1 이하의 고요한 기간에 얻어진 값들의 중간값이다. 폴라 홀 이벤트가 발생하지 않은 기간과 폴라 홀 이벤트 기간을 비교해 보면 중성대기 “meridional”, “zonal”, “vertical” 방향의 온도가 폴라 홀 이벤트 기간에 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 중성대기 온도와 다르게 중성대기 속도의 경우 폴라 홀 이벤트 발생 기간에 특별한 변화가 관측되지 않았다.

FPI observations at JBS for 2018-2019

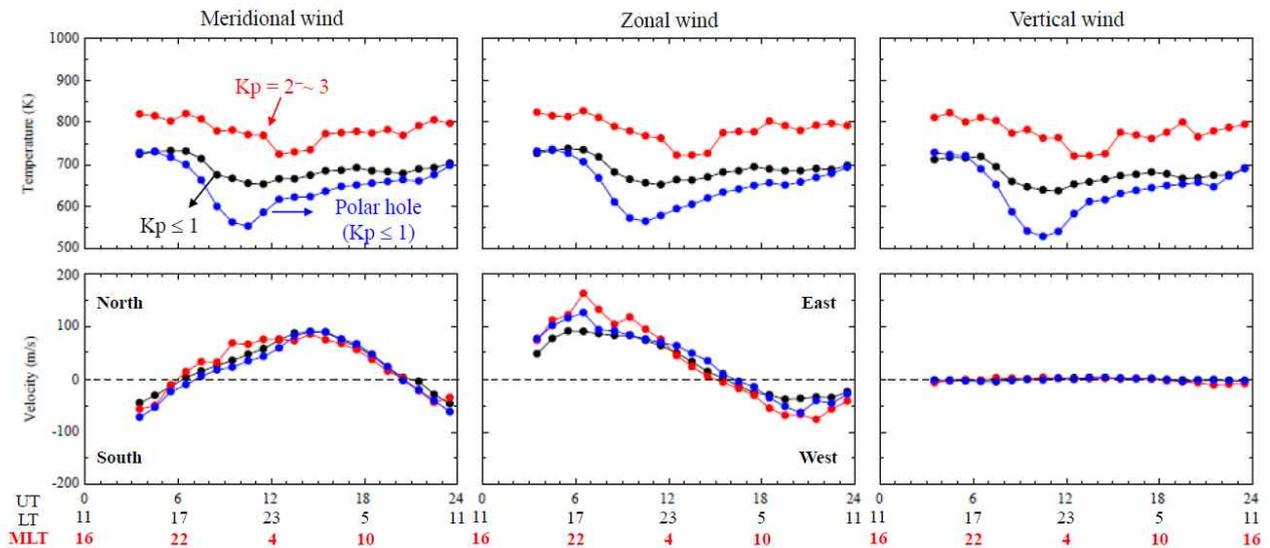


그림 20: 다양한 우주환경 기간에 장보고 FPI 장비로 관측된 중성대기 온도/바람 자료

그림 20은 중성대기 통계 결과로서 다양한 우주환경 (Kp≤1: 극고요 우주환경 섭동 기간(검정색), Kp = 2-3: 중간규모의 우주환경 섭동 기간(빨간색), “polar hole”이 관측된 기간(파란색))에 장보고 기지에서 측정된 중성대기 온도/바람 속도를 나타낸다. 중성대기 온도의 경우 우주환경 변화, 즉 지구 자기권 섭동 정도에 크게 의존성이 확인되었으나 바람 속도의 경우에는 우주환경 변화에 크게 영향을 받지 않고 있다.

제 3 절 장보고 기지에서 관측된 Pc1 파동 발생 및 전파 특성 연구

우주환경 지상 자기장 측정기 자료를 이용하여 지구 자기권에서 발생한 다양한 종류의 자기장 섭동을 연구할 수 있다. 근지구 우주공간에서는 자기장 측정기를 이용하여 관측되는 파동은 ultra-low frequency (ULF) 파동으로 주기는 약 수 mHz에서 수 Hz정도이다 (표1 참조). ULF 파동은 지구 자기권 규모에서 진동하는 가장 낮은 진동수를 가진 파동으로 다양한 이온 회전 주파수까지의 범위를 포함하고 있다. 지구 자기권에서 ULF 파동은 태양풍 변화에 의해 발생할 수 있으며 자기권계면에서의 불안정성 및 지구 자기권 내에서의 지구 자기력선에 대한 플라즈마 온도 비등방성에 의해서 발생할 수 있다.

Type		Period (sec)	Freq (mHz)
Continuous Pulsations	Pc 1	0.2 – 5	200 – 5000
	Pc 2	5 – 10	100 – 200
	Pc 3	10 – 45	22 – 100
	Pc 4	45 – 150	7 – 22
	Pc 5	150 – 600	2 – 7
Irregular Pulsations	Pi 1	1 – 40	25 – 1000
	Pi 2	40 – 150	7 – 25

표 1 . ULF 파동의 분류

지구 자기권 우주 환경 연구를 위해 중요한 장비 중 하나는 자기장 측정기이다. 이러한 자기장 측정기는 지상과 우주공간에서 시 변환 우주환경에 의한 자기장 섭동량 측정을 위해 사용되고 있으며 많은 우주 선진국에서 지상에 설치하여 운용하고 있으며 특히 최근에는 여러 나라가 자기장 네트워크를 구축하여 국제 공동연구를 수행하고 있다.

우주환경 연구를 위해 배경 자기장 변화와 파동 자기장 변화 측정이 요구된다. 배경 자기장 관측을 위해 “플럭스게이트 자기장 측정기 (fluxgate magnetometer)”가 사용되고 있으며 우주공간에서 발생한 플라즈마 파동 관측을 위해 “서치코일 자기장 측정기 (search-coil magnetometer)”가 사용되고 있다. 물론 고성능 플럭스게이트 자기장 측정기를 이용하여 플라즈마 파동을 관측하기도 한다. 그림 21a에서 정지궤도위성의 플럭스게이트 자기장 측정기로 관측된 electromagnetic ion cyclotron (EMIC) 파동과 남극에서 서치코일 자기장 측정기로 관측된 Pc1 파동을 나타내었다 (Hyun et al., 2014). 우주공간에서 발생한 시간에 남극에서도 주기는 약간 다르지만 파동이 발생함을 알 수 있다. 그림 21의 경우 정지궤도근처에서 파동이 발생하여 정지궤도 자기력선을 따라 파동이 전리층으로 전파되고 전리층에서 다양한 위도로 파동이 전파되었다고 설명된다 (그림 21b 참조). 전리층에서의 전파 과정을 설명하기 위해 국제 공동으로 남·북극 지역에 자기장 측정기 망을 설치하여 극 우주환경 연구를 수행하고 있다.

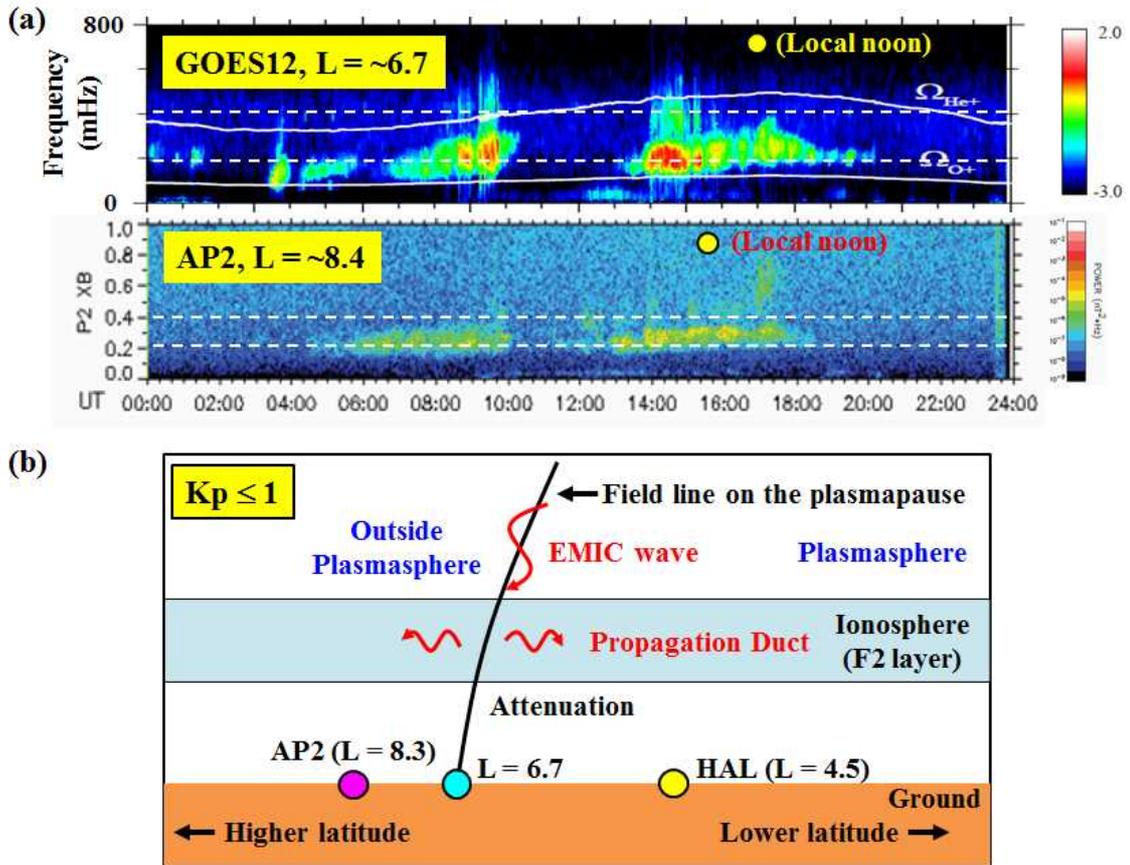
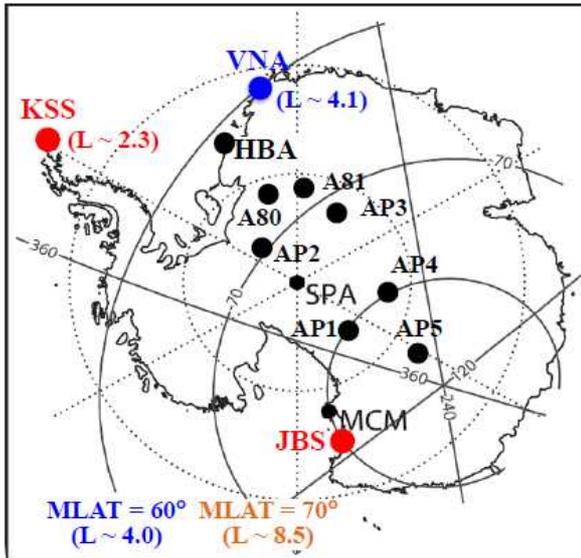


