

연구결과보고서 서식

I. 인쇄규격

1. 크기 : A4 신판(가로 210mm*세로 297mm)
2. 제본 : 좌철
3. 용지
 - 1)표지 200g/m . 양면 아트지
 - 2)내용 80g/m . 모조지
4. 인쇄방법:
 - 1) 표지 : 바탕 백색, 활자 흑색
 - 2) 내용 : 흑색 지정활자로 인쇄한다. 그림 또는 그래프 등이 삽입된 경우 연구책임자의 재량에 따라 칼라로 인쇄 가능, 양면 또는 단면인쇄

II. 편집순서

1. 표 지(앞면)
2. 제출문
3. 보고서 초록
4. 요약문
5. Summary
6. 목 차
7. 본 문
8. 뒷면지



III. 참고사항

※ 전자조판 인쇄시에는 이 요령에 준한다.

표 지

(뒷면)	(측면)	(앞면)
↑ 7cm ↓ 주 의 (편집 순서8) (16 포인트 코딕체) ↑ 7cm ↓	다양한 자기권 우주환경에서의 자기권-남극 전리권 상호작용 연구 Study of Magnetosphere-Antarctic Ionospheric Coupling in Various Space Environments (16 포인트 명조체) KOPRI 극지연구소 경희대학교 산학협력단 ↑ 5cm ↓	↑ 7cm ↓ 다양한 자기권 우주환경에서의 자기권-남극 전리권 상호작용 연구 Study of Magnetosphere-Antarctic Ionospheric Coupling in Various Space Environments (16 포인트 명조체) KOPRI 극지연구소 ↓ 7cm ↑ 경희대학교 산학협력단 (20 포인트 중고딕체)

제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “오로라 발생과 극지 고층대기 변동성과의 상관관계 규명”과제의 위탁연구 “다양한 자기권 우주환경에서의 자기권-남극 전리권 상호작용 연구” 과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자 : 지 건 화

위탁연구기관명 : 경희대학교

위탁연구책임자 : 김 관 혁

위탁참여연구원 : 백 준 호

“ : 박 이 경

“ : 권 종 우

보고서 초록

위탁연구과제명	다양한 자기권 우주환경에서의 자기권-남극 전리권 상호작용 연구				
위탁연구책임자	김 관 혁	해당단계 참여연구원수	4	해당단계 연구비	110,000,000
연구기관명 및 소속부서명	경희대학교 우주탐사학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	
남극은 지구 자기장이 열려 있어, 우주와의 상호작용이 활발한 지역이다. 따라서 태양과 지구의 상호작용으로 발생한 지자기 폭풍이나 서브스톰의 영향을 관측하기에 적합하다. 본 과제에서는 남극 장보고 과학 기지에 설치된 여러 극지역 우주환경 관측 장비와 위성 자료들을 이용하여 이러한 변화를 조사하였다. 지구 자기장 환경이 급격하게 변하는 지자기 폭풍과 달리, 지구 자기장의 변동이 매우 고요한 시기에 극 지역 전리권이 어떻게 변하는지를 연구하였다. 그 결과, 태양 극소기였던 2019년 극야 기간에 전리권 F층의 전자밀도가 급격히 낮아지는 “polar hole” 이벤트가 발생했음을 확인했다. 같은 해에 발생한 45개의 “polar hole” 이벤트를 통계적으로 분석하였다. 이 과정에서 전리권 측정 장비인 VIPIR 자료가 정상적으로 산출되어 연구에 활용 가능한지를 자동으로 분류하는 코드를 개발하였다. 잘못 분류될 확률은 약 2% 정도였으며, 매년 20만 개가 넘게 축적되는 데이터를 연구 목적으로 자동 분류할 수 있게 되었다.					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	극 전리권, 지자기폭풍, 극지역 홀, 수직 입사형 펄스 전리권 레이더, 이오노그램			
	영 어	Polar ionosphere, Geomagnetic storm, Polar hole, Vertical Incident Pulse Radar, Ionogram			

요 약 문

I. 제 목

다양한 자기권 우주환경에서의 자기권-남극 전리권 상호작용 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

인공위성을 이용한 통신 기술은 현대 사회에 들어서 다양한 분야에 이용되고 있다. 만약 통신 기능에 장애가 발생하면 우리는 핸드폰으로 연락할 수 없고, 위치를 확인하기도 어려우며, 드론 역시 원하는 대로 조종할 수 없을 것이다. 지구의 지자기 활동은 이러한 통신 기능들과 밀접하게 연관되어 있으며, 남극처럼 지구 자기장이 열려있는 지역에서는 그 영향을 더욱 뚜렷하게 관측할 수 있다. 따라서 지자기 활동에 따라 전리권 환경이 어떻게 변하는지를 연구하는 것은 전리권을 활용하는 여러 기술에 꼭 필요한 과정이라 할 수 있다. 본 과제에서는 태양활동으로 인한 자기권-전리권 섭동 시, 장보고 기지에 설치된 전리권 및 고층대기 관측장비를 활용하여 극 지역 전리권과 고층대기의 특성을 조사하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 지구 지자기 활동의 변화에 따라 극지역 전리권 전자밀도의 증감과 전기역학적 불규칙성에 따른 오로라 활동을 규명하고자 한다.

IV. 연구개발결과

본 연구 결과는 국제 및 국내 학술지에 게재되었다. 장보고 과학기지의 극지역 전리권 관측자료와 인공위성 자료를 활용하여, 지자기 폭풍, 서브스톰 등 지구 지자기 활동과 자기장이 고요한 시기의 극지역 전리권 변화를 심화해 이해할 수 있었다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구에서 도출된 극지역 전리권 환경의 변화 특성은 자기권-전리권 결합 과정을 이해하는데 필요한 자료로 활용될 수 있다. 또한 전리권 관측장비인 VIPIR 자료에서 스포라딕 E 현상 발생할 시 이를 자동으로 분류하는 Python 기반 코드를 개발하여, 향후 극 지역 전리권에서의 스포라딕 E 현상을 통계적으로 분석하는 데 유용할 것으로 기대된다.

S U M M A R Y

(영 문 요 약 문)

I. Title

Study of Magnetosphere-Antarctic Ionospheric Coupling in Various Space Environments

II. Purpose and Necessity of R&D

Satellite-based communication technology has been increasingly utilized across various fields in modern society. If communication functions were to fail, we would be unable to make contact through mobile phones, have difficulty determining our location, and drones would not operate as intended. The Earth's geomagnetic activity is closely related to these communication functions, and in regions such as Antarctica, where the geomagnetic field is open, its effects can be observed more distinctly. Therefore, studying how the ionospheric environment changes in response to geomagnetic activity is an essential process for technologies that rely on the ionosphere. In this project, we investigated the characteristics of the polar ionosphere and upper atmosphere using ionospheric and upper-atmospheric observation instruments installed at Jang Bogo Station during magnetosphere-ionosphere disturbances caused by solar activity.

III. Contents and Extent of R&D

This study aims to investigate the variations in polar ionospheric electron density caused by changes in geomagnetic activity, as well as auroral phenomena arising from electrodynamic irregularities.

IV. R&D Results

The results of this study have been published in both international and domestic journals. By utilizing polar ionospheric observation data from Jang Bogo Station together with satellite data, we were able to deepen our understanding of polar ionospheric variations associated with geomagnetic storms, substorms, as well as periods of geomagnetic quiet.

V. Application Plans of R&D Results

The characteristics of polar ionospheric environmental variations derived from this

study can be utilized as essential data for understanding the magnetosphere-ionosphere coupling process. In addition, by developing a Python-based code that automatically classifies the occurrence of sporadic E events in VIPIR ionospheric observation data, the results are expected to be useful for future statistical analyses of sporadic E phenomena in the polar ionosphere.



목 차

제 1 장 서론

- * 연구개발의 목적,필요성 및 범위 등을 기술

제 2 장 국내외 기술개발 현황

- * 국·내외 관련분야에 대한 기술개발현황과 연구결과가 국·내외 기술개발현황에서 차지하는 위치 등을 기술

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

- * 이론적, 실험적 접근방법, 연구내용, 연구결과를 기술

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

- * 연도별 연구목표 및 평가착안점에 입각한 연구개발목표의 달성도 및 관련분야의 기술발전에의 기여도 등을 기술

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- * 추가연구의 필요성, 타연구에의 응용, 기업화 추진방안을 기술
- * 연구기획사업 등 사업별 특성에 따라 목차는 변경 가능함.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌

- * 보고서 작성시 인용된 모든 참고 문헌을 열거한다.

본 문

제1장 서론

지구의 전리권은 대기 성분들이 주로 태양 극자외선(EUV) 복사에 의해 이온화되어 형성된다. 태양 극자외선 복사는 지구 상층 대기의 중성입자(가스 분자와 원자)를 광이온화시키기 때문에, 전리권은 완전히 이온화된 지구 자기권과 하부 중성 대기 사이에 위치한 전이 영역으로 간주된다. 이는 플라즈마와 중성 입자의 혼합으로 이루어져 있다.

태양 극 자외선 복사에 의한 광이온화는 전리권 내 플라즈마의 유일한 원인이 아니다. 극지역에서는 높은 에너지를 가진 입자(양성자와 전자)들이 지속적으로 지구 자기권 (또는 태양풍)에서 지구 자기력선을 따라 대기로 유입된다. 이와 관련된 플라즈마 입자들은 밤지역 지구자기권에서 발생하는 서브스톰, 자기권계면에서의 자기 재결합, magnetosheath내의 압축가열된 태양풍 플라즈마와 관련이 있으며, 주위의 폐쇄 또는 개방된 자기력선을 따른다. 중성 대기에 충돌하는 고에너지 입자들에 의한 이온화는 특히 높은 지자기 위도에서 중요한 역할을 한다. 이는 극지방 전리권 밀도의 주요 변동이 오로라 지역(Fontaine, 2002)에 유입되는 에너지를 가진 입자들과 직접적으로 관련이 있으며, 이곳에서 광이온화의 영향이 줄어들며 cusp 지역 (Knudsen, 1974)에서는 magnetosheath 플라즈마가 전리권에 직접적인 접근을 가지기 때문이다.

전리권은 지구 자기권과 하층 대기가 결합되어 있어(Milan et al, 2017), 두 영역에서 발생한 물리 현상에 의해 영향을 받는다. 결과적으로 두 영역에서 에너지와 운동량이 전리권으로 전달되게 된다. 극 전리권에서 플라즈마 밀도 변동은 교차된 polar cap 전기장에 의해 유도되는 플라즈마 대류에 강하게 영향을 받는다. 행성 간 자기장(IMF)이 남쪽으로 향할 때 전리권 플라즈마의 대류는 주로 지자기 극 위에서 태양반대 방향 흐름이 나타나는 two-cell pattern을 따라 극지방 전리권 밀도를 재배치 하게 한다. 이는 태양 극자외선 또는 입자 침전에 의해 생성된 극지방 전리권 밀도가 태양 주기, 지방 시간, 계절 및 지자기 활동에 따라 다르다는 것을 의미한다. (Fontaine, 2002; Cai et al, 2007; Moen et al, 2008; Xu et al, 2014; Kim et al, 2020, 2022).

극지방 F층 밀도 구조는 플라즈마 대류 패턴의 변화와 관련이 있는 것으로 보고되었다. 이 구조 중 하나는 polar cap patch로, 이는 배경 플라즈마 밀도의 최소 두 배에 해당하는 고밀도 구조로서 수직으로 약 100-1000 km에 해당된다. (Buchau et al, 1983; Carlson, 2012). polar cap patch는 cusp 지역의 적도 쪽 낮 지역에서 생성되며, 대류 패턴을 따라 polar cap 지역을 횡단하며 이동한다. (Weber et al, 1984). polar cap patch의 발생은 남쪽 방향의 행성간 자기장 조건 하에서 강한 지자기 활동과 상관 관계가 있다. 지자기 폭풍 중에는 이온화의 polar tongue of ionization(TOI)가 낮쪽에서 밤쪽으로 플라즈마의 대류와 함께 연속적인 밀도 증가로 관측된다. TOI로 인해 낮 쪽에서 storm으로 강화된 밀도 변화가 극 지역 까지 북쪽으로 확장되며, 전지구적인 플라즈마 대류 패턴에 끌려 밤 쪽 전리권으로 들어가게 된다 (Foster et al, 2005; Pokhotelov et al, 2021). polar cap patch와 TOI 모두 적도 쪽 cusp 영역에서 시작되

기 때문에 두 고밀도 구조 모두 polar cap 내부에서 기원하지 않는다.

가장 최근에, Kwon et al(2022)이 중간 규모의 지자기 폭풍이 발생하는 동안 polar cap 지역의 전리권이 사라졌다고 보고했다. 서브스톰 전류회로에 흐르는 연자기력선 전류에 연결된 transpolar ionospheric currents가 지자기폭풍 기간 동안 극지 대기 가열의 원인으로 작용하며, 이 대기 가열로 인해 상승한 무거운 분자 가스(O_2 와 N_2)의 재결합 비율이 증가하면서 F-층 전자 밀도 감소로 연결된다고 제안했다.

조용한 지자기 조건 하에서는 저 고도 궤도와 지상에서의 관측을 통해 극지방 전리권에서 알려진 전리권 Polar hole이라고 불리는 희박한 플라즈마 밀도 구조가 보고되었으며(Benson & Grebowsky, 2001; Bjoland et al., 2020; Brinton et al., 1978; Crowley et al., 1993; Forsythe et al., 2021; Hoegy & Grebowsky, 1991; Jenner et al., 2020) 수치적인 연구가 수행되었다 (Sojka et al., 1981). Polar hole은 Brinton et al(1978)이 남반구에서 저궤도 위성(약 300 km)의로 얻은 겨울 F층 데이터를 통해 처음 관측되었다. 저자들은 Polar hole이 낮은 태양 활동($F_{10.7} \sim 71$) 및 지자기 활동(일일 평균 $K_p = 2$) 조건에서 $\sim 2100-0600$ MLT와 $-70^\circ \sim -80^\circ$ 의 위도대에서 발생했다고 보고했다. Polar hole의 발생지역은 플라즈마 대류가 태양 반대 방향으로 진행될 것으로 예상되며 이러한 저밀도 구조는 polar cap 지역 내에서 발생한다는 것을 의미한다. Polar hole은 겨울 밤에, 조용한 지자기 조건에 polar cap 지역에서 관측되므로, polar hole의 형성은 이온화원이 없는 상황에서 polar cap 지역에 오랜시간 지속되는 재결합과 polar cap 지역을 가로지르는 느린 태양 반대방향의 플라즈마 대류와 관련이 있다.

Polar hole은 조용한 지자기 조건에서 어두운 polar cap 전리권에서 일반적으로 관측되며, 이러한 polar hole은 플라즈마가 polar cap 지역을 오랜 시간 동안 태양반대방향으로 느리게 가로지르며 형성되는 것으로 여겨지지만, 여전히 대류의 역할에 대한 의문이 존재한다. 그러므로 플라즈마 대류와 polar hole간의 관계를 정량적으로 이해하기 위해 더 많은 관측 연구가 필요하다. 이 논문에서는 태양 극소기에서 겨울/밤 남극 장보고 기지에서 VIPIR/Dynasonde를 사용하여 관측한 Polar hole을 제시한다. Polar hole이 발생하기 전 극지방 F층 플라즈마 밀도의 공간적, 시간적 변화를 조사하였고, polar hole 형성 전에 태양 반대 방향의 플라즈마 대류 속도와 지수적 전자 밀도 감소 사이에 관련성이 있음을 발견하였다. 우리의 관측은 polar hole 발생이 느린 태양 반대 방향 플라즈마 대류와 인과관계가 있다는 것을 명확히 입증한다.

해당 연구를 위해 사용된 전리권 관측 장비인 VIPIR(Vertical Incident Pulse Radar)는 전리권에서 라디오 펄스가 반사되는 걸 이용해 플라즈마의 고도를 측정한다. VIPIR는 다이내슨드에서 발전된 형태로, 데이터 수집과 처리를 위해 NeXtYZ 3D 역산 프로그램을 사용한다. NeXtYZ는 전리권의 에코를 분석해 3D 전자밀도 분포를 계산하는데, 전리권을 얇은 플라즈마 층으로 나누고 에코의 전파 시간과 방향을 최적화한다. 최소 제곱 최적화 과정을 통해 관측된 데이터와 계산된 데이터 간의 차이를 최소화한다. 이 방법을 통해 NeXtYZ는 F층 최대 플라즈마 주파수(FMxF), F층 최대 높이(HMxF) 및 전자밀도 프로파일과 같은 극지 전리권의 물리적 변수와 특성을 제공한다. 그러나 극지방의 전리권 밀도 분포는 입자 강하와 자기권 전기장으로 인해 수평 기울기가 더 커지며 불규칙적으로 방해받는 경향이 있어, 저위도 전리권 밀도에 비해 Dynasonde에서 추정된 전리권 매개변수가 더 큰 불확실성을 가지게 된다. JVD에서 전리권 매개변수의 이러한 측면을 줄이기 위해서는 추정된 전리권 매개변수를 레이더로 얻은

이오노그램 이미지와 직접 비교하여 Dynasonde의 데이터 분석 절차의 정확성을 평가할 필요가 있다. 장보고 기지에 설치된 VIPIR는 128초의 시간 해상도로 이오노그램을 제공하므로, 2017년 이후 제공된 모든 이오노그램을 수동으로 분류하는 데는 많은 시간이 필요하다. 따라서 직접 분류하는 방법보다는 분류를 자동화할 필요성을 느꼈고, 이러한 과정을 python의 Python Imaging Library (PIL)을 사용하여 이오노그램의 사용성에 초점을 두고 2017년부터 2021년도까지의 이오노그램들을 자동적으로 분류했다.



제2장 국내외 기술개발 현황

국·내외 전리권 연구는 위성 항법 시스템의 오차 보정 및 통신 안정성 확보, 우주기상 예측을 위해 전리권 관측 자료를 분석하고, 이를 기반으로 모델링 연구가 이루어지고 있다. 지구의 자기장은 완벽한 대칭이 아니기 때문에, 지구 자기장과 밀접한 연관이 있는 전리권은 북반구와 남반구가 완전히 동일하게 변화하지 않는다. 이외에도 계절이 반대인 것과, 대륙의 분포 차이도 북반구와 남반구 전리권의 차이를 만든다. 하지만, 전리권 관측장비는 대부분이 북반구에 있고, 남반구의 장비는 상대적으로 부족기 때문에, 남반구 전리권의 연구는 상대적으로 부족하다. 예를들어, 전리권을 위한 가장 범용적인 지상 관측 장비인 비간섭 산란 레이더(incoherent scatter radar, ISR) 다수가 북극권에 설치되어 있다. 예를 들어 스칸디나비아와 스발바르의 EISCAT(European Incoherent Scatter Scientific Association), 그린란드의 Sondrestrom ISR, 알래스카의 Poker Flat ISR(PFISR), 캐나다 레절루트 베이의 Resolute Bay ISR들(RISR-N과 RISR-C)이 있다. 또한, 오로라 지수를 나타내는 AE 지수의 경우 북반구 고위도에 위치한 관측소에서 측정하기 때문에, 남반구에서는 오차가 발생한다. 지상 관측의 이러한 반구 비대칭성은 전리권을 포함한 전 지구 고층대기를 이해하는 데 있어 주요한 문제 중 하나다(Back et al, 2025).

한국극지연구소(KOPRI)는 2014년 남극 노던 빅토리아랜드의 테라 노바 만(Terra Nova Bay)에 제2의 한국 남극기지인 장보고과학기지(Jang Bogo Station, JBS)를 설립하여 운용중으로, 극관 경계의 특성을 관측하기에 이상적인 이 위치에서 KOPRI는 파브리 - 페로 간섭계(Fabry - Perot Interferometer, FPI), 오로라 및 에어글로우관측을 위한 전천 카메라, GNSS 섭동(scintillation) 모니터, 자기장계, 중성자 모니터, 전리권 레이더 등 다양한 광학·레이더 장비를 운영하고 있다(Kwon et al., 2018, 2022; Ham et al., 2020; Jee et al., 2021; Kim et al., 2023). 이러한 지구 자기장이 열려있는 남극 극관 지역에서 운용중인 관측장비들은 전리권을 이해하는 데에 유용한 자료들을 제공해준다. 본 연구에서는 남극 장보고과학기지 자료들과 위성장비들을 이용하여 지구 지자기 활동에 따른 전리권 환경 변화를 살펴보았다.

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 남극 Pc1-2 지자기 파동 발생 시 전리권 우주환경 변화와 극고요 우주환경에서의 중성대기 특성 연구

1. 격변/ 극고요 우주환경에서 장보고 기지 자료 분석

그림 1은 2019년 5월 5일(day 125)~5월 13일(day 133) 기간의 지자기 지수(자기폭풍 SYM-H 지수, Kp 지수, 오로라 SML 지수)와 장보고 기지에서 관측된 전리권 (VIPIR, NmF2, TEC) 자료이다. VIPIR 자료(그림 1d)에서 노란색 원은 장보고 기지의 정오 시간을 나타낸다. 장보고 기지가 극야임에도 VIPIR 자료와 TEC 자료로부터 전리권 F2층의 높이와 전자밀도 일 변화를 확인할 수 있다. 즉 낮 지역에서는 낮은 고도와 높은 밀도 그리고 밤지역에서는 높은 고도와 낮은 밀도를 보인다. 약 100km 고도에서 정오 근처에서만 VIPIR 자료가 관측되는데 이는 E층에 해당된다.

초록색으로 표시된 5월 8일(day 128)과 5월 11일(day 131)은 우주환경 극고요 기간과 중간 크기의 자기폭풍 기간을 나타낸다. 자기폭풍 기간은 SYM-H 지수를 통해 확인할 수 있으며 크기가 약 -50~-60 nT이다. 이 기간에 Kp 지수는 4~5로 증가하였고 오로라 SML 지수로부터 다수의 서브스톰 발생을 확인할 수 있다. 1차년도 연구에서 5월 11일 자기폭풍 기간에 밤지역에서 남극 전리권 F2 층의 소멸을 확인하였으며 그 시간에 TEC 자료도 자기폭풍 발생 전날과 비교하여 더 감소한 양이 관측되었다. 자기폭풍 기간의 남극 전리권 F2층 소멸은 극관지역 혹은 오로라 발생지역의 전리권/고층대기 가열에 의한 것으로 설명되어질 수 있다. 1차년도 연구에서 가열에 대한 공급원은 태양풍 전기장과 자기권의 연자기력선 전류로 제안되어지고 있다.

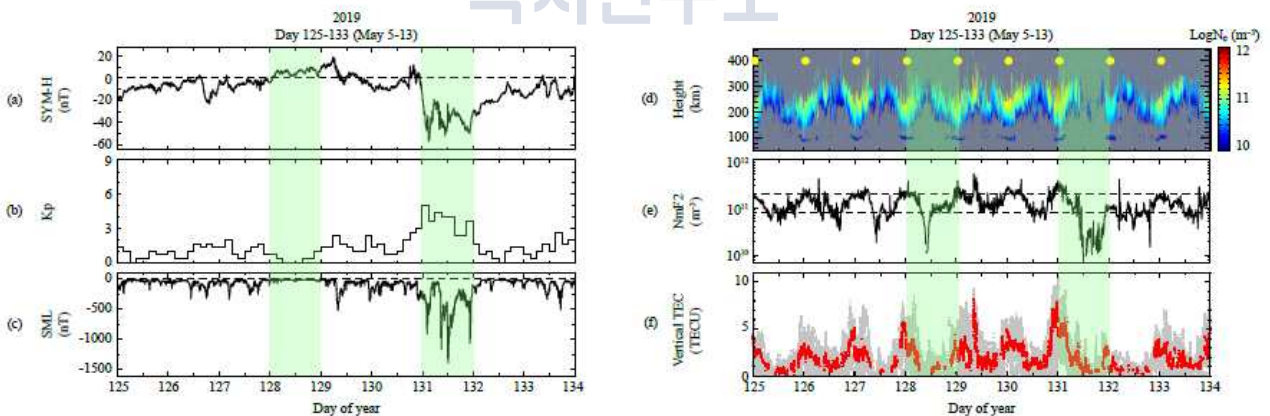


그림 1. 2019년 5월 5일 (day 125)~5월 13일 (day 133) 기간의 (a)자기폭풍 지수, (b)Kp 지수, (c)오로라 지수, 장보고 기지 (d)VIPIR, (e)NmF2, (f)TEC 자료.

5월 8일의 지자기 지수는 Kp 지수가 1 이하이고 오로라 SML 지수로부터 오로라 발생을 확인할 수 없으며 자기폭풍 SYM-H 지수는 자기권에서 환전류 활동이 전혀 없는 극고요한 우주환경을 나타내고 있다. 즉 자기권이 기저상태에 있다. 이 기간에 장보고 기지 VIPIR 장비는 밤 지역에서 약 2~3시간 정도 전리권 소멸을 관측하였다.

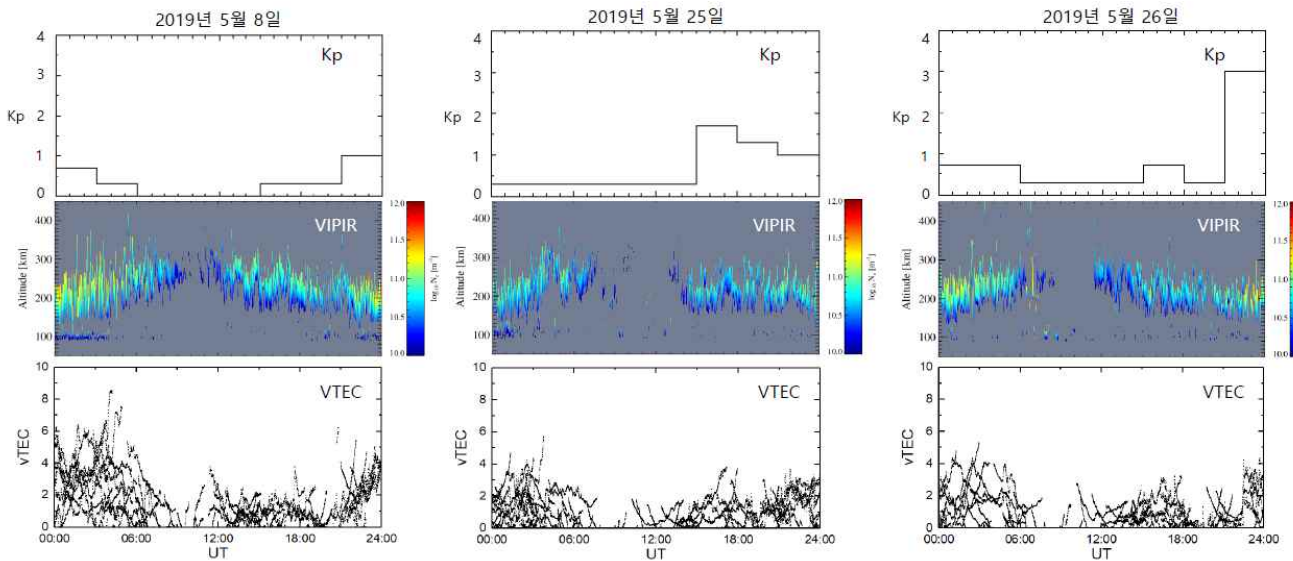


그림 2. Kp 지수, VIPIR, TEC 자료. 2019년 5월 (왼쪽)8일, (중간)25일, (오른쪽)26일

그림 2(왼쪽)은 2019년 5월 8일 Kp, 장보고 기지 VIPIR, TEC 자료이다. 남극 전리권 F2 층이 사라졌을 때 Kp지수는 0값을 보였고 그 기간에 TEC 자료가 다른 시간에 비해 적은 양의 자료를 제공하고 있다. 이는 극고요한 우주환경에서 GPS 위성으로부터 원활하게 수신되지 않은 것 같다. 이러한 현상은 5월 8일 이벤트 외에도 장보고 VIPIR 자료에서 극고요 우주환경 기간에 많이 관측되고 있다. 그러한 예를 그림 2(중간, 2019년 5월 25일), 그림 2(오른쪽, 2019년 5월 26일)에 보였다. 5월 8일 이벤트와 유사하게 남극 전리권 F2층이 사라질 때 Kp 지수는 0+이며 상대적으로 다른 시간에 비해 TEC 자료 공백이 발생함을 확인하였다.

