

TSPE16090-033-5

극저 전리권 전자밀도 불규칙성과 극저
고층대기에 미치는 영향 이해



Johns Hopkins University
Applied Physics Laboratory

제 출 문

한국해양연구원 부설 극지연구소장 귀하

본 보고서를 “극지 전리권 전자밀도 불규칙성과 극지 고층대기에 미치는 영향 이해”
과제의 최종보고서로 제출합니다.



2017. 1. 29

총괄연구책임자 : 지 건 화

위탁연구기관명 : Johns Hopkins University
Applied Physics Laboratory

위탁연구책임자 : 길 효 섭

참 여 연 구 원 : 길 효 섭

요약문

I. 제목

극지 전리권 전자밀도 불규칙성과 극지고층대기에 미치는 영향 이해

II. 연구개발의 목적 및 필요성

본 연구를 통해서 전리권의 전자밀도 분포와 불규칙성이 어떤 특성을 가지며 어떤 물리적 과정을 통해서 발생하는지 밝히고자 한다. 전리권과 고층대기의 상호작용, 외부 에너지의 극지방 고층대기로의 유입, E층과 F층의 coupling 등 많은 원인에 의해서 전자밀도 분포와 불규칙성 발생이 영향을 받는다고 알려져 있는데, 이들의 변화가 워낙 다양하기 때문에 이 주제들은 아직도 주된 연구 대상이다. 전자밀도의 분포와 불규칙성은 직접적으로 통신과 항법에 영향을 주는 중요한 우주기상 현상이기 때문에 이들의 특성 및 원인에 대한 연구의 필요성은 항상 강조돼 왔다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

위성과 지상 레이더 관측 자료를 이용한 통계적인 분석과 이벤트 연구를 통하여 전리권의 특성을 통해서 조사하였다. 2013-2014년 동안 관측된 Swarm 위성 자료를 이용해서 남반구와 북반구 고위도 지방의 전자밀도 분포를 조사 했다. 대전에 설치된 VHF 레이더가 2000-2014년 동안 관측한 자료를 이용해서 F층 불규칙성의 발생 빈도가 지방시, 계절, 그리고 태양 활동에 따라 어떻게 변하는지 조사했다. Communication/Navigation Outrage Forecasting System (C/NOFS) 위성의 2008-2012 기간 관측 자료를 이용해서 저위도 지방에서 플라즈마 버블이 발생하는 양상이 규칙적이어서 중량파와 같은 파동과 연관지어 설명할 수 있는지 조사하였다. 2013년 6월 1일에 북미대륙 (중위도)에서 전자밀도의 급격한 감소가 관측됐는데 이 현상이 적도지방의 버블과 관련됐는지 아니면 고위도에서 발생한 traveling ionospheric disturbance (TID) 와 관련됐는지 조사하였다. 마지막으로 2015년 3월 17일 지자기 폭풍시의 전리권 교란 (저위도 전자밀도의 극감현상)을 여러 위성관측 자료를 이용해서 조사하였다.

IV. 연구개발결과

고위도 지방에서 전자밀도의 시간에 따른 분포가 여름 계절에 남 북반구에서 크게 차이를 발견하였다. 일반적으로 00-06시 사이에 전자밀도가 가장 작게 나타나는데 남반구에서는 오히려 이 시간대에 전자밀도가 가장 크게 나타났다. 대전 VHF 레이더로 관측된 전자밀도 불규칙성 발생빈도는 전체적으로 여름철에 가장 많이 발생함을 보여주는데 하지만 지방시에 따라 약간 달라진다. 겨울철에는 어느 시간대에서도 거의 나타나지 않았다. 저위도 지방의 플라즈마 버블 발생양상으로부터 중량파의 특성을 알기는 어렵다는 결론을 얻었으며 2013년 6월 1일에 북미대륙 에서 전자밀도의 극감현상이 버블이 아닌 TID로 설명함이 타당하다는 결론에 이르렀다. 2015년 3월 17일 지자기 폭풍 시 저위도 전자밀도의 극감현상은 전리권의 위성궤도 위로 들림 현상에 의

한 것임을 밝혔다.

V. 연구개발결과의 활용계획

전자밀도와 불규칙성의 특성과 분포에 대한 지식을 전리권에 변화를 일으키는 원인 연구와 통신 및 항법에 미치는 영향 조사에 활용할 계획이다.



SUMMARY

I. Title

Characteristics of the electron density irregularities in high latitudes and their coupling with upper atmosphere

II. Purpose and Necessity of R&D

This project aimed at identifying the characteristics of the electron density distribution and irregularities in the ionosphere and the underlying physical processes. The ionosphere is affected by various factors including ionosphere-thermosphere interaction, external energy input into polar atmosphere, and E and F region coupling, but all the diversity in the ionosphere has not yet been fully explained. Owing to the direct impact of the ionosphere to the communication and navigation systems, the importance of ionospheric investigation has been emphasized.

III. Contents and Extent of R&D

Our investigation of the ionosphere was conducted by the statistical analyses and case studies of events using satellite and ground-based radar observations. Using the Swarm data acquired in 2013-2014, we investigated the plasma distribution in high latitudes in opposite hemispheres. The local time, season, solar cycle variation of the activity of the irregularities in middle latitudes was investigated by analyzing the Daejeon VHF radar observation acquired in 2010-2014. The manner of plasma bubble occurrence in the equatorial region and its association with gravity wave were investigated with observations of the Communication/Navigation Outage Forecasting System (C/NOFS) satellite in 2008-2012. The association of severe plasma depletion events observed in Northern America on June 1, 2013 with plasma bubbles and traveling ionospheric disturbance (TID) was investigated. Finally, the cause of the extreme plasma depletions in the equatorial ionosphere during the March 17, 2015 geomagnetic storm was investigated using multiple satellite observation data.

IV. R&D Results

We found that the plasma density distribution in high latitudes is significantly different in the opposite hemispheres during summer season. Normally, plasma density is minimal in the 00-06 LT sector, but it was maximal in the southern hemisphere during summer. The occurrence of the irregularities in middle latitudes identified by the Daejeon VHF radar

showed a high occurrence rate in summer and an extremely low occurrence rate in winter. However, their occurrence rate at different local times showed a slight seasonal variation. For the manner of bubble occurrence in low latitudes, we reached a conclusion that the characteristics of seeding gravity waves are difficult to identify from the observations of the manner of bubble occurrence. The emission depletions over North America observed on June 1, 2013 were explained in terms of bubbles, but our investigation showed that the phenomena were related with TIDs. The extreme plasma depletions in the equatorial region observed on March 17, 2015 were turned out to be caused by the uplift of the ionosphere above satellite altitudes.

V. Application Plans of R&D Results

Knowledge of the characteristics and distribution of plasma density and irregularities will be applied for the investigation of their creation mechanisms and their effect on communication and navigation systems.