그림 21: (a) 정지궤도에서 관측된 EMIC 파동과 남극에서 관측된 Pc1 파동 비교. (b) 자기권에서 발생한 EMIC 파동의 지상 전파과정.

남극 장보고 기지 주변에 설치된 국제 서치코일 자기장 측정기 망을 이용하여 미국의 여러 기관(New Hampshire Univ., Augsburg College 등)에서 극지 우주환경 연구를 수행하고 있다 (그림 22 참조). 극지연구소는 국제 경쟁력 있는 극지 우주환경 연구를 위해 남극에 3기의 서치코일 자기장 측정기를 장보고기지 (JBS), 세종기지 (KSS), 그리고 독일의 Neumayer (VNA) 기지에 설치하여 운영하고 있다.

남극 장보고 기지는 오로라 지역보다 더 높은 극관(polar cap) 지역에 위치하며 이러한 지역은 자기력선이 열려있는 지역으로 알려져 있다. 극관 지역에서 Pc1-2 지자기 파동이 어떻게 발생 되는지 지금까지 정확한 발생 과정이 밝혀지지 않고 있다. 극지연구소에서 운영하는 서치코일 자기장 측정기 자료와 주변에 설치된 다른 나라의 자기장 측정기 자료를 이용하여 플라즈마 파동의 발생지역과 발생원으로부터 남쪽의 내부 자기권 지역 북쪽의 극관 경계지역 (polar cap boundary)까지의 넓은 영역에 대한 지구 자기권 플라즈마 파동 발생 및 전달과정 연구를 수행 할 수 있다.



장보고과학기지 (JBS): Polar cap boundary.

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

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

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

그림 22: 자기권-전리권 연동 연구를 위해 남극대륙에서 운용되고 우주환경 관측기지.

극지연구소가 독일 “Neumayer (VNA)기지”에 설치한 서치 코일 자기장 측정기는 지구 자기권에서 플라즈마 파동 발생 기원을 연구하는데 중요한 역할을 한다. 플라즈마권계면(plasmapause)은 우주환경이 극고요한 시기와 격변시기를 제외하면 일반적으로 지구반경의 약 4-5배 (L ~ 4-5) 지역에 위치하고 있다(그림 23 참조). 이론적으로 자기권에서 발생한 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 지역이 파동 발생 선호 지역으로 제안되고 있다. 원지점이 L > 8에 위치한 위성들은 궤도운영 특성 상 플라즈마권계면 지역에서 오래 머물지 못하고 순간적으로 통과하기에 플라즈마 파동 발생의 공간적 분포에서 플라즈마권계면 지역이 파동 발생빈도가 적어 최근 연구에서는 플라즈마권계면 근처 지역이 발생원 지역에서 배제되고 있다. 파동 발생에 대한 이론적 제안과 위성 관측 결과의 불일치성에 대한 문제 제기가 본 연구책임자 그룹에서 사전연구 수행으로 국제학술지에 제안되어 졌고 플라즈마 파동의 이벤트 연구와 통계적 연구를 통하여 플라즈마권계면에 대한 중요성을 강조하였다.

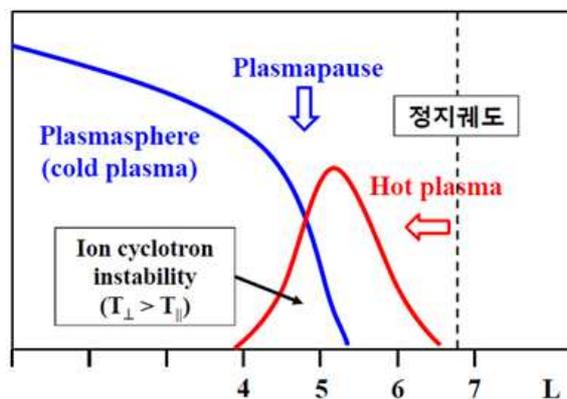


그림 23: 플라즈마권계면과 고온 플라즈마 비등방성 공간분포

현재 남극에서 영국이 운영하는 Halley 관측소 (HBA)와 극지연구소에서 운영하는 VNA 관측소가 플라즈마권계면 근처에 위치하고 있으며 (그림 22 참조) 서치코일 자기장 측정 장비를 이용하여 플라즈마 파동 연구를 수행하고 있다. 본 과제 수행으로 개발된 서치코일 자기장 측정 장비가 지방시적으로 HBA 관측소와 약간 떨어진 플라즈마권계면 근처의 VNA 관측소에서 운영된다면 자기권 플라즈마 파동 발생 및 전파에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다.

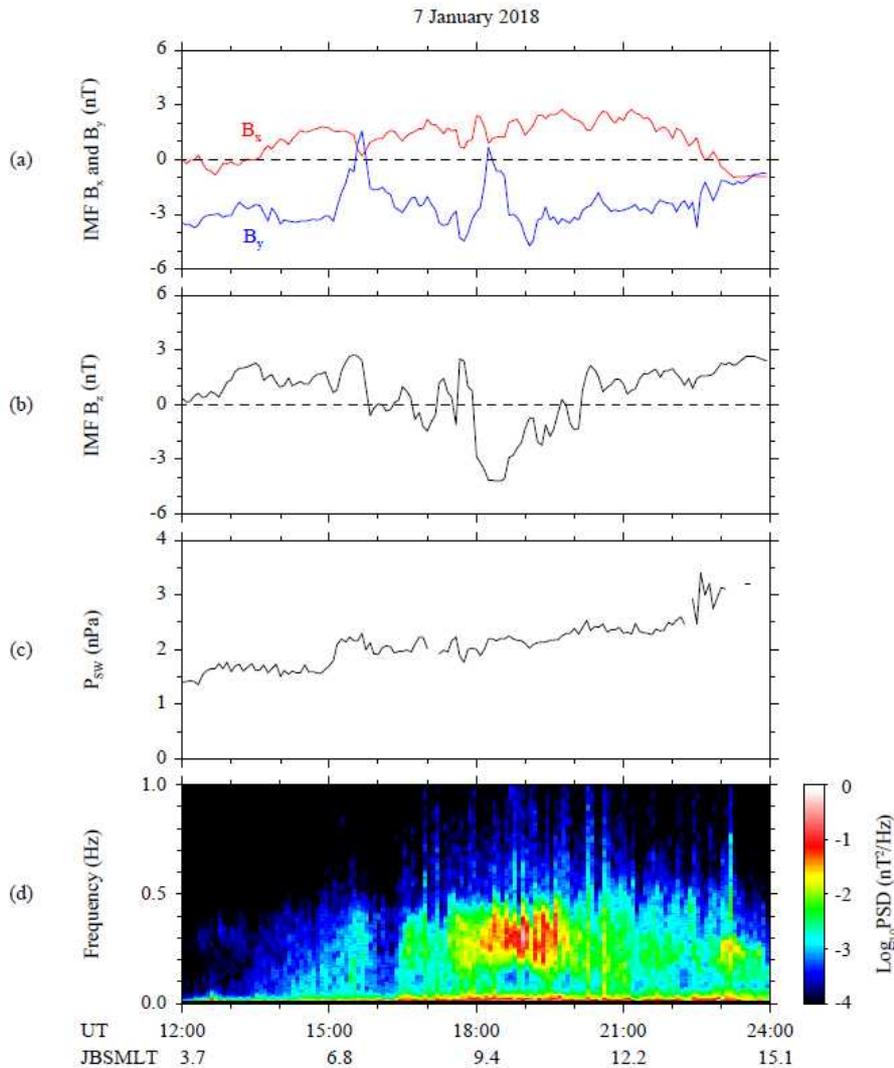


그림 24: 2018년 1월 7일 (a) 행성간 자기장 B_x , B_y 성분, (b) 행성간 자기장 B_z 성분, (c) 태양풍 동압력, (d) 장보고 기지에서 관측된 Pc1-2 파동의 다이내믹 스펙트럼