1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
4	x	17	x	7	1	4	4	1	x	11	x
24		19		8	4	9	7	2			
				11	10	10	9	4			
				14	14	12	10				
				17	15	14	11				
				19	18	16	13				
				21	23	17	14				
				23	24	19	15				
				25		23	22				
				26		24	28				
						28					
						30					

표 1. 2019년 장보고 기지 VIPIR 자료에서 1시간 이상 F2 소멸이 발생한 날

표 1은 2019년 장보고 기지 VIPIR 자료에서 1시간 이상 F2 소멸이 발생한 날을 표시하였다. 노란색은 Kp 지수가 2+ 이하로 조용한 우주환경 기간이고 갈색은 Kp 지수가 3- 이상으로 CME 혹은 CIR 같은 태양활동에 의해 우주환경이 교란된 기간이다. 통계 분석을 수행하여 극고요 우주환경에서 남극 전리권 F2층 소멸의 원인이 무엇인지를 규명하고자 한다.

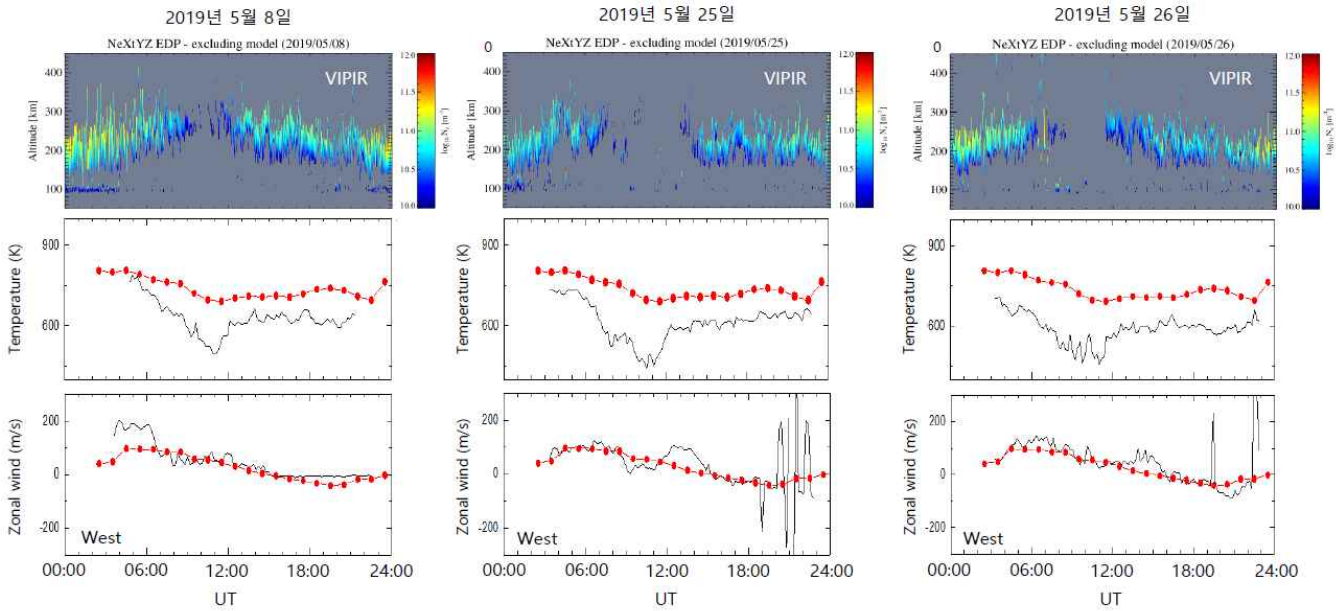


그림 3. 남극 장보고 기지 VIPIR, FPI 자료. 2019년 5월 (왼쪽) 8일, (중간) 25일, (오른쪽) 26일. FPI 중성대기 온도, 중성대기 바람속도 자료에서 빨간색 선은 5월 중간값을 나타냄.

그림 3은 극고요 우주환경 기간에 VIPIR 자료와 FPI 장비로 측정된 ~250 km에서의 중성대기 온도 및 바람 속도 자료이다. 빨간색 선은 5월 1일부터 31일까지 FPI 자료의 중간값이다. VIPIR 자료에서 F2층 소멸이 확인된 기간에 바람의 속도는 중간값을 잘 따르고 있으나 중성대기 온도는 급격히 감소하는 현상이 관측되었다. 이러한 중성대기 온도 감소가 F2층 전자밀도 감소와 직접적으로 관련이 있는지 조사할 예정이다.

FPI 관측 자료의 정확성은 구름의 정도에 영향을 받으므로 FPI 자료 사용에 있어서 맑은 날에 관측되었는지 확인이 필요하다. 5월 8일, 25일, 26일 극고요 우주환경 기간에 오로라 관측 전천 카메라 자료를 조사하여 맑은 날을 확인하였다.

2. 천리안 2A 위성 자기장/입자 자료와 장보고 기지 전리권 관측 자료 비교 분석

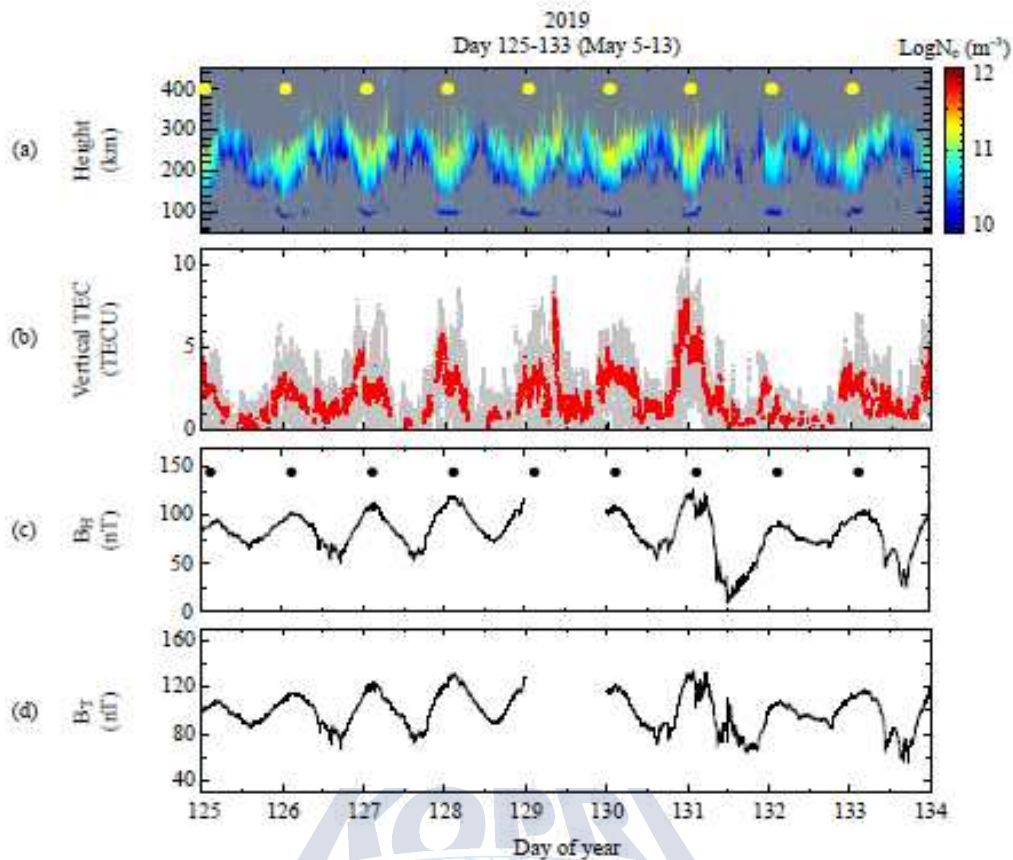


그림 4. 2019년 5월 5일 (day 125)~5월 13일 (day 133) 기간의 장보고 기지 (a) VIPIR, (f) TEC 자료, 천리안 2A의 자기장 (c) H 성분과 (d) 자기장 세기

그림 4은 장보고 기지 VIPIR, TEC 자료, 정지궤도 천리안 2A 위성에서 관측된 자기장 H 성분과 자기장 세기를 나타낸다. 131일 (5월 11일) 장보고 기지 정오 지역(노란색 원)에서 TEC 증가를 관측하였고 132일 (5월 12일) 정오 지역에서 TEC의 급격한 감소가 관측되었다. 남극 극관 정오 지역의 TEC 증가와 감소를 중·저위도 TEC 변화 모델로 설명될 수 있는지 조사할 예정이다. 흥미롭게도 천리안 위성의 낮지역 자기장 변화와 장보기 기지 낮 지역 TEC 변화가 서로 상관관계가 있는 것처럼 보인다. 즉 132일의 경우 천리안 2A의 낮 지역 자기장 값의 급격한 감소가 관측되었다. 감소 이유는 태양풍 동압력의 값에 의한 것으로 설명되고 이는 자기권 팽창에 의한 결과이다. 자기권 팽창은 낮 지역 자기 플럭스의 공간적 확장으로 이어지며 결과적으로 전자밀도 감소가 예상된다. 이러한 현상은 자기권 압축 기간인 131일 (5월 11일) TEC의 증가와 천리안 2A 자기장 증가를 예상할 수 있다. 천리안 2A 자기장 세기와 장보고 기지 TEC 관계는 통계적 자료 분석이 요구되므로 2019~2020년 이용 가능한 자료를 얻어 통계분석을 수행할 예정이다.

3. 고위도 연자기력선 전류 변화와 남·북극 고층대기 및 오로라 분포 차이점 이해

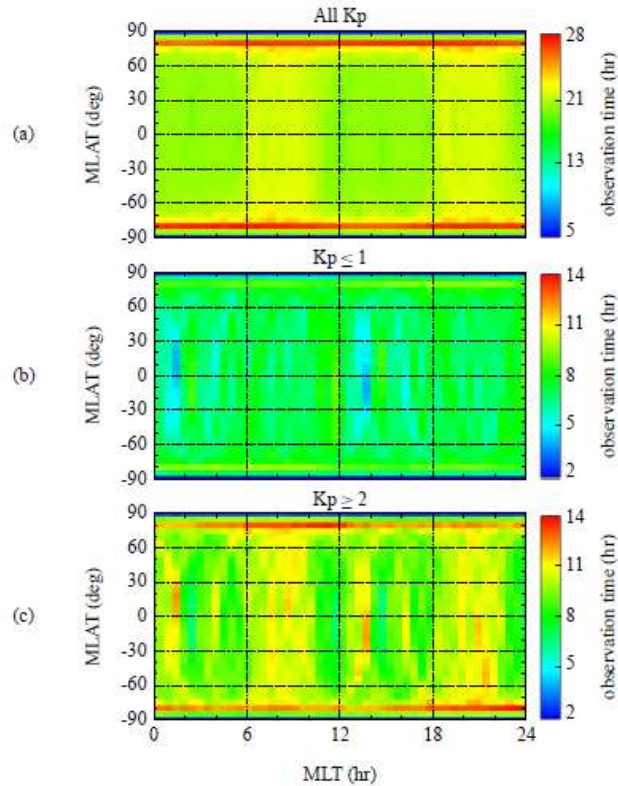


그림 5. Swarm 위성에서 관측된 자기장 분포

그림 5a-5c는 모든 우주환경 (all Kp 지수), 고요한 우주환경 ($Kp \leq 1$) 조건, 중간 및 교란 우주환경 ($Kp \geq 2$)에 대해 각각 MLAT에서 5° , MLT에서 0.5시간의 빈 크기를 갖는 자기 위도 (MLAT)-MLT 공간분포 지도에서 2014-2017년의 자기장세기 범위를 보여준다. 색상 키는 관측 시간을 시간 단위로 표시한다. 모든 Kp 조건에 대한 색상 키 척도는 $Kp \geq 2$ 및 $Kp \leq 1$ 의 색상 키 척도와 다르다. 데이터 범위는 $\pm 80^\circ$ MLAT에서 높다. 이는 위성의 궤도 경사각이 약 87.8° 이기 때문이다. 통계 분석에 사용된 자기장 데이터의 공간 분포는 MLT에서 균일하지 않다. 그러나 비균일 분포의 지역 시간에 따른 변화는 평균 관측 시간의 경우 2배 이내이므로 비균일 데이터 범위는 통계에 큰 영향을 미치지 않는다.

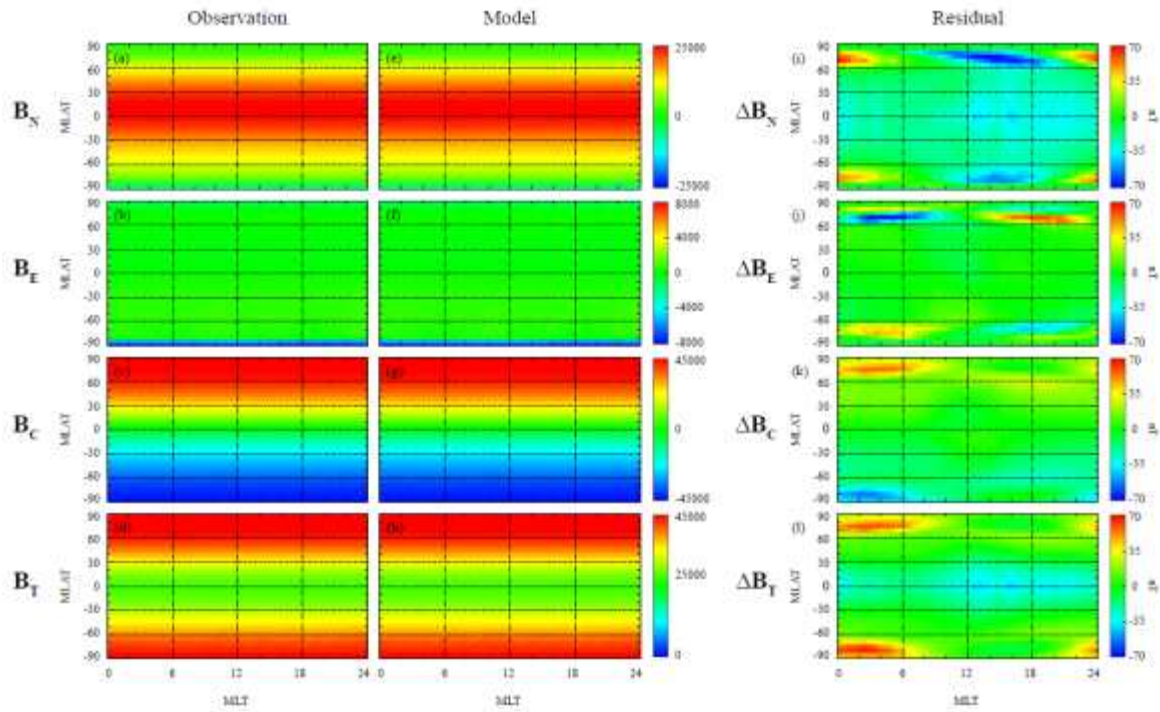


그림 6. (a)-(d) 2014-2017년 기간에 North-East-Center (NEC) 좌표로 고도 약 500km에서 측정된 Swarm-B의 자기장 성분 및 자기장 세기의 자기 지방시에 대한 평균값. (e)-(h) CHAOS 자기 모델값. (i)-(l) 관측값-모델값.

그림 6은 4년 기간동안 모든 Kp 조건에서 Swarm 위성에서 관측된 자기장 값과 CHAOS 모델 값 비교를 나타낸다. 오른쪽 그림은 관측과 모델 값 차이이다. 위성 위치에서 관측된 자기장과 모델 자기장의 주요 기여는 내부 쌍극자 자기장이기 때문에 BN (북쪽방향)은 적도 근처에서 강하고 자기 위도가 증가함에 따라 감소하며 BC (지구중심방향)는 적도 근처에서 약하고 두 반구의 고위도에서 반대 자기장 방향으로 강한 자기장 세기를 보인다. BE (동쪽방향)의 자기장 세기는 전 세계적으로 BN 및 BC보다 훨씬 자기장 세기가 약합니다. 극지방의 총 자기장 세기 BT는 남반구보다 북반구에서 더 강하다.

그림 7은 서브스톰 세기에 따른 위성에서 관측된 자기장 섭동과 그 결과로부터 계산된 전리권 전류 세기를 나타낸다. 전리권 자기장 및 전류 세기가 남북반구 대칭을 확인할 수 있다. 고위도 지역에서 관측되는 전류는 지역1과 지역2 전류로 예상할 수 있으며 북반구에서 더 큰 전류 관측이 되는 이유는 아직 규명되지 않았다. 이 문제를 해결하기 위해 지속적인 연구가 필요하다.

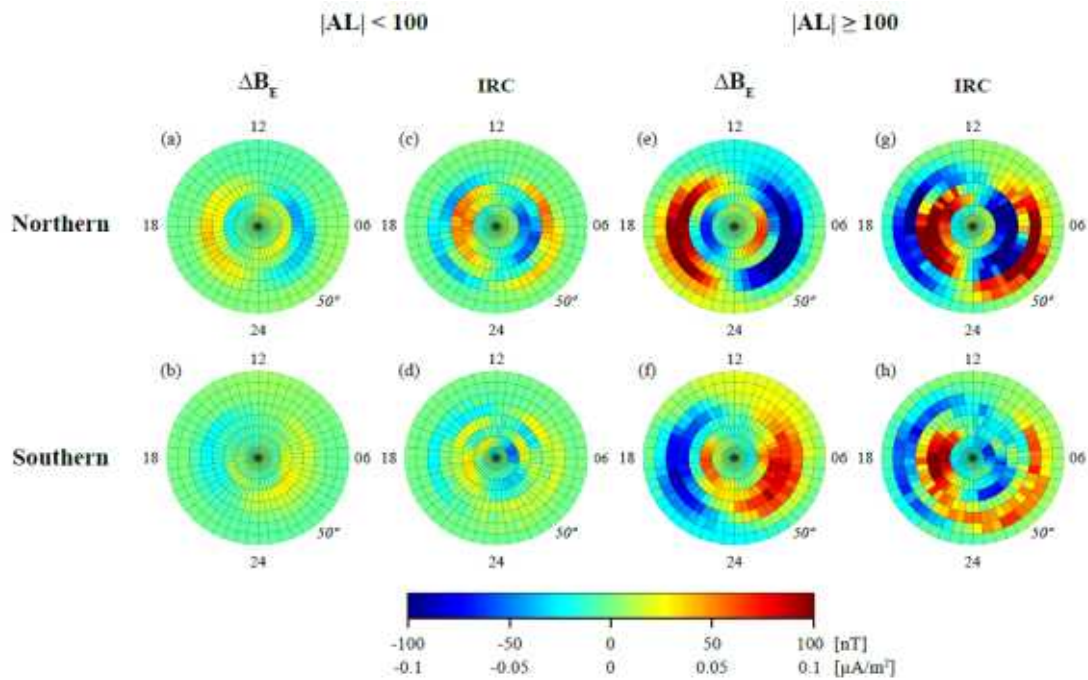


그림 7. 오로라 AL 지수에 대한 남북반구 전리권 전류 분포

4. 남극 장보고 기지 Pc1-2 지자기 파동 발생과 전리권 우주환경 상관관계 연구

장보고 기지에서 Pc1-2 지자기 파동은 행성간 자기장이 남쪽을 향할 때 자주 발생하는 것을 SCM 자료를 통해 확인하였다. 일반적으로 Pc1-2 파동은 플라즈마권계면 근처에서 플라즈마 분포의 온도 비등방성 원인으로 발생한다고 알려져 있다. 이러한 파동은 주변의 플라즈마 입자와 상호작용으로 고에너지 프로톤 입자와 상대론적 전자 입자의 궤적각을 산란시켜 지구 자기권에서 대기권으로 입자 유실에 기인한다. 플라즈마권계면의 위치를 지구 표면으로 옮기면 오로라 아래 지역에 위치하며 그곳에서 지상 자기장 측정기와 오로라 관측장비를 이용해 Pc1-2 파동과 프로톤 오로라 발생을 확인할 수 있다. (그림 8 참조)

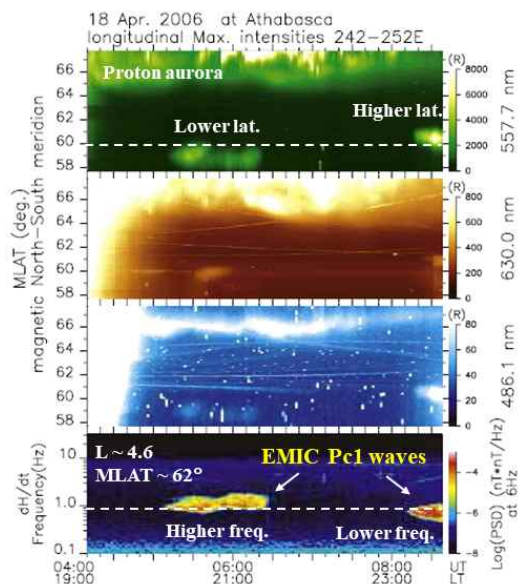


그림 8. 오로라 지역 아래에서 발생한 Pc1 파동과 프로톤 오로라

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. 본 과제에서는 장보고 기지에서 관측된 Pc1-2 파동 기간에 전리층 우주환경 자료를 조사하여 전리층 밀도, 온도 등의 변화와 Pc1-2 발생 상관관계를 조사한다.

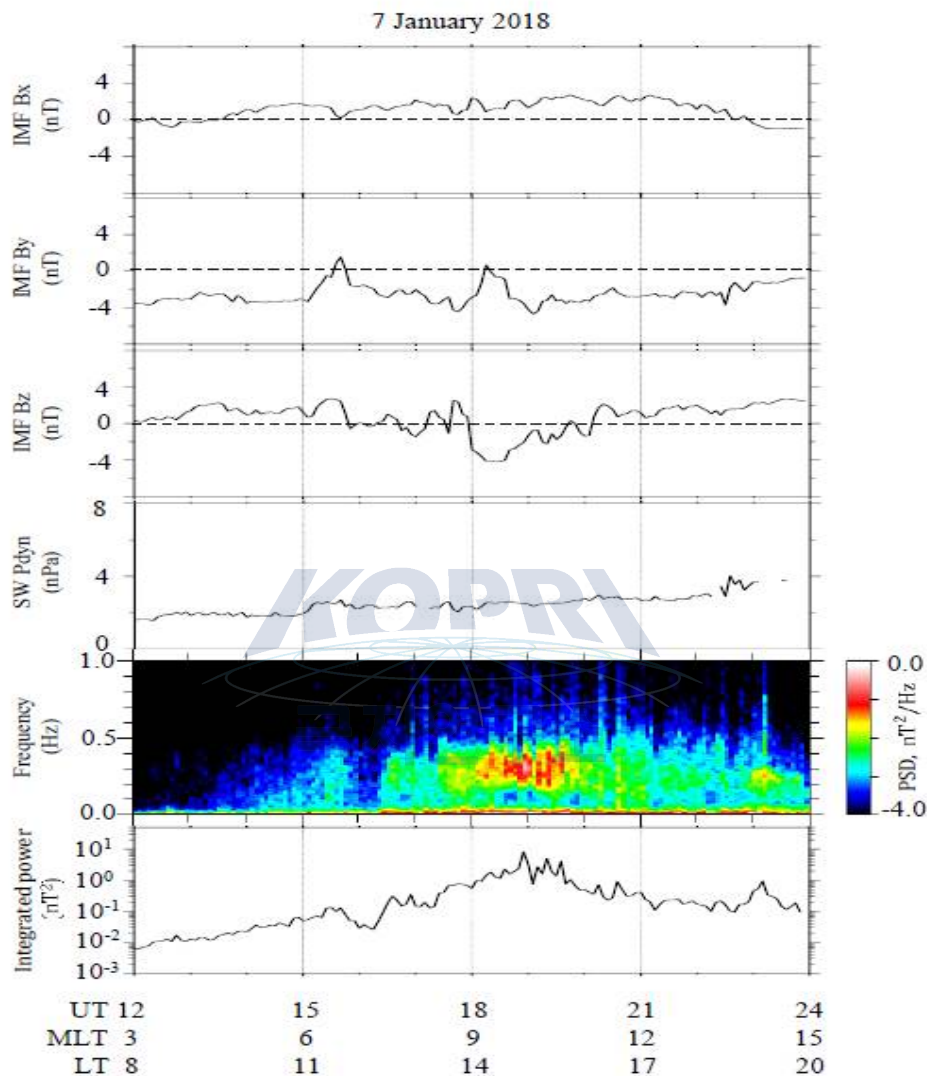


그림 9. 2018년 1월 7일 행성간 자기장, 태양풍 동압력, 장보고 기지에서 관측된 Pc1-2 파동

그림 9는 2018년 1월 7일 행성간 자기장과 태양풍 동압력, 장보고 기지에서 서치코일 자기장 측정기 장비로 관측된 Pc1-2 전자기 파동을 나타내고 있다. 자기 지방시(MLT) 9-11시 사이에 Pc1-2 파동의 세기가 급격히 증가하는 것이 관측되었고 행성간 자기장은 남쪽 성분을 나타내고 있다.

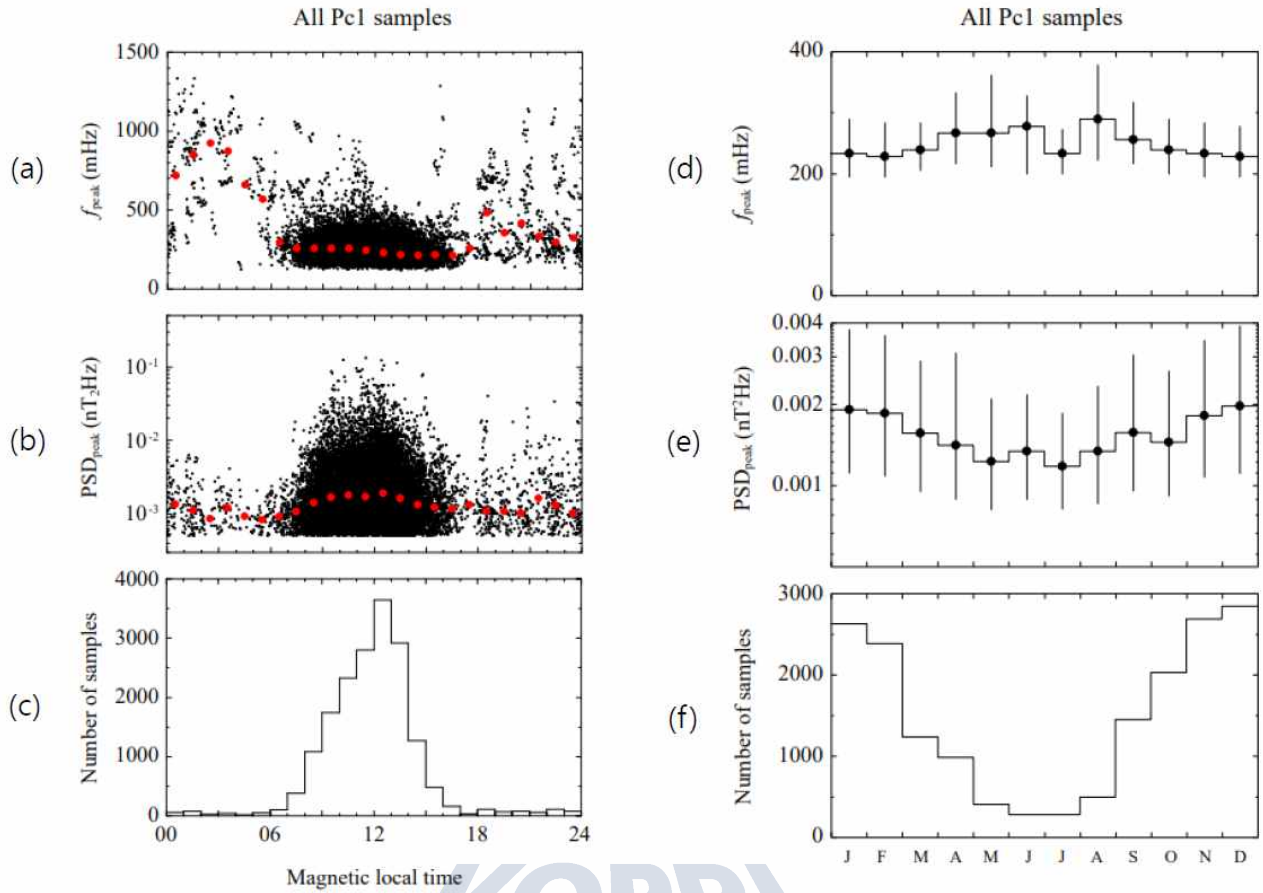


그림 10. 2018년 기간에 관측된 Pc1 파동. 자기 지방시에 대한 (a) 피크 주파수, (b) 파동 세기, (c) 이벤트 분포. 계절에 대한 (d) 피크 주파수 중간값, (e) 파동세기 중간값, (f) 이벤트 분포

그림 10은 2018년 장보고 기지에서 관측된 Pc1 파동의 자기 지방시 및 계절에 대한 특성을 나타낸다. 이벤트들은 주로 낮 지역에서 발생하며 계절은 여름 지역에 많이 발생한다. 이러한 현상은 파동들이 지구 자기권 커스프 (cusp) 지역에서 배경 플라즈마의 온도 비등방성에 의해 발생한다고 설명될 수 있다.