목 차

제 1 장 서론	1
제 2 장 국내외 기술개발 현황	3
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	4
제 1 절 중고위도 지방 전자밀도 분포	4
제 2 절 북아메리카 대륙의 중위도 지방에서 2013년 6월 1일에 관측 된 OI 630.0 nm 선 강도의 감소 원인 분석	6
제 3 절 중위도 지방 F층에서의 전자밀도 불규칙성 분포 분석	8
제 4 절 자기폭풍 (2015년 3월 17일)시 발생한 거대한 전자밀도 감소 현상의 원인	12
제 5 절 시리즈로 나타나는 플라즈마 버블의 물리적 의미 분석	15
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도	21
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	23
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	24
제 7 장 참고문헌	25

제 1 장 서론

본 연구의 목적은 지구의 전리권에 나타나는 전자밀도 불규칙성이 외부의 에너지 유입과 고층대기와의 상호작용과 어떤 관계가 있는지 알아보는 것이다. 전자밀도 불규칙성이 발생하는 원인으로 많은 요인들이 제안되었다. 지자기 폭풍이 가장 중요한 전자밀도 불규칙성의 원인으로 알려져 있는데 [Kil et al., 2003], 비 지자기 폭풍 시에도 지자기 폭풍이 있을 때 못지않게 자주 전자밀도 불규칙성이 나타난다. 비 지자기 폭풍시의 불규칙성의 원인으로서는 지진, 수나미, 토네이도, 태풍, 로켓발사를 포함한 많은 요인들이 제안돼 왔는데 [Makela et al., 2011; Maruyama et al., 2011; Nishioka et al., 2011; Occhipinti et al., 2011; Choi and Kil, 2016], 이런 요인들이 없을 시에도 나타나기 때문에 불규칙성의 원인은 여전히 중요한 연구 주제로 남아있다.

고위도 지방에서 전자밀도 불규칙성은 크게 두 원인에 의해서 발생한다고 알려져 있다. 한 원인은 낮 시간의 고밀도 플라즈마가 고위도지방에서 일어나는 대류 현상에 의해서 밤 시간대로 이동해서 저밀도의 플라즈마와 섞이는 것이고 또 다른 원인은 오로라가 일어나는 지역에서 고에너지 입자가 대기를 이온화하 관련이 있다. 중위도 지방에서는 전자밀도 불규칙성의 강도가 고위도나 저위도보다 약한 관계로 상대적으로 관심이 적었는데 최근의 연구 결과들은 중위도에서도 전자밀도 불규칙성이 흔히 나타남을 보여준다 [Yang et al., 2015]. 외부에너지 유입으로 인한 오로라 지역의 가열에 의해서 바람이 형성되고 이 바람이 저위도 지방으로 전파되면서 전리권에 Traveling ionospheric disturbance (TID)라는 현상을 유발하는데 중위도 지방에서의 전자밀도 불규칙성은 TID와 연관지어서 이해되고 있다. 하지만 TID가 없을 때에도 전자밀도 불규칙성이 나타나기 때문에 TID가 유일한 원인은 아니며 E층에서 나타나는 sporadic E현상과의 연관돼 있다는 연구도 있다. 저위도 지방에서 일어나는 전자밀도 불규칙성은 플라즈마 버블과 연관되어 있는데 [Kil, 2015], 버블 현상이 강한 전자밀도 불규칙성을 만들기 때문에 전리권 격변과 관련된 전자기파의 방해는 저위도 지방에서 가장 심하다.

전자밀도의 불규칙성이 중요한 이유는 불규칙성이 전자기파의 전파에 영향을 미치기 때문이다. 즉, 전자밀도의 불규칙성이 통신을 방해하고 항법시스템의 위치 측정에 오차를 유발하기 때문에 일찍부터 중요한 우주기상 현상으로 이해되어 왔다. 우주기상이 현대

인간의 삶에 미치는 영향을 최소화 하고 대처하기 위해서 왜 그런 현상이 일어나는지 또 얼마나 강한 불규칙성이 언제 어느 곳에 나타나는지에 대한 지식이 필요하다. 불규칙성은 다양한 위성 탑재체나 지상 장비로 관측되는데, 본 연구는 지상 레이더와 위성에서 원거리 광학기기와 입자검출기로 관측한 자료를 이용해서 수행되었다.



제 2 장 국내외 기술개발 현황

전리권 관측에 사용되는 주요한 지상 관측 설비들은 레이다, 광학관측기기, 이오노존데, 그리고 GPS수신기를 들 수 있다. 이러한 지상 관측 설비들은 한정된 장소에서 특히 육지에서만 관측가능하기 때문에 전 지구적 관측 자료를 얻기 위해 1960년대부터 지속적으로 위성관측이 수행되어 왔다. 현재 작동중인 위성 중에 Swarm, Defense Meteorological Satellite Program (DMSP), Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climatology (COSMIC), 그리고Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) 위성이 전리권 관측자료를 제공하고 있다.

한국의 지상 관측설비로는 이오노존데가 가장 오랜 기간 관측자료를 제공해 왔고 그 뒤를 이어서GPS 수신기와 신틸레이션 모니터가 설치되었고, 그리고 가장 최근에는 VHF 레이다 (2009년)가 대전에 설치되었다. 한국의 위성관측은 1999년 발사된 Korea Multipurpose satellite (KOMPSAT)-1 으로 처음 수행되었고 계속되는 KOMPSAT시리즈 (나중에 이름이 아리랑으로 바뀜)에서 전리권 관측 탑재체로 관측이 계속 되었다.

한국의 전리권 연구는 한국 주변국인 일본이나 대만에 비해서 늦게 시작되었고 아직 이들 나라들에 비교하면 연구 역량도 부족한 부분이 많다. 중국도 한국과 비슷한 시기에 전리권에 대한 관심이 증가하기 시작했는데 많은 연구 인력이 집중적으로 전리권 연구에 참여해왔기 때문에 짧은 시간 안에 연구 역량이 급성장 하였다. 아마도 한국에서 본격적인 전리권 연구의 시작은 전리권 연구자들이 천문연구원과 극지연구원에서 연구를 시작하고 지상관측 설비 논의를 시작하던 2007-2008년 이라고 볼 수 있을 것 같다. 물론 그 전에 다른 대학에 한 두 분의 전리권 관련 연구하는 교수님들이 계셨지만, 그 당시 국내에 전리권 연구자들이 극소수였기 때문에 하나의 분야로 인정받기 어려웠다. 관측 시설이 구축되고 관련 연구자 그리고 학생들이 늘면서 이제는 하나의 독립된 분야로 인식될 만큼 성장하였고 국제 공동연구에 동참하고 국제회의를 주관 할 만큼 연구 역량이 향상되었다.

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 중고위도 지방 전자밀도 분포

Swarm은 European Space Agency가 운영하는 3대의 위성으로 구성돼 있는데 주목적은 정확한 지구의 자기장 측정이다. Swarm 위성들은 2013년 11월22 에 발사되어 원궤도로 운항되고 있다. Swarm-Alpha (SwA) 와 Swarm-Charlie (SwC) 의 고도는 460 km 이고 두 위성이 위도로는75 km 경도로는150 km 떨어져 있다. Swarm-Bravo (SwB) 의 고도는 530 km로 다른 두 위성과 떨어진 궤도를 가진다. 위성의 궤도각은 SwA와 SwC 쌍과 SwB 가 각각 87.4° 와 88°이다. 전자밀도는 0.5 초 간격으로 Langmuir probe로 관측되었고 전자밀도 분포는 2013년 11월부터 2015년 3월까지 SwA 위성으로 관측된 자료를 이용하였다.