그림 24a-24c는 2018년 1월 7일 12:00-24:00 UT의 행성간 자기장(interplanetary magnetic field: IMF)과 태양풍 동압력(solar wind dynamic pressure: P_{sw})을 보여준다. 태양풍 매개변수는 5분 해상도로 OMNI 웹에서 제공됩니다. OMNI 웹에서 제공되는 행성간 자기장 자료는 bow shock nose로 시간 이동되어 나타내었다 (King and Papitashvili, 2006). IMF 벡터는 지구 중심 태양 자기권(GSM) 좌표계로 표시되었고 12시간 동안 IMF는 대부분 IMF $B_x = \sim 1-3$ nT 및 IMF $B_y = \sim -3-4$ nT인 Parker 나선형 방향을 따른다. IMF B_z 는 $\sim 18:00-20:07$ UT을

제외하고 주로 북쪽 ($B_z > 0$)이었다. P_{sw} 는 12시간 기간이 시작될 때 ~ 1.5 nPa에서 끝날 무렵 ~ 3 nPa로 점진적으로 증가한다.

그림 24d는 장보고 기지(JBS)에 설치된 서치코일 자기장 측정기 데이터의 수평성분에 대한 다이나믹 스펙트럼을 보여줍니다. 다이나믹 스펙트럼은 수평 X(북쪽) 및 Y(동쪽) 구성 요소의 다이나믹 스펙트럼 밀도의 평균 제곱근에 의해 생성되었습니다. JBS의 다이나믹 스펙트럼은 JBS 관측소가 이른 아침(MLT = ~ 6 hr)부터 오후 (MLT = ~ 15 hr)까지 약 9시간 동안 Pc1-Pc2 파동에 해당되는 ~ 150 -500mHz의 넓은 주파수 대역의 파동을 보여준다. JBS 스펙트럼에서 주요 특징은 $\sim 18:00$ -20:00 UT 기간에 스펙트럼 세기의 증가입니다. 이 특징은 IMF 방향이 남쪽일 때 발생했으며 JBS에서 측정된 Pc1-Pc2 파동의 세기가 IMF B_z 극성에 의해 변조됨을 의미합니다.

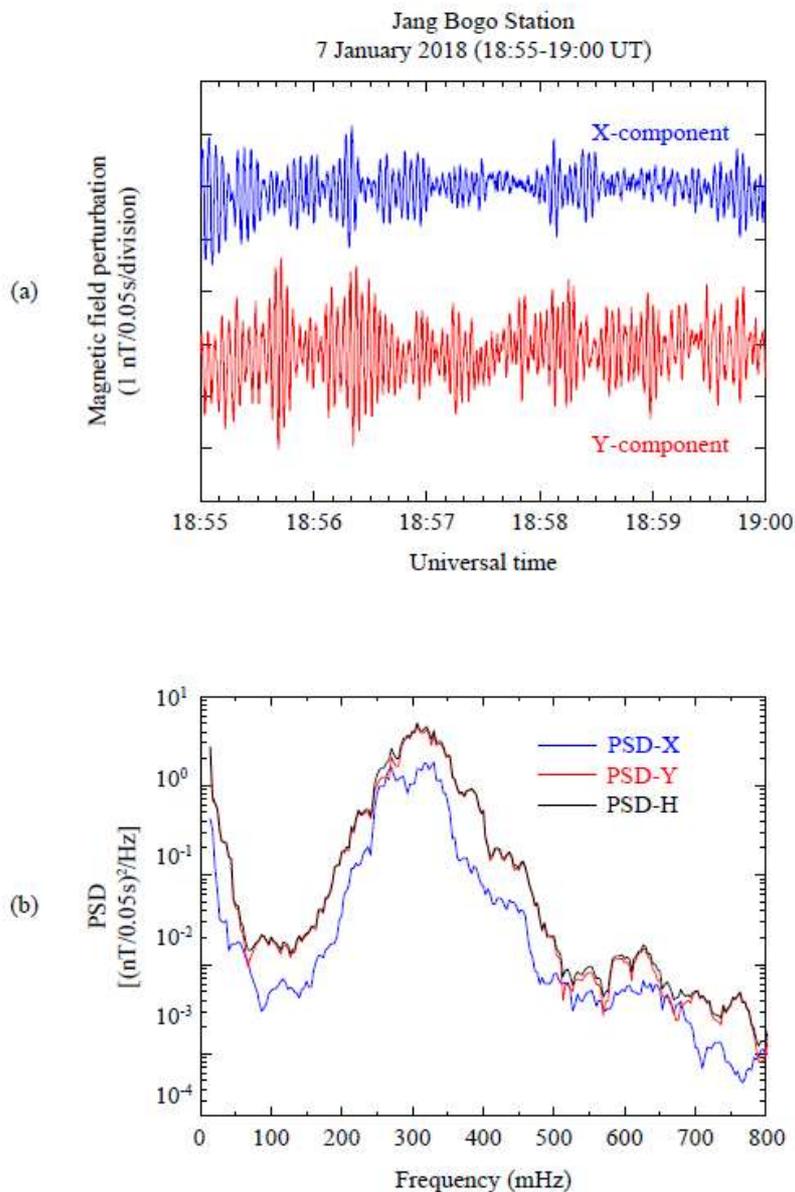


그림 25: (a) 2018년 1월 7일 18:55-17:00 UT의 시계열 자료 (b) 18:55-17:00 UT 자료의 파워 스펙트럼 밀도.

JBS에서 관측된 Pc1-Pc2 파동의 정량적 정보(파동 주파수 및 전력)를 얻기 위해 Fourier 변환을 5분 간격으로 적용하여 각 구성 요소의 전력 스펙트럼 밀도(PSD)를 계산하였다. 그림 25a는 그림 24에 표시된 기간의 5분(18:55-19:00 UT)에 대해 JBS의 서치코일 자기장 측정기에서 획득한 자기장 데이터를 보여준다. X 및 Y 구성 요소의 파동은 여러 파동 패킷 구조로 정현파로 진동합니다. 파동 패킷 구조의 5분 간격에 대한 X(PSD-X) 및 Y(PSD-Y) 구성 요소의 자기력 스펙트럼이 그림 25b에 나와 있습니다. 총 수평 전력 스펙트럼 밀도(PSD-H)는 $PSD-X^2 + PSD-Y^2$ 의 제곱근을 취하여 계산됩니다. PSD-H의 스펙트럼은 307 mHz에서 강한 피크가 지배적이다. 지자기 파동의 강도를 정량화하기 위해 본 연구에서는 100-800 mHz의 고정 주파수 대역에서 PSD-H 세기를 적분하여 사용하였다.