5. Kp 지수와 남극 PC 지수에 대한 장보고 기지 FPI 중성대기 바람 온도 통계 조사

Ionospheric F-region depletion in the polar cap region under quiet geomagnetic conditions ($K_p \leq 1$)

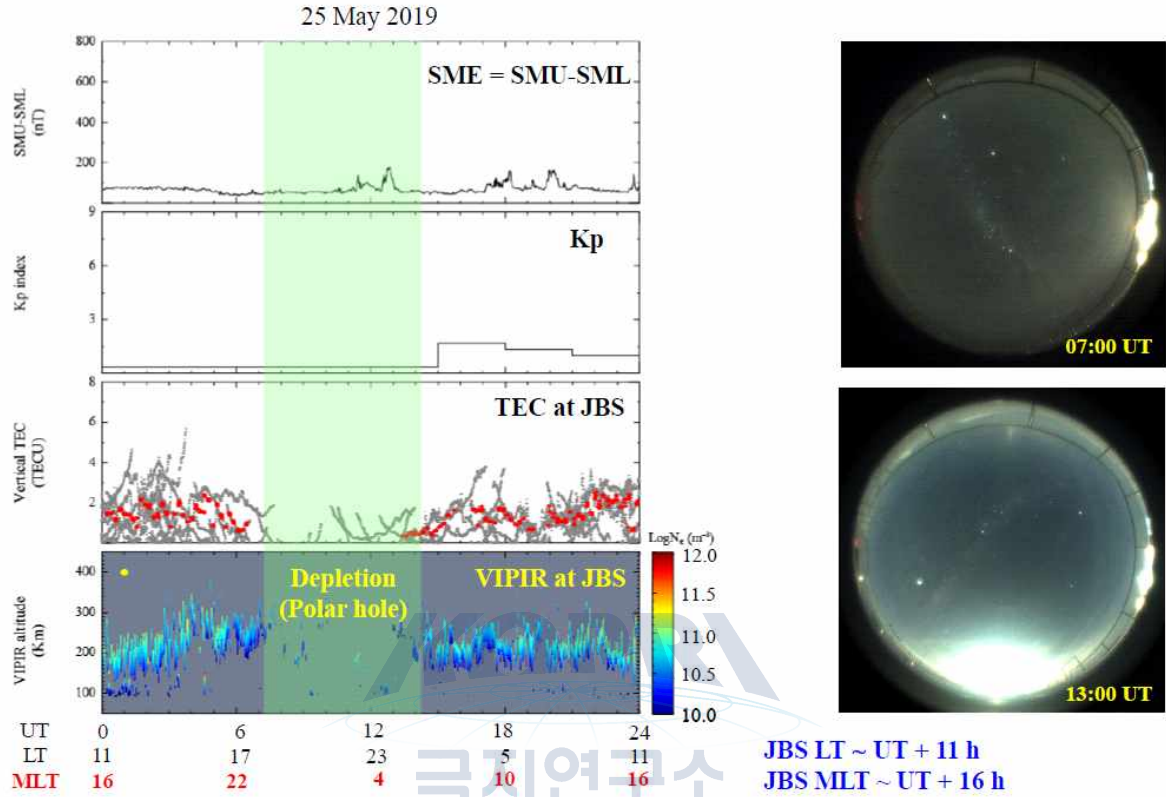


그림 11. 2019년 5월 25일 오로라 지수, Kp 지수, 장보고 기지에서 측정된 TEC, VIPIR 자료

그림 11은 극고요 우주환경 기간에 장보고 기지에서 관측된 TEC, VIPIR 자료이다. 자기 지방시(MLT) 23-05시에 VIPIR 자료로부터 200-300-km 고도 F-2층의 소멸이 관측되었다. 이러한 극관 전리권 소멸 현상을 “polar hole”이라 부른다. “Polar hole” 기간 동안에 장보고 기지 FPI 장비로 측정된 ~250 km에서의 중성대기 온도 및 바람 자료를 통계적으로 조사하였다.

FPI observations at JBS for 2018-2019

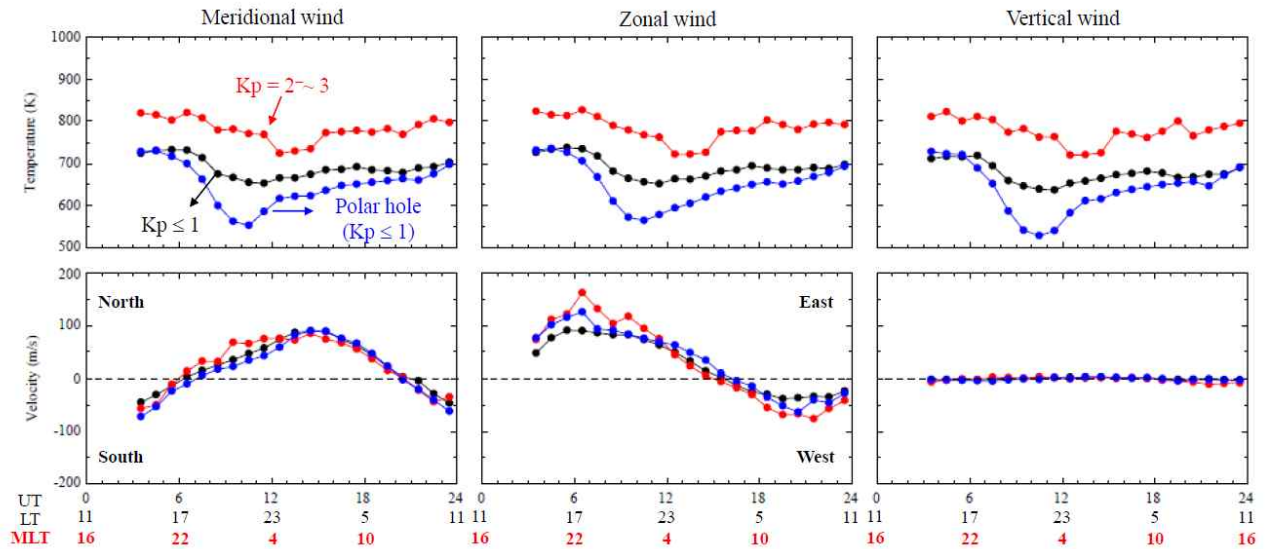


그림 12. 다양한 우주환경 기간에 장보고 FPI 장비로 관측된 중성대기 온도/바람 자료

그림12는 중성대기 통계 결과로서 다양한 우주환경 ($K_p \leq 1$: 극고요 우주환경 섭동 기간(검정색), $K_p = 2-3$: 중간규모의 우주환경 섭동 기간(빨간색), “polar hole”이 관측된 기간(파란색))에서의 남극 극관 지역의 중성대기 온도/바람 속도를 나타낸다. 중성대기 온도의 경우 우주환경 변화에 크게 의존성이 확인되었으나 바람 속도의 경우에는 우주환경 변화에 크게 영향을 받지 않고 있다.

극지연구소

제2절 남극 장보고 기지에서 조용한 지자기 조건에서 관측된 polar hole 특성 연구

1. 사용된 자료

본 연구에서 사용된 자료는 주로 남극 장보고 기지(JBS)에서 Dynasonde 분석 소프트웨어로 작동하는 Vertical Incident Pulsed Ionospheric Radar(VIPR)에서 얻은 것이다. 2019년 JBS는 지리적 위도 약 74.6°S 와 경도 약 164.2°E 에 위치해 있었다. Altitude Adjusted Corrected Geomagnetic(AACGM) 시스템에서 정의된 지자기 위도와 경도는 각각 약 79.9°S 와 약 55.2°W 로 되어 있다 (Shepherd, 2014 참고). 전리권의 양은 JBS VIPR와 Dynasonde (JVD)에서 얻은 반사된 라디오 에코를 분석하여 추정되었다(Ham et al., 2020; Kim et al., 2022 참고). JVD는 128초의 시간 해상도로 전리권 하부에서 전자 밀도의 높이 프로파일, 이온권 기울기 및 이온 흐름을 포함한 극지방 전리권 매개 변수를 제공한다. Super Dual Auroral Radar Network(SuperDARN)은 전리권 플라즈마 대류의 $E \times B$ 드리프트 속도의 line-of-sight(LOS) 성분, backscattered power 및 E, F층 전리권의 decameter-scale 불규칙성에서 스펙트럼 폭을 연속적으로 측정하기 위해 양반구에서 지속적으로 운영되는 국제 HF 도플러 레이더 네트워크이다. LOS 데이터는 표준 SuperDARN 알고리즘에 결합되어 맵 포텐셜 기법 (Map Potential Technique)을 사용하여 전기 정전위 및 대류 패턴을 생성한다(Ruohoniemi & Baker, 1998 참

고).

오로라 전류지수 (SML 및 SMU 지수)와 Kp 지수는 지자기 활동을 설명하는 데 사용된다. SML 및 SMU 지수는 1분의 시간 해상도를 가지고 있다. Kp 지수는 태양풍과 자기권의 상호 작용에서 발생하는 전지구적인 지자기 장애 수준을 나타내는 매개 변수로, 3시간 간격으로 정의된다.

2. 2019년 5월 25일 장보고 기지에서 관측된 polar hole 이벤트

그림 13은 2019년 5월 25일에 남극 JBS에서 관측된 polar hole event를 포함한 24시간 간격의 지자기 상태 개요를 보여준다. 오로라 전류 지수인 SML 및 SMU 그리고 자기섭동 Kp 지수는 각각 그림 13a와 그림 13b에 plotting 되어 있다. 11:00 UT에서 21:00 UT까지 SML 지수는 여러 번의 갑작스런 감소를 보여준다. SML 감소의 크기는 최소 SML 값은 -46 nT에서 -150 nT 범위로 나타나며 이러한 크기는 일반적인 서브스톰에 비해 상당히 작은 수치이다. 작은 SML 변동은 작은 서브스톰 확장/강화 또는 의사 해체(pseudobreakups)로 해석될 수 있다(Koskinen et al, 1993; Ohtani et al, 1993). Kp 지수는 00:00-15:00 UT 동안 매우 낮은 수준인 0+에 있었으며, 그런 다음 15:00-18:00 UT 동안 약간 상승하여 2-가 되었다. 이것은 13:00 UT 쯤 SML 지수에서 -150 nT의 피크 진폭과 관련된 작은 서브스톰 활동 때문일 수 있다. 18:00 UT 이후에 Kp는 다시 18:00-21:00 UT 동안 1+로 감소하고, 21:00-24:00 UT 동안 1로 유지되었다.

그림 13c에서는 JVD로 측정된 전자밀도(Ne)의 하부 프로필을 보여준다. 전자밀도 프로필은 수직 높이에 따른 전자 수밀도를 나타내기 위해 색상 별로 코드가 지정되어 있다. 관측된 전리권 밀도의 일일 변화를 보면 약 100 km 고도에서의 약간의 밀도의 흔적을 제외하면 전리권 E 층이 나타나지 않는다. 이는 5월 말 JBS 지역에서 태양 EUV 생성이 존재하지 않는 것을 나타낸다. 07:30-10:30 UT 시간 동안, JVD는 약 200 km에서 350 km까지의 고도에서 작은 전자밀도 ($Ne < 5 \times 10^{10} m^{-3}$) 변동을 관측했다. 이후 JVD에 의해 관측된 전리권 특징은 10:30 UT에 갑자기 사라졌으며, 13:00 UT 이후에 전자 수밀도의 연속적인 밴드 구조가 다시 나타났다. 10:30-13:00 UT (수직 점선으로 표시된 구간) 동안 JVD가 F-층을 연속적으로 감지하지 않은 이 구간을 이 연구에서 "Polar hole" 사건이라 정의한다.

Polar hole은 자정 이후의 MLT 섹터에서 발생했다 (MLT = 약 2.0-4.5 시간). JVD에 의한 F-층 에코의 감지 공백은 조용한 지자기 조건으로($Kp = 0+$) 유지되는 동안 전자밀도가 약 2.5 시간 동안 $10^{10} m^{-3}$ 미만으로 감소했음을 나타낸다. Polar hole 기간 동안 11:00 UT에서 12:00 UT 사이에 200 km 아래에서 $10^{10} m^{-3}$ 이상의 밀도를 가진 일시적인 에코가 관측되었다. 이러한 일시적인 에코는 SML 지수에서 확인된 약한 서브스톰 활동과 연관될 수 있다. 또한 JVD 같은 지상 기반 sounding 관측에서 F-층 에코가 사라지는 몇 가지 다른 이유가 있을 수 있다는 점을 유의해야 한다. 예를 들어, F-층 전리권이 Sporadic E-층으로 덮인 경우 JVD로는 에코를 감지할 수 없다. 특히, Sporadic E-층은 F-층 전리권 밀도 수준과 관계없이 발생하며, 이 연구와 같이 F-층 밀도 수준이 낮아진 경우에 F-층 전리권으로부터의 에코를 차단하는 데 더 효과적일 수 있다 (MacDougall et al, 2000a, 2000b; Wang et al, 2022). F-층 에코가 없는 다른 이유 중 하나로 F-층 전리권에서 발생하는 밀도 불규칙성과 관련된 다중 산란 효과도 존재한다. (Zabotin et al, 2004). 그러므로 F-층 에코의 모든 사라짐 사건이 꼭 polar hole과 관련되어 있는 것은 아니라는 것을 염두에 두어야 한다. E-층 활동 및 F-층 무작위 밀도 불규칙성과

관련된 구간을 제외하기 위해 polar hole 구간에서 JVD에 의해 생성된 모든 이오노그램을 시각적으로 검토했다. 여기서 Polar hole 구간에서 sporadic E-층의 발생을 확인했다. 그러나 이는 polar hole 구간의 일부에서 나타났으며 JBS의 천정 부근에 국한되었으므로 F-층 전리권이 sporadic E-층으로 덮여 있지 않다는 것을 나타낸다. Polar hole 이벤트의 이오노그램에서 F-층의 무작위 밀도 불규칙성이 확인되지 않았다.

그림 13d는 JVD에서 얻은 F2-층의 최대 이온화 고도 (HmF2)를 보여준다. HmF2는 JBS가 MLT = 약 16 시에서 MLT = 약 22시로 이동함에 따라 00:00 UT의 200 km에서 06:00 UT의 400 km로 변화한다. 06:00에서 09:00 UT까지 피크 높이가 약 200 km로 감소하고, polar hole 시작된 09:00에서 10:30 UT까지 점진적으로 약 350 km까지 다시 증가한다. Polar hole이 끝난 시점인 13:00 UT에서 HmF2는 250 km에서 400 km 사이로 분포되어 있다. Sojka et al. (1981)은 polar hole 내부의 HmF2가 polar hole 외부보다 약 50-100 km 낮다고 예측했다. Polar hole 내부에서 JVD는 약 200 km 주변에서 F-층 에코를 감지했으므로 우리의 관측 결과는 Sojka et al. (1981)이 보고한 이전 관측 결과와 유사하다.

그림 13e에서는 F2-층 최대 플라스마 주파수로부터 추정된 F2-층 최대 전자밀도 (NmF2)를 보여준다. NmF2 값 대부분은 00:00-06:00 UT 간격에서 약 $1.0 \times 10^{11} m^{-3}$ 에서 약 $3.0 \times 10^{11} m^{-3}$ 사이로 분포하며, 그 이후 NmF2의 급격한 감소가 발생했다. 이 감소는 polar hole 시작 시간보다 약 4.5 시간 이른 06:00 UT에 발생했다. 13:00에서 15:00 UT까지 NmF2는 약 $10^{11} m^{-3}$ 로 회복되었으며, polar hole 외부에서는 15:00에서 24:00 UT까지 주로 $8.0 \times 10^{10} m^{-3}$ 에서 $4.0 \times 10^{11} m^{-3}$ 사이로 유지되었다. 01:00-06:00 UT (LT = 11-17 시) 동안 관측된 NmF2 값은 15:00-19:00 UT (LT = 2-6 시) 동의 관측값과 비교할만하다. 이것은 극지 밤 동안 JBS 상공 전리권 형성에 태양 복사선이 주요한 역할을 하지 않음을 나타낸다. 빨간 직선은 지수 피팅 방법을 사용하여 06:00에서 10:20 UT까지의 데이터 포인트에 맞추어 적합시킨 것이다.

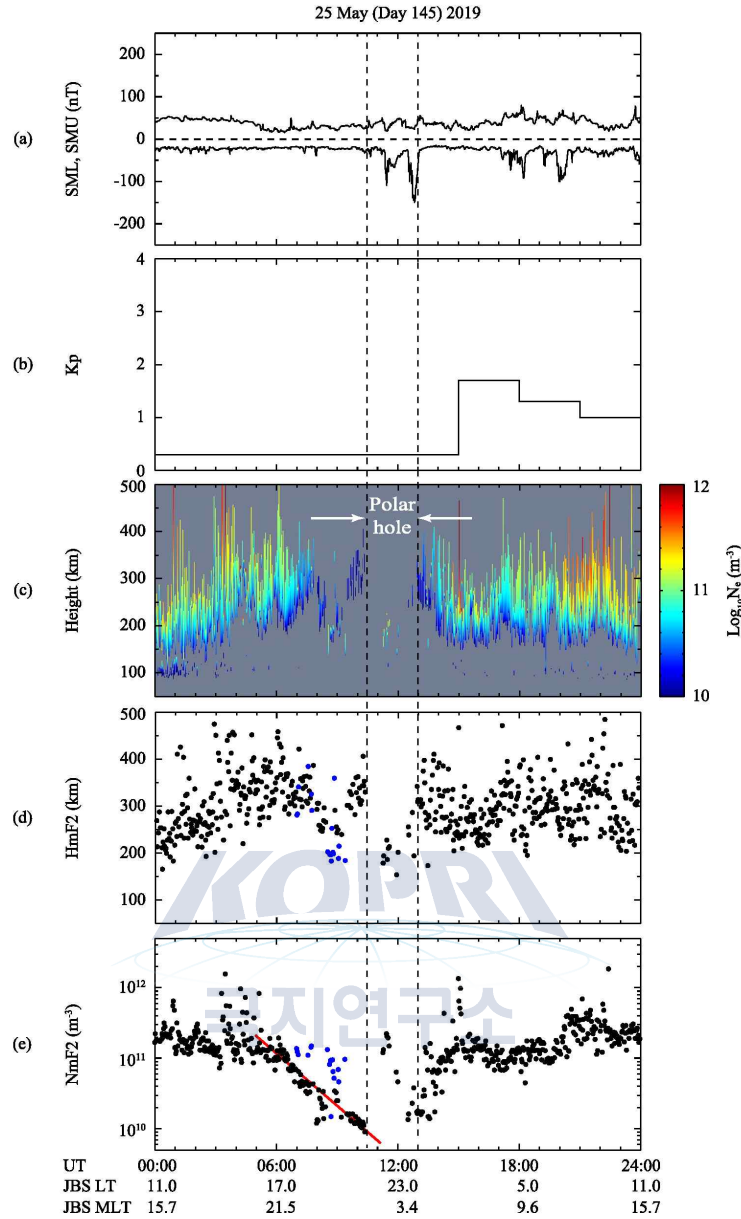


그림 13. 2019년 5월 25일에 남극의 JBS에서 관측된 polar hole 이벤트를 포함한 24시간 동안의 지자기 조건 개요이다. (a) SML 그리고 SMU 지수. (b) Kp 지수. (c) JVD가 측정한 전자밀도 (N_e)의 하부 프로파일. (d) JVD에서 얻은 F2-층의 최대 이온화 고도 (HmF2). (e) F2-층 최대 플라즈마 주파수에서 추정된 F2-층 최대 전자밀도 (NmF2). 10:30–13:00 UT 간격 (수직 점선으로 표시)은 polar hole 이벤트를 나타낸다. 빨간 직선은 06:00에서 10:20 UT까지의 데이터 포인트에 지수 피팅 방법을 사용하여 피팅했다. 07:00–09:30 UT 간격의 파란색 점들은 실제 전리권 밀도 프로파일을 나타내지 않았기 때문에 피팅에 포함되지 않았다. 이것은 전리권 구조가 특히 복잡하여 자동 Dynasonde 소프트웨어가 추적 선택에서 오류가 발생한 결과이다.

지수 함수는 $\exp(-kt)$ 로 정의되며, 여기서 n 은 06:00 UT에서의 NmF2 값, k 는 자유 매개 변수이고, t 는 06:00 UT와 관련된 시간이다. 시간에 대한 NmF2의 지수적 의존성은 $k = 14$ 의 값

으로 제공되며, 이는 e-fold decay time이 1.7 시간임을 나타낸다. 07:00-09:30 UT 간격의 파란색 점들은 실제 전리권 밀도 프로필을 나타내지 않았기 때문에 피팅에 포함되지 않았음을 주목해야 한다. 이것은 전리권 구조가 특히 복잡하여 자동 Dynasonde 소프트웨어가 추적 선택에서 실수를 저지른 것으로 인한 것이다 (Kim et al, 2022 참고).

3. 장보고 기지에서 관측된 Polar hole 이벤트들의 통계분석

이전 분석을 통해 polar hole이 조용한 지자기 상태의 야간 MLT 부근에서 발생하며, 지수적인 밀도 감소가 polar hole보다 4.5시간 빨리 시작된다는 것을 나타냈다. 이 섹션에서는 polar hole 이벤트의 공간 분포와, 시작 전의 전자밀도 변화를 통계적으로 조사했다.

Polar hole 이벤트를 식별하기 위해, 우리는 2019년 태양 극소기 1년 동안 수행된 JVD 관측을 사용한다. 데이터 처리의 첫 번째 단계는 조용한 지자기 조건의 구간을 선택하는 것이다. 그림 14a는 Kp 값이 1+ 이하인 9시간 동안의 안정된 조용한 상태에 대한 계절적 발생 분포를 보여준다. 안정된 조용한 구간의 발생은 약간 편향되어 있다. 2019년 6월에는 더 많은 조용한 구간이 있지만, 모든 달에는 많은 수의 조용한 구간(60개 이상)이 포함되어 있다.

일단 안정된 조용한 구간이 선택되면, 우리는 polar hole을 식별하기 위한 절차를 사용한다. 이 절차에서는 JVD에서 측정된 색상 코드가 지정된 전자밀도 프로필과 NmF2 값(그림 13c와 13d)을 시각적으로 검토한다. 전자밀도가 약 $\sim 4.0 \times 10^{10} m^{-3}$ 이하로 내려가는 경우에는 부드러운 전환의 사라짐이 1시간 이상 나타나야 한다. 이 polar hole에 대한 임계값은 이전 연구 (Jenner et al., 2020; Makarevich et al., 2015)에서 사용된 값과 비교 가능하다. 마지막으로, polar hole 이벤트가 조용한 조건과 관련되어 있는지 확인해본 결과, polar hole 이벤트 발생 3시간 전에 두 Kp값 (6시간) 중 최대 Kp값이 1+이하였다. 이 절차를 통해 2019년 45개의 polar hole 이벤트를 식별했다. 그림 14b는 45개의 polar hole 이벤트의 계절적 발생 분포를 보여준다. 우리는 44개의 polar hole 이벤트 (약 98%)가 5월부터 8월까지 발생했음을 발견했으며, 이 기간은 JBS에서 완전한 밤 기간에 해당한다.

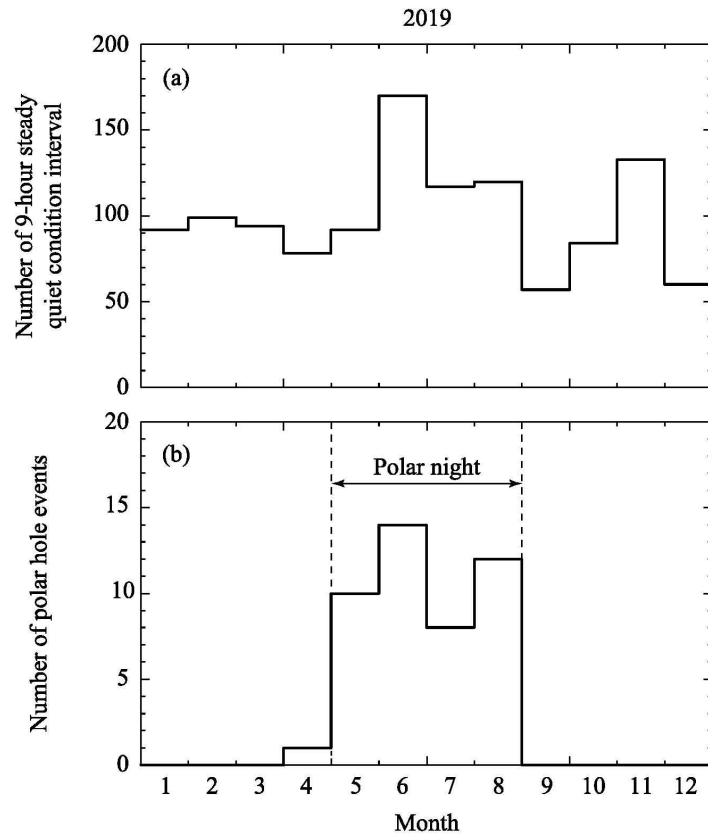


그림 14. (a) Kp 값이 1+ 이하로 정의된 9시간 동안의 고요한 조건에서 발생 분포의 계절적 의존성. (b) 45개의 극지 구멍 사건의 계절별 발생 분포.

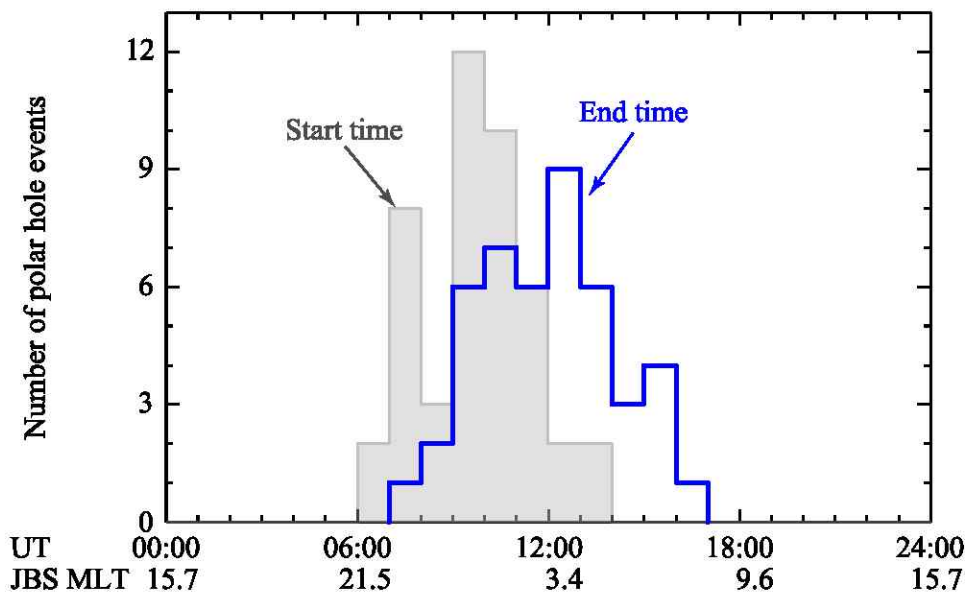


그림 15. 45개의 polar hole 이벤트의 자기 지방 시간 발생 분포. 회색 및 파란색 히스토그램은 polar hole 이벤트의 시작 시간 및 종료 시간의 이벤트 수를 나타낸다.