계절은 크게 3개로 나뉘었는데 북반구에서 겨울은 1, 2, 11, 12월, 여름은 5-8월, 그리고 봄가을은 3, 4, 9, 10월을 의미한다. 남반구에서는 겨울과 여름의 기간을 바꾸면 된다. 그림 1은 자기지방시와 자기위도의 함수로 전자밀도 분포를 보여준다. 북반구 겨울은 전형적인 낮 동안의 높은 밀도와 밤 동안의 낮은 밀도 분포를 보여주는데 밤 시간에 전자밀도의 최소치가 자기위도 60°에 나타난다. 이 위치는 middle latitude ionization trough이라고 생각되는데 DMSP 위성으로 관측된 위치보다 좀 저위도 쪽에 있다. 위성의 고도에 따른 차이인지 확인하기 위해서 두 위성 자료를 직접 비교해 볼 필요가 있다. 북반구 여름에는middle latitude ionization trough이 거의 나타나지 않는데 특이한 점은 12-18시의 전자밀도가 18-00시의 전자밀도보다 낮다는 사실이다. 밤시간에 적도방향으로 부는 바람의 영향으로 밤 시간의 전자밀도가 더 높을 수 있는데 바람의 영향은 모델 시뮬레이션으로 확인할 계획이다. 북반구 봄가을철에는 전자밀도가 오후 시간에 가장 높고 21시와 06시 근방에서 가장 낮다. 왜 이러한 전자밀도 분포를 보이는지에 대한 설명은 아직 없다. 이 계절에 middle latitude ionization trough의 형태는 뚜렷이 볼 수 있다.

남반구 겨울철에는 middle latitude ionization trough을 모든 시간대에 확인할 수 있다. 낮 시간의 trough위치가 밤 시간의 trough위치보다 약10° 정도 고위도로 이동되어 있다.

이러한 차이는 고위도의 플라즈마 대류 패턴과 연관되어 있다고 생각되는데 장래에 SuperDarn관측이 제공하는 대류 패턴과 비교하고자 한다. 전자밀도 분포가 북반구와 남반구 여름철에 크게 다르다. 북반구 여름철에 전자밀도가 00-06시간대에 최소였었는데 남반구에서는 이 시간대에 최대이다. 그 이유에 대한 설명은 아직 찾지 못했다. 또 다른 특이 사항은 전자밀도 감소 밴드가 06-21시 사이에 고위도에 형성되어 있는 것이다. 이 밴드를 middle latitude ionization trough 이라고 해석할 수도 있을 텐데 위치가 다른 계절에 나타나는 trough의 위치와는 차이가 있다. 남반구의 봄가을 계절에 전자밀도 분포의 특이점은 두드러지지 않는데 전자밀도의 최소치가 이른 새벽이 아니고 00시 근방에서 나타나는 현상도 쉽게 설명되지 않는다.

북반구와 남반구의 전자밀도 분포 차이는 지구 자전축에 대한 자기축의 위치가 두 반구에서 크게 다른데 기인한다고 이해된다. 그림 1에서 보이는 전자밀도 분포가 다른 해에도 일관성 있게 나타나는지 그리고 다른 위성으로 관측된 결과와 일치하는지 앞으로 조사해 봐야할 사항이다. 그리고 왜 관측된 것 같은 전자밀도 분포를 보이는지 모델 시뮬레이션을 수행해서 확인할 계획이다.

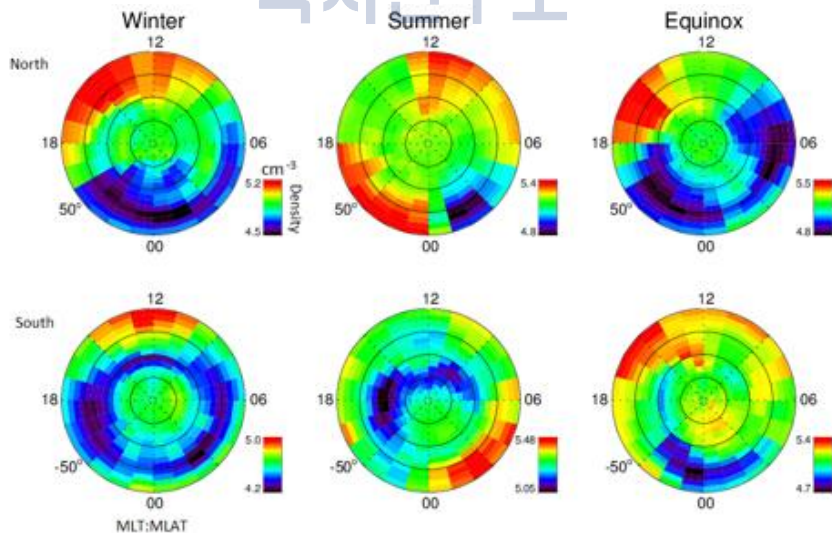


그림 1 Swarm위성으로 2013년 12월과 2015년 3월 기간 관측된 자료를 이용해서 얻은 남북반구에서의 전자밀도 분포.

제 2 절 북아메리카 대륙의 중위도 지방에서 2013년 6월 1일에 관측된 OI 630.0 nm 선 강도의 감소 원인 분석

OI 630.0 nm 방출선의 세기가 주위에 비해서 급격히 감소한 현상이 2013년 6월 1일에 멕시코 상공의 전리권에서 미국 텍사스 주의 McDonald Observatory (30.67°N, 104.02°W, 40° magnetic latitude) 에 설치된 전천 카메라로 관측되었다 [Martinis et al., 2015]. 그 날의 자기폭풍의 세기는 중간 레벨 이었다 (minimum Dst index: -119 nT). 카메라에 나타난 방출선 감소 이미지는 갈라지고 시간에 따라 저위도에서 고위도로 뻗어나가는 것처럼 보였으며 자기력선에 대해서 서쪽으로 기울어진 것처럼 보였다. 이러한 관측된 특성들은 적도지방에서 나타나는 플라즈마 버블과 유사해서 Martinis et al. [2015]은 이 현상이 버블과 연관되어 있다고 주장하였다. 하지만 이제까지 적도지방의 버블이 지자기 위도 40°N 이상의 지역에서 발견된 예가 없으며 Martinis et al. [2015]은 이 주장을 증명할 직접적인 증거를 제시하지 못하였다. 본 연구는 이들의 주장이 타당한지 살펴보기 위해서 Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) F18 위성에 탑재된 Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager (SSUSI)기기로 관측된 전리권 이미지와 Communication/Navigation Outage Forecasting System (C/NOFS) 위성 탑재된 Coupled Ion-Neutral Dynamics Investigation (CINDI) instrument 기기로 관측된 플라즈마 밀도와 속도 자료를 분석하였다. 그리고 위에 설명한 현상이 버블이 아니고 TID와 관련됐다는 것을 보여주기 위해서 미국에 있는 Global Positioning System (GPS) 관측소 자료를 이용해서 만든 total electron content (TEC) 맵을 이용하였다.

그림 2a 는 Martinis et al. [2015]이 중위도에서 전천카메라로 관측한 OI 630.0 nm 방출선의 이미지를 보여주고 그림 2b는 DMSP/SSUSI로 저위도에서 관측된 OI 135.6 nm 이미지를 보여준다. 두 방출선의 세기는 전리권 산소 이온의 밀도와 관련돼 있는데 검은 밴드로 나타나는 지역은 산소이온의 밀도가 주위보다 낮기 때문이다. 이 그림에서 지적하고자 하는 것은 검은 밴드가 기울어져 있는 방향이 중위도 지방과 저위도 지방에서 다르다는 것과 (노란선과 붉은선을 비교) 저위도 지방의 버블이 20°이상의 지역까지 발달한 증거가 없다는 것이다. 물론 나중시간에 버블이 더 성장해서 40°까지 도달했을 가능성을 배제할 수 없지만 이 가설을 증명할 자료는 없다. 그림 2c 는 CNOFS/CINDI로 관측한 적도 근방에서의 플라즈마 속도 (파랑: 동쪽방향 속도, 빨강: 위쪽방향 속도)를 보여주는데

버블을 포함해서 배경 플라즈마가 동쪽으로 움직임을 보여준다. 이에 반하여 중위도에서 전천카메라로 관측된 검은 밴드는 시간에 따라 서쪽으로 이동함을 보여주었다. 중위도에서 관측된 검은 이미지의 서쪽으로의 움직임은 동쪽으로 이동하는 버블로 설명할 수 없기 때문에 위에서 설명한 두 가지 이유와 더불어서 우리는 멕시코에서 관측된 OI 630.0 nm 방출선 감소는 버블과 관련이 없는 현상이라고 주장한다. 그림 2d가 보여주는 것처럼, 멕시코에서 OI 630.0 nm 방출선 감소가 관측됐을 때 북아메리카에 강한 TID가 발달했었고 따라서 OI 630.0 nm 방출선 감소는 TID와 관련됐다는 것이 우리가 대안으로 제안한 설명이다.