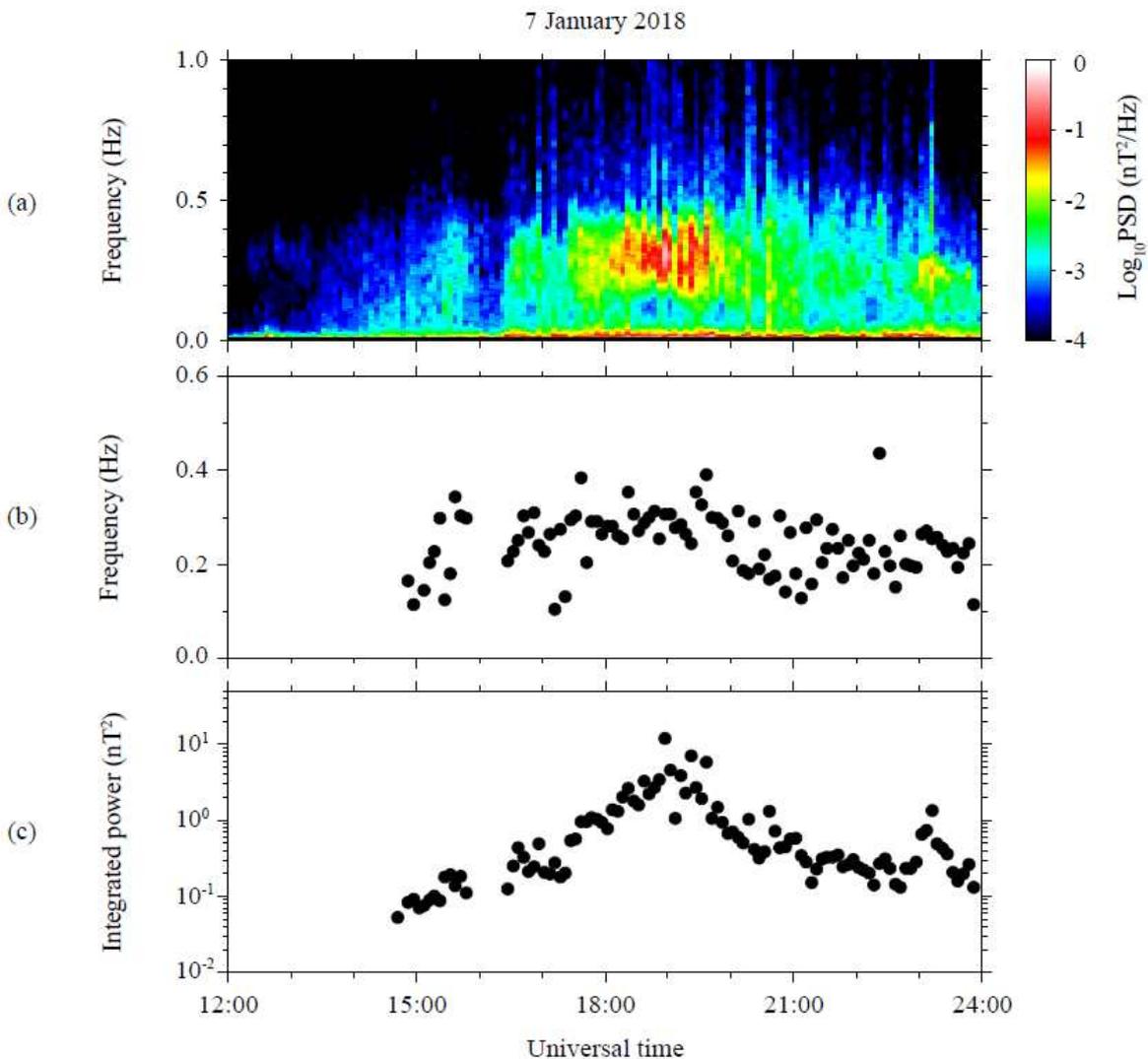


그림 26: (a) 2018년 1월 7일 장보고 기지에서 관측된 Pc1-2 파동의 다이내믹 스펙트럼. (b) 피크 주파수. (c) 100-800 mHz의 고정 주파수 대역에서 PSD-H 세기를 적분한 값

그림 26은 JBS 동적 스펙트럼과 함께 그림 24에서 나타낸 기간에 대한 파동 샘플의 피크 주파수 및 통합 전력을 보여줍니다. 각 파동 샘플을 식별하기 위해 그림 25에 사용된 스펙트럼 분석을 시계열의 중첩되지 않는 5분 간격에서 연속적으로 수행했습니다. 통합 전력은 $(\text{nT})^2$ 단위

로 0.07보다 큰 임계값을 사용하여 샘플에 대해 나타내었다. 피크 주파수는 0.1~0.4Hz 사이에 분포합니다. 그림 26a에서 볼 수 있는 시간 변조된 파동 활동은 그림 26c의 전력 강화 시간과 잘 일치합니다. 따라서 파동세기의 임계값은 적절하게 사용되었다.

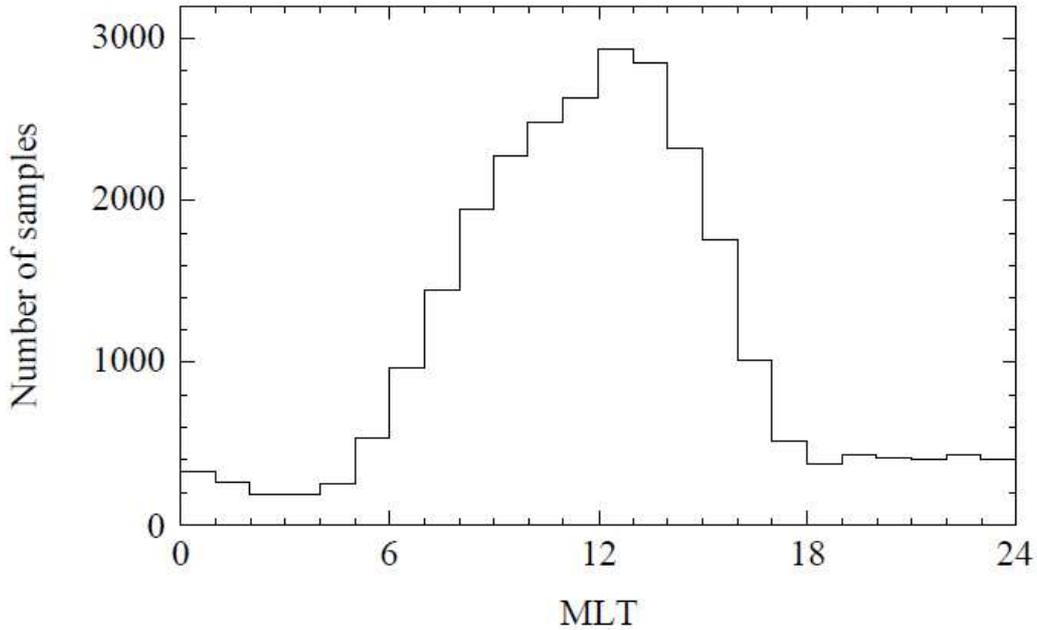


그림 27: 자기 지방시에 대한 파동 이벤트 수

그림 27은 2018년 1년 동안 장보고 기지에서 관측된 Pc1-Pc2 이벤트의 자기 지방시에 대한 발생 빈도를 보여줍니다. 이벤트는 주로 정오 지역에서 가장 많이 발생하고 있음을 알 수 있다.

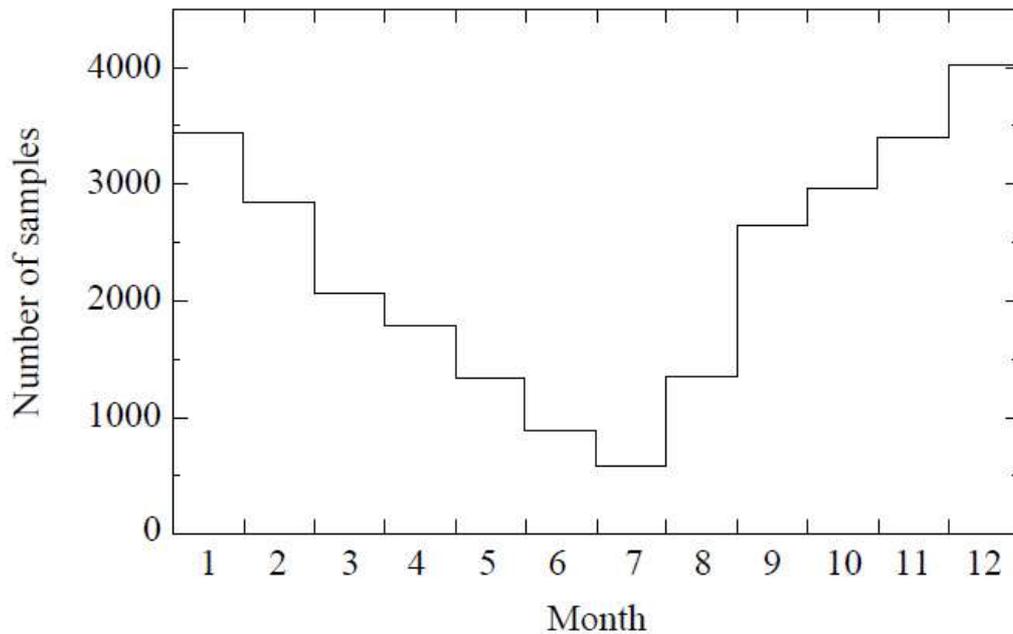


그림 28: 계절에 대한 파동 이벤트 수

그림 28은 계절에 대한 Pc1-Pc2 파동의 이벤트 수를 나타냅니다. JBS에서 측정된 파동 이벤트 수는 겨울(5-8 월)이 되면 가장 작은 수의 파동이 관측되고 여름(11-2월)이 되면 파동 수가

크게 증가한다.