그림 15은 45개의 polar hole이벤트의 자기 지방 시간 발생 분포를 보여준다. 회색 및 파란색 히스토그램은 polar hole이벤트의 시작 시간과 종료 시간의 이벤트 수를 나타낸다. 모든 이벤트는 넓은 범위의 야간 지자기 지방 시간 (MLT = 약 22-05시)에서 시작되었으며, MLT = 약 01-03 시에 발생이 가장 많았다. Polar hole이벤트는 약 MLT = 23-08 시 범위에서 종료되었으며, 이 중 약 82% (45개 중 37개)는 MLT = 06시 이전에 종료되었다. 이는 야간 MLT 지역에서 polar hole을 감지할 가능성이 높다는 것을 나타낸다. 이 MLT 의존성은 낮 쪽 MLT에 비해 매우 비대칭적으로 나타나며, 어두운 극성 캡을 횡방향으로 천천히 이동하는 플라즈마 이동에 기인하여 플라즈마 채류 시간이 길어지는 것으로 해석될 수 있다. 우리의 지상 기반 관측은 Brinton et al(1978)의 이전 위성 관측과 일치한다. 그들은 polar hole 이벤트를 O⁺ 밀도로 식별하고 이러한 사건이 주로 MLT = 21시부터 06시 사이에 발생한다고 발견했다.

그림 16는 겨울 극지방 F-층 전리권에서 관측된 45개의 polar hole 이벤트의 지속 시간에 대한 발생 히스토그램을 보여준다. 지속 시간이 0에서 1시간 사이에 이벤트가 없는 것은 선택 기준으로 인한 것이다. 즉, 우리 연구에서 정의한 polar hole 이벤트는 1시간 이상 지속되어야 한다는 것을 의미한다. 지속 시간의 발생은 1시간에서 5.5시간 사이로 분포되며, 대부분 2시간 내로 편향되어 있으며, 1.5시간에서 가장 빈번하게 발생한다.

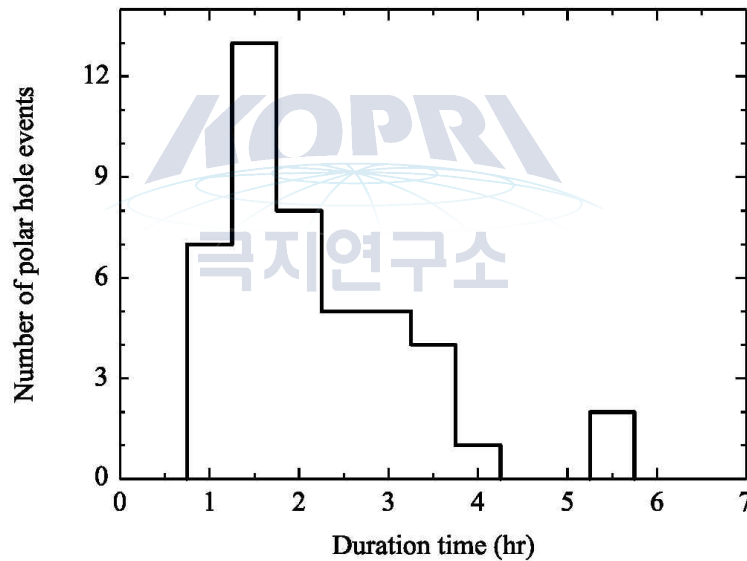


그림 16. 45개의 polar hole 이벤트 지속 시간의 발생 히스토그램

그림 13e에서 우리는 NmF2의 지수적 감소가 polar hole 이벤트 시작 4.5시간 전에 시작되었음을 보여주었다. 그림 13에 나타난 polar hole 이벤트 이전에 발생하는 이러한 급격한 밀도 변화는 특이한 경우가 아니다. 그림 17는 각각 2019년 6월 11일과 6월 17일에 관측된 두 가지 다른 예를 보여준다. 그림 17a는 6월 11일 polar hole 이벤트(흰색 수평 막대로 표시됨)가 약 07:00 UT (t_2)부터 시작되었음을 보여준다. JVD에서는 NmF2 값이 $10^{10} m^{-3}$ 이상이어야 감지한다. 그러나 밀도는 약 07:00 UT에서 급격하게 감소하고 그 후 1시간 이상 동안 NmF2 값이 약 $4.0 \times 10^{10} m^{-3}$ 이하로 유지되었다. 이 값은 이 연구에서 polar hole event의 임계 값이다. 04:00 UT (t_1)에서 NmF2 값은 약 $2.0 \times 10^{11} m^{-3}$ 이며 (그림 17b), 그 이후에 감소하기 시작했다. t_1 와 t_2 사이의 데이터에 대한 NmF2 값과 t_1 에 대한 시간에 대한 지수 함수($\exp(-\beta t)$, 빨간 선으로 표시됨)를 통해 $A_i = 2.0 \times 10^{11} m^{-3}$ 및 $\beta = \sim 1.2 \times 10^{-4} s^{-1}$ 을 얻었으며, 이는 e-fold

decay time이 2.4 시간임을 나타낸다. t_2 이후에는 polar hole 내부의 NmF2 값이 빨간색 기울기 아래로 $1.0 \times 10^{10} m^{-3}$ 에서 $3.0 \times 10^{10} m^{-3}$ 사이에 분포되어 있으며, 이는 polar hole 내의 전자가 polar hole 주변의 전자보다 더 빠르게 감소하고 있음을 나타낸다. 6월 17일 이벤트에서 polar hole의 시작은 11:00 UT로 확인되었다(그림 17c). Polar hole의 시작보다 1.5시간 앞선 09:30 UT에 NmF2의 급격한 감소가 시작되었다(그림 17d). 이 기울기는 지수함수 피팅을 통해 $\beta = \sim 3.5 \times 10^{-4} s^{-1}$ 로 결정되었으며, 이는 e-fold 감소 시간이 약 0.8 시간으로 6월 11일 사건보다 짧은 것을 나타낸다. 12:00에서 13:00 UT 사이의 구간에서도 지수적인 NmF2 감소와 유사한 특징을 발견했다.

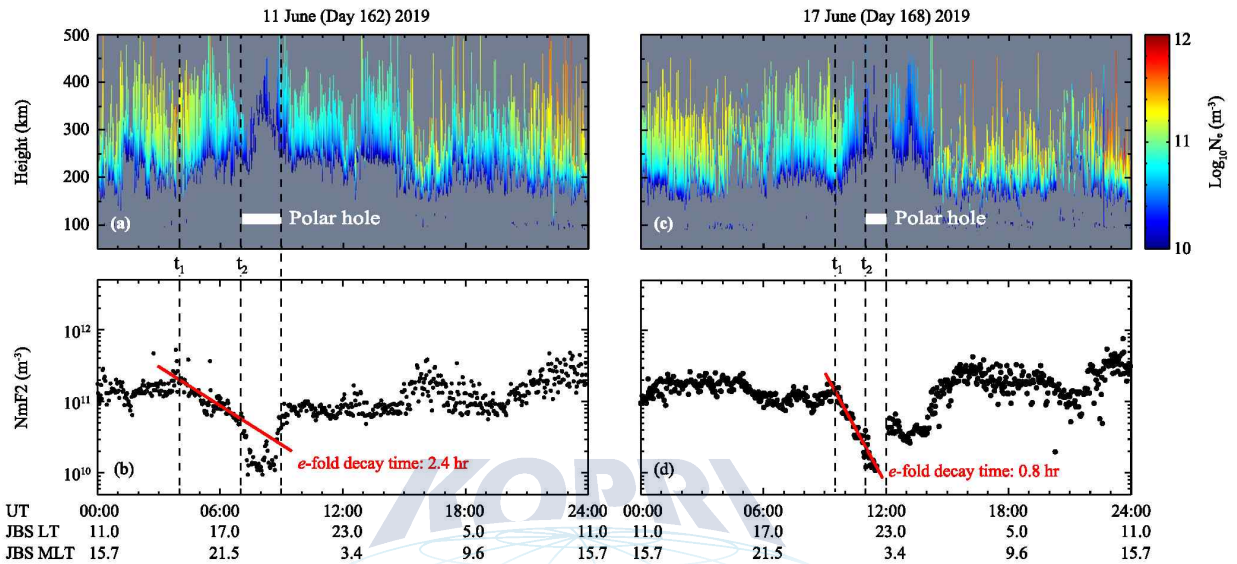


그림 17. 두 가지의 다른 polar hole이 (a) - (b)는 2019년 6월 11일에, (c) - (d)는 2019년 6월 17일에 관측되었다.

우리는 45개의 polar hole 이벤트 중에서 polar hole 이벤트 시작 전에 지수적인 NmF2 감소를 나타내는 34개의 이벤트를 식별했다. 그림 18a는 34개의 이벤트에서 (빨간 점) 및 (파란 점)에서의 NmF2 값을 보여준다. 지수적 전자밀도 감소는 약 03:00에서 11:00 UT 사이에 시작되었으며, NmF2 값은 약 $1 \times 10^{11} m^{-3}$ 에서 $4 \times 10^{11} m^{-3}$ 정도였다. t_1 에서의 NmF2 값은 MLT = ~ 19 시부터 MLT = ~ 2.5 시까지의 자기 지방 시간에 대한 유의미한 의존성이 없다. 지수적 밀도 감소는 약 MLT 21.5에서 5.1 사이에서 멈췄다. t_2 에서의 NmF2 값은 주로 약 $1 \times 10^{10} m^{-3}$ 에서 $5 \times 10^{10} m^{-3}$ 사이에 분포한다. 이러한 값들은 polar cap 지역의 300 km 고도 근처에서 우주선에 의해 관측된 낮은 값들보다 2개의 큰 자릿수가 높다 (Brinton et al., 1978).

그림 18b는 34개의 이벤트에 대한 e-folding time을 보여준다. 이러한 e-folding time은 전자밀도가 지수적으로 감소하기 시작한 t_1 에서 표시된다. e-folding time 값들은 MLT = ~ 19 시에서 MLT = ~ 2.5 시 사이에서 약 0.5 시간에서 3.5 시간 정도의 범위에 분포한다. e-folding 시간은 JBS의 자기 지방 시간이 MLT = 24 시로 이동함에 따라 감소하며, 그 후에 증가한다. Polar cap 지역에 어둠과 이온화 요인이 없는 상황에서 F층 플라즈마가 자정 섹터로 향하게 된다면, 재결합 감쇠가 우세할 것으로 예상된다. 따라서 우리는 그림 18b에서의 e-folding 시간을 재결합 F층의 e-folding decay time으로 간주했다.

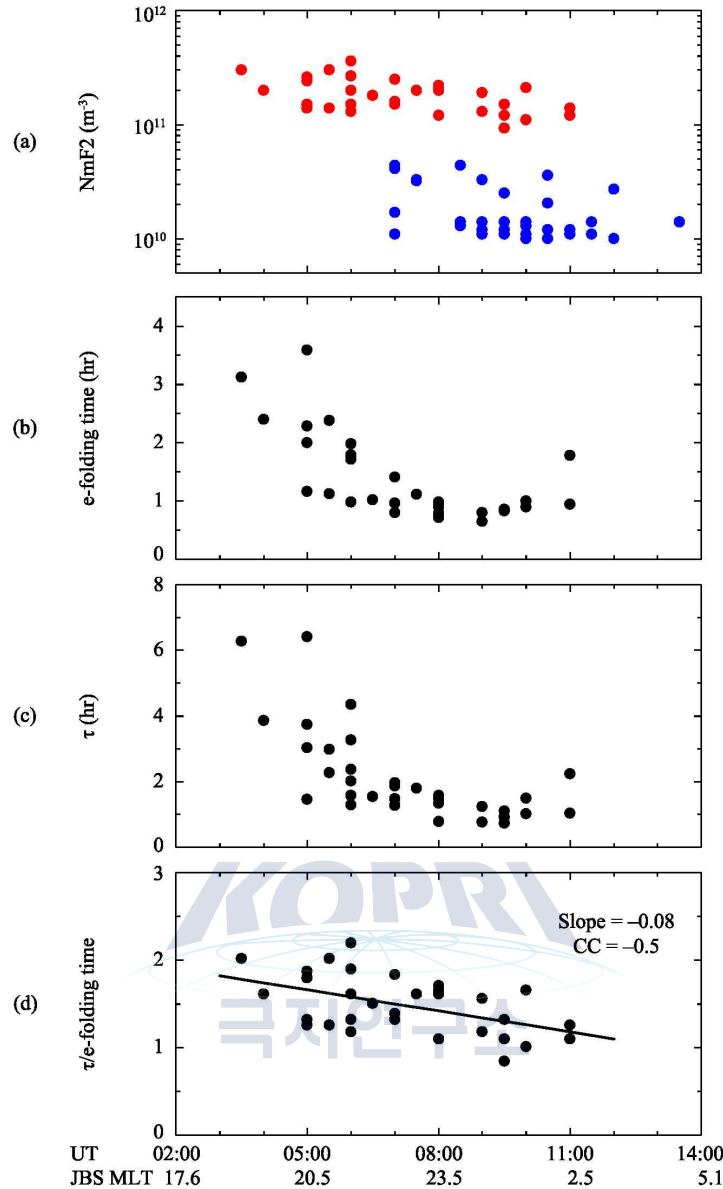


그림 18. Polar hole 시작 전의 34개의 지수적인 NmF2 감소 이벤트. (a) (빨간 점) 및 (파란 점)에서의 NmF2 값. (b) e-folding 시간. (c) 에서 NmF2 값이 JVD 기기에서 polar hole을 식별하기 위한 상한값인 $\sim 4.0 \times 10^{10} m^{-3}$ 값으로 감소하는 데 필요한 시간 (τ). (d) 시간 비율 τ /e-folding 시간.

그림 18c 에서의 τ 는 t_1 에서의 NmF2 값이 $4.0 \times 10^{10} m^{-3}$ 으로 감소하는 데 필요한 시간을 나타내며, 이 값은 JVD에서 polar hole을 식별하기 위한 상한선이다. 데이터 분포의 정도는 자기 지방 시간에 대한 e-folding time 값의 정도와 유사하다. 그림 18d는 시간 비율인 τ /e-folding time을 보여준다. 그림 18d에서는 최소 제곱법으로 결정된 기울기와 선형 상관 계수 (CC)를 포함하였다. 시간 비율은 약 1에서 2까지의 범위에 있으며, 이는 NmF2가 기기 밀도 상한선인 $4.0 \times 10^{10} m^{-3}$ 로 감소하기 위해 1-2 개의 e-folding 감소가 필요함을 나타낸다. 데이터 포인트의 상당한 분산이 있더라도, τ /e-folding time 비율이 MLT의 감소 함수인 것은 명백하다. 즉, 비율은 JBS가 일몰 부근 (MLT = 약 19시)에 가까울 때 약 2이며, MLT = 약 2.5 시로 이동함에 따라 약 1로 감소한다.

4. 논의

Polar hole은 태양 반대 방향의 느린 대류 흐름이 어두운 polar cap지역을 가로지르며 이온 재결합이 동반되어 발생한다고 알려져 있다 (Benson & Grebowsky, 2001; Brinton et al., 1978; Forsythe et al., 2021). Sojka et al (1981a, 1981b)은 전리권-대기 합성 모델을 사용한 간단한 플라즈마 대류 모델로 polar hole 형성에 대한 수치 연구를 수행했다. 이러한 수치 연구는 조용한 지자기 활동 조건과 관련된 polar hole 형성이 이온화 원인이 없는 상황에서 플라즈마가 태양 반대 방향으로 느린 이동을 하면서 장기간 지속적인 재결합 과정 중에 발생한다는 것을 제공했다. 이것은 polar hole 형성을 고려해야 할 중요한 요소 중 하나가 대류 속도인 것을 나타낸다. 우리는 JVD로 측정된 F2-층 수평 이온 흐름 속도와 NmF2 간의 관계를 조사한다.

5. F2층 수평 이온 속도와 NmF2의 자기지방시 의존성

그림 18b에서는 e-fold decay time이 MLT = 약 19 시에서 MLT = 약 2.5 시까지 0.5시간에서 4시간 범위 내로 분포되며, JBS가 자정 방향으로 이동함에 따라 감소함을 보였다. Polar hole 시작 전 다양한 매개 변수(수평 이온 흐름 속도, NmF2 및 HmF2의 상대적인 타이밍을 특성화하기 위해, 22개의 polar hole 사건에 대한 superposed epoch 분석을 수행했다. 각 polar hole 사건에 대해 polar hole 검출 전 6시간 동안 얻은 데이터 샘플을 사용했다. 22개의 polar hole 사건은 자정 근처에 발생했으므로, 일몰에서 자정까지의 자기 지방 시간에 따른 매개 변수의 변화를 조사할 수 있다. 결과는 그림 19에 나와 있다. 그림 19의 각 패널에서 작은 회색 점은 개별 샘플을 나타내며, 큰 빨간 점들은 각각의 1 시간 UT 구간 내에서의 중앙값을 직선으로 연결한 것이며, 세로 막대는 하위와 상위 사분위수를 연결한다. 10:00-11:00 UT 구간은 샘플 수가 적어서 통계적 유의성이 낮을 가능성이 있다.

동쪽 방향의 이온 이동 속도 (V_{zon})와 북쪽 방향의 이온 이동 속도 (V_{mer})는 그림 19a와 19b에 그려져 있다. V_{zon} 및 V_{mer} 의 양의 값은 각각 동쪽 및 북쪽으로 정의된다. JBS가 낮의 LT sector (03:00-07:00 UT)에 위치한 경우, 음의 값은 태양 반대 방향 이온 이동을 의미한다. 밤의 LT sector (07:00-11:00 UT)에서의 양의 또한 태양 반대 방향 이동을 나타낸다. V_{zon} 과 V_{mer} 의 데이터 샘플은 큰 수직 분포를 보인다. 그림 19에 표시된 이동 속도는 시선 도플러 속도(V^*)에서 계산되며, 이는 반사된 라디오 에코 신호의 위상 차이($\Delta\theta$)와 시간 지연(Δt) 간의 관계인 $\Delta\theta(f) = (V^*/c)4\pi f\Delta t$ 에 의해 연결된다. 여기서 c 는 빛의 속도이고 f 는 라디오파의 주파수이다(Ham et al., 2020; Kim et al., 2022). 따라서 이동 속도의 큰 분포는 반사된 에코 위상의 큰 변화에서 비롯되며 이것은 F2 층에서 이온 운동의 시간적 및 공간적 변화가 균일하지 않다는 것을 나타낸다.

03:00-10:00 UT에서 동쪽 방향으로 V_{zon} 중앙값이 MLT에 따라 감소한다. 저녁 MLT 부근(MLT = 18.6 시)에서 V_{zon} 중앙값은 108 m/s이며, 자정 근처(MLT = 0.5 시)에서는 47 m/s이다. V_{zon} 중앙값의 극성은 관측 지점이 자정 이후로 이동함에 따라 동쪽에서 서쪽으로 변경된다. 서쪽 방향 속도의 중앙값은 -14 m/s이다. V_{mer} 중앙값은 약 MLT 19에서 -86 m/s에서 시작하여 MLT 21에서 -10 m/s로 단조로운 변화를 보이며, MLT 22에서 약 0 m/s이다. MLT

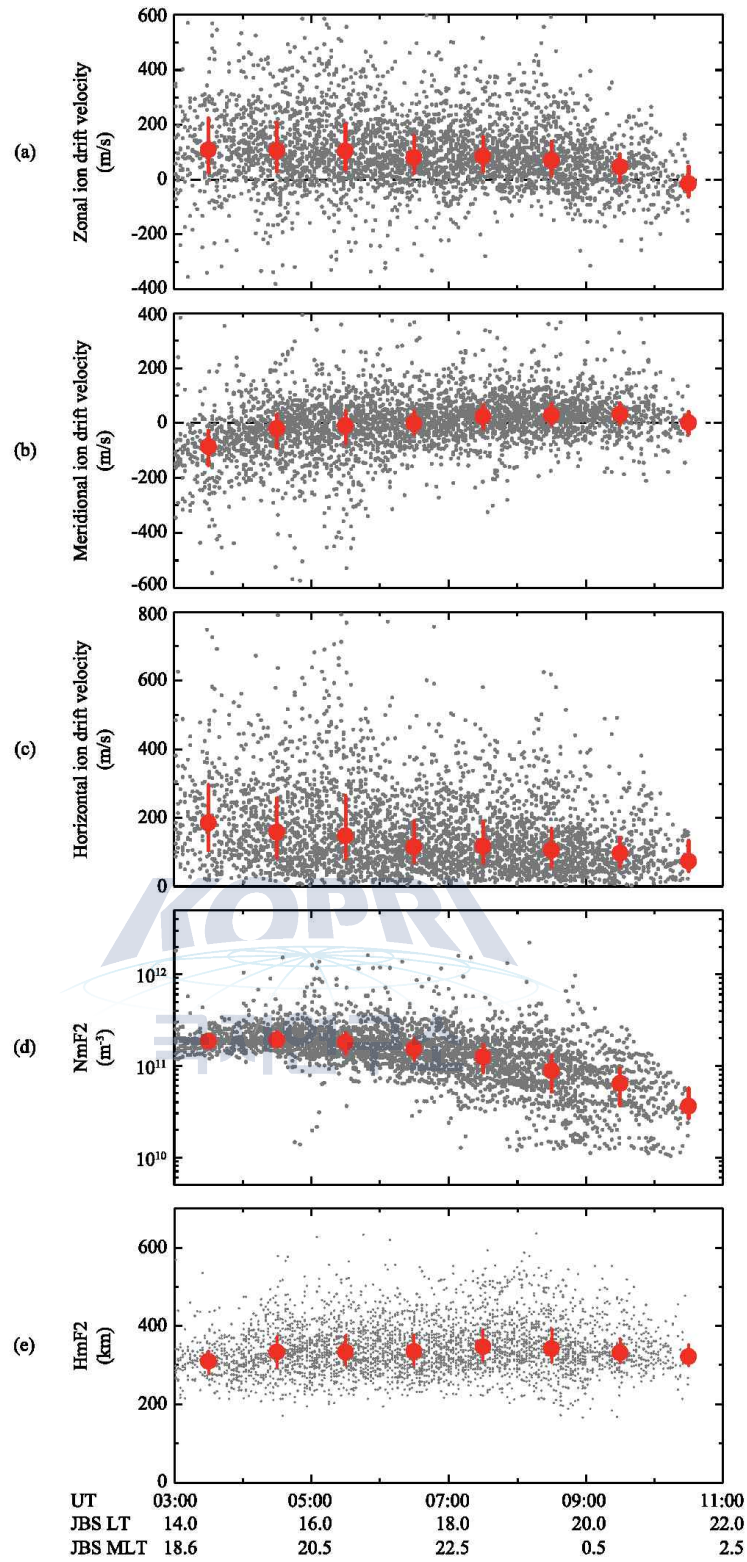


그림 19. Polar hole 시작 전 다양한 매개변수의 상대적인 타이밍(수평 이온 풍속, NmF2 및 HmF2). (a) 동서 (V_{zon}) 및 (b) 남북 (V_{mer}) 방향의 이온 풍속. (c) 수평 이온 풍속은 (V_{hor}), $V_{zon}^2 + V_{hor}^2$ 의 제곱근을 계산하여 얻는다. (d) NmF2. (e) HmF2. 각 패널에서 작은 회색 점은 개별 샘플을 나타내며, 직선으로 연결된 두꺼운 점은 각 1시간 UT 구간 내의 중앙값을 나타내고 수직 막대는 하위와 상위 사분위수를 연결한다.

22에서 MLT 01로 이동함에 따라 V_{mer} 중앙값은 약 24 m/s에서 31 m/s로 약간 증가한다. V_{mer} 중앙값은 JBS가 polar cap 내에서 MLT 범위 19-01에서 태양 반대 방향으로 이동하는 이온을 관측하고 있으며, JBS의 MLT가 polar hole이 되는 자정 방향으로 이동함에 따라 이동 속도가 감소함을 나타낸다.

V_{zon} 과 V_{mer} 의 중앙값을 비교함으로써, 우리는 JBS가 03:00-07:00 UT 구간에서 저녁쪽 영역에서 형성된 시계 반대 방향 순환 셀의 중심 동쪽에 위치하였다가, 07:00-11:00 UT 구간에서 여명쪽 영역에서 형성된 반시계 방향 순환 셀의 중심 서쪽에 위치한 것으로 제안한다. 수평 이온 이동 속도(V_{hor})의 중앙값은 $V_{zon}^2 + V_{mer}^2$ 의 제곱근을 계산하여 얻었으며, 이 값은 그림 19c에 표시되어 있다. 이 데이터에는 상당한 분포가 있지만, 중앙값은 MLT 18에서 190 m/s에서 자정 근처에서 약 100 m/s로 내려가는 명확한 경향을 보여준다. Brinton et al (1978)은 평균 이동 속도가 약 100 m/s인 경우 가장 깊은 polar hole을 형성할 수 있다고 제안했다. 1시간에서 5시간 동안 지속되는 polar hole을 고려할 때, polar hole은 100 m/s의 수평 이동 방향과 평행한 수평 방향으로 약 360에서 1800 km의 수평 범위를 가진다.

그림 19d에서는 NmF2를 보여준다. Polar hole이 시작되기 전 6시간 동안 중앙값 NmF2는 19 MLT에서 02 MLT에서 로 5.0 배 감소한다. 이러한 NmF2 감소는 감소와 동반된다. NmF2와 간의 이러한 양의 상관 관계는 전자밀도 감소의 발생이 어둠에서 태양 반대 방향 플라즈마 대류와 이온화원이 없는 상황과 관련이 있다는 것을 시사한다(Benson & Grebowsky, 2001; Brinton et al., 1978; Forsythe et al., 2021; Sojka et al., 1981a, 1981b). 그림 19e에서는 중앙값 HmF2가 JBS MLT에 의존하지 않고, MLT = 20시부터 MLT = 01시까지 HmF2 약 330 km로 일정함을 보여준다.

극지연구소

6. SuperDARN and JVD 관측 비교

위에서 언급한대로, 드리프트 속도는 극 전리권에서 전자밀도 감소(즉, polar hole 발생)의 주요 요소로 고려된다. 우리는 F2 층에서 JVD로 얻은 태양 반대 방향 이온 이동 속도가 합리적인 값인지 조사한다. Polar cap 위의 drift velocity는 polar cap 내에서 여명에서 황혼으로 향하는 횡단 전기장 (E_T)에서 추정할 수 있다. 그림 20a는 황혼과 여명 셀의 전위 최소값과 최대값 간의 차이로 계산된 Cross-Polar Cap Potential Drop (Φ_{PC})을 보여준다. 전위 값은 맵 포텐셜 기술 (Ruohoniemi & Baker, 1998)을 사용하여 SuperDARN 대류 모델의 5분 간격의 시간 단계에서 얻어졌다. 중앙값은 03:30 UT에서 최대(29 kV)이며, 10:30 UT에서 최소(21 kV)인 20 kV에서 30 kV 사이로 분포한다. 이러한 polar cap potential drops은 조용한 지자기 활동 조건에서 기대된다(Boyle et al., 1997). Polar cap 지름이 약 30°인 지역에서 potential drop을 통해 추정된 transverse dawn-to-dusk electric field(E_T) 강도 및 $E_T \times B/B^2$ 드리프트 속도에서 B 는 F2 지역의 지자기장 ($|B| = 55,000$ nT)이며 이 값들은 각각 그림 20b와 그림 20c에 표시되어 있다. 태양 반대 방향 이동 속도의 중앙값은 100에서 200 m/s 범위 내에서 분포하며, 이 값들은 JVD에서 관측된 값과 비슷하다.