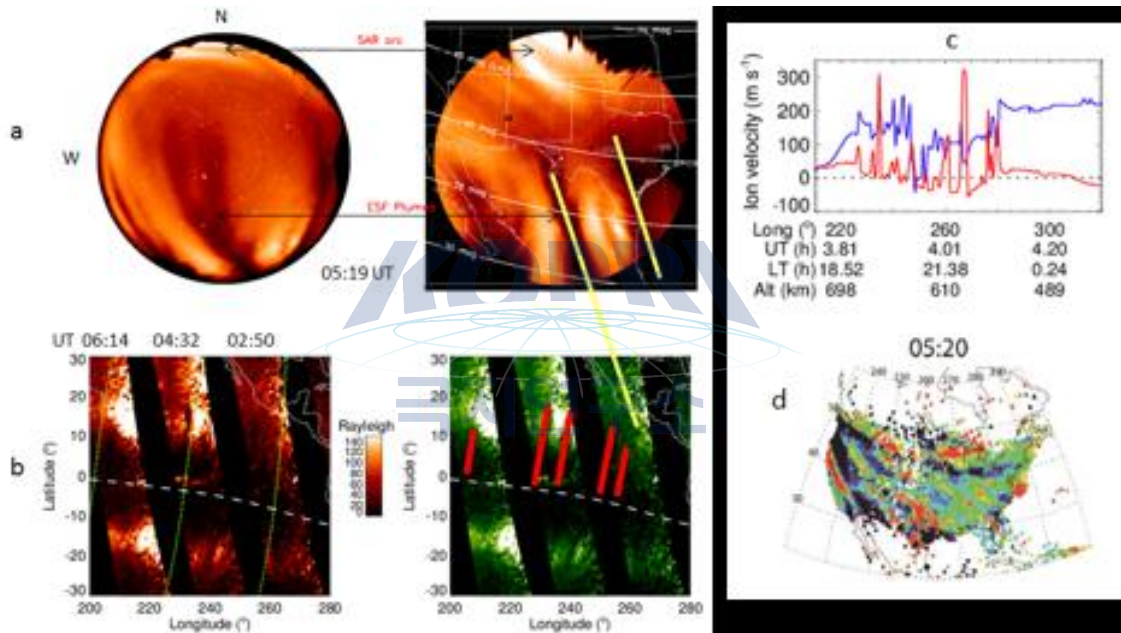


그림 2 (a) 미국 텍사스에 있는 McDonald Observatory 에서 전천카메라로 관측한 OI 630.0 nm 방출선 이미지. (b) DMSP/SSUSI 로 관측된 OI 135.6 nm 이미지. 버블의 위치는 빨간선으로 표시하였다. (c) CNOFS/CINDI로 관측한 플라즈마의 동쪽 방향(파란색) 과 상승 (빨간색) 운동. (d) GPS TEC perturbation map. [Kil et al., 2016]

제 3 절 중위도 지방 F층에서의 전자밀도 불규칙성 분포 분석

전리권에서의 전자밀도 불규칙성은 자력선에 수직인 방향으로 짧고 자력선 방향으로 길게 뻗어있는 비등방성을 보이는 데 이런 특성 때문에 불규칙성을 흔히 field-aligned irregularities (FAIs)라고 부른다. 대전 very high frequency (VHF) 레이더는 FAI관측을 이용해서 중위도 지방의 전자밀도 불규칙성의 특성을 조사하기 위해서 설치되었다. 중위도 지방에서 F층 FAI를 긴 기간 관측한 자료는 대전 레이더가 유일하게 제공한다. 본 연구는 2010년 1월부터 2014년 12월까지 관측된 레이더 자료를 이용해서 F층 FAI의 특성을 통계분석 했다.

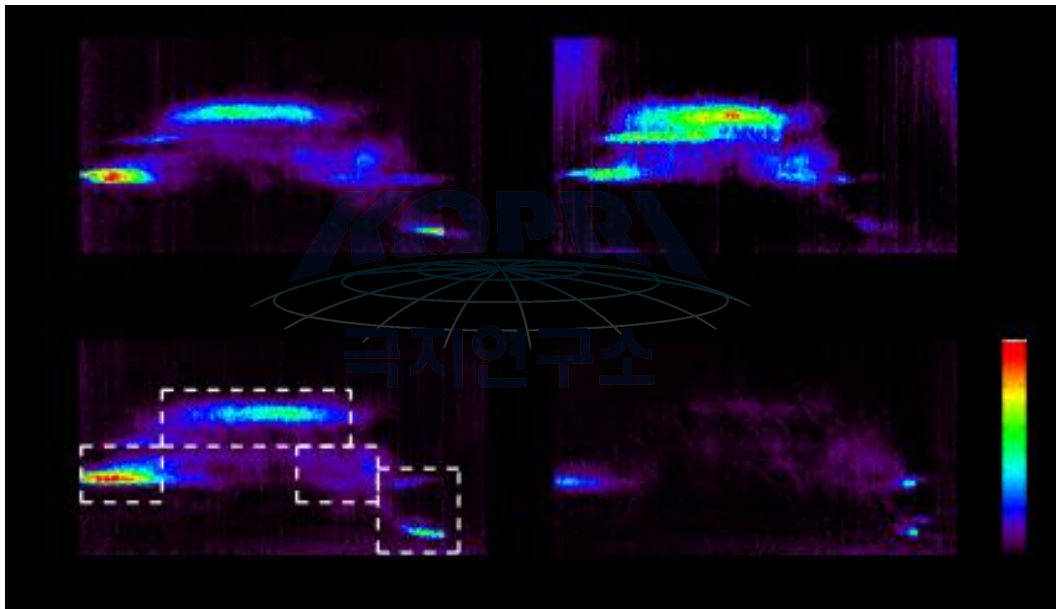
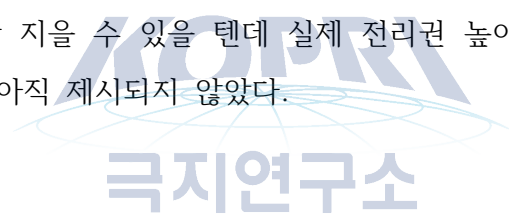


그림 3 계절에 따른 FAI 발생빈도. (a) spring (February, March, April), (b) summer (May, June, July), (c) fall (August, September, October), and (d) winter (November, December, January). 하얀색 박스들은 그림4에서 사용할 4개의 시간대를 나타낸다. [Yang et al., 2015]

그림 3. 계절에 따른 FAI 발생빈도. (a) spring (February, March, April), (b) summer (May, June, July), (c) fall (August, September, October), and (d) winter (November, December, January). 하얀색 박스들은 그림4에서 사용할 4개의 시간대를 나타낸다. [Yang et al., 2015].