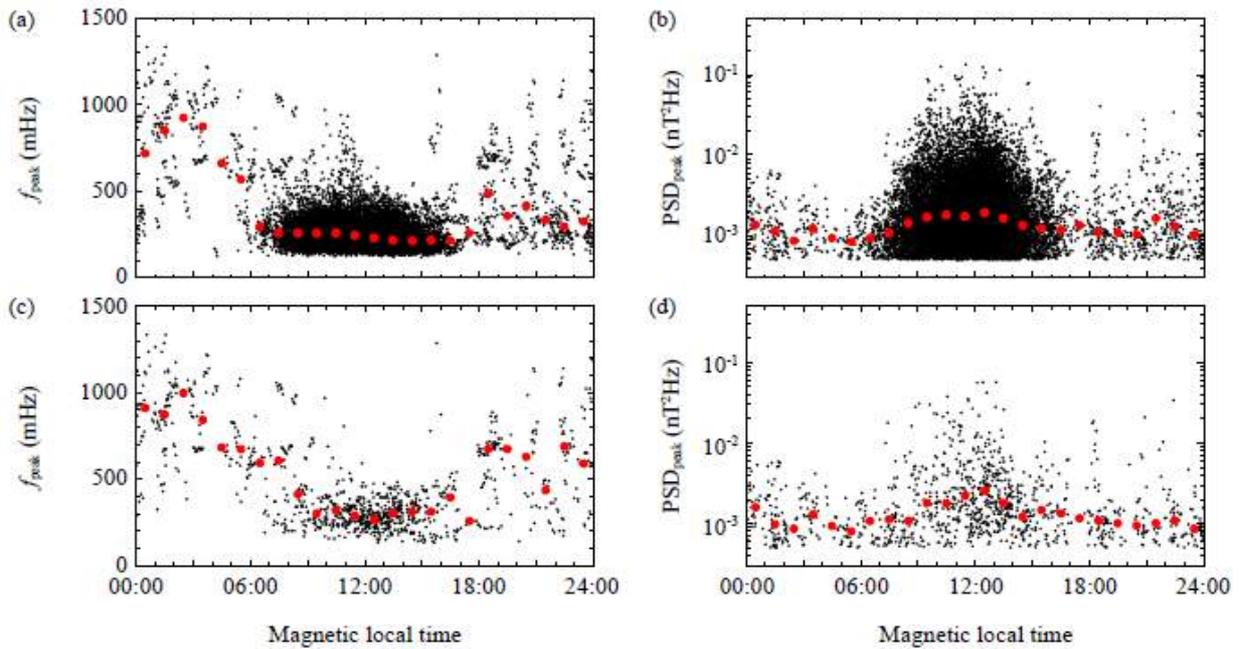


그림 29: 자기 지방시에 대한 Pc1-2 이벤트의 (a) 피크 주파수 (b) PSD. 자기 지방시에 대한 X-Y 높은 상관관계 이벤트의 (c) 피크 주파수 (d) PSD.

그림 29a와 29b는 자기 지방시에 대한 Pc1-2 이벤트의 피크 주파수와 PSD를 나타낸다. 빨간색 원은 각 1-hr MLT 구간에 있는 이벤트들의 중간값이다. 그림 27에서 보인 것처럼 낮 지역에서 거의 모든 이벤트가 관측되었다. 밤 지역에서의 이벤트와 비교하면 파동의 주파수는 낮 지역에서 낮고 파동의 세기는 낮 지역에서 큰 값을 갖는다. 파동 세기의 중간값들이 22시 근처에서 증가하고 있는데 이러한 PSD 증가는 서브스톰 활동과 관련이 있는 것 같다. 낮 지역에서 많은 이벤트가 관측되는 것은 파동 발생원 지역에 JBS가 위치했기 때문이다. 주로 cusp 지역이 낮 지역에 형성되므로 장보고 기지에서 관측된 Pc1-2 파동들은 자기장이 열려있는 cusp 지역에서 발생한 파동으로 생각된다. X-Y 높은 상관관계 이벤트 수는 전체 이벤트의 약 6%에 해당하지만 자기 지방시에 대한 피크 주파수, PSD의 변화는 거의 같은 경향을 보인다.

그림 30은 X-Y 높은 상관관계 이벤트들에 대한 “ellipticity”와 “azimuthal angle”을 나타낸다. “ellipticity”값이 음이면 “left-handed” 극성을 가지고 양이면 “right-handed” 극성을 갖는다. “ellipticity”가 0 값을 가지면 선형편광을 의미한다. “azimuthal angle”의 경우 +45도 이상 또는 -45이하의 값을 가지면 Y 성분의 크기가 X 성분의 크기보다 큰 경우이다. 장보고 기지에서 관측된 Pc1-2 파동들은 어느 한 방향으로 편광된 모습이 아닌 “ellipticity”값이 -0.5부터 +0.5 사이에 주로 분포한다. “azimuthal angle”의 경우 대부분의 이벤트들이 |45도| 보다 큰 값들을 가지고 있어 Y 성분이 X 성분보다 큰 값으로 관측되었다. “ellipticity”와 “azimuthal angle”의 값들이 자기권에서 발생한 파동이 전리권을 통과하면서 얻어진 결과인지 또는 자기권에서의 특성이 그대로 지상으로 전달되었는지 조사가 요구된다. 이러한 관측 결과를 설명하기 위해 자기권/전리권 위성 자료 분석도 필요하다.