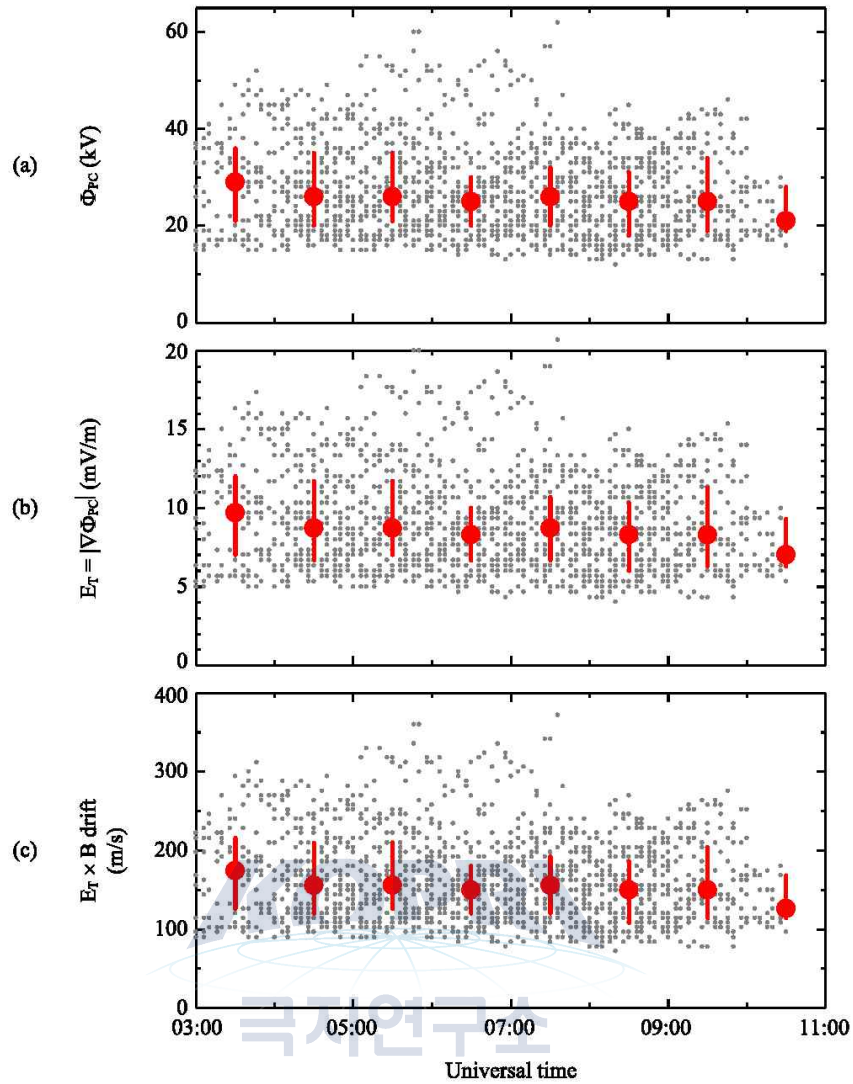


그림 20. (a) 황혼과 새벽 셀의 전위 최솟값과 최댓값 사이의 차이로 계산된 cross-polar cap 전위 하락(Φ_{PC}). (b) 약 30° 정도의 polar cap 지역에서 전위 하락을 기반으로 추정된 횡단 새벽에서 황혼으로 향하는 전기장 (E_T) 강도. (c) $E_T \times B/B^2$ drift 속도, 여기서 B는 F2 지역의 지자기장 ($|B| = 55,000$ nT)이다.

JVD와 SuperDARN 레이더로 측정된 이동 속도를 비교하기 위해, 그림 21에 JVD 중앙값을 SuperDARN 중앙값에 대해 플롯했다. 만약 JVD로 측정된 속도가 SuperDARN으로 측정된 것과 동일하다면, 모든 데이터 포인트는 대각선 실선 위에 있어야 한다. 03:30 UT, 04:30 UT 및 05:30 UT의 중앙값인 세 개의 데이터 포인트는 대각선 실선에서 ± 15 m/s에 해당하는 두 개의 직선 점선으로 제한된다. 이는 각 중앙값의 오차 막대를 비교하여 (그림 19c 및 20c 참조) 두 기기(JVD 및 SuperDARN 레이더)에서 거의 동일한 드리프트 속도 중앙값이 얻어진다는 것을 나타낸다. 05:30 UT 이후에는 JBS 기지가 자정 방향으로 이동함에 따라 JVD의 드리프트 속도 중앙값이 감소한다. 그러나 SuperDARN의 중앙값은 10:30 UT에서 얻은 중앙값을 제외하고는 약 150m/s 근처에서 일정하다. 이 중앙값은 샘플 수가 적음으로써 얻은 것이다. JVD와 SuperDARN 간의 이러한 속도 차이로 인해 그림 21에서 데이터 포인트가 대각선 실선에서 멀

리 떨어져 있다. 그림 20c에 표시된 $E_T \times B/B^2$ 드리프트 속도는 6 MLT (여명)에서 18 MLT (황혼)까지의 라인을 따라 polar cap을 가로지르는 전위 차이에서 얻어진다. 이것은 JBS가 약 1900-2100 (저녁쪽) MLT 구간에 있을 때 03:30 UT, 04:30 UT 및 05:30 UT의 JVD 세 중앙값이 SuperDARN 레이더로 측정된 것과 거의 동일하며, JBS 기지가 저녁 MLT 구간에서 멀어질수록 JVD 속도 중앙값이 감소하는 이유를 설명한다.

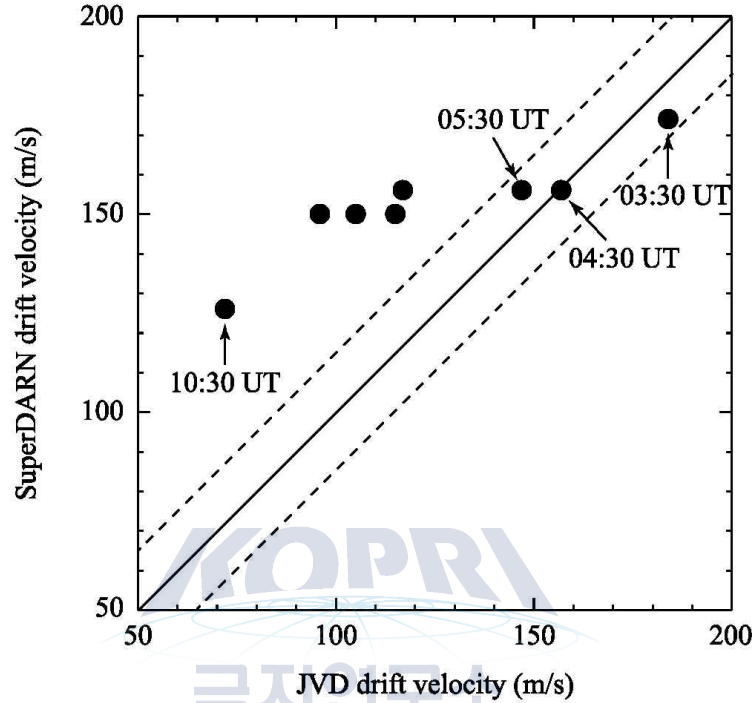
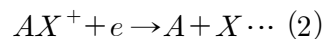


그림 21. JVD의 중앙값 대 SuperDARN의 중앙값. JVD로 측정된 속도가 SuperDARN으로 측정된 속도와 동일한 경우, 모든 데이터 포인트는 대각선 실선 위에 있어야 한다.

그림 18b의 e-folding time과 그림 19c의 태양 반대 방향 드리프트 속도의 MLT 변화를 비교하면 (즉, 양쪽 다 황혼에서 자정 방향으로 경도를 따라 감소한다), F2층의 플라스마 밀도 감소가 밤의 MLT 구간에서의 플라스마 체류 시간과 직접 관련이 있으며, 재결합 속도는 대류 속도로 결정된 플라스마 체류 시간과 관련이 있다고 주장할 수 있다. 그러나 재결합 과정은 항상 플라스마 체류 시간과 관계없이 발생한다. 따라서 대류 속도로 결정된 플라스마 체류 시간이 polar hole 형성의 유일한 가능한 설명은 아니다.

7. Polar hole 형성 전의 지수적인 NmF2 감소

F층에서 일어나는 전자의 손실은 다음 두 가지 과정으로 알려져 있다.



X^+ 는 F층에서 지배적인 O^+ 이온을 의미하고, A_2 는 F층에서 흔한 분자 중 하나인 O_2 와 N_2 을

의미한다. F층에서 O^+ 의 손실은 주로 O_2 와 N_2 의 식 (1)에 해당하는 재결합에 의해 일어난다. 준 중성($[X^+] \approx N_e$)조건 하에 식 (1)의 손실 비율은 $L \approx k_{CE}[A_2][X^+] = \beta[X^+] \approx \beta N_e$ 이다. 여기서 k_{CE} 는 반응 계수고, $\beta(=k_{CE}[A_2])$ 는 손실 계수, 그리고 $[X^+]$ 와 N_e 는 각각 이온과 전자밀도에 해당한다.

NO^+ 와 O_2^+ 의 전자와의 재결합은 식 (2)의 과정에서 보이는 것처럼 중성 산소와 질소를 만든다. 전자의 손실 비율 식 (2)는 $L \approx \alpha[AX^+]N_e \approx \alpha N_e^2$ 다. 여기서 α 는 재결합 계수다. 계수 α ($\sim 10^{-13} m^3 s^{-1}$)는 F층($\sim 250\text{km}-350\text{km}$)에서 K_{CE} ($\sim 10^{-19} m^3 s^{-1}$)보다 10^6 배 크다. β -유형 과정은 전반적인 비율을 다룬다(Bates, 1988; Hargreaves, 1992; Prölss, 2004).

Polar hole 현상은 F층 polar cap 지역에서 β -유형 과정으로 인한 손실계수를 무시할 만한 겨울 계절의 밤 시간대에 관측된다. 그렇기 때문에, 밀도 식은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = -L = -\beta N_e \dots (3)$$

식(3)은 전자밀도가 고정된 지점에서 오직 시간에 의해서만 변하는, 즉 시간에 대해 밀도 분포가 변함을 의미한다.

$$N_e(t) = N_e(t_0)e^{-\beta(t-t_0)} \dots (4)$$

β 계수는 온도가 1000K일 때, 다음과 같이 주어진다(Prölss, 2004).

$$\beta[s^{-1}] = 5 \times 10^{-19}(N_{N_2}[m^{-3}] + 25N_{O_2}[m^{-3}]) \dots (5)$$

Altitude (km)	$O_2 (m^{-3})$	$N_2 (m^{-3})$	β coefficient (s^{-1})	e-fold decay time (hr)
250	1.3×10^{13}	1.6×10^{14}	2.5×10^{-4}	1.1
275	4.5×10^{12}	6.0×10^{13}	8.5×10^{-5}	3.3
300	1.4×10^{12}	2.2×10^{13}	2.9×10^{-5}	9.6

표 2. 2019년 5월 25일 06:00 UT에 NRLMSIS 2.0을 통해 추정된 N_2 와 O_2 의 밀도

여기서 N_{N_2} 와 N_{O_2} 는 각각 N_2 와 O_2 의 수 밀도를 의미한다. JBS 상공의 F층에서 β 계수를 정량화하기 위해서 우리는 지수적 감소가 시작된 2019년 5월 25일 06:00 UT에 광범위한 데이터를 기반으로 한 대기의 MSIS 경험적 모델의 가장 최근 버전인 NRLMSIS 2.0으로부터 추정된 N_2 와 O_2 밀도를 사용한다 (Emmert et al., 2020). 이 결과는 표 1에 다른 고도에서 수 밀도와 e-fold 붕괴시간과 함께 요약되어 있다. β 계수는 중성분자인 N_2 와 O_2 의 밀도에 의존하기 때문에 높이에 따라 변한다. 표 2에 나열된 N_2 와 O_2 밀도를 채택하면, 우리는 β 계수와 e-fold 붕괴 시간을 얻는다. 250과 275km에서의 값은 우리가 관찰한 값과 유사하다. 그림 18b에서 e-fold 붕괴시간은 JBS가 dusk 구역 (MLT= ~ 19 시)에서 midnight 위치로 이동함에 따라 ~ 3.5 시간에서 0.5시간으로 내려가는 명확한 경향을 보여준다. 1시간 미만의 e-fold 붕괴 시간 값은 MLT= $\sim 23.5-2.5$ 시간 영역에 분포되어 있다. 위에서 언급한 바와 같이 β -유형의 과정은 분자

의 밀도에 의존한다. 따라서 $MLT \sim 23.5-2.5$ MLT 부문에서 전자의 급속한 감소는 중성 분자의 고농도와 관련이 있을 수 있다. 주어진 위치에서 분자 밀도의 변화는 수직 또는 수평 수송 형태로 일어나는 분자의 bulk 이동 때문이다. 고위도에서, substorm 및 자기 폭풍 발생과 관련된 전리권 교란 동안 예상되는 E층의 Joule heating은 중성 대기의 온도와 바람을 상승시킨다. 증가한 온도는 분자의 상승 운동으로 이어진다. polar hole은 극도로 조용한 지자기 조건에서 관찰되었기 때문에, 우리는 가열원이 없는 midnight 지역 근처에서 수직 수송이 일어날 것으로 예상하지 않는다.

우리가 사용한 데이터는 23.5-2.5 MLT 영역으로의 수평 수송에 대한 직접적인 증거를 제공하지 않는다. 그러나, 수평 수송을 뒷받침하는 한 가지 정성적 주장은 POLAR HOLE이 검출된 영역에 국한된 차가운 전자 분포라는 관점에서 제시될 수 있다. 이 주장에 대한 설득력 있는 근거는 Brinton et al.(1978)이 보고한 대로 AE-C 위성에서 얻은 polar hole 과 전자 온도 데이터의 통계적 분석 결과에서 나온다. 그들은 post midnight quadrant 영역 ($MLT \sim 21-06$ 시에서) 관측된 polar hole들은 심전자 온도 ($T_e \sim 500-750K$)에 의해 동반된다는 것을 발견했다. 21-06MLT 영역에 있는 이 차가운 전자들은 조용한 지자기적 조건에서 전리권 가열원의 부족 때문일 수 있다. T_n 이 중성 분자 온도인 $T_e \approx T_n$ 을 가정하면, 중성 냉각에 의한 압력 ($-\nabla P$)이 분자를 차가운 중성 분자의 온도 영역으로 이동시켜서 T_n 이 감소함에 따라 중성 분자의 농도가 증가한다. 이 과정은 차가운 영역에서 β 의 증가로 이어지고, 그림 22과 같이 전자 밀도 감소가 β -형태의 과정에 의해 통제되기 때문에 지수적으로 감소가 일어난다. 따라서 시간 및 공간적 효과가 모두 작용하여 지수적으로 NmF2가 감소하고 polar hole이 발생한다. 우리는 polar hole 사건의 약 76%(45개 중 34개)가 polar hole 이전에 NmF2의 지수적인 감소세를 보여준다는 것에 주목한다. 플라즈마 대류 flux의 발산과 수렴은 고위도에서 전자밀도의 시간적 변화에도 중요하다. 우리는 이러한 플라즈마 대류가 polar hole의 형성에도 영향을 미칠 수 있다고 제안한다.

Polar hole 형성을 위한 발생 위치, 수평적인 규모의 크기, 지속 시간, 지자기 조건 등과 같은 polar hole의 유사한 특성이 우주와 지면에서의 관측을 이용하여 보고되었다(Benson & Grebowsky, 2001; Bjoland et al., 2021; Brinton et al., 1978; Crowley et al., 1993; Forsythe et al., 2021; Hoegy & Grebowsky, 1991; Jenner et al., 2020). 그러나 우리는 우리의 분석이 polar hole 형성 이전에 태양의 반대 방향 플라즈마 대류 속도와 exponential한 전자밀도 감소 사이의 관계를 처음으로 보고한 것이라고 믿는다. exponential한 밀도 감소는 극도로 조용한 지자기 조건에서 nightside MLT ($\sim 19-2.5$ 시간) 영역에서 발생했다. polar cap이 어두운 상태에 있으므로, 광전리가 없을 때 exponential한 밀도 감소는 재결합 붕괴와 관련이 있다. 이것은 우리에게 영구적인 어둠 속에서 극 전리권의 이온화 (즉, 플라즈마) 근원이 무엇인가라는 근본적인 질문으로 이어진다. 그러한 연구는 이 논문의 범위를 벗어난다. 앞으로, 우리는 극야 동안 어떻게 플라즈마가 극 전리권 위의 day side MLT 영역에 지속해서 공급되는지 연구할 예정이다.

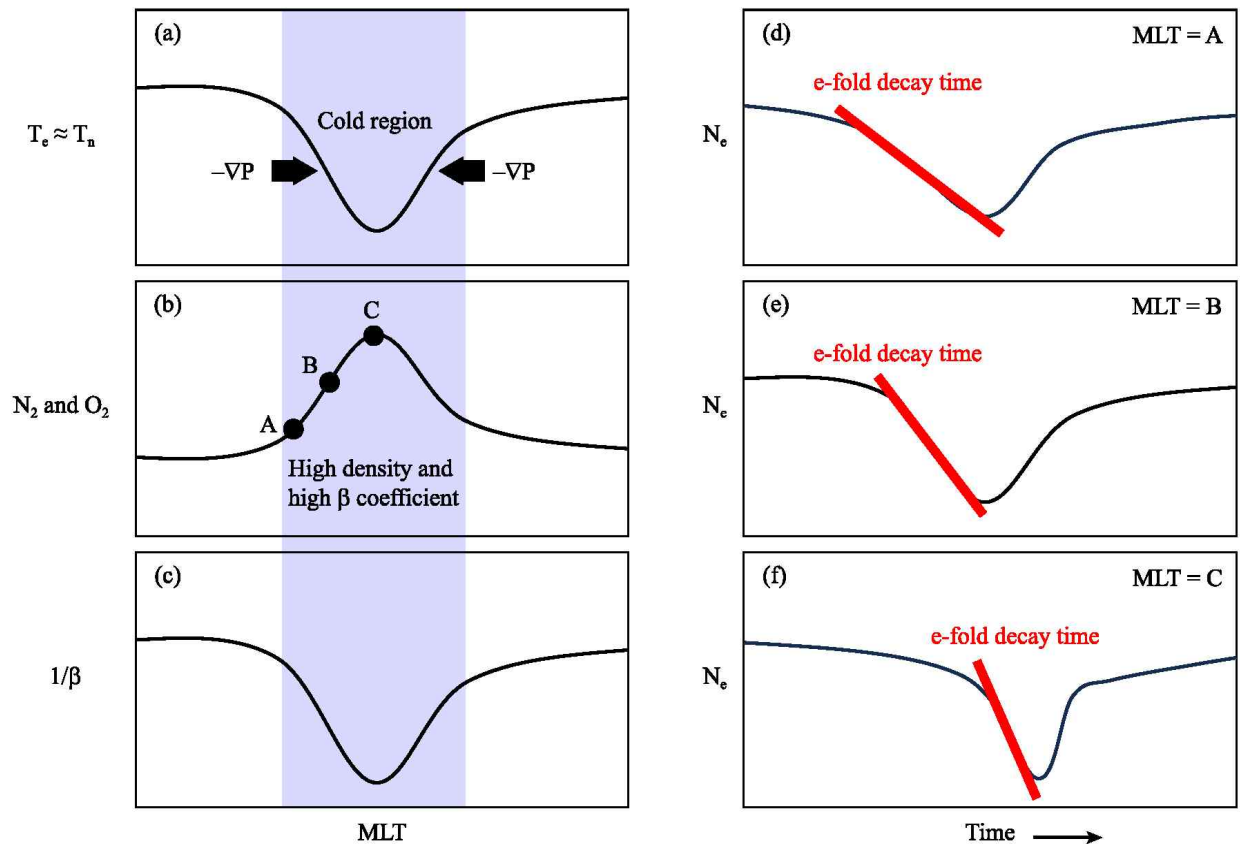


그림 22. 지수적인 NmF2의 감소 및 polar hole의 형성에 대한 가능한 시나리오. (a) 전자(T_e) 온도와 중성 분자(T_n)의 온도 (b) N_2 와 O_2 의 밀도 (c) $1/\beta$. (d) MLT=A에서의, (e)는 MLT=B에서의, (f)는 MLT = C에서의 N_e 밀도. 붉은 선은 e-fold 다른 MLT 영역에서의 붕괴 시간을 나타낸다.

8. 결론

고요한 지자기 조건 하에서 겨울 및 야간 F2-층 극지 전리권에서 관측된 polar hole과 전자밀도 감소를 연구했으며 통계 분석은 다음과 같은 결과를 나타냈다.

- 가) 대부분의 polar hole은 약 22에서 06 MLT 사이에 발생하며, 이는 이전의 polar hole 연구와 일치한다.
- 나) Polar hole의 지속 시간은 1에서 5.5 시간 사이이며, 1.5 시간에서 가장 많이 발생한다.
- 다) Polar hole이 시작되기 전에는 밤 사이 MLT (~19-2.5 시) 지역에서 지수적으로 전자 밀도가 감소했다.
- 라) F2-층 밀도의 e-fold decay time은 0.5 시간에서 4 시간 범위로 분포하며, 경도를 따라 낮에서 자정 방향으로 극지의 감소가 일어난다.
- 마) 수평 이온 풍속의 중앙값은 18 MLT에서 190 m/s에서 자정 근처에서 약 100 m/s로 감소한다.
- 바) 수평 이온 풍속이 감소함에 따라 전자밀도가 감소한다.

또한 가능성 있는 지수적인 NmF2 감소의 생성과 polar hole의 형성에 대한 시나리오에 대해

논의한다.

- 가) 중성 분자 냉각에 의한 압력 ($-\nabla P$)은 분자를 저온의 중성 분자에 해당하는 온도 영역으로 수평 이동 시킨다.
- 나) 중성 분자는 T_n 가 감소함에 따라 밀집도가 증가한다.
- 다) 분자의 밀집도 증가로 인해 차가운 영역에서는 β 계수가 증가한다.
- 라) 지수적인 NmF2 가 감소와 및 polar hole은 차가운 중성 분자의 영역에서 발생한다.

제3절 2019년 3월 16일 서브스톰 발생과 남극 전리권 변화

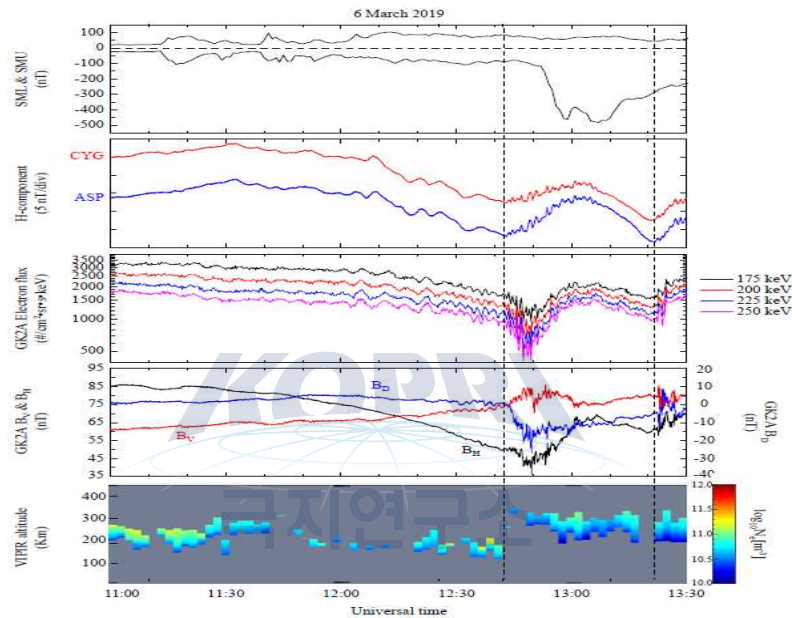


그림 23. 2019년 3월 6일 오로라 SML/SMU 지수, 청양(CYG)과 ASP(호주) 지상 자기장 측정기 자료, 천리안 2A 전자 플럭스/자기장 자료, 장보고 기지 VIPIR 자료.

그림 23은 2019년 3월 6일 서브스톰 이벤트가 발생했을 때 저위도 지상관측소 청양(CYG)과 앨리스 스프링(ASP, 호주)에서의 자기장 측정기 H-성분 자료, 정지궤도 위성 천리안 2A(GK-2A)에서 측정된 전자 플럭스와 자기장 자료, 장보고 기지에서 측정된 VIPIR 자료를 나타낸다. 12시 40분 근처에서 (수직 점선) 저위도 관측소 자기장 H 성분이 증가하였고 천리안 위성에서 전자 플럭스와 자기장 자료의 섭동이 확인된다. 이러한 현상은 서브스톰 발생과 관련이 있으며 강한 전류가 지구 자기권에서 고위도 전리권으로 흐르는 현상으로 설명된다. 13시 20분 근처에서도 유사한 현상이 발생하였다. 장보고 기지 VIPIR 자료를 보면 서브스톰 현상이 발생했을 때 전리권 F2층 높이가 갑자기 증가하는 현상(12시 40분)과 VIPIR의 에코가 일시적으로 사라지는 현상(13시 20분)이 관측되었다. 남북반구에 위치한 저위도 지상 자기장 자료의 H(남북방향 성분: 북쪽 섭동이 +값)/D(동서방향 성분: 동쪽 섭동이 +값)성분의 섭동방향을 이용하여 CYG 관측소와 ASP 관측소가 서브스톰 발생 시 서브스톰 전류계 중심으로부터 서쪽 방향 즉 연자기력선 전류가 지구에서 자기권으로 흐르는 자기력선에 가까이

위치하고 있음을 확인하였다 (그림 24 참조).

Ground observations

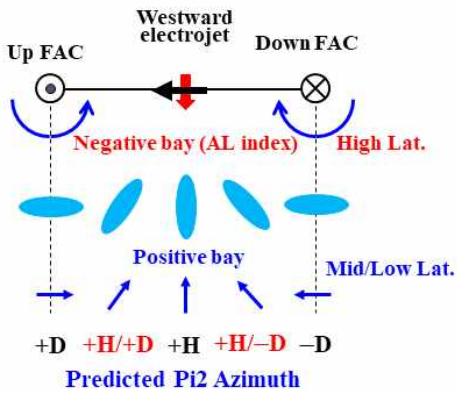


그림 24: 서브스톰 전류계와 지상 자기장 성분 변화

그림 23에서 11시 30분부터 12시 40분 사이 천리안-2A 위성은 준 주기적인 플럭스 변화를 관측하였고 이러한 현상들이 관측되었을 때 오로라 SML 지수는 약한 서브스톰이 준 주기적으로 발생 했음을 보인다. 이 기간에 VIPIR 자료는 밀도 감소에 의한 에코가 사라지는 현상이 관측된다. 극 전리권 F2층의 밀도와 높이 변화는 전리권 상공에 흐르는 전류(또는 전기장)의 세기와 관련이 있어 오로라 활동과 전리권 F2층의 특성 변화는 밀접한 상관관계가 있을 것으로 예상된다.

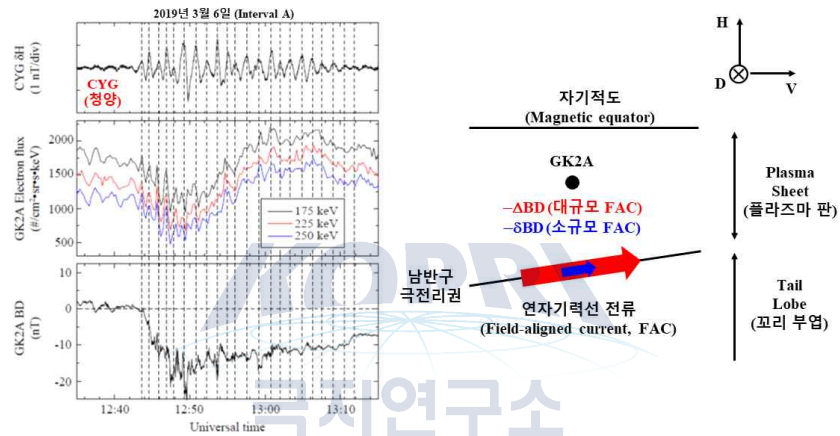


그림 25: CYG 자기장 섭동과 GK-2A 위성의 플럭스/자기장 섭동

그림 25는 서브스톰 발생 시간 부근을 확대하여 저위도 청양관측소와 GK-2A 정지궤도 위성 자기장/전자 플럭스 자료를 나타내었다. GK-2A의 자기장 자료로부터 서브스톰 발생에 의한 전리권에서 자기권으로 흐르는 연자기력선 전류의 위쪽에 GK-2A가 위치함을 예상할 수 있고 정지궤도에서의 전자 플럭스의 변화와 저위도 지상 자기장 자료의 상관관계를 확인하였다.