그림 3은 계절에 따른 FAI의 발생빈도를 지방시와 고도의 함수로 보여준다. FAI의 기준으로는 signal-to-noise ratio (SNR) 값 -10dB 을 사용했다. 이제까지 중위도 F층 FAI에 관한 자료는 일본의 Shigaraki에 설치된 middle and upper atmosphere (MU)레이다가 제공했었는데 MU 레이다는 주로 북반구 여름철에 일주일 정도만 운용되었다. 그 이유는 F층 FAI가 여름철 이외의 계절에는 거의 나타나지 않는다는 판단 때문이었다. 하지만 대전 레이더 관측 자료로부터 다른 계절에도 FAI가 자주 나타나는 것을 확인하였고 그림3이 통계적 분포를 보여준다. 모든 계절에 FAI는 18시 근방에서 나타나기 시작한다. 300km정도의 고정된 고도에 18-21시에 나타나는 FAI는 발생빈도가 봄가을에 여름보다 높다. 겨울철에도 나타나지만 다른 계절에 비해서 발생빈도가 현저히 낮다. 21시부터 03시까지는 400km근방에 나타나는데 여름철이 발생빈도가 가장 높고 겨울철에는 거의 나타나지 않는다. 그 후에는 다시 400km정도의 고도에 나타나는데 발생빈도는 그 앞의 시간대에 비해서 훨씬 낮다. 05-08시 사이의 FAI는 특이하게도 두 개의 가느다란 밴드 형태로 나타난다. FAI가 나타나는 고도의 변화는 전리권 높이의 시간에 따른 변화와 연관 지을 수 있을 텐데 실제 전리권 높이와 FAI가 나타나는 높이가 연관되어 있다는 증거는 아직 제시되지 않았다.



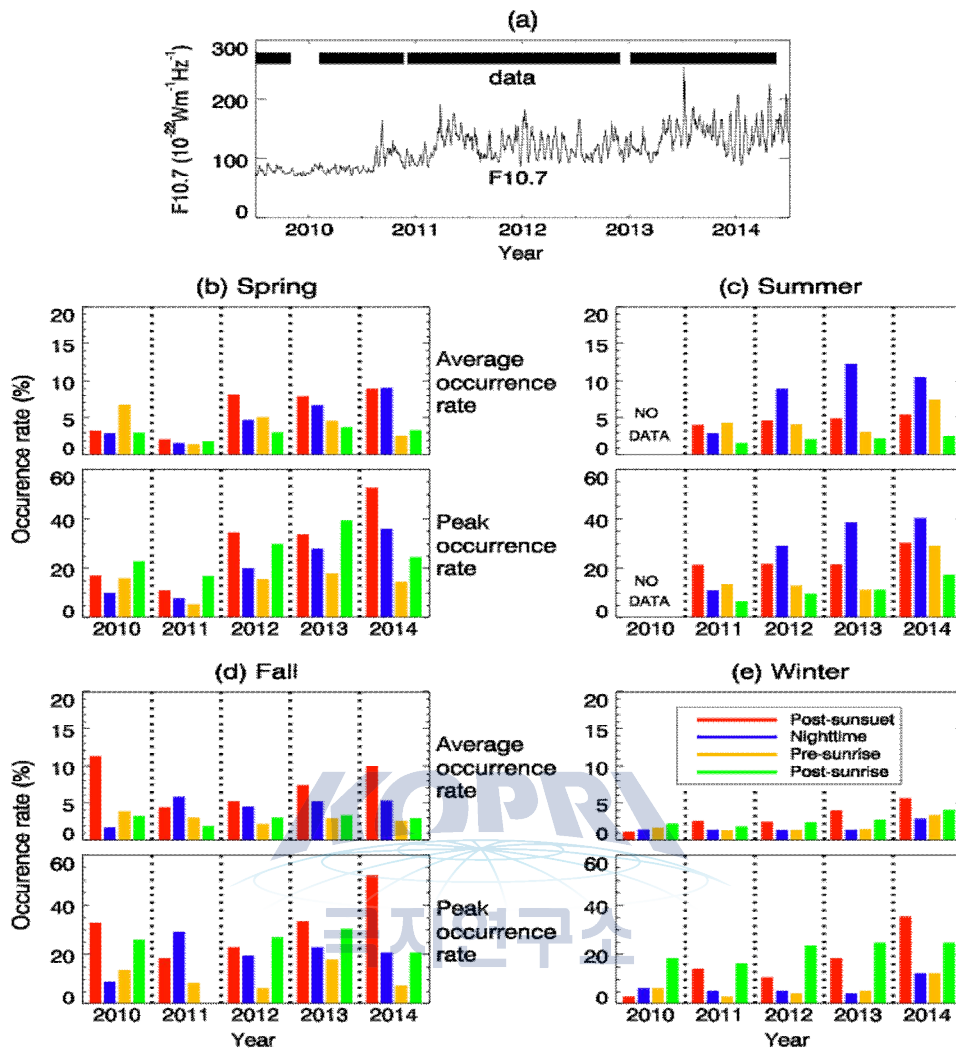


그림 4 태양활동에 따른 F층 FAI 발생빈도 변화. (a) F10.7 index. (b) 봄철 년도에 따른 F층 FAI 발생빈도. 각 시간대의 자료는 다른 색으로 구분하였다. (c-e) 여름, 가을, 겨울에 대해서 그림4b와 같은 양식. [Yang et al., 2015]

FAI 발생빈도의 태양활동과의 관계를 조사하기 위해서 그림 3에 표시한 4개의 시간대의 자료를 각 년도마다 구별해서 그림4에 보여주었다. 발생확률은 각 시간대의 평균값과 최대값에 대해서 따로 그렸다. 시간대 마다 약간의 차이가 있고 또 년도에 따른 변화가 크지 않은 경우도 있지만 전체적으로 태양활동이 증가함에 따라 FAI 발생빈도가 증가하는 추세이다. 이 결과는 이제까지 통상적으로 알고 있는 중위도 지방의 FAI 발생빈도와는 차이가 있다. 즉, FAI가 태양활동 극소기일 때 가장 자주 나타난다고 알고 있었는데 대전 레이다 관측 결과는 그렇지 않다는 것을 보여준다. 이 결과가 중요한 이유는 태양활동에

따른 변화가 FAI의 원인을 찾는 데 단서를 제공해 줄 수 있기 때문이다. 중위도 지방에서 TID 발생빈도가 태양극소기의 여름철에 가장 높다고 알려져 있었고 FAI의 발생빈도도 이와 비슷하다고 이해되고 있었기 때문에 TID가 FAI의 주된 원인이라고 생각돼 왔다. 하지만 대전 레이더 관측 결과는 TID로 설명되지 않는다. E 층의 sporadic E가 더 중요한 원인이라고 생각할 수 있는데 앞으로 이에 대한 연구를 진행할 계획이다.



제 4절 자기폭풍 (2015년 3월 17일)시 발생한 거대한 전자밀도 감소 현상의 원인

지자기 폭풍 시 전리권에서 가장 눈에 띄는 현상중의 하나가 적도지역 전리권에 나타나는 broad plasma depletion (BPD) 현상이다 [Basu et al., 2001; Burke et al., 2000; Greenspan et al., 1991; Huang et al., 2011; Kil and Paxton, 2006; Kil and Lee, 2013; Kil et al., 2006; Lee et al., 2014; Su et al., 2002].. 이 현상이 적도지역에서 빈번히 발생하는 플라즈마 버블과 구별되는 이유는 그 크기가 버블보다 훨씬 크다는 것과 주로 큰 지자기 폭풍 때 나타난다는 사실이다. 참고로 버블은 지자기 폭풍과 상관없이 나타난다.