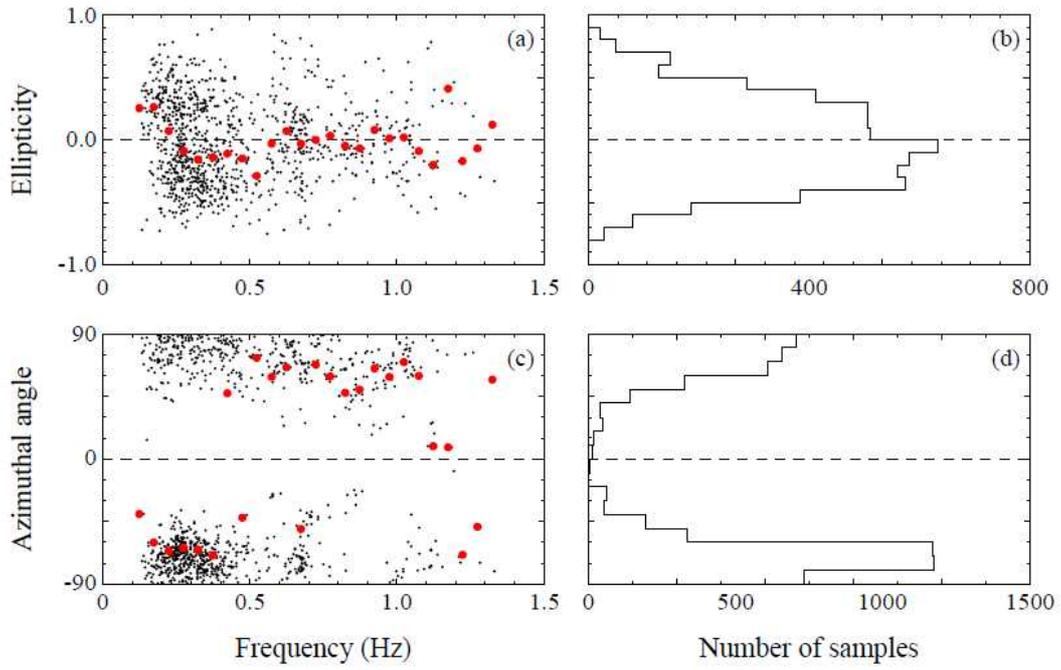


그림 30: “High-coherence” 이벤트의 ellipticity와 azimuthal angle



제 4 절 전리권 Swarm 위성 자료를 이용한 지구 자기장 특성 연구

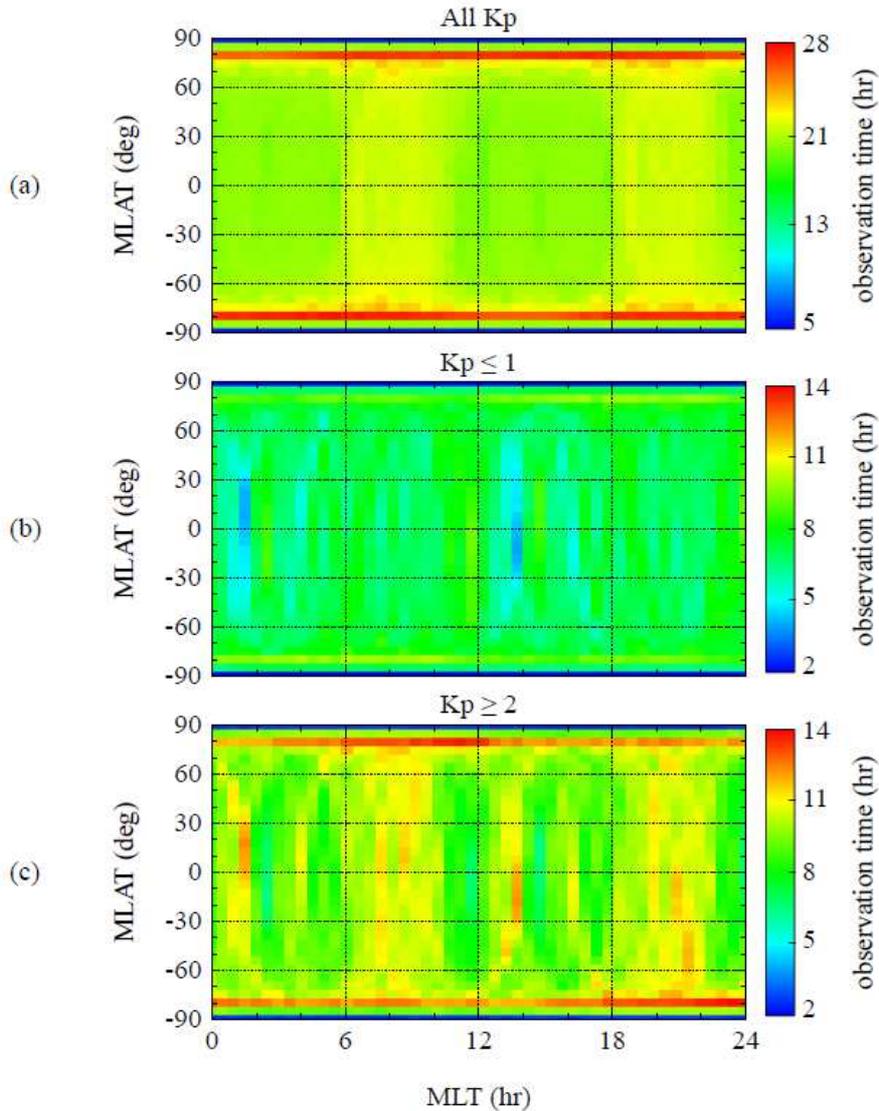


그림 31: 2014-2017년 Swarm 위성 관측자료 범위

그림 31a-31c는 모든 Kp 조건에 대해 빈 크기가 MLAT에서 5°이고 MLT에서 0.5시간인 자기 위도(MLAT)-자기 지역 시간(MLT)공간 지도에서 2014-2017년에 대한 Swarm 자기장 데이터 범위를 보여줍니다. $K_p \geq 2$ 는 중간 및 교란 조건, $K_p \leq 1$ 는 조용한 조건에 해당한다. 색상 키는 관측 시간을 시간 단위로 보여줍니다. 모든 Kp 조건에 대한 컬러 키 스케일은 $K_p \geq 2$ 및 $K_p \leq 1$ 의 경우와 다릅니다. 데이터 범위는 $\pm 80^\circ$ MLAT에서 높습니다. 이는 위성의 궤도 기울기가 87.8° 이기 때문이다. 통계분석에 사용된 자기장 데이터의 공간 분포는 MLT에서 균일하지 않습니다. 그러나 시간에 따른 불균일 분포의 변동은 평균 관측 시간에 대해 계수 2 이내이므로 불균일 데이터 커버리지가 통계에 큰 영향을 미치지 않습니다.

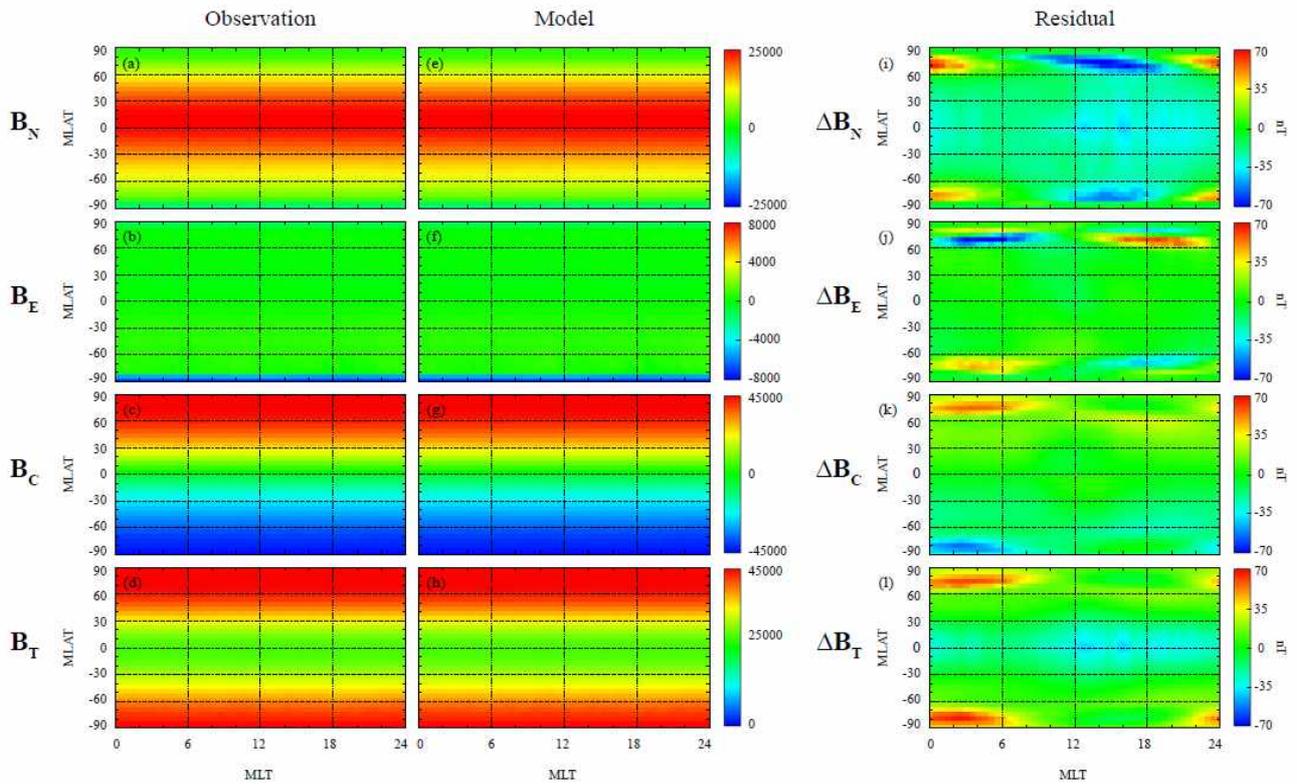


그림 32: (a)-(d) 2014-2017년 기간에 North-East-Center (NEC) 좌표로 고도 약 500 km에서 측정된 Swarm-B의 자기장 성분 및 자기장 세기의 자기 지방시에 대한 평균값. (e)-(h) CHAOS 자기 모델값. (i)-(l) 관측값-모델값.

그림 32a-32d는 2014-2017년 기간에 North-East-Center 좌표로 고도 약 500 km에서 Swarm-B 위성으로부터 측정된 자기장 성분 및 세기의 자기 지방시에 대한 평균값이고 그림 32e-32h는 CHAOS 모델값이다. 우선 남극/북극 총 자기장 세기를 비교하면 북극의 자기장 세기가 남극보다 큰 것을 확인할 수 있다. 지구 자기장은 쌍극자 형태가 지배적이기에 동서 방향 (BE)의 세기가 남북 방향(BN), 중심 방향(BC)보다 작다. 위성 위치에서 관측 및 모델 필드의 주요 기여는 내부 쌍극자 필드이기 때문에 BN은 적도 근처에서 강하고 자기 위도가 증가함에 따라 감소합니다. BC는 적도 근처에서 약하고 양반구의 고위도에서 반대 방향으로 강한 필드 강도를 나타냅니다. BE의 자기장 세기는 BN 및 BC보다 모든 지역에서 훨씬 약합니다.

관측 필드에서 모델 필드를 빼면 외부 소스에 의해 유도된 전리권 및 자기권 전류에 의해 주로 발생하는 잔류 필드(ΔB)를 확인할 수 있다. 각 필드 구성 요소에 대한 잔차 필드는 그림 32i-32l에 표시하였다. ΔB_N 은 $|MLAT| = 60$ 도 이상의 지역에서 낮에는 음의 섭동, 밤에는 양의 섭동을 보인다. 이러한 자기장 구성은 태양풍의 흐름에 의해 주간 구간에서는 압축되고 야간 구간에서는 늘어나는 자기력선의 변형으로 해석할 수 있다. 또한 적도 부근에서는 모든 자기 지역 시간에 ΔB_N 단위의 자기장의 고갈이 있으며 그 진폭의 고갈 정도는 자기 지방시 경도에 따라 다르다. 즉, 정오 구간에서 큰 고갈이 발생한다. ΔB_N 고갈의 이러한 종방향 비대칭은 비대칭 자기권 환전류에 의해 야기되는 것으로 보입니다. ΔB_E 섭동은 60도 이상의 고위도 지역에서 새벽과 저녁 지역에 반대 극성을 보이고 있다. 그러나 남반구에서는 이른 저녁 구간에서 단극성 섭동이 나타나고, 늦은 저녁 구간에서 약한 양극성 섭동이 관측되었다. 배경 자기장에 대한 동-서 방향의 섭동은 고위도 지역에 지구자기력선을 따라 흐르는 연자기력선 전류

에 의한 것이다. ΔBC 는 MLT = 0시에서 MLT = 8시까지 지방시를 따라 고위도 (MLAT = 70°-80°)에서 양의 섭동을 보여줍니다. 남반구에서는 ΔBC 의 반대 섭동이 MLT = 0시와 MLT = 7시 사이의 MLAT = -70°-90°에서 나타납니다. MLT = 14시와 MLT = 21시 사이에 각각 MLAT = ~60° 및 MLAT = ~-60°에서 약한 양의 섭동 및 음의 섭동이 나타납니다. ΔBT 는 두 반구의 고위도 지역에서 양의 섭동을, 적도 근처에서는 음의 섭동을 보여줍니다.