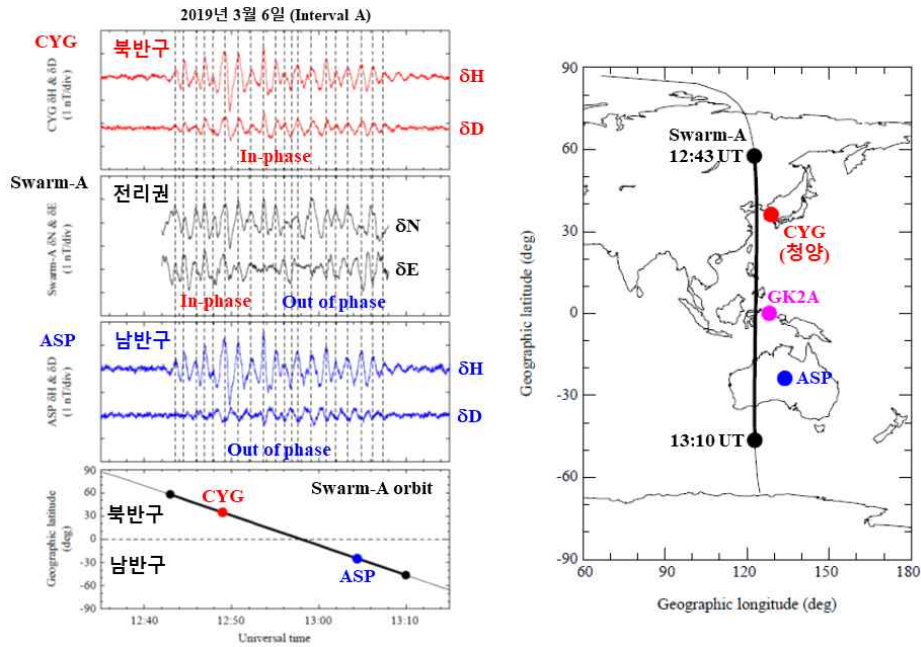


그림 26: 남/북반구 저위도 자기장 자료와 전리권 위성 Swarm 자기장 자료 비교

그림 26는 남/북반구 저위도 자기장 자료와 전리권 위성 Swarm 자기장 자료 비료를 나타낸다. 저위도 자기장 섭동은 전리권 자기장 섭동과 위상차 없이 같은 모습으로 진동하는 것을 확인하였다.

제4절 VIPIR/Dynasonde 자료 Ionogram 분류

1. NeXtYZ 역산 과정

JVD 관측에는 NeXtYZ 3차원 역산 절차가 적용되어, JBS 상공의 전자밀도 3차원 분포(수평 구배를 포함한 전자밀도 연직 프로파일과 이온 속도 포함)를 산출한다(Zabotin et al., 2006; Ham et al., 2020). NeXtYZ는 수치적 다중 광선추적 기법을 사용하여, 각 이오노그램에서 전리권 반사 에코 그룹의 지연과 입사각을 분석함으로써 3차원 전자밀도 분포를 계산한다. 이 절차는 전리권을 얇은 썰기(wedge) 형태의 플라스마 주파수 층들로 나누고, 모든 에코에 대해 관측된 전파 시간과 방향과 계산값 사이의 차이를 최소화하는 최소제곱 최적화 문제를 푸는 방식으로 수행된다. 역산은 프로파일의 하부에서 시작하여 일련의 플라스마 주파수 층들을 따라 진행된다. F-영역 정점 부근에서는, 해당 고도에서 또 하나의 플라스마 썰기를 쓰는 대신, 채프먼(Chapman) 모형을 가정하여 최적화 문제를 푼다(Zabotin et al., 2006).

processed automatically

Jang Bogo

DYNASONDE IONOGRAM

Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar JB57N

2018-04-10 (DoY 100) 00:08:32 UT

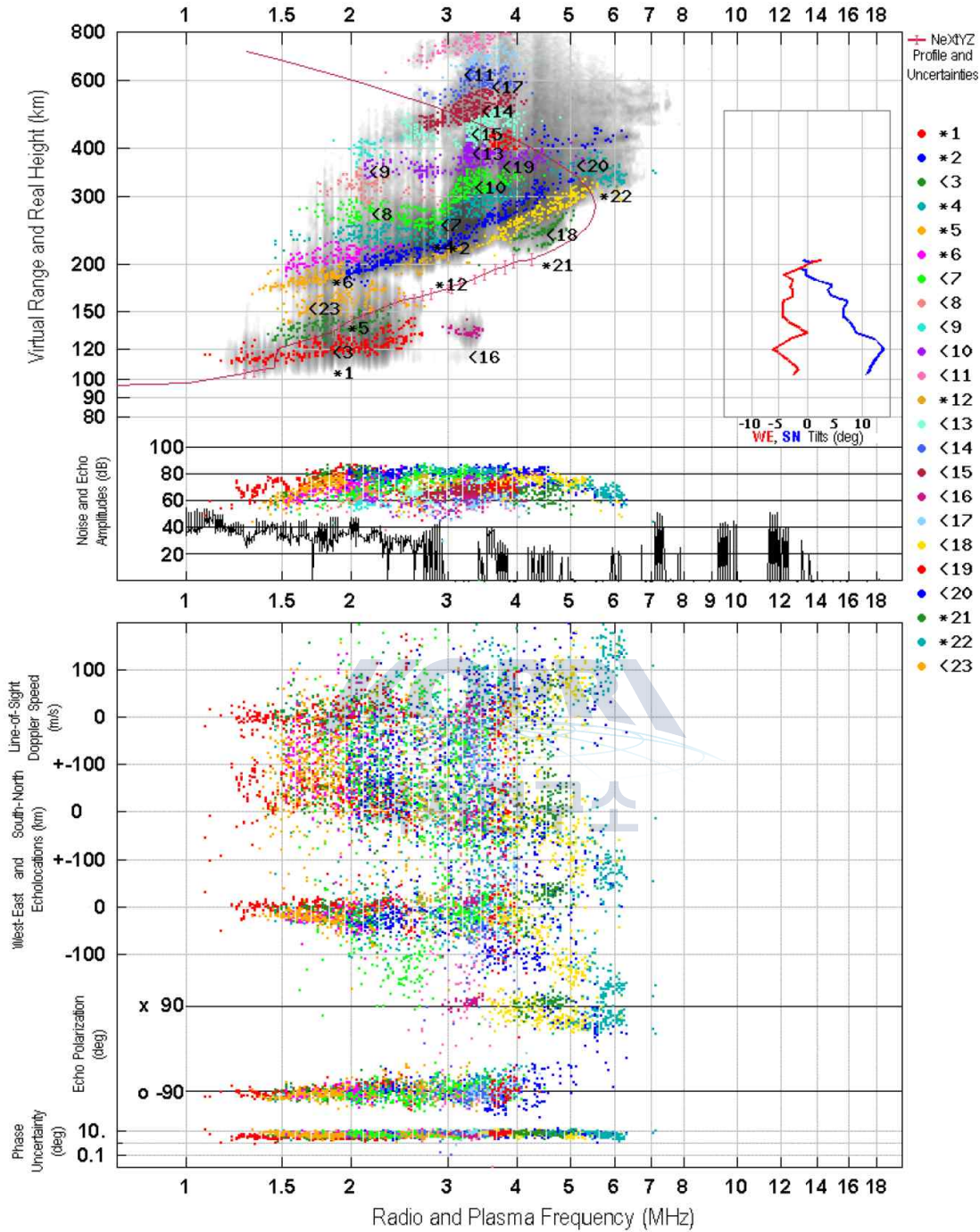


그림 27. JBS의 VIPIR/Dynasonde(JVD)가 산출한 전자밀도 프로파일, 이온 속도, 전리권 경사(tilt) 등 에코와 전리권 산출물의 구체 정보가 포함된 예시 이오노그램. 상단 패널의 x축과 y축은 각각 플라즈마/무선 주파수와 전리권의 가상/실제 고도를 나타낸다. 상단 패널의 회색 이미지는 신호대잡음비(SNR)를 의미하며, 무선 에코는 색 점으로 표시된다. 색상이 다른 번호 매겨진 점들의 집합은 트레이스(traces)를 나타낸다. 상단 패널 삽입 그림의 빨간색과 파란색 선은 각각 동 - 서 및 남 - 북 방향의 국지 반사 전리권 면의 경사각 프로파일을 보여준다.

그림 27은 JVD로부터 얻은 전형적인 이오노그램 이미지를 보여준다. 상단 패널은 전리권 에코의 범위와 하부 전리권 전자밀도 프로파일(오차 막대 포함)을 나타내며, 패널 하단에는 에코의 진폭(색상)과 잡음(회색)을 데시벨 단위로 표시한다. 시선 방향 도플러 속도, 수평 에코 위치, 편광, 위상 불확실도 등 에코에 관한 추가 정보는 하단 패널에 제시된다. 상단 패널의 x축과 y축은 각각 무선 및 플라스마 주파수, 그리고 전리권의 가상 고도와 실제 고도를 나타낸다. 그림의 회색 배경 이미지는 전통적인 진폭 기반(또는 SNR 기반) 이오노그램 표현이다. 색이 입혀진 점들은 Dynasonde 해석에서 전리권 매개변수를 추정하기 위해 활용되는 인지된 에코를 의미한다(Wright & Pitteway, 1999). SNR 이미지와 에코들은 상단 패널 y축의 가상 고도 좌표계로 표시된다. 유사한 물리적 매개변수(예: 전파 시간, 위상, 편광, 도달 방향, 진폭, 반사 고도)를 가진 에코들의 집합은 서로 다른 색과 번호로 표시된 에코 그룹 또는 트레이스(trace)를 이룬다. 역산 절차에는 별표가 붙은 번호의 일부 트레이스만이 선택됨에 유의해야 한다. 계산 부하를 합리적으로 유지하기 위해, 선택된 각 트레이스에는 최소 10개의 에코가 포함된다. 트레이스는 O-모드와 X-모드 편광을 모두 포함하며, 그룹에서 거리 잔차와 지상 반사 거리의 최소화를 번갈아 수행하는 최적화 절차를 거친다. 계산된 반사점이 현재 켄넬(wedge) 바깥에 놓이는 에코는 과정에서 제외된다. 이러한 선택은 전리권 매개변수의 보다 안정적이고 정확한 추정을 가능하게 한다. 그 결과 얻어진 하부 전리권의 전자밀도 프로파일은 실제고도 좌표계에서 오차 막대와 함께 적갈색 선으로 제시된다. 하부 전자밀도 프로파일의 오차 막대는 실제 고도에 대한 오차 추정치(NeXtYZ에 의해 산정됨)를 뜻한다. 오차 막대가 없는 상부 전리권 구간의 밀도 프로파일은 채프먼(Chapman) 모델을 데이터 기반으로 추정된다(Zabotin et al., 2006). 상단 패널의 오른쪽 구역에 그려진 빨간 선과 파란 선은 각각 동서(zonal) 및 남북(meridional) 방향의 국지 경사각(tilt angle)을 나타내며, 이는 다른 전통적 아이오노존데 관측이 가정하는 단순 평면 성층 전리권 대신, Dynasonde 해석이 켄넬 성층 전리권(WSI, Wedge-Stratified Ionosphere)을 가정하기 때문에 얻어지는 고유한 결과 중 하나이다.

자동적 Dynasonde 해석은 에코 검출에서 매우 유용하다. 가장 눈에 띄는 오류들은 상위 처리 단계, 즉 이후의 역산 절차를 위한 트레이스 선택 과정에서 발생한다. 또한 임계 주파수 계산이 실패하는 경우도 있다. 이 두 지점은 숙련된 운영자가 개입하면 자동 해석의 거의 모든 오류를 교정할 수 있는 부분이다. 에코 정보는 탐사 모드와 원래 해석에 필요한 모든 매개변수와 함께 데이터베이스에 보관되므로, 원시 데이터 파일을 호출하지 않고도 운영자 주도의 재처리가 가능하다. 현재 지역의 Dynasonde에서는 Expert Reprocessing 기능을 위한 매우 간결하고 직관적인 웹 인터페이스가 제공된다.

2. 분류

앞서 언급했듯이, Dynasonde 해석 절차는 때때로 적절한 밀도 프로파일을 생성하지 못하는데, 특히 극지에서의 자기장 교란기 동안 그러하며, 따라서 산출된 밀도 프로파일을 해당 이오노그램과 직접 비교해 해석 절차의 성능을 평가할 필요가 있다. 이를 위해 본 연구에서는 Dynasonde 출력물을 네 가지 범주로 분류하고자 한다. 그림 28은 본 연구에서 사용한 분류 절차의 단순화된 순서도를 제시한다. Dynasonde에서 자동 생성된 이오노그램은 그림 29에 제시된 순차적 분류 필터를 사용하여 네 가지 범주로 분류된다. 네 가지 유형은 각각 Unavailable(a), Sporadic E(b), Needs Reprocessing(c), Available(d)로 표기한다. 그림 29a - 29d는 이 네 유형의 이오노그램 예시를 보여준다. 그림 29a와 같은 이오노그램은 Dynasonde가 어떤 에코(이오노그램의 색있는 점)도 판정하지 못했을 때

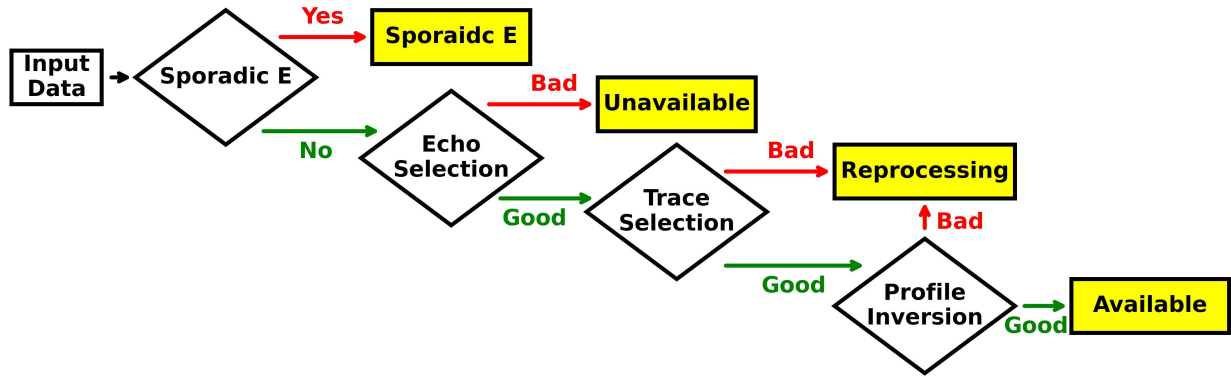


그림 28. 이오노그램 분류과정 순서도.

‘Unavailable’로 분류된다. 이후 필터는 그림 29b처럼 강한 스포라딕 E층이 나타나 차폐가 가능하여 전파가 F영역 전리권에 도달하지 못하게 하는 특징을 가진 이오노그램을 골라내어 ‘Sporadic E’로 분류한다. 다음으로, 생성된 밀도 프로파일을 이오노그램의 해당 에코 트레이스 군과 비교하여 트레이스 선택 및 프로파일 역산 절차를 평가한다. 그림 3c의 사례처럼, 해당 에코 트레이스와 비교했을 때 밀도 프로파일이 합리적으로 보이지 않으면, 역산 절차를 다시 수행할 필요가 있을 수 있으므로 ‘Needs Reprocessing’으로 분류한다. 에코 트레이스의 타당성 여부를 판단하기 위해, 분류 코드는 회색 SNR 이미지와 색상 에코가 차지하는 픽셀 수를 비교하고, 특정 고도에서 프로파일이 급격히 떨어지는지 확인하기 위해 프로파일의 기울기를 활용한다. 마지막으로, 그림 29d와 같은 나머지 모든 이오노그램은 ‘Available’로 분류되며, 이는 JBS 상공의 전리권 연구에 추가 수정을 하지 않아도 사용할 수 있음을 의미한다. 이 네 가지 유형은 표 3에 요약되어 있다.

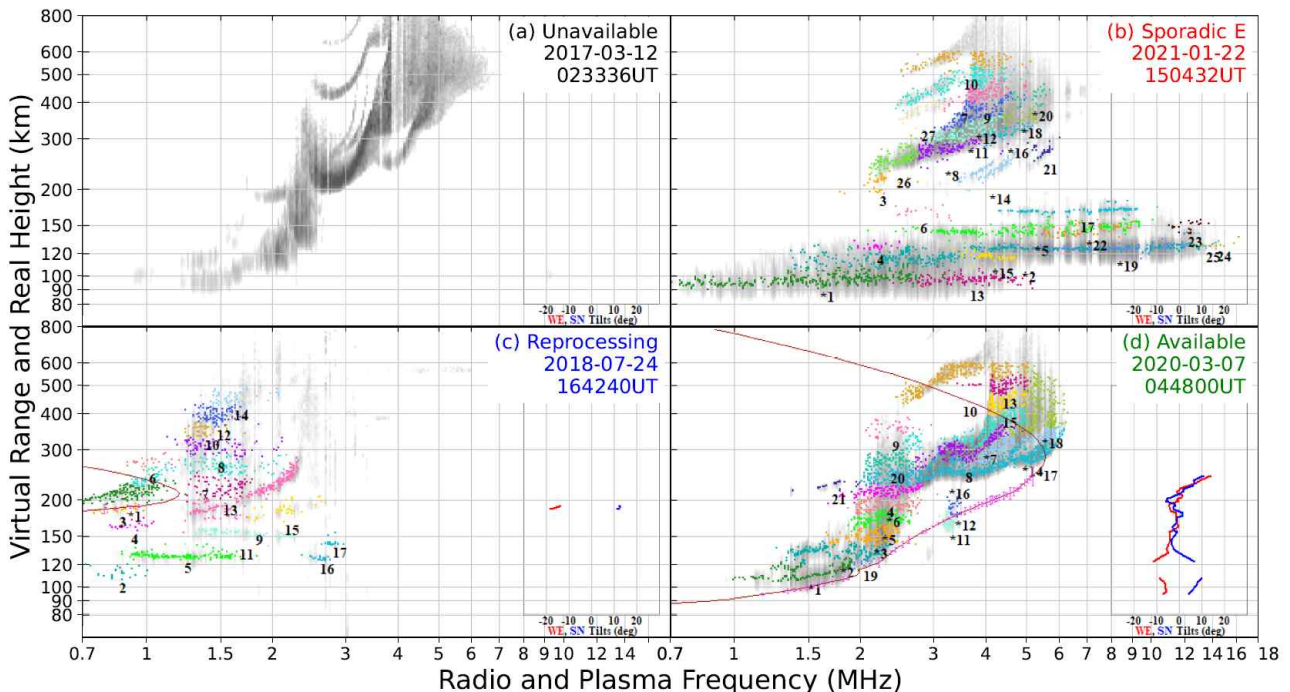


그림 29. 4가지 유형의 이오노그램 분류 예시

유형	설명
Unavailable	Dynasode 분석에서 어떠한 에코도 없을 때
Sporadic E	전리권 F층이 보다 낮은 고도에서 발생한 sporadic-E와 같은 구조로 인해 차폐되었을 때
Needs Reprocessing	트레이스 선택이 적절히 이루어지지 않았을 때
Available	전리권 전자 밀도가 제대로 산출되었을 때.

표 3. Dynasode 분석값의 4가지 분류유형

‘Available’ 유형은 에코로부터 도출된 전자밀도 프로파일의 신뢰도가 충분히 높아, 스포라딕 E와 유사한 구조를 포함하거나 에코를 제대로 반영하지 못하는 불합리한 프로파일을 보이는 이오노그램과는 다르게 전리권 F층의 통계 연구에 적합하다. 이오노그램의 데이터세트에는 전리권 F층 확산(spread F), 극히 낮은 플라즈마 밀도, 오로라 활동과 같은 전리권 현상들이 포함되는데, 이는 F층 최대 플라즈마 주파수(FMFX)와 그에 대응하는 고도(HMFX)와 같은 핵심 매개변수의 값이 매우 높거나 낮게 나타나는 형태로 전자밀도 프로파일에 반영되기 때문이다. 예를 들어, 주파수 확산 F(FSF)는 비정상적으로 높은 FMFX 값을 나타낸다. FSF의 에코는 전리권 F층에서 주파수 방향으로 퍼지는데, 이는 전리권 불규칙성에 의한 산란이 원인이다(Kintner et al., 2007). 반대로, 거리 확산 F(RSF)는 비정상적으로 높은 HMFX 값을 제공한다. 이 경우에는, 불규칙한 전리권 구조로 인해 형성된 다중 층에서의 반사 때문에 에코가 고도 축 방향으로 퍼진다(Afolayan et al., 2019; Wang et al., 2019). 따라서 ‘Available’ 데이터세트에서 FMFX 또는 HMFX가 비정상적으로 높거나 낮게 나타나는 값들은 오류로 간주되지 않고, 실제 전리권 사건의 지표로 간주된다. 즉, Available로 분류된 이오노그램들 가운데에서도 극단적인 FMFX 또는 HMFX 값의 존재는 실제 전리권 사건의 발생을 시사할 수 있다. 이러한 경우, 사건의 성격을 보다 정확히 해석하기 위해서는 GPS 섭동(scintillation) 강도나 오로라 전류제트(AE) 지수와 같은 추가 매개변수가 필요할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 극지방의 복잡한 전리권 구조와 변동성으로 인해 발생하는 사건들을 명시적으로 세세하게 분류하지 않았으며, 이러한 분류 작업은 연구 범위를 넘어서는 것으로 향후 과제로 남긴다.

위에서 설명한 분류 절차는 파이썬 기반의 자동 분류 코드로 수행되었으며, 이 코드는 Python Imaging Library(PIL)를 사용해 이오노그램 이미지의 각 픽셀에 대한 RGB 값을 얻어, 마치 사람의 눈으로 판독하듯 작동한다. 예를 들어 스포라딕 E를 분류하기 위해, URSI의 *ionogram interpretation and reduction* 핸드북(Piggott & Rawer, 1978)을 따르되, 플라즈마 밀도의 연직 기울기뿐 아니라 고밀도 플라즈마 에코의 존재를 함께 고려하여 전리권 E층의 고도 범위를 대략 95 km에서 150 km로 설정하였다.

3. 결과 및 토의

본 연구에 사용한 분류 코드의 신뢰도를 검증하기 위해 무작위 표본추출을 수행하였다. 표본 크기는 Krejcie & Morgan 공식(Krejcie & Morgan, 1970)에 따라 산정하였다:

$$n \geq \frac{\chi^2 * N * p * (1 - p)}{e^2 * (N - 1) + \chi^2 * p * (1 - p)}$$

여기서 $\chi^2(=3.84)$ 는 자유도 1, 신뢰수준 95%에서의 χ^2 분포 표 값이고, $p(=0.5)$ 는 모집단 비율, $e(=0.05)$ 는 허용 오차를 의미한다. 이오노그램 자료를 겨울철만 선별하여 5년간 수집한 데이터에 근거해, 모집단 크기 N 과 필요한 표본 크기 n 은 각각 305,004와 1,469였다. 표본 크기의 최대화를 위해 모집단 비율 $p=0.5$ 를 사용하였다. 표본 자료는 특정 계절과 지방시(local time)에 대해 무작위로 선정되었으며, 산출된 전자밀도 프로파일을 해당 이오노그램 영상과 수작업으로 대조하여 평가하였다. 표 4는 2017 - 2021년 관측 기간 동안 계절별 잘못 분류된 데이터의 비율을 보여준다. 이 표에 따르면 오분류 비율은 3% 미만이었고, 오직 남반구 겨울(즉, 극야 기간)에만 다소 높게 나타났는데, 이는 겨울철에 극지 전리권이 더 교란되는 경향이 있음을 시사한다.

계절	봄	여름	가을	겨울
오분류 비율	1.67 %	1.84 %	1.70 %	2.31 %

표 4. 2017년부터 2021년까지 각 계절별 오분류된 비율 결과

시간에 따른 오분류 비율의 변화는 그림 30에 제시되어 있다. JBS의 지방시는 UT+11시간이며, 자기 지방시는 JBS 위치에서 AACGM으로 계산했을 때 추가로 4.7시간 더 이동한다. 그림 상단에는 자기 자정과 자기 정오가 각각 실선 원과 공백 원으로 표시되어 있다. 오분류 비율은 대략 1.5 - 3.0%로 추정되며, 약 15 UT(즉, 02 LT 또는 07 MLT) 부근에서 최대를 보인다. 이 비율은 자기 저녁에서 자정 구간보다 자기 오전 구간에서 훨씬 더 크다. 오로라 발생 시 전리권 전자밀도 프로파일이 심하게 교란된다고 가정하면, 오전 구간에서의 오분류 비율 증가는 JBS 상공에서 자기 오전 구간에 오로라 발생이 많다는 사실과 관련이 있는 것으로 보인다(Jee et al., 2021).

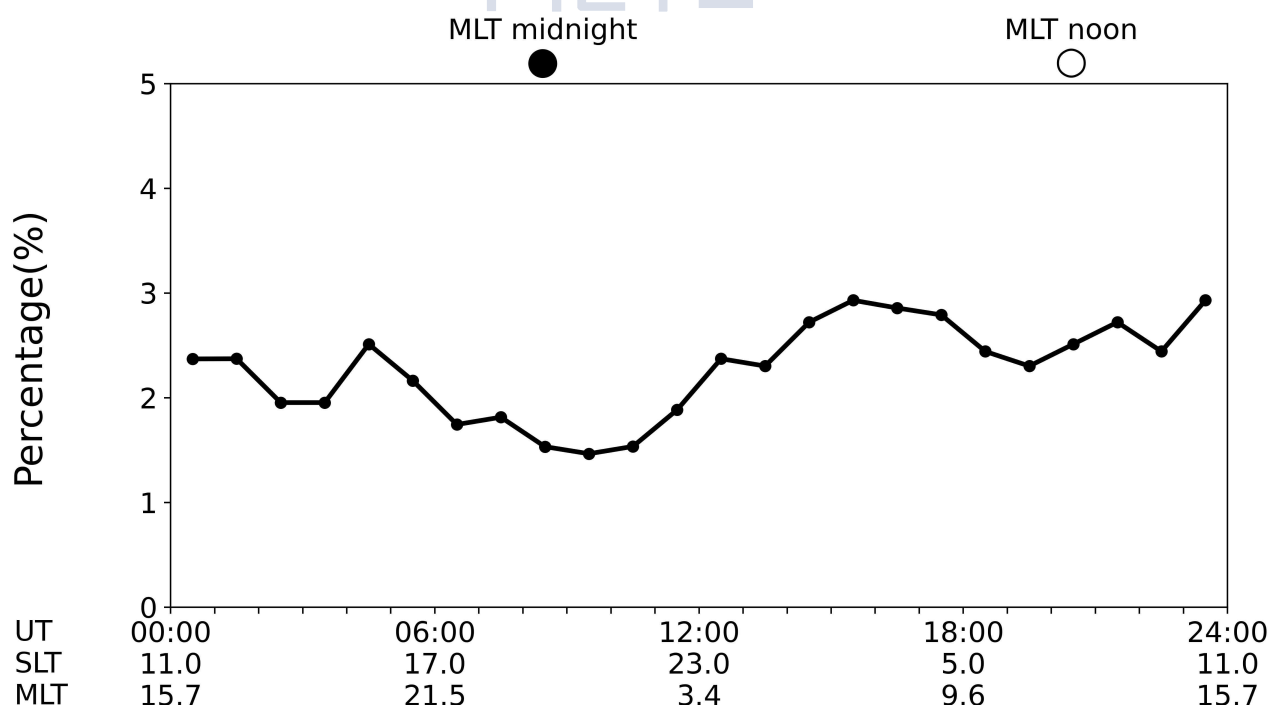


그림 30. 표준시(UT), 태양 지방시(SLT), 자기 지방시(MLT)에 따른 오분류 비율의 시간 변화. 패널 상단에는 자기 자정과 자기 정오가 표시.