BPD가 어떤 현상인지에 대한 가설은 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 가장 자주 언급되는 설명은 전리권의 들림이다[Basu et al., 2001; Greenspan et al., 1991; Kil and Lee, 2013; Lee et al., 2014; Su et al., 2002]. 지자기 폭풍 시 penetration electric field에 의해서 전리권이 위성의 고도보다 높은 곳으로 들렸을 경우 위성관측에 BPD로 나타난다는 설명이다. 이에 반해서, 작은 버블들이 시간이 지나면서 서로 연결되면 BPD로 나타날 수 있고 [Huang et al., 2011; Kil and Paxton, 2006]. [Burke et al., 2000] 하나의 버블 자체가 BPD처럼 크게 발달할 수 있다는[Burke et al., 2000] 설명도 있다.

본 연구는 2015년 3월17일 지자기 폭풍기간에 나타난 위성관측자료를 이용해서 BPD의 발생원인을 조사했다. 다행히 BPD가 관측된 지역에서 여러 위성이 관측자료를 제공해서 BPD의 원인에 대한 심도있는 조사를 할 수 있었다. 세계의 다른 지역에서 BPD가 관측이 되었는데 그림5는 150°E근방에서 Swarm위성으로 관측된 BPD를 보여준다. DMSP F18/SSUSI (그림 5a, 5b) 이미지에 는 흔히 볼수 있는 하나의 버블이150°-160°E에 나타난다. 그런데 이 버블지역을 지나 는 Swarm위성에는 거대한 크기의 밀도감소가 나타나는데 (그림5d, 5e), 이 중에서 "D"로 표시한 구조를 BPD라고 할 수 있겠다. 그 BPD가 관측된 장소에서 DMSP관측자료는 (그림 5c) 플라즈마의 강한 상승운동이 있었음을 보여준다. C/NOFS 관측자료는 그림 5g에 있는데BPD가 관측된 지역에서 여러개의 버블이 발생했음을 보여준다. 특이한 점은Swarm에서 관측된것 같은BPD가 C/NOFS관측에는 나타나지 않는다는 것이다. 이에 대한 이해를 하기위해서는 버블의 구조와 위성의 궤도를 고려해야 한다.

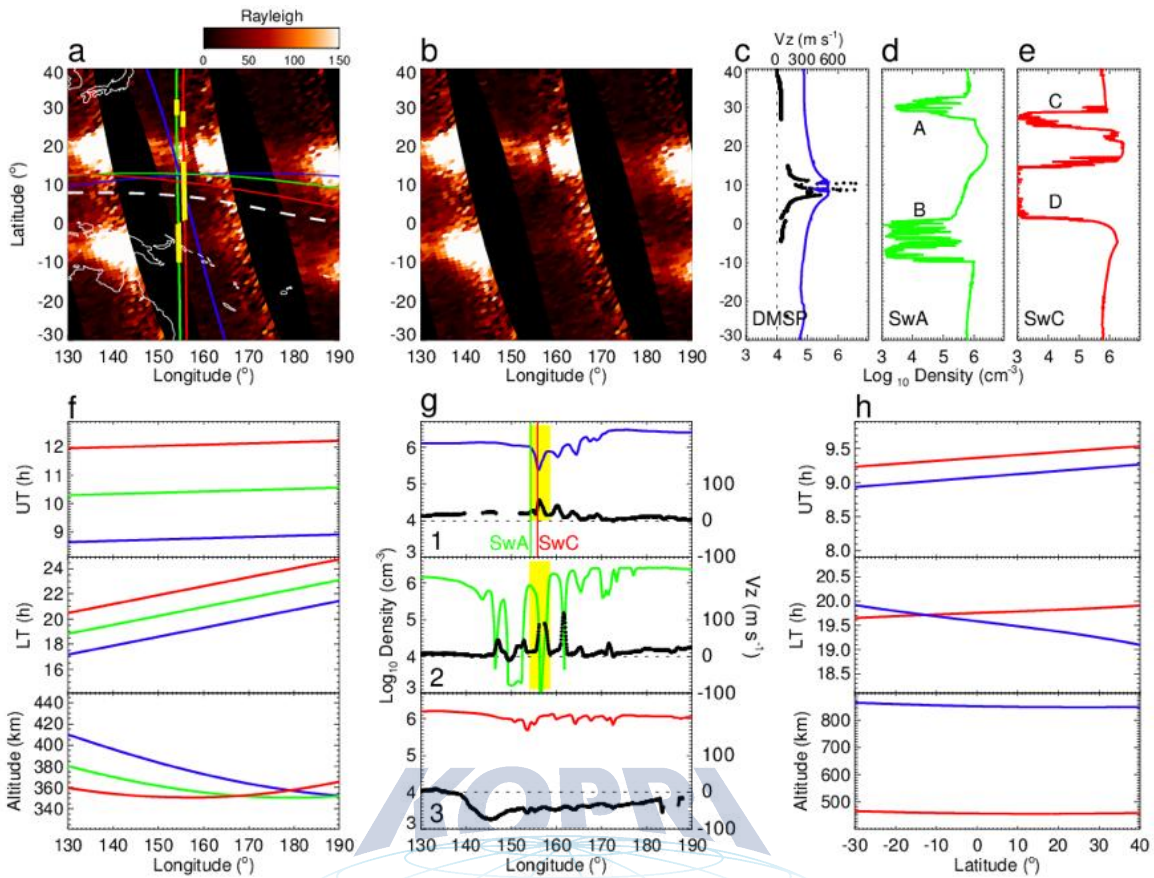


그림 5 130°-190°E 에서의DMSP F18, Swarm, 그리고 C/NOFS 관측. (a) DMSP/SSUSI OI 135.6 nm 이미지와 위성의 궤도. (b) SSUSI OI 135.6 nm 이미지. (c-e) F18, SwA, 그리고 SwC에서 관측한 플라즈마 밀도. F18으로 관측한 이온의 상승 속도는 검은 점으로 표시했다. (f) C/NOFS 궤도정보. (g) C/NOFS로 관측된 전자밀도 (파랑, 연두, 빨간색)와 이온의 상승속도 (검은점). (h) F18 과 SwC 궤도정보. [Kil et al., 2016]

전리권 구조와 버블의 형태가 위성의 궤도에 따라 어떻게 다르게 보일 수 있는지를 그림 6의 다이어그램을 이용해서 설명하였다. 어떤 이유로 전리권의 높이가 그림 6a처럼 변화가 생겼고 녹색선 높이로 위성이 적도지방을 동서로 지나간다고 가정하였다. 빨간선은 F층의 바닥의 높이를 의미하고 왼쪽 그림은 버블이 없을 때 가운데 그림은 버블이 있을 때를 상정했다. 위성의 높이에서 예상되는 전자밀도를 그림 6b에 보여준다. 버블이 없을 때는 밀도가 점차적으로 변하지만 버블이 있으면 밀도가 갑자기 급격히 변하게 된다. 남북방향으로 진행하는 위성이 남북방향과 기울어진 버블을 관측했을 때의 전자밀도를 그림6c에 보여줬다. 위성이 어느 한 시간에 버블 전체를 관측하는 것이 아니고 시간에 따라서 버블의 다른 지역을 관측한다. 버블 1에서 위성의 궤도가 빨간 화살표

방향일지라도 버블에서 봤을 때는 위성이 녹색화살표처럼 전리권을 관측하는 것처럼 보인다는 것이다. 버블2는 위성을 따라가면서 버블을 봤을 때 똑바로 남북방향으로 발달한 버블이라도 기울어진 버블처럼 보인다는 것을 보여준다. 버블1에서는 버블이 남북방향으로 대칭적이지만 버블2에서는 비대칭적이다. 이 다이어그램은 그림5d-e에서 왜 버블이 남북방향으로 비대칭적인지 설명한다.