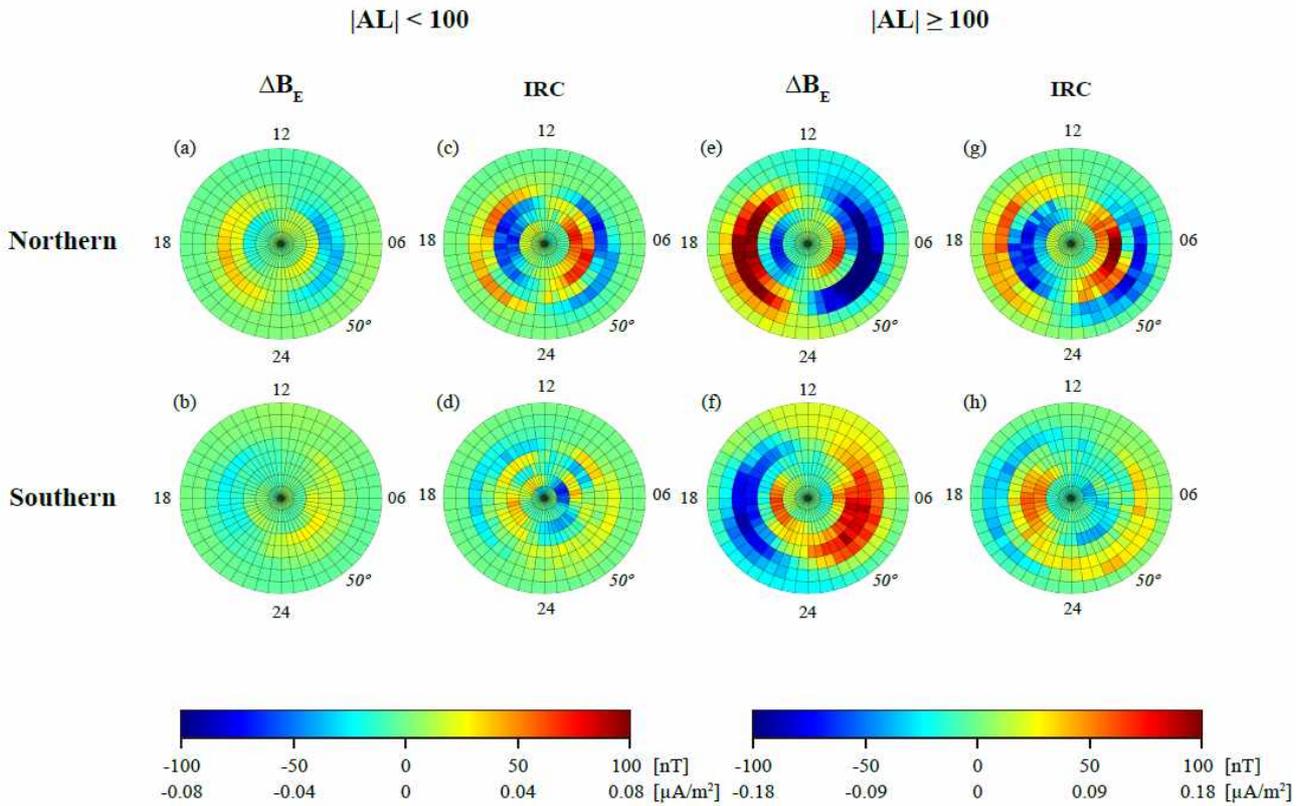


그림 33: 남북반구에서의 오로라 지수에 대한 동서방향의 자기장 섭동과 연자기력선 전류

그림 33은 남북반구 동서방향의 자기장 섭동과 연자기력선 전류를 오로라 지수에 대해 극지도로 나타낸 결과입니다. 극 지역에서의 자기장 섭동과 연자기력선 전류의 세기는 오로라 활동 (약한 경우 ($|AL| < 100$ nT)와 강한 경우 ($|AL| \geq 100$ nT))에 따라 크게 영향을 받으며 남반구보다 북반구에서 더 큰 연자기력선 전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 이러한 남북반구 비대칭 현상 이해를 위해 더 많은 연구가 요구된다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

	목표	결과	비고
SCI 논문	3	7	1차년도: SCI급 저널 2건 게재 2차년도: SCI급 저널 2건 게재 3차년도: SCI급 저널 3건 게재
학술대회 발표	3	7	1차년도: 2건 발표 2차년도: 2건 발표 3차년도: 3건 발표

1. 논문

- 1) SCI급(Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2020) 게재 1건: Statistical study of EMIC Pc1-Pc2 waves observed at subauroral latitudes
- 2) SCI급(Journal of Geophysical Research, 2020) 게재 1건: A statistical study of Pi2 pulsations observed in the upper ionosphere using Swarm magnetic field data
- 3) SCI급(Journal of Geophysical Research, 2021) 게재 1건: A statistical study of low-energy ion flux enhancements by EMIC waves in the inner magnetosphere
- 4) SCI급(Journal of Geophysical Research, 2021) 게재 1건: A case study of transversely heated low-energy helium ions by EMIC waves in the plasmasphere
- 5) SCI급(Journal of Geophysical Research, 2022) 게재 1건: Mass density inferred from toroidal wave frequencies and energization of low-energy helium ions during H-band EMIC wave interval
- 6) SCI급(Journal of Geophysical Research, 2022) 게재 1건: Spacecraft potential changes associated with EMIC waves in the inner magnetosphere
- 7) SCI급(Space Weather, 2022) 게재 1건: Disappearance of the polar cap ionosphere during geomagnetic storm on 11 May 2019

2. 학술대회 발표

- 1) 국제(VERSIM Virtual Meeting 일본 2020): A case study of transversely heated low-energy helium ions by EMIC waves in the plasmasphere

- 2) 국내(2020 한국우주과학회 가을 학술대회): A case study of transversely heated low-energy helium ions by EMIC waves in the plasmasphere
- 3) 국내(2020 한국우주과학회 가을 학술대회): Simultaneous observations of ducted Pc1 waves at multi-stations in Antarctica
- 4) 국내(2021 우주과학회 가을 학술대회): F-Region Depletion in the Polar Cap Ionosphere under Quiet Geomagnetic Conditions
- 5) 국내(2021년 한국우주과학회 가을 학술대회): Mass Density Inferred from Toroidal Standing Alfvén Wave Frequencies during H-Band EMIC Wave Interval
- 6) 국내(2021 우주과학회 봄 학술대회): Relationship between Positive Spacecraft Charging and Cold Ions Energized by EMIC Waves
- 7) 국내(2022 우주과학회 봄 학술대회): Spacecraft potential changes associated with EMIC waves in the inner magnetosphere



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 추가연구의 필요성

자기권-극 전리권·고층대기 연동 연구는 최근 많은 우주선진국에서 지상 장비를 이용하여 활발하게 진행하고 있는 연구 분야이다. 극 지역은 중위도, 저위도 지역과 달리 태양풍 에너지가 직접 전달되어지는 지역으로 자기장 변화가 가장 심하게 관측되어진다. 이러한 변화는 극 지역 전리층에 흐르는 강한 전류에 의한 것으로 태양풍 변화에 의한 자기권 운동학적 변화와 직·간접적으로 연동되어 있다. 이러한 전류 변화는 전리층에서의 전도도와 전기장과 상관관계가 있으며 극 지역에서의 여러 장비를 이용하여 전리층 변화에 대한 연구가 진행되고 있다.

극지 우주환경 연구를 위해 극지연구소는 남극 장보고 기지에 오로라 관측장비(All Sky Camera: ASC), 전리권 관측장비(Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar: VIPIR), 고층대기 관측장비 (Fabry-Perot Interferometer: FPI), 우주환경 자기장 측정기(Search-coil magnetometer: SCM, delta Inclination delta Declination magnetometer: dIdD)를 설치하여 운영하고 있다. 이러한 장비들은 극 지역에서 발생하는 다양한 자기권 우주환경 변화에 의한 지구 자기권-전리권 상호작용 현상 이해를 위해 중요한 자료를 제공하고 있다.