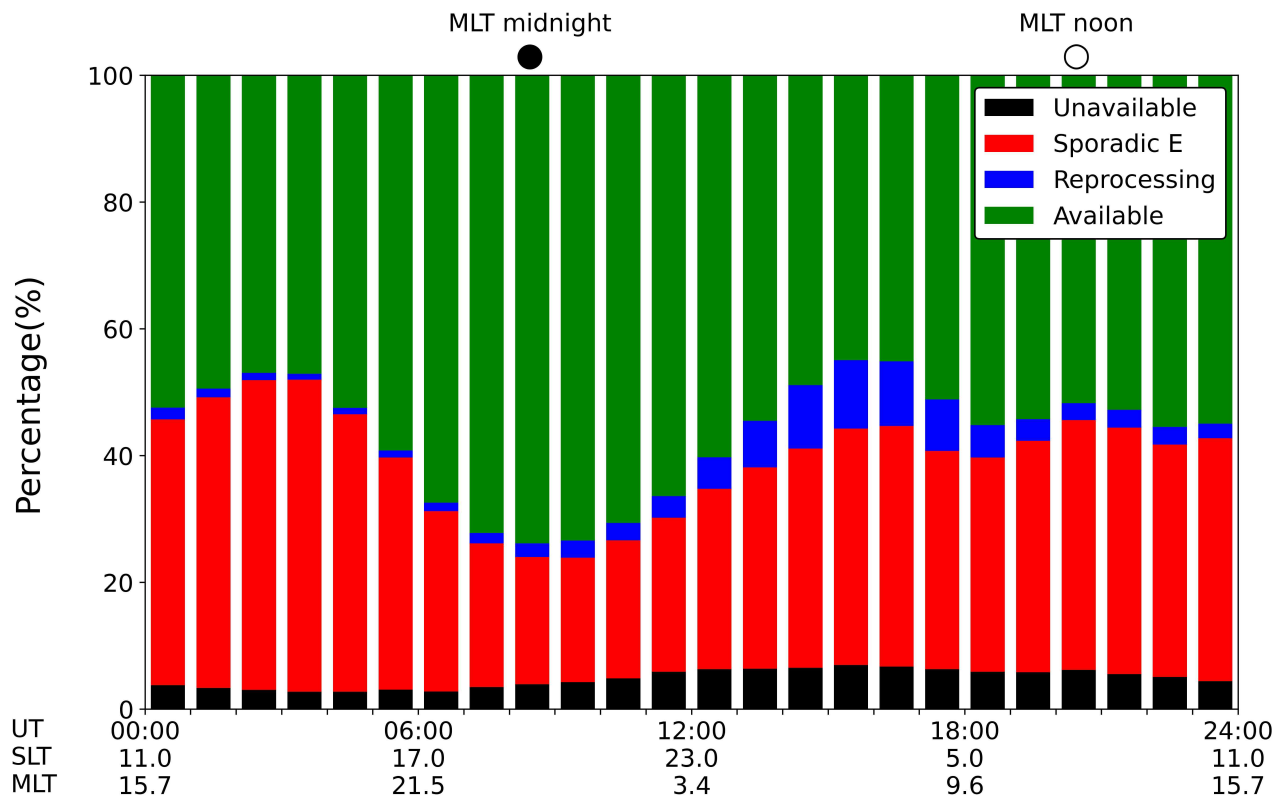


그림 31. 2017 - 2021년 전체 관측 기간의 데이터를 바탕으로, 표준시(UT), 태양 지방시(SLT), 자기 지방시(MLT)에 따른 네 가지 유형(서로 다른 색)의 백분율 비율의 시간 변화. 패널 상단에는 자기 자정과 자기 정오가 표시되어 있다.

그림 31는 2017 - 2021년 전체 관측 기간 동안, 그림 29에 제시된 네 가지 유형의 이오노그램에 대한 분류 결과를 시간 변화 형태로 보여준다. 검은색, 빨간색, 파란색, 초록색은 각각 ‘Unavailable’, ‘Sporadic E’, ‘Needs Reprocessing’, ‘Available’ 유형을 나타낸다. 패널 상단의 실선 원과 공백 원은 각각 자기 자정과 자기 정오를 뜻한다. 발생 비율은 자기 지방시에 뚜렷하게 의존하는 양상을 보인다. ‘Unavailable’ 유형은 자기 오전 구간에서 더 자주 나타나는 경향이 있다. 이 결과는 JBS의 전천 오로라 카메라(ASC)로 관측된 가장 빈번한 오로라 발생과 관련이 있을 수 있다(Jee et al., 2021). 다시 말해, 오로라 입자들이 전리권 전자밀도를 교란하여 해당 지역의 전리권 사운드 레이다 관측에 영향을 줄 수 있다.

‘Sporadic E’의 발생은 초기 자기 저녁 무렵에 최대 거의 50%까지 상당히 높았으며, 자기 자정 부근에서는 최소치(약 20%)로 감소했다. 평균 발생률은 약 35 - 40%였다. 이 결과는 극지 F영역 전리권을 관측하는 데 있어, 하층 대기의 스포라딕 E 유사 구조가 주요한 장애 요인임을 시사한다. 극지에서의 오로라 입자 침강이 E영역 전리권에서 이온화를 증가시키는 주요 원천 중 하나라는 것은 잘 알려져 있다(Kirkwood & Nilsson, 2000). 그림 31에 제시된 ‘Sporadic E’의 발생 비율은 JBS의 위치적 특성과 연관 지어 극지에서의 스포라딕 E 연구에 중요한 정보를 제공할 수 있다. ‘Needs Reprocessing’ 유형 역시 자기 오전 구간에서 증가하는 경향을 보이는데, 이는 ‘Unavailable’ 유형과 마찬가지로 SNR 측정을 방해할 만큼 강한 오로라 교란과 관련이 있음을 시사한다. 마지막으로, ‘Available’ 유형의 발생은 자기 자정 부근에서 최대가 되지만 주간측에서는 감소하며, 이는 ‘Sporadic E’의 발생과 밀접하게 연관된 것으로 보인다. 한편, 고위도에서 스포라딕 E가 형성되는 지배적 메커니즘을 규명하는 일은 본 연구의 범위를 벗어나며, 향후 과제로 남긴다.

4. 요약 및 결론

우리는 남극 JBS에서 VIPIR/Dynasonde 전리권 레이더로 획득한 이오노그램에 대해, Dynasonde 웹 인터페이스의 Expert Reprocessing 기능 (<http://surf.colorado.edu/login.dcc>)처럼 특별한 처리가 필요한 자율형 Dynasonde 해석 산출물을 식별하기 위한 자동 분류 코드를 개발하였다. 이 코드는 이오노그램을 네 가지 유형으로 분류하며 오분류율은 약 2%에 불과하다. 그 결과, 전체 자료의 약 55%는 어떠한 수정 없이도 F영역 전리권의 연구에 사용할 수 있고, 약 35%는 F영역 전리권으로 전파가 진행되는 것을 차단하는 스포라딕 E 유사 구조를 보였으며, 약 5%는 전리권 매개변수를 추출하는 데 사용할 수 없고, 약 5%는 Expert Reprocessing 기능을 이용한 재해석 절차의 개시가 필요한 것으로 나타났다. 각 유형의 지방시 변화와 관련해서는, 사용 가능한(Available) 자료가 스포라딕 E 유사 구조와 밀접히 연관되어 있으며, Unavailable 및 Reprocessing 필요 유형은 JBS 상공의 오로라 입자 침강과 관련된 것으로 보인다.

제5절 남극 장보고 기지에서 관측된 polar hole과 중성대기 상호 관계 연구

1. SWARM 위성 자료 이용

1차년도 연구에서는 polar hole의 발생 메커니즘으로, 중성 대기의 냉각으로 인한 압력 변화 ($-\nabla P$)가 분자를 차가운 중성 분자의 온도 영역으로 이동시키고, 그 결과 중성 분자의 농도가 증가함과 동시에, 이온과 중성 대기의 재결합 및 전자와 이온 간의 재결합이 활발해지면서 전자밀도가 지속적으로 감소하는 과정을 제시하였다. 지구 자기권-남극 전리권 상호 작용 연구를 위해 3차년도에는 앞서 제시한 시나리오를 실제 관측 자료를 통해 검증하고자 한다. 중성 대기 밀도 및 온도 변화를 파악하기 위해서 남극 장보고 기지의 고층대기 관측장비인 FPI(Fabry-Perot Interferometer)와 Swarm 위성 자료를 활용하고, 전자밀도 변화는 장보고 기지에 설치된 VIPIR로 산출한 값을 이용한다. 또한 전리권 전체의 전자 수의 변화를 보기 위해 GPS 수신기를 통해 산출한 TEC(Total Electron Content) 값과 GNSS(Global Navigation Satellite System)을 통해 산출한 TEC 값을 이용한다.

Polar hole 발생 시나리오 검증에는 전자밀도와 중성 대기 밀도 변화가 핵심 요소로, Swarm 위성은 전리권 F층 고도에서 운용되며, 가속도계를 통해 얻은 데이터를 바탕으로 중성 대기 밀도 변화를 산출할 수 있다. 또한, 전자밀도와 전자 온도도 직접 측정할 수 있어, 본 연구에 중요한 자료를 제공할 것으로 기대된다. 중성 대기 온도는 FPI를 통해 얻을 수 있으며, 이는 실제로 차가운 중성 분자 영역으로의 온도 이동이 발생했는지를 확인하는 데 활용된다. 아울러, Swarm 위성을 통해 얻은 플라스마 온도 변화 자료는 polar hole 발생 시 주변 지역의 온도 분포를 분석할 수 있게 해주며, polar hole이 발생하는 조건과 메커니즘을 보다 정밀하게 이해하는 데 기여할 것으로 기대된다. VIPIR는 장보고기지 상공의 전리권 밀도의 변화를 분석할 수 있게 해준다.

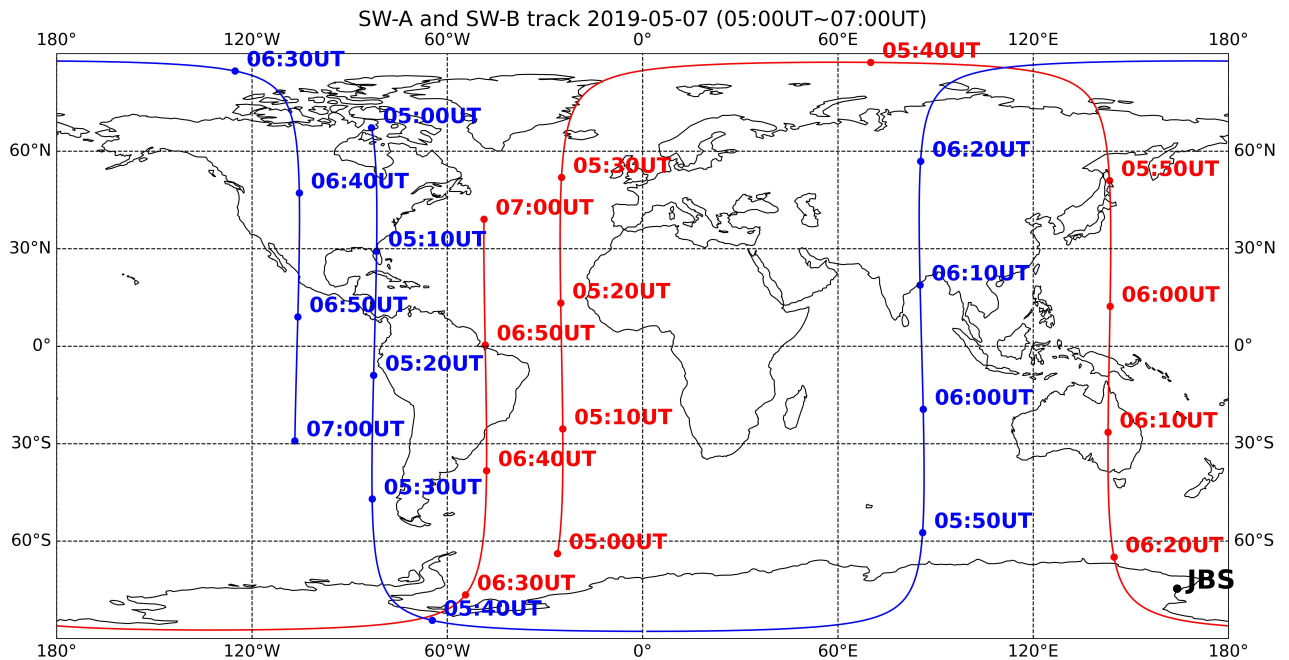


그림 32: 지구 중심 좌표계로 나타낸 2019년 5월 17일 5:00 UT부터 7:00 UT까지 Swarm A 위성, Swarm B 위성과 장보고 기지 위치. Swarm C 위성은 Swarm A위성의 궤도와 거의 일치함.

Swarm 위성은 특정 고도에서 데이터를 수집하는 반면, VIPIR로 얻는 NmF2 값은 전리권에서 가장 높은 전자밀도를 나타내는 F층의 고도에서 얻어진다. 이에 반해, 수신기에서 위성까지 측정되는 TEC(Total Electron Content) 값은 전리권 전체를 통과하는 신호를 기반으로 하므로, F층에 국한되지 않고 전리권 전체의 전자밀도 정보를 포함한다. 그림 33는 GNSS(Global Navigation Satellite System) 수신기의 개념도를 보여주며, GPS뿐만 아니라 GLONASS, Galileo 등 다양한 위성 시스템을 이용함으로써, GPS 단독 시스템보다 더 넓은 범위에서 TEC 값을 측정할 수 있음을 의미한다. 이에 따라, TEC 측정의 표본 수를 증가시키기 위해 장보고 기지에 설치된 GPS 수신기로부터 얻은 TEC 값과 GNSS 기반 TEC 값을 함께 활용함으로써, 전리권 전자 수의 시·공간적 변화를 보다 정밀하게 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

World Map with Latitude and Longitude

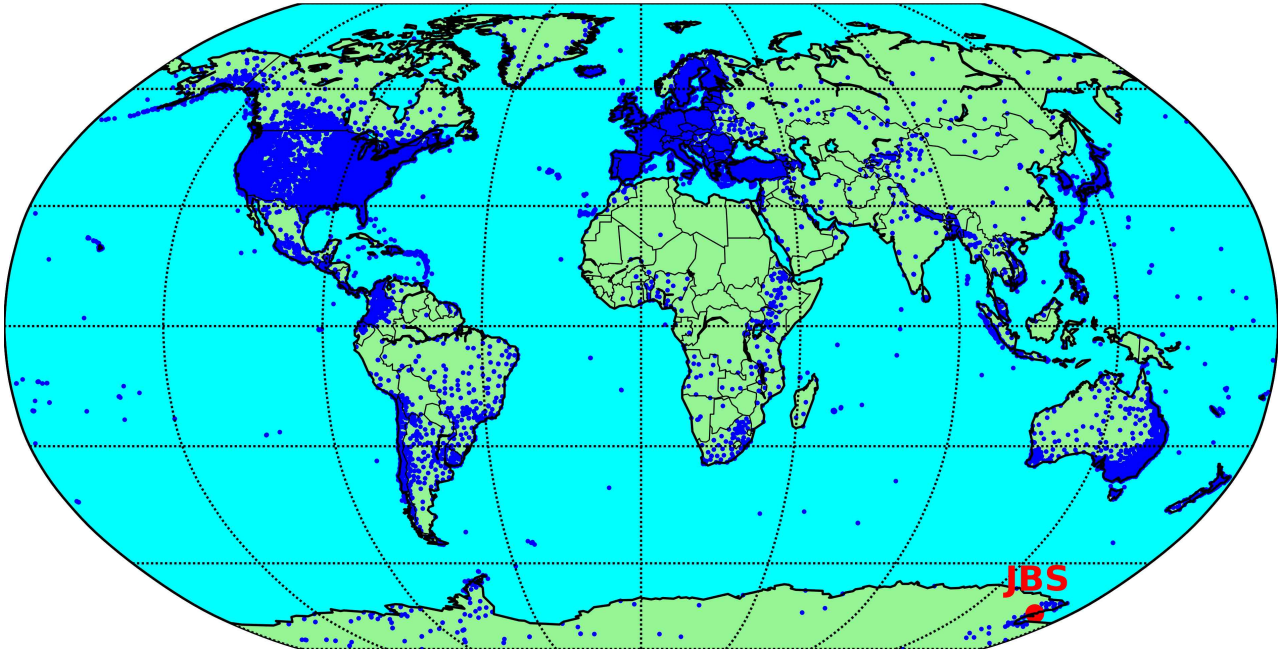
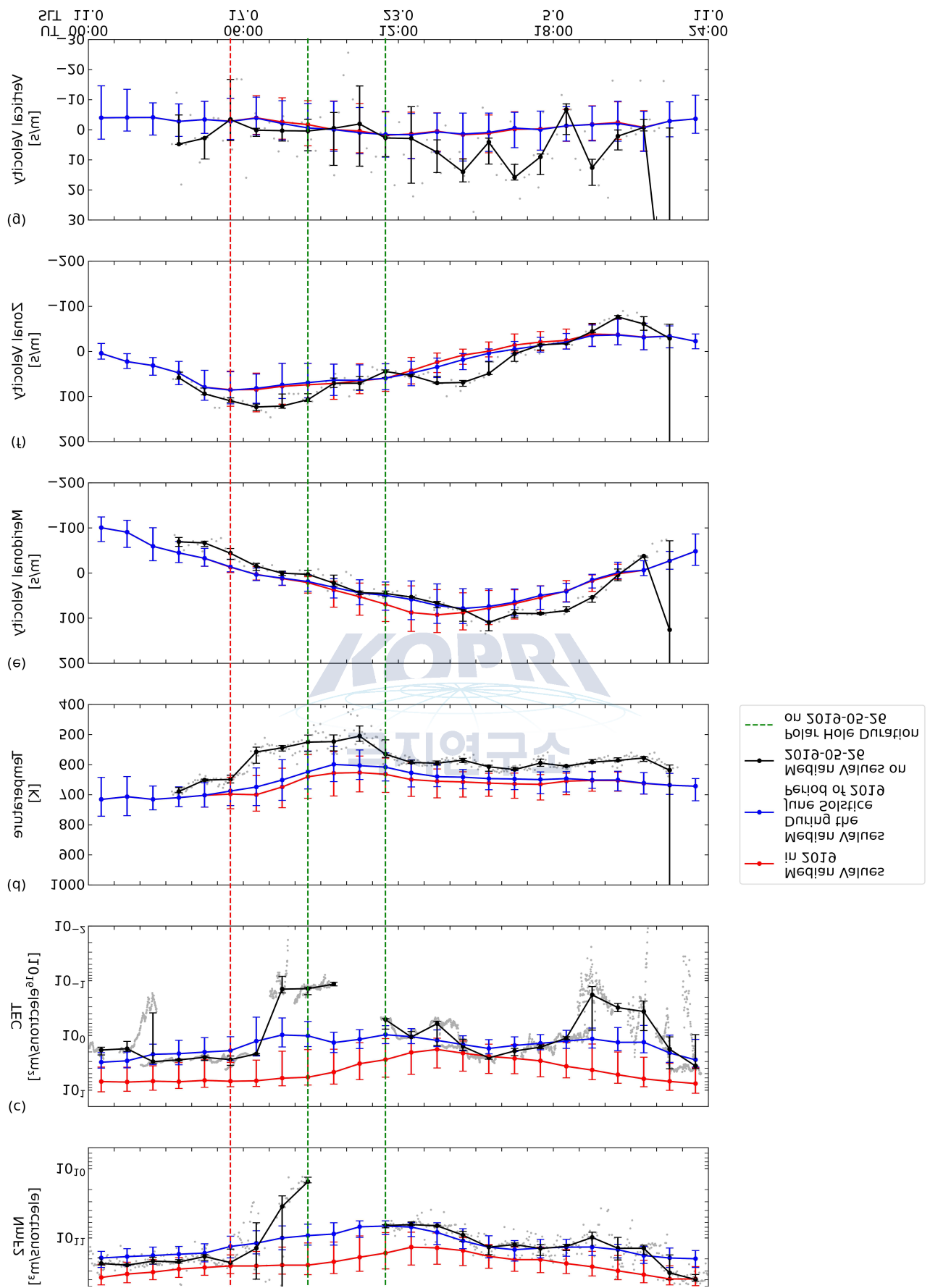


그림 33: GNSS 수신기의 위치 지도. 수신기의 위치는 파란색 점으로 표시되었으며, 장보고 기지의 위치는 붉은색 점으로 표시.

2. 전리권 전자밀도와 TEC 및 중성대기의 변화

그림 34는 2019년 5월 26일 장보고 기지 상공에서 polar hole 이벤트가 발생했을 때, 장보고 기지에 설치된 각종 장비들로 얻은 데이터를 이용하여 그린 그림으로, 순서대로 그림 34a, 34b는 전리권 전자밀도 측정 장비인 VIPIR로 얻은 전자밀도(NmF2) 값, 그림 34c는 장보고 기지에 설치된 GPS 수신기로 얻은 총 전자량(TEC) 값들, 그리고 그림 34d, 34e, 34f, 34g는 FPI로 얻은 중성 대기 온도 값과 속도들을 나타낸다. 붉은색 점선으로 표시된 수직선은 전자밀도가 감소하기 시작하는 시간을 의미하며, 녹색 점선으로 표시된 수직선은 해당 날짜에 발생한 polar hole 기간을 의미한다. 각 그래프 안에 있는 검은색 실선은 데이터들의 1시간 간격의 중간값이고, 붉은색 실선은 당해 년도 동안의 중간값, 파란색 실선은 당해연도 여름에 해당하는 시기의 중간값을 의미한다. 각각의 errorbar는 사분위수의 범위를 나타낸다.

그림 34b와 34c를 통해 polar hole 현상에서 발생하는 전자밀도의 감소가 플라즈마가 외권이 나 전리권 E층으로 단순히 확산된 결과가 아니라, 전리권 F층 내부에서의 전자 손실 메커니즘에 의해 발생했을 가능성을 시사함으로써 이전 연구에서 제시한 시나리오를 뒷받침 할 수 있다. 그림 34b와 34d의 비교를 통해 polar hole이 발생하기 전에 전자밀도가 지수함수 적으로 감소할 때, 중성 대기의 온도가 감소하는 현상을 볼 수 있었고, 이는 2019년에 발생한 45개의 polar hole event 중에서 FPI 자료를 확인할 수 있는 날짜에서 모두 동일하게 확인할 수 있었다. 또한, 6월 30일을 제외하면 중성 대기 온도는 polar hole 이벤트 동안 최저점을 기록하였으며, polar hole이 발생했을때는 같은 연도의 계절이 여름일 때 보다 더 낮은 중성대기 온도가 관측되었음을 확인할 수 있다. 이를 통해 polar hole이 발생하기 전에 중성 대기의 온도가 낮아지면서, 주변에 있던 중성 분자들은 압력 ($-\nabla P$)의 영향을 받아 차가운 중성 분자의 온도 영역으로 이동할 수 있음을 관측 사실을 통해 알 수 있다.



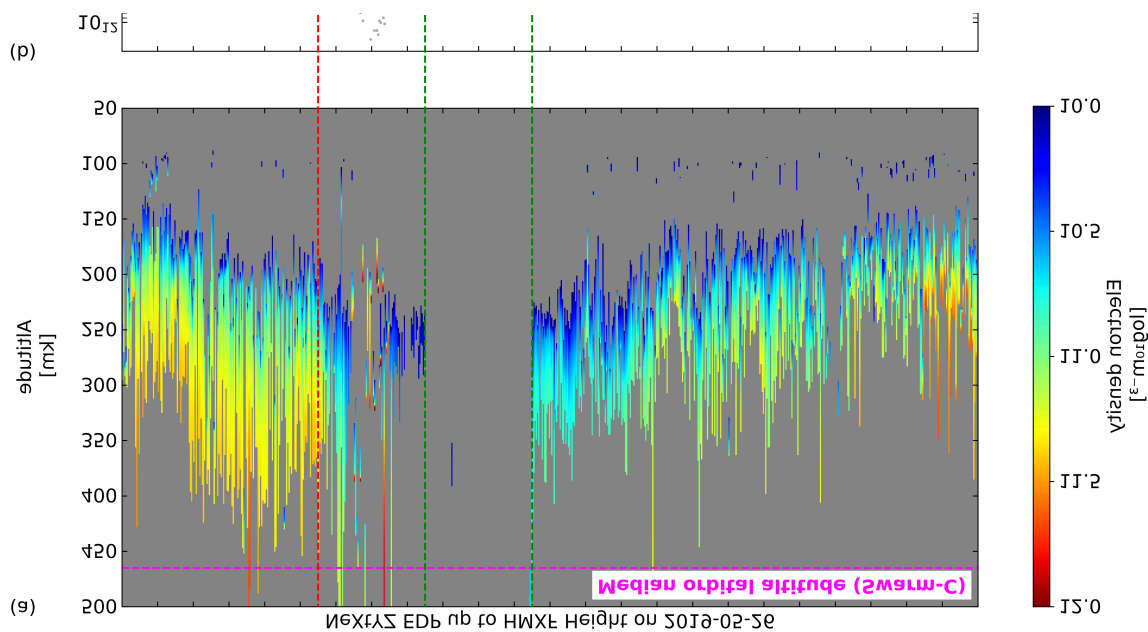


그림 34: 2019년 5월 26일 장보고 기지 VIPIR 전자밀도(NmF2) 자료, GPS TEC 자료와 FPI 중성 대기 자료. 붉은 점선은 전자밀도가 감소하기 시작한 시간, 초록 점선은 Polar hole이 발생한 시간대 간격을 의미. 검은색 실선은 1시간 동안의 중간값, 붉은색 실선은 당해연도의 중간값, 파란색 실선은 당해연도 여름에 해당하는 시기의 중간값을 의미. 각각 색상의 errorbar는 사분위수의 범위를 의미.

그러나, 그림 34e, 34f, 34g를 통해 중성풍 바람속도의 변화는 polar hole이 발생하기 전과 polar hole이 발생하는 동안과 그리 큰 차이가 없다. 이 결과는 지리위도와 지리경도상으로 부는 바람의 방향은 polar hole 현상에 그리 큰 영향을 주지 못함을 시사한다.

3. 전리권 전자밀도와 Swarm 위성 및 GNSS TEC 값 비교

그림 35는 2019년 5월 26일 장보고 기지에 설치된 전리권 전자밀도 측정 장비인 VIPIR와 중성대기 측정 장비 FPI로 얻은 데이터와 Swarm C 위성 및 GNSS TEC 값을 이용하여 그린 그림으로, 위성 data를 이용할 때는 지자기위도 $-80^{\circ} \sim -75^{\circ}$ 범위의 자료만을 이용하였다. 그림 35a, 35b, 35c는 Swarm C 위성의 자료, 35d에는 GNSS TEC 자료가 사용되었다. 초록 점선은 Polar hole이 발생한 시간대 간격, 검은색 실선은 장보고 기지에서 관측한 자료의 자기지방시 기준으로 1시간 동안의 중간값, 붉은색 실선은 위성으로 얻은 자료의 자기지방시 기준으로 1시간 동안의 중간값, 파란색 실선은 당해연도 해당하는 시기의 위성 자료의 중간값, 진한 노란색 실선은 당해연도 여름에 해당하는 시기의 위성 자료의 중간값을 의미한다. 위성 자료에서도 비슷한 지자기 위도에서 전자밀도와 TEC가 감소하고 전자 온도는 증가하는 현상 볼 수 있다. 이는 2019년 동안 일어난 polar hole event 현상에 대해 6월 12일을 제외하고서는 대부분 발생하는 현상이지만, 중성대기 밀도는 이와 크게 관련이 없어 보이는 통계적인 결과를 얻을 수 있었다. 장보고기지에서 측정된 전자밀도의 고도는 250에서 300 km 이고, FPI로 얻는 중성 대기는 고도 250 km의 온도다. 하지만, Swarm-C 위성의 공전 궤도는 약 460 km로 중성 대기의 밀도가 250 km 정도 고도의 중성 대기와는 독립적인 환경을 지니기에 실제로 중성대기 밀도가 증가하는 자료가 통계적으로 나오지 않았을 것이다. 따라서, 연구에서 제시한 시나리오를 확인하기위해 중성대기 밀도가 어떻게 변하였는지는 위성 자료로는 확인할 수 없기 때문에, 새로운 방법을 찾아야 하는 바이다.