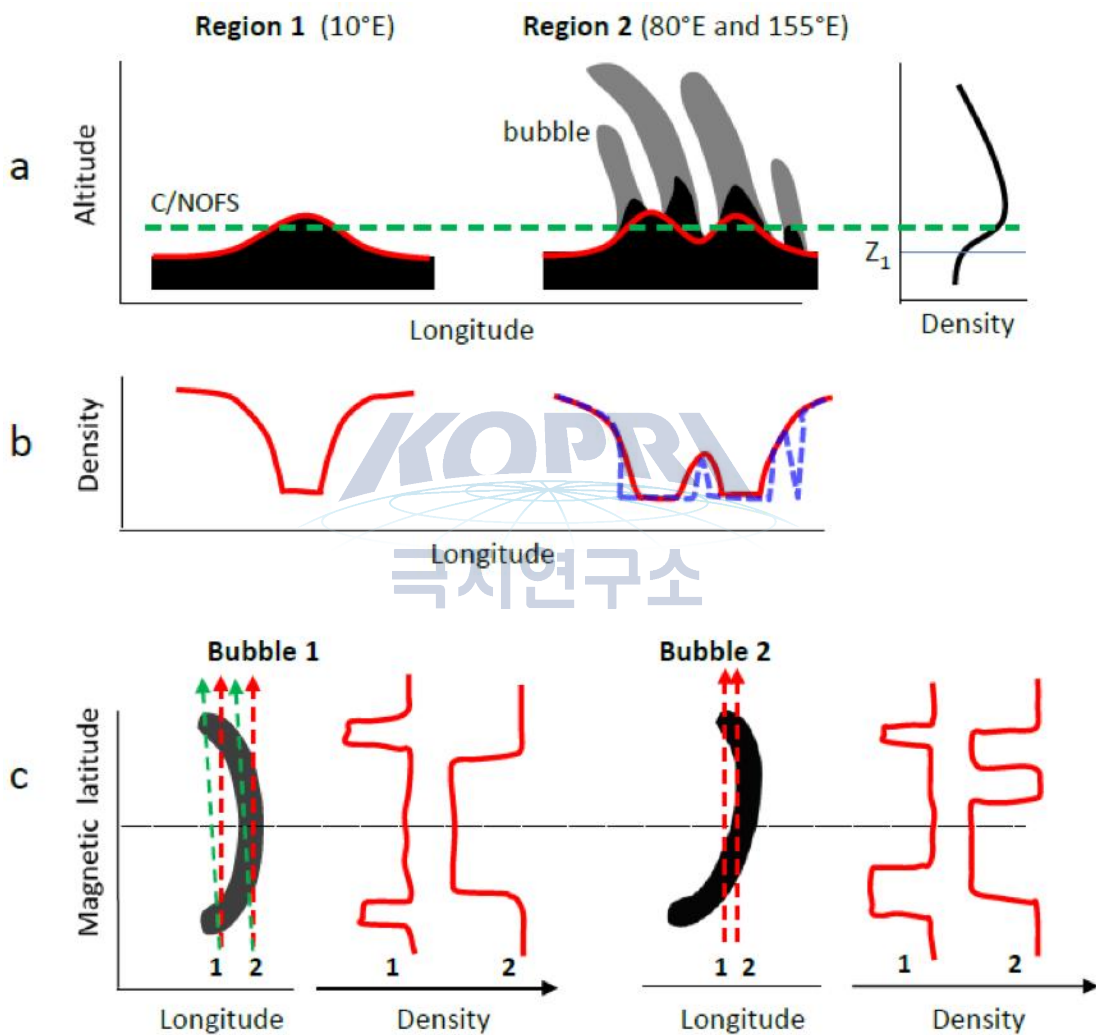


그림 6 전리권의 변화와 위성 궤도에 따른 BPD 현상 설명. (a) 버블이 없는 상태에서 전리권 높이 변동 (Region 1)과 버블이 있는 상태에서의 전리권 높이변동 (Region 2). 빨간선들은 오른쪽의 전자밀도 프로파일에서 F층 바닥높이 (Z_1)를 나타낸다. (b) 가상의 C/NOFS 위성 고도에서의 전자. Region 2에서 버블이 없을 때는 빨간선과 같은 밀도를 보여줄 텐데 버블이 있음으로 해서 파란선으로 그린것 처럼 가파른 밀도경사가 나타난다. (c) 위성의 궤도가 버블과 나란할 때 그리고 버블이 기울어졌을 때 위성에 나타나는 버블의 모습. [Kil et al., 2016]

제 5 절 시리즈로 나타나는 플라즈마 버블의 물리적 의미 분석

적도지방에서 버블이 생성되기 위해서 꼭 필요한 두 가지 요소가 있다. 하나는 F층 바닥에 요동 (perturbation)이 있어서 전리권을 불안정하게 해야 하고 또 하나는 그 요동이 성장을 해야한다. 버블의 성장 조건은 모델계산을 통해서 살펴볼 수 있는 반면 F층 바닥에 요동이 존재하는지 존재한다면 그 특성이 무엇인지에 대한 정보를 얻기는 극히 어렵다. 그 이유는 F층 바닥의 관측이 힘들기 때문이다. 이런 어려움 때문에 버블이 나타나는 형태를 보고 F층 바닥에서 나타나는 요동의 특성을 알아보려는 노력이 있어왔다[Hysell et al., 2005, Kelley et al., 1981; Kim et al., 2002; Singh et al., 1997; Thampi et al., 2009; Tsunoda and White, 1981; Tulası Ram et al., 2014]. 즉, 버블이 주기적으로 나타난다면 버블과 버블사이의 간격이 중량파와 같은 파동형태의 요동의 파장을 나타낸다는 것이다. 그동안 버블간격은 레이더, 전천카메라, 위성, 그리고 GPS 관측자료를 이용해서 조사해 왔다. 표1은 다른 연구자들의 여러 관측방법으로 얻은 결과를 보여준다. 버블 간격이 50 부터 1000 km까지 굉장히 넓은 분포를 보여주는데, 이 결과는 과연 대표성이 있는 버블간격이 존재할까 하는 의문을 제기하게 한다. 그전 연구들은 얼마나 자주 주기성을 가진 버블이 나타나는지 그리고 그 주기성이 얼마나 공통적이나 하는 질문들에 대한 답을 제시하지 못했다. Huang et al. [2013]은 C/NOFS위성으로 관측된 몇 개의 주기적 특성을 보이는 버블들을 보여주고 이 현상을 중량파와 연관지어서 설명하였다. 하지만 이들의 연구는 눈으로 보이는 큰 버블들의 간격을 보고 정성적인 해석을 했으며 정량적 분석은 하지 않았다. 우리의 조사에 의하면 주기적 버블이라고 보여준 예들이 정량적 분석을 해보면 주기적이라고 주장하기 힘들었다. 그 이유는 버블이 나타나는 형태는 복수의 파동의 조합이기 때문에 대표성 있는 파동으로 특정지을 수 없다는 것이다. 본 연구는 이러한 특성을 통계적 분석으로 보여주고자 한다.

통계분석을 위해서 2008-2012년 동안 C/NOFS위성이 관측한 전자밀도 자료를 사용하였다. 먼저 시리즈로 일어나는 버블들을 20-60° 경도구간으로 나누었고 각 구간의 데이터에 대해서 Lomb-Scargle periodogram [Lomb, 1976; Scargle, 1982]을 얻었다. 전체 664개의 시리즈 버블을 얻었는데 이 시리즈들은 주로 $\pm 10^\circ$ 자기위도와 400-500 km 고도 구간에 나타났다.