“자기권-전리권 연동” 연구는 현재 경희대학교 근지구 우주환경 연구그룹에서 활발하게 진행하고 있으며 극지연구소 전리권·고층대기 연구그룹과 장보고 기지 자료 공유를 통해 국제 경쟁력 있는 연구 결과를 도출하고 있다. 극지연구소 연구그룹은 전리권·고층대기 연구 분야에 강점을 띄고 있으며 경희대학교 연구그룹은 지구 자기권 연구 분야의 연구수행에 전문성을 띄고 있다. 현재 추진 중인“학-연 연구사업 협력체계”가 지속적으로 유지된다면 장보고 기지에 기 구축된 장비 활용으로 국제 극지 전리권·고층대기 커뮤니티에서 극지연구소의 위상이 크게 높아질 것으로 전망된다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 위성 자료

1. 저궤도 Swarm 위성 자료: <https://earth.esa.int/web/guest/swarm/data-access>
가. 자기장 자료 이용.
2. 저궤도 MetOp and NOAA/POE: <http://ngdc.noaa.gov/>
가. 고에너지 전자/프로톤 입자 자료.
3. 내부 자기권 Van Allen Probes 위성 자료: <http://emfisis.physics.uiowa.edu>
가. 저에너지 전자/프로톤 입자 자료/자기장 자료/위성 포텐셜 자료.
4. 태양풍 자료 : <http://omni.gsfc.nasa.gov/>
가. 행성간 공간 자기장 및 태양풍 속도/밀도 자료 이용.

제 2 절 지상 자료

1. 장보고 기지 서치코일 자기장 측정기 자료
2. 장보고 기지 전리권 측정기 자료

제 3 절 지자기 활동지수 자료

1. AE 지수: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>
2. SMU/SML 지수: [SuperMAG \(jhuapl.edu\)](http://www.jhuapl.edu/SuperMAG/)
3. Kp, SYM-H 지수: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>

제 7 장 참고문헌

- Bjoland, L. M., Ogawa, Y., Løvhaug, U. P., Lorentzen, D. A., Harch, S. M., & Oksavik, K. (2021). Electron density depletion region observed in the polar cap ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 126, e2020JA028432. <https://doi.org/10.1029/2020JA028432>
- Brinton, H. C., Grebowsky, J. M., & Brace, L. H. (1978). The high-latitude winter F region at 300 km: Thermal plasma observations from AE-C. *Journal of Geophysical Research*, 83(A10), 4767 - 4776. <https://doi.org/10.1029/JA083iA10p04767>
- Buonsanto, M. J. (1999). Ionospheric storms – A review. *Space Science Reviews*, 88(3 - 4), 563 - 601. <https://doi.org/10.1023/a:1005107532631>
- Clauer, C. R., & McPherron, R. L. (1974). Mapping the local time-universal time development of magnetospheric substorms using mid-latitude magnetic observations. *Journal of Geophysical Research*, 79(19), 2811 - 2820. <https://doi.org/10.1029/JA079i019p02811>
- Fuller-Rowell, T. J., Codrescu, M. V., Moffett, R. J., & Quegan, S. (1994). Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 99(A3), 3989 - 3914. <https://doi.org/10.1029/93JA02015>
- Gjroev, J. W. (2012). The SuperMAG data processing technique. *Journal of Geophysical Research*, 117(A9), A09213. <https://doi.org/10.1029/2012JA017683>
- Hosokawa, K., Kullen, A., Milan, S., Reidy, J., Zou, Y., Frey, H. U., et al. (2020). Aurora in the Polar Cap: A review. *Space Science Review*, 216(15), <https://doi.org/10.1007/s11214-020-0637-3>
- Kim, K.-H., Kwon, H.-J., Lee, J., Jin, H., & Seough, J. (2021). A case study of transversely heated lowenergy helium ions by EMIC waves in the plasmasphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2020JA028560. <https://doi.org/10.1029/2020JA028560>
- Kim, K.-H., Lee, J., Kwon, J.-W., Lee, E., Kim, H.-E., Jin, H., et al. (2022). Spacecraft potential changes associated with EMIC waves in the inner magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030337. <https://doi.org/10.1029/2022JA030337>
- Kim, K.-H., Takahashi, K., Lee, J., Jin, H., & Kwon, J.-W. (2022). Mass density inferred from toroidal wave frequencies and energization of low-energy helium ions during H-band EMIC wave interval. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030523. <https://doi.org/10.1029/2022JA030523>
- Kwon, H.-J., Kim, K.-H., Jee, G., Seon, J., Lee, C., Ham, Y.-B., et al. (2022). Disappearance of the polar cap ionosphere during geomagnetic storm on 11 May 2019. *Space Weather*, 20, e2022SW003054. <https://doi.org/10.1029/2022SW003054>
- Kwon, J.-W., K.-H. Kim, H. Jin, H.-J. Kwon, G. Jee, K. Shiokawa, and M. Connors (2020), Statistical study of EMIC Pc1-Pc2 waves observed at subauroral latitudes, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*,

<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105292>

- Lee, C., Jee, G., Wu, Q., Shim, J. S., Murphy, D., Song, I.-S., et al. (2017). Polar thermospheric winds and temperature observed by Fabry-Perot interferometer at Jang Bogo Station, Antarctica. *Journal of Geophysical Research*, 122, 9685 - 9695. <https://doi.org/10.1002/2017JA024408>
- Lee, J., Kim, K.-H., & Lee, E. (2021). A statistical study of low-energy ion flux enhancements by EMIC waves in the inner magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2021JA029793. <https://doi.org/10.1029/2021JA029793>
- Lyons, L. R., Lee, D.-Y., Wang, C.-P., & Mende, S. B. (2005). Global auroral responses to abrupt solar wind changes: Dynamic pressure, substorm, and null events. *Journal of Geophysical Research*, 110(A8), A08208. <https://doi.org/10.1029/2005JA011089>
- Nagai, T., Takahashi, K., Potemra, T. A., McEntire, R. W., Lopez, R. E., & Klumpar, D. M. (1990). The structure of the birkeland current system in the post-midnight plasma sheet. *Geophysical Research Letters*, 17(8), 1057 - 1060. <https://doi.org/10.1029/gl017i008p01057>
- Newell, P. T., & Gjerloev, J. W. (2011). Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power. *Journal of Geophysical Research*, 116(A12), A12211. <https://doi.org/10.1029/2011JA016779>
- Park, J.-H., Kim, K.-H., Kwon, H.-J., Jee, G., & Hwang, J. (2020). A statistical study of Pi2 pulsations observed in the upper ionosphere using Swarm magnetic field data. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125, e2019JA027293. <https://doi.org/10.1029/2019JA027293>
- Rishbeth, H., & Barron, D. W. (1960). Equilibrium electron distribution in the ionospheric F2-layer. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 18, 234 - 252. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(60\)90095-7](https://doi.org/10.1016/0021-9169(60)90095-7)
- Rishbeth, H., Fuller-Rowell, T. J., & Rees, D. (1987). Diffusive equilibrium and vertical motion in the thermosphere during a severe magnetic storm: A computational study. *Planetary and Space Science*, 35(9), 1157 - 1165. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(87\)90022-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(87)90022-5)
- Rodger, A. S., Mofett, R. J., & Quegan, S. (1992). The role of ion drift in the formation of ionization troughs in the mid- and high-latitude ionosphere—A review. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 54(1), 1 - 30. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(92\)90082-V](https://doi.org/10.1016/0021-9169(92)90082-V)
- Stauning, P. (2013). The polar cap index: A critical review of methods and a new approach. *Journal of Geophysical Research*, 118(8), 5021 - 5038. <https://doi.org/10.1002/jgra.50462>
- Tsurutani, B. T., Gonzalez, W. D., Gonzalez, A. L. C., Tang, F., Arballo, J. K., & Okada, M. (1995). Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of the solar cycle. *Journal of Geophysical Research*, 100(A11), 21717 - 21733. <https://doi.org/10.1029/95JA01476>
- Tsurutani, B. T., Ho, C. M., Arballo, J. K., & Goldstein, B. E. (1995). Large amplitude IMF

fluctuations in corotating interaction regions: Ulysses at midlatitudes. *Geophysical Research Letters*, 22(23), 3397 - 3400. <https://doi.org/10.1029/95GL03179>

Tsyganenko, N. A., & Stenov, M. I. (2005). Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 110, A03208. <https://doi.org/10.1029/2004JA01079>

Vanhamäki, H., Aikio, A., Voiculescu, M., Juusola, L., Nygrén, T., & Kuula, R. (2016). Electrodynamics structure of the morning high-latitude F region. *Journal of Geophysical Research: Space Science*, 121(3), 2669 - 2682. <https://doi.org/10.1002/2015JA022021>

Voiculescu, M., Nygrén, T., Aikio, A. T., Vanhamäki, H., & Pierrard, V. (2016). Postmidnight ionospheric troughs in summer at high latitude. *Journal of Geophysical Research: Space Science*, 121(12), 12171 - 12185. <https://doi.org/10.1002/2016JA023360>

Weimer, D. R. (2005). Improved ionospheric electrodynamics models and application to calculating Joule heating rates. *Journal of Geophysical Research*, 110, A05306. <https://doi.org/10.1029/2004JA010884>

Wilson, L. B., Brosius, A. L., Gopalswamy, N., Nieves-Chinchilla, T., Szabo, A., Hurley, K., et al. (2021). A quarter century of wind spacecraft discoveries. *Reviews of Geophysics*, 59(2). <https://doi.org/10.1029/2020rg000714>



KOPRI

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소 위탁과제 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 위탁연구과제로 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.