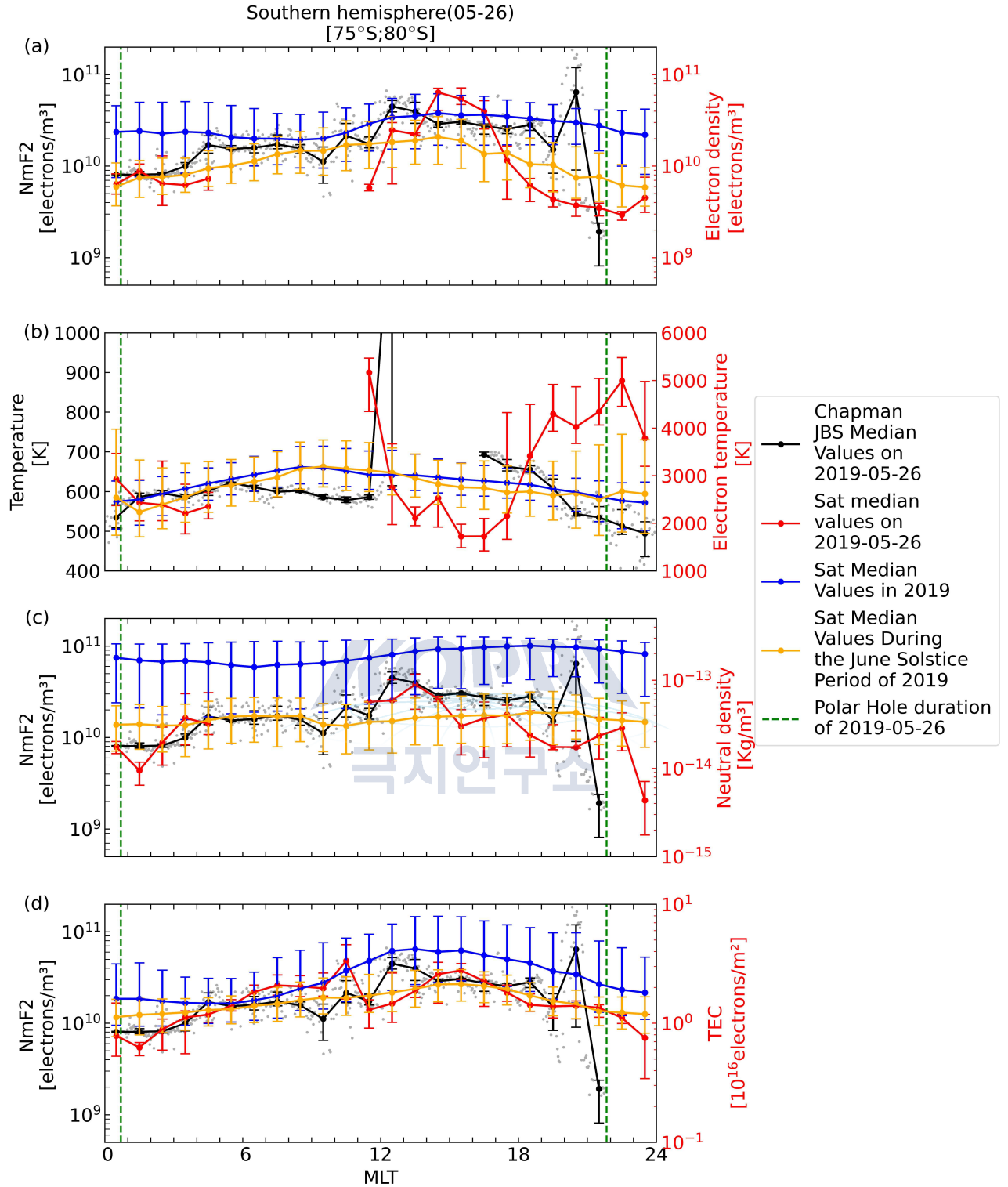


그림 35: 2019년 5월 26일 장보고 기지 VIPIR 전자밀도(NmF2) 자료, 장보고기지 FPI 중성 대기 온도자료, 지자기 위도 -80 ~ -75° 범위의 Swarm C 위성 자료와 GNSS TEC 자료. 초록 점선은 Polar hole이 발생한 시간대 간격, 검은색 실선은 장보고 기지에서 관측한 자료의 자기 지방시 기준으로 1시간 동안의 중간값, 붉은색 실선은 위성으로 얻은 자료의 자기지방시 기준으로 1시간 동안의 중간값, 파란색 실선은 당해연도 해당하는 시기의 위성 자료의 중간값, 진한 노란색 실선은 당해연도 여름에 해당하는 시기의 위성 자료의 중간값을 의미. 각각 색상의 errorbar는 사분위수의 범위를 의미.

제4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제1절 평가의 착안점

년도		성과목표	세부목표	가중치	평가의 착안점 및 척도
1 단계	1차년도 (2020)	지자기폭풍 기간 동안 고위도 오로라 발생과 전리권 우주환경 변화 연구	2019년 3월 이후 지자기 폭풍 이벤트 조사	40	- 지자기 폭풍 자료 조사
			GK2A 정지궤도 자기장 자료 지구 쌍극자 VDH 좌표 변환	40	- 위성 자료 분석 - 장보고 기지 자료 조사
			장보고 기지 ASC, VIPIR, FPI 고층대기 관측장비 자료와 GK2A 자기장, 입자 자료 비교	20	- 연구결과 학술대회 발표 - 연구 논문 작성
	2차년도 (2021)	고위도 연자기력선 전류 변화와 남·북극 고층대기 및 오로라 분포 차이점 이해	Swarm 자기장 자료 조사	30	- 위성 자료 분석 - 장보고 기지 자료 조사 - 연구결과 학술대회 발표 - 연구 논문 작성
			장보고 기지 고층대기 자료 조사	30	
			GK2A 자기장·입자 자 료 조사	40	
	3차년도 (2022)	남극 Pc1-2 지자기 파동 발생 시 전리권 우주환경 변화와 오로라 발생 상관관계 연구	장보고 기지 서치코일 자기장 측정기 자료를 이용한 Pc1-2 지자기 파 동 발생과 행성간 자기 장 방향 의존성 조사	50	- 장보고 기지 자료 조사 - 연구결과 학술대회 발표 - 연구 논문 작성
			Pc1-2 지자기 파동 발생 과 오로라 발생 상관관 계 조사	50	

2 단계	1차년도 (2023)	다양한 자기권 우주환경에 서의 자기권-남 극 전리권 상호작용 연구	극고요 및 중간섭동 자기권 우주환경에서의 남극 전리권 특성 이해	50	- 장보고 기지 자료 조사 - 연구결과 학술대회 발표 - 연구 논문 작성
			서브스톰/자기폭풍 발생 시 남극 전리권 특성 이해	50	
	2차년도 (2024)	자기권 격변 기간의 남극 전리권 특성 이해	SML 오로라 지수와 GK-2A 위성 자료를 이용한 서브스톰 이벤 트 조사	30	- 장보고 기지 자료 조사 - 연구결과 학술대회 발표 - 연구 논문 작성
			서브스톰 발생 시 남 극 장보고 기지 상공 전리권 F2층 밀도 변 화 조사	30	
			오로라 발생 시 하강 고에너지 하강 입자에 의한 남극 전리권 F2층에서의 VIPIR 에코 이벤트 조사	40	
	3차년도 (2025)	극고요 우주 환 경 에 서 의 극관 전리권 소멸 현상 이 해	장보고 기지 상공의 극관 전리권 소멸 현 상 발생시 중성대기 환경 이해	50	- 위성 자료 분석 - 장보고 기지 자료 조사 - 연구결과 학술대회 발표
			Swarm C 위성 자료 와 GNSS TEC를 이용 한 극관 전리권 소멸 현상 조사	50	

제2절 연구개발목표 달성도

성과목표	세부목표		달성 주요내용	달성도(%)
1단계: 남극 Pc1-2 지자기 파동 발생 시 전리권 우주환경 변화와 극고요 우주환경에서의 중성대기 특성 연구	1-1	장보고 기지 서치코일 자기장 측정기 자료를 이용한 Pc1-2 지자기 파동 발생과 행성간 자기장 방향 의존성 조사	- 장보고 기지 서치 코일 자료로부터 측정되어진 Pc1-2 전자기 파동 선정 - 파동의 빈도 및 세기가 행성간 자기장 방향과 상관관계가 있는지 분석	100
	1-2	Kp 지수와 남극 PC 지수에 대한 장보고 기지 FPI 중성대기 바람 온도 통계 조사	- 다양한 우주환경 조건에서의 장보고 FPI 중성대기 바람/온도 자료 비교/분석 - VIPIR 자료의 이온 속도와 중성대기 속도 비교/분석	100
2단계: 다양한 자기권 우주환경에서의 자기권-남극 전리권 상호작용 연구	2-1	극고요 및 중간섭동 자기권 우주환경에서의 남극 전리권 특성 이해	- 2018-2022년 기간의 Kp 지수를 이용한 극고요($K_p \leq 1$) 및 중간섭동($K_p = 2-3$) - VIPIR 자료를 이용한 낮/밤 지역 전리권 F2층 밀도 변화	100
	2-2	서브스톰 발생 시 남극 전리권 특성 이해	- SML 오로라 지수와 GK-2A 위성 자료를 이용한 서브스톰 이벤트 조사 - 서브스톰 발생 시 남극 장보고 기지 상공 전리권 F2층 밀도 변화 조사 - 오로라 발생 시 하강 고에너지 하강 입자에 의한 남극 전리권 F2층에서의 VIPIR 에코 이벤트 조사	80

제3절 관련분야의 기술발전예의 기여도

기존 고위도 전리권 연구는 북반구 지역을 중심으로 수행되어왔으며, 남반구 고위도는 인프라 및 육지보다 바다가 많은 지형적인 제약을 인해 지자기 활동에 따른 전리권 반응 특성에 대한 체계적인 분석이 제한적이었다.

본 연구에서는 남극 지역 전리권 관측 자료를 바탕으로 지자기 활동의 증가와 감소에 따른 plasma 밀도 불규칙성을 분석하였으며, 해당 연구 결과는 극지역에서의 전리권-자기권 결합과정이나 모델링 예측에 있어 기초적인 자료중 하나로써 도움이 될 것으로 기대된다. 또한, 기존에 눈으로 보고 확인하던 전리권 관측자료의 정상산출 여부를 자동적으로 분류할 수 있는 코드를 만듦으로써, 향후 많은 양의 데이터를 이용하여 전리권 연구를 할 때 보탬이 될 것으로 기대된다.

제5장 연구개발결과의 활용계획

학문적으로는 극지역 전리권 물리 이해를 위한 기초 자료로 활용될 수 있어, 향후 전리권-자기권 결합과정의 연구에 있어 도움이 될 것이다. 또한 전리권 환경 모델링을 위한 표본 중 하나로 더 정밀한 전리권 환경 예측에 보탬이 될 수 있을 것이다. 우주환경 예측을 통해, 인공위성의 운용을 포함하여 인공위성과 관련된 다양한 무선통신에 있어, 통신 불량을 해소할 수 있게 될 것이다.

해당 연구 과정에서 개발한 Ionogram 자료의 자동분류를 통해, 전리권 E층에서 갑자기 plasma 밀도가 증가하는 현상인 sporadic E가 발생한 시간대를 통계적으로 연구하는 데에 있어 Ionogram 자료를 눈으로 일일이 보는 과정을 python 코드가 대체함으로써, 연구 시간을 단축시킬 수 있을 것이다. 남극지역에는 환경적인 제한 때문에, 전리권 관측 자료가 적어, sporadic E가 어떻게 발생하는지는 북반구 고위도 지역과는 다르게 연구가 부족하다. 향후 sporadic E를 연구한다면, 해당 연구에서 개발된 코드가 도움을 줄 수 있을 것이라고 기대되는 바이다.



제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제1절 사용 자료

본 연구개발 과정에서는 지자기 활동 및 극지역 전리권 특성 분석을 위해 해외에서 구축·운영 중인 과학기술정보 및 관측 자료를 수집·활용하였다. 활용된 주요 해외과학기술정보는 다음과 같다.

1. SuperMAG 지자기 지수 자료 (SML, SMU), <https://supermag.jhuapl.edu>

본 연구에서는 고위도 지자기 활동 특성 분석을 위해 국제 지자기 관측 네트워크인 SuperMAG에서 제공하는 SML(Substorm Maximum Lower) 지수와 SMU(Substorm Maximum Upper) 지수를 활용하였다. 해당 지수는 오로라 전류계 변동 및 서브스톰 활동을 정량적으로 평가하는 데 사용되었다.

2. Kp 지수, <https://kp.gfz-potsdam.de>

전 지구적 지자기 교란 수준을 평가하기 위해 독일 지자기 연구센터(GFZ)에서 제공하는 Kp 지수를 활용하였다. Kp 지수는 중·고위도 전리권 교란 조건을 구분하기 위한 기준 지표로 사용되었다.

3. SuperDARN 레이더 관측 자료, <http://vt.superdarn.org>

극지역 전리권 대류 및 플라즈마 이동 특성 분석을 위해 Super Dual Auroral Radar Network(SuperDARN)에서 제공하는 HF 레이더 관측 자료를 활용하였다.

4. NRLMSIS 중성대기 모델링 자료, <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/models/NRLMSIS~00>

전리권 - 중성대기 결합 특성 분석을 위해 미국 해군연구소(NRL)에서 개발한 NRLMSIS 중성대기 모델을 활용하였다. 해당 모델은 고도별 중성대기 밀도 및 조성 정보를 제공한다.

5. Swarm 위성 자기장 및 플라즈마 자료, <https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm>

극지역 자기장 및 전리권 플라즈마 특성 분석을 위해 유럽우주국(ESA)이 운영하는 Swarm 위성에서 제공하는 자기장 및 플라즈마 관측 자료를 활용하였다.

6. GNSS 기반 TEC 자료, <https://cedar.openmadrigal.org>

전리권 총전자함량(Total Electron Content, TEC) 분석을 위해 GPS를 포함한 GNSS 위성 시스템에서 제공되는 전리권 TEC 자료를 활용하였다.

제7장 참고문헌

Afolayan, A. O., Jit Singh, M., Abdullah, M., Buhari, S. M., Yokoyama, T., Supnithi, P. (2019). Observation of seasonal asymmetry in the range spread F occurrence at different longitudes during low and moderate solar activity, *Ann. Geophys.*, 37, 733 - 745, <https://doi.org/10.5194/angeo-37-733-2019>

Bates, D. (1988). Recombination in the normal E and F layers of the ionosphere. *Planetary and Space Science*, 36(1), 55 - 63. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(88\)90146-8](https://doi.org/10.1016/0032-0633(88)90146-8)

Benson, R. F., & Grebowsky, J. M. (2001). Extremely low ionospheric peak altitudes in the polar hole region. *Radio Science*, 36(2), 277 - 285. <https://doi.org/10.1029/1999RS002401>

Bjoland, L. M., Ogawa, Y., Løvhaug, U. P., Lorentzen, D. A., Hatch, S. M., & Oksavik, K. (2021). Electron density depletion region observed in the polar cap ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(1), e2020JA028432. <https://doi.org/10.1029/2020JA028432>

Boyle, C. B., Reiff, P. H., & Hairston, M. R. (1997). Empirical polar cap potentials. *Journal of Geophysical Research*, 102(A1), e2020JA028432. <https://doi.org/10.1029/96JA01742>

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>

Buchau, J., Reinisch, B. W., Weber, E. J., & Moore, J. G. (1983). Structure and dynamics of the winter polar cap F region. *Radio Science*, 18(6), 995 - 1010. <https://doi.org/10.1029/RS018i006p00995>

Cai, H. T., Li, F., Shen, G., Zhan, W., Zhou, K., McCrea, I. W., & Ma, S. (2014). E layer dominated ionosphere observed by EISCAT/ESR radars during solar minimum. *Annales Geophysicae*, 32(10), 1223 - 1231. <https://doi.org/10.5194/angeo-32-1223-2014>

Cai, H. T., Ma, S. Y., Fan, Y., Liu, Y. C., & Schlegel, K. (2007). Climatological features of electron density in the polar ionosphere from long-term observations of EISCAT/ESR radar. *Annales Geophysicae*, 25(12), 2561 - 2569. <https://doi.org/10.5194/angeo-25-2561-2007>

Carlson, H., C. (1994). *Radio Science, The dark polar ionosphere: Progress and future challenges*, Volume 29, Number 1, Pages 157-165. <https://doi.org/10.1029/93RS02125>

- Carlson, H. C. (2012). Sharpening our thinking about polar cap ionospheric patch morphology, research, and mitigation techniques. *Radio Science*, 47(4), 1 - 16. <https://doi.org/10.1029/2011RS004946>
- Crowley, G., Carlson, H. C., Basu, S., Denig, W. F., Buchau, J., & Reinisch, B. W. (1993). The dynamic ionospheric polar hole. *Radio Science*, 28(3), 401 - 413. <https://doi.org/10.1029/92rs02878>
- Emmert, J. T., Drob, D. P., Picone, J. M., Siskind, D. E., Jones, M., Jr., Mlynczak, M. G., et al. (2020). Nrlmsis 2.0: A whole-atmosphere empirical model of temperature and neutral species densities. *Earth and Space Science*, 7(3), e2020EA001321. <https://doi.org/10.1029/2020EA001321>
- Fontaine, D. (2002). Structure and dynamics of the Earth's polar ionosphere: recent results inferred from incoherent scatter sounders, *Plasma Sources Sci. Technol.* 11, A113. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/11/3A/317>
- Forsythe, V. V., Kunduri, B., & Zou, S. (2021). Multi-instrument investigation of the polar holes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(12), e2021JA029795. <https://doi.org/10.1029/2021JA029795>
- Foster, J. C., Coster, A. J., Erickson, P. J., Holt, J. M., Lind, F. D., Rideout, W., et al. (2005). Multiradar observations of the polar tongue of ionization. *Journal of Geophysical Research*, 110(A9). <https://doi.org/10.1029/2004JA010928>
- Ham, Y.-B., Jee, G., Lee, C., Kwon, H.-J., Kim, J.-H., Zaboltn, N., & Bullett, T. (2020). Observations of the polar ionosphere by the Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar at Jang Bogo station, Antarctica, *Journal of Astronomy and Space Science*, 37(2), 143-156. <https://doi.org/10.5140/JASS.2020.37.2.143>
- Hargreaves, J. K. (1992). The solar-terrestrial environment: An introduction to geospace: The Science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere. *Cambridge University Press*, 420.
- Heelis, R. A. (1982). The Polar Ionosphere, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, VOL. 20, NO. 3, PAGES 567-576. <https://doi.org/10.1029/RG020i003p00567>
- Hoegy, W. R., & Grebowsky, J. M. (1991). Dependence of polar hole density on magnetic and solar conditions. *Journal of Geophysical Research*, 96(A4), 5737 - 5755. <https://doi.org/10.1029/90JA02755>
- Jee, G., Ham, Y.-B., Choi, Y., Kim, E., Lee, C., Kwon, H.-J., Trondsen, T. S., Kim, J., Kim J.-H. (2021). Observations of the Aurora by Visible All-Sky Camera at Jang Bogo Station, Antarctica, *Journal of Astronomy and Space Science* 38(4), 203-215. <https://doi.org/10.5140/JASS.2021.38.4.203>

- Jenner, L. A., Wood, A. G., Dorrian, G. D., Oksavik, K., Yeoman, T. K., Fogg, A. R., & Coster, A. J. (2020). Plasma density gradients at the edge of polar ionospheric holes: The absence of phase scintillation. *Annals of Geophysics*, 38(2), 575 - 590. <https://doi.org/10.5194/angeo-38-575-2020>
- Kim, E., Jee, G., Ji, E.-Y., Kim, Y. H., Lee, C., Kwak, Y.-S., & Shim, J.-S. (2020). Climatology of polar ionospheric density profiles in comparison with mid-latitude ionosphere from long-term observations of incoherent scatter radars: A review. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 211, 105449. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105449>
- Kim, E., Jee, G., Ham, Y.-B., Zabolotin, N., Lee, C., Kwon, H.-J., Hong, J., Kim, J.-H., Bullett, T. (2022). Assessment of Polar Ionospheric Observations by VIPIR/Dynasonde at Jang Bogo Station, Antarctica: Part 1—Ionospheric Densities. *Remote Sens*, 14, 2785. <https://doi.org/10.3390/rs14122785>
- Kim, K. H., Kim, D. H., & Back, J., Kwon, H.-J., Jee, G., Ham, Y.-B., Lee, C., Kim, J.-H. (2023). Dynasonde Observations of Ionospheric Polar Holes Under Quiet Geomagnetic Conditions at Jang Bogo Station, Antarctica. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 128. <https://doi.org/10.1029/2023JA031563>
- Kintner, P. M., B. M. Ledvina, E. R. de Paula (2007), GPS and ionospheric scintillations, *Space Weather*, 5, S09003, doi:10.1029/2006SW000260
- Kirkwood, S., Nilsson, H. High-latitude Sporadic-E and other Thin Layers - the Role of Magnetospheric Electric Fields, *Space Science Reviews* 91, 579 - 613 (2000). <https://doi.org/10.1023/A:1005241931650>
- Knudsen, W. C. (1974). Magnetospheric convection and the high-latitude F2 ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, 79(7), 1046 - 1055. <https://doi.org/10.1029/JA079i007p01046>
- Koskinen, H. E., Lopez, R. E., Pellinen, R. J., Pulkkinen, T. I., Baker, D. N., & Bosinger, T. (1993). Pseudobreakup and substorm growth phase in the ionosphere and magnetosphere. *Journal of Geophysical Research*, 98(A4), 5801 - 5813. <https://doi.org/10.1029/92JA02482>
- Krejcie, R. V., & Morgan, D. W. (1970). Determining Sample Size for Research Activities. *Educational and Psychological Measurement*, 30(3), 607 - 610. Doi:10.1177/001316447003000308

Kwon, H. J., Lee, C., Jee, G., Ham, Y. B., Kim, J.-H., Kim, Y., H., Kim, K.-H., Wu, Q., Bullett, T., Oh, S., Kwak, Y.-S. (2018). Ground-based Observations of the Polar Region Space Environment at the Jang Bogo Station, Antarctica, *Journal of Astronomy and Space Science*, 35(3):185–193. <https://doi.org/10.5140/JASS.2018.35.3.185>

Kwon, H.-J., Kim, K.-H., Jee, G., Jin, H., Kim, H., Shin, J., Lee, S., Kwon, J.-W., Kim, J.-H., Lee, C., Lessard, M. (2019). Characteristics of Pc5 activity at high latitudes stations in Antarctica, *J. Atmo. And Sol-Terr Phys.*, 193, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105087>

Kwon, H.-J., Kim, K.-H., Jee, G., Seon, J., Lee, C., Ham, Y.-B., Hong, J., Kim, E., Bullett, T., Auster, H.-U., Magnes, W., and Kraft, S. (2022). Disappearance of the Polar Cap Ionosphere During Geomagnetic Storm on 11 May 2019, *Space Weather*, 20, e2020SW003054, doi:10.1029/2022SW003054

Kwon, H.-J., Jee, G., Ham, Y.-B., Zabolotin, N., Lee, C., Kim, E., and Bullett, T. W. (2024). Assessment of Polar Ionospheric Observations by VIPIR/Dynasonde at Jang Bogo Station, Antarctica: 2. Ionospheric Ion Drift Velocity, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 129, e2023JA032402, doi: 10.1029/2023JA032402

MacDougall, J. W., Jayachandran, P. T., & Plane, J. M. C. (2000). Polar cap sporadic-E: Part 1, observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62(13), 1155 - 1167. [https://doi.org/10.1016/s1364-6826\(00\)00093-6](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(00)00093-6)

MacDougall, J. W., Plane, J. M. C., & Jayachandran, P. T. (2000). Polar cap sporadic-E: Part 2, modeling. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62(13), 1169 - 1176. [https://doi.org/10.1016/s1364-6826\(00\)00092-4](https://doi.org/10.1016/s1364-6826(00)00092-4)

Makarevich, R. A., Lamarche, L. J., & Nicolls, M. J. (2015). Resolute bay incoherent scatter radar observations of plasma structures in the vicinity of polar holes. *Journal of Geophysical Research*, 120(9), 7970 - 7986. <https://doi.org/10.1002/2015JA021443>

Milan, S. E., Clausen, L. B. N., Coxon, J. C., Carter, J. A., Walach, M.-T., Laundal, K., et al. (2017). Overview of solar wind-magnetosphere-ionosphere-atmosphere coupling and the generation of magnetospheric currents. *Space Science Reviews*, 206(1 - 4), 547 - 573. <https://doi.org/10.1007/s11214-017-0333-0>

Moen, J., Qiu, X. C., Carlson, H. C., Fujii, R., & McCrea, I. W. (2008). On the diurnal variability in F2-region plasma density above the EISCAT Svalbard radar. *Annales Geophysicae*, 26(8), 2427 - 2433. <https://doi.org/10.5194/angeo-26-2427-2008>

- Ohtani, S., Anderson, B. J., Sibeck, D. G., Newell, P. T., Zanetti, L. J., Potemra, T. A., et al. (1993). A multisatellite study of a pseudo-substorm onset in the near-Earth magnetotail. *Journal of Geophysical Research*, 98(A11), 19355 - 19367. <https://doi.org/10.1029/93JA01421>
- Piggott, W. R., & Rawer, K. (1978). URSI handbook of ionogram interpretation and reduction (23A) (p. 146). World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, NOAA. Retrieved from <https://repository.library.noaa.gov/view/noaa/10404>
- Pokhotelov, D., Fernandez-Gomez, I., & Borries, C. (2021). Polar tongue of ionisation during geomagnetic superstorm. *Annales Geophysicae*, 39(5), 833 - 847. <https://doi.org/10.5194/angeo-39-833-2021>
- Prolss, G. W. (2004). Physics of the Earth's space environment: An introduction. *Springer*, 513. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-97123-5>
- Ruohoniemi, J. M., & Baker, K. B. (1998). Large-scale imaging of high-latitude convection with super dual auroral radar network HF radar observations. *Journal of Geophysical Research*, 103(A9), 20797 - 20811. <https://doi.org/10.1029/98JA01288>
- Scali, J., L., Reinisch, B., W., Kelley, M., C., Miller, C., A., Swartz, W., E., Zhou, Q., H., Radicella, S. (1997). Incoherent scatter radar and Digisonde observations at tropical latitudes, including conjugate point studies, *Journal of Geophysical Research*, Vol., 102, NO. A4, PAGES 7357-7367. <https://doi.org/10.1029/96JA0351>
- Shepherd, S. G. (2014). Altitude-adjusted corrected geomagnetic coordinates: Definition and functional approximations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 7501 - 7521. <https://doi.org/10.1002/2014JA020264>
- Sojka, J. J., Raitt, W. J., & Schunk, R. W. (1981a). Plasma density features associated with strong convection in the winter high-latitude F region. *Journal of Geophysical Research*, 86(A8), 6908 - 6916. <https://doi.org/10.1029/ja086ia08p06908>
- Sojka, J. J., Raitt, W. J., & Schunk, R. W. (1981b). A theoretical study of the high-latitude winter F region at solar minimum for low magnetic activity. *Journal of Geophysical Research*, 86(A2), 609 - 621. <https://doi.org/10.1029/ja086ia02p00609>
- Wang, N., Guo, L., Ding, Z., Zhao, Z., Xu, Z., Xu, T., Hu, Y. (2019). Longitudinal differences in the statistical characteristics of ionospheric spread-F occurrences at midlatitude in Eastern Asia. *Earth Planets Space* 71, 47. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1026-6>

- Wang, Y., Themens, D. R., Wang, C., Ma, Y., Reimer, A., Varney, R., et al. (2022). Simultaneous observations of a polar cap sporadic-E layer by twin incoherent scatter radars at resolute. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127(6). <https://doi.org/10.1029/2022ja030366>
- Weber, E., Buchau, J., Moore, J., Sharber, J., Livingston, R., Winningham, J., & Reinisch, B. (1984). F-layer ionization patches in the polar cap. *Journal of Geophysical Research*, 89(A3), 1683 - 1694. <https://doi.org/10.1029/JA089iA03p01683>
- Wright J. W., & Pitteway M. L. V. (1999). A new data acquisition concept for digital ionosondes: Phasebased echo recognition and real-time parameter estimation, *Radio Science*, Volume 34, Number 4, Pages 871-882. <https://doi.org/10.1029/1999RS900039>
- Yeh, K. C., & Liu, C. H. (1972). Propagation and application of waves in the ionosphere, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, VOL. 10, NO. 2, PP. 631-709, <https://doi.org/10.1029/RG010i002p00631>
- Xu, S., Zhang, B., Liu, R., Guo, L., & Wu, Y. (2014). Comparative studies on ionospheric climatological features of NmF2 among the Arctic and Antarctic stations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 119, 63 - 70. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2014.06.016>
- Zabotin, N. A., Wright, J. W., & Kovalenko, E. S. (2004). Multiple scattering effects in ionospheric radio sounding. *Radio Science*, 39(3). <https://doi.org/10.1029/2003rs002953>
- Zabotin, N. A., Wright, J. W., Zhbankov, G. A. (2006). NeXtYZ: three-dimensional electron density inversion for dynasonde ionograms, *Radio Sci.* 41, RS6S32. <https://doi.org/10.1029/2005rs00335>

뒷 면

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.

붙임. 위탁과제 국·영문 사사(acknowledgment) 표기 방법