그림7은 서로 다른 세 개의 버블이 나타나는 양상을 보여준다. 그림7a는 촘촘한 간격으로 나타나는 버블들을 보여주고 이 시리즈로부터 얻은 periodogram은 오른쪽에 있다. Periodogram안의 빨간색 점선은 신뢰도 95%를 나타내고 노란색 지역은 파워가 이 신뢰도 위에 있는 주기들을 나타낸다. 가로축의 period는 지자기 경도로 버블과 버블사이의 1°간격은 110km에 해당한다. Periodogram이 보여주는 것은 1-4° 파장의 조합으로 좌측에 보여준 버블들의 공간분포를 설명할 수 있다는 것이다. 그림7b에 보여준 샘플은 그림7a샘플과 대조하기 위해서 선택했다. 그림7b 샘플에서는 버블들이 그룹으로 나타나고 그룹간의 간격이 크다. 이러한 특성은 오른쪽의 periodogram에서 파워가 큰 주기에서 나타나는 것으로 설명이 된다. 위의 두 샘플들은 주기성이 짧은 파장과 긴 파장대에 집중적으로 나타나는 좀 예외적인 경우라고 볼 수 있다. 이런 양상으로 버블들이 자주 나타난다면 이들의 주기성이 일관성이 있고 이것이 가지는 물리적 의미를 생각해 볼 수 있겠지만 대부분의 경우에는 짧은 파장과 긴 파장의 특성이 섞여서 나타나난다. 보다 일반적으로 볼 수 있는 버블이 나타나는 양태를 보여주는 예가 그림7c이다. 눈으로 확인할 수 있는 것처럼 버블 간격이 짧은지 긴지를 단정적으로 말하기 어렵다. 이 시리즈 구간 중 어느 구간을 보느냐에 따라 버블 간격이 다르다. 오른쪽의 periodogram에 여러 주기에서 파워가 크게 나타나는데 이러한 특성은 버블간격이 다양하다는 것을 말한다. 이 결과는 버블간격이 임의적 혹은 불규칙하다는 의미이기도 하다.

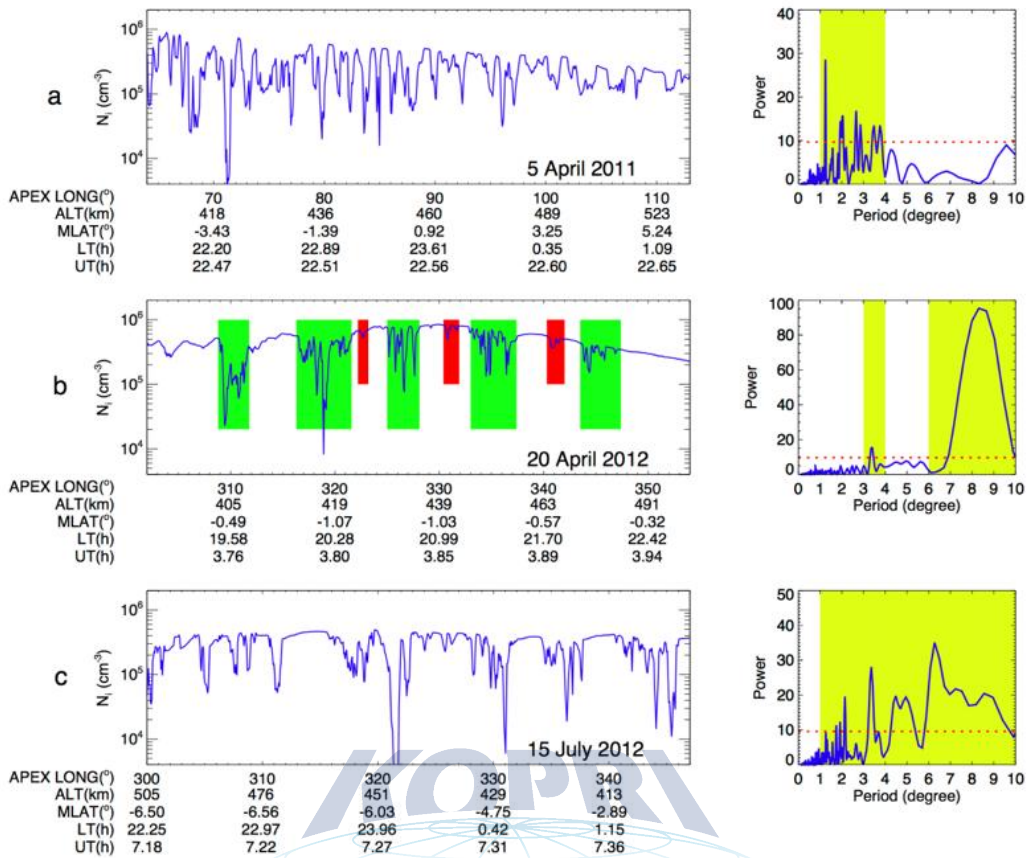


그림 7 시리즈로 나타나는 버블 샘플들과 periodograms. Periodogram 안의 빨간 점선은 95% 신뢰도를 나타내고 노란색 그늘 구간은 파워가 95% 신뢰도보다 큰 주기를 표시한다. [Choi et al., 2016]

어느 구간에서 시리즈로 나타나는 버블이 주기성이 있느냐 없느냐는 대표성을 띄는 주기의 갯수로 판단할 수 있다. 즉, 대표성 주기 숫자가 적다면 버블간격이 규칙성을 가진다고 볼 수 있고, 반대로 대표성 주기 숫자가 많다면 버블간격이 다양함을 의미하기 때문에 버블이 나타나는 양상이 불규칙함을 의미한다고 해석할 수 있다. 대표성 주기의 기준으로 주기를 1°간격으로 나눴을 때 간 주기안의 평균파워가 95% 신뢰도보다 큰 경우로 정하였다. 대표주기 갯수가 그림7a의 경우 3개, 그림7b의 경우 5개, 그리고 그림7c의 경우에 9개이다.

664개 시리즈로부터 얻은 대표주기수 분포를 그림8a에 보여주었다. 검은색 막대그림은 전체 데이터에 대해서 얻은 결과이고, 경도에 따라서 분포가 다른지를 살펴보기 위해서 두 경도지역 데이터에서 얻은 결과는 녹색과 빨간색 막대바로 보여주었다. 이 결과가 보여주는

것은 버블이 나타나는 양상은 (혹은 버블 간격은) 뚜렷하게 특정 주기로 대표되지 않는다는 것이다. 그림8b는 두 경도구간에서 대표주기의 백분을 분포를 보여준다. 두 경도 지역에서 시리즈 버블이 나타나는 빈도는 크게 다르지만 대표주기수의 분포는 큰 차이가 없다. 빨간 점 데이터를 예로 들어 설명하자면, 약 5%의 샘플이 0-1°의 대표주기를 가지고 있고 1-9°사이의 대표주기는 60% 이상의 샘플에서 볼 수 있다는 것이다. 다시 말하면, 1-9°사이의 대표주기는 어느 버블 시리즈에서나 흔히 볼 수 있다는 것이다. 좀 더 분명하게 버블의 주기성을 설명해주는 것은 그림8c가 보여주는 것처럼 시리즈 버블에서의 대표주기 숫자이다. 앞에서 설명한 것처럼 숫자가 적으면 적을수록 주기적이라는 것을 의미한다. 그림8c는 대부분의 시리즈에서 대표주기 숫자가 6개 이상임을 의미한다. 즉, 버블 간격은 6개 이상의 주기로 대표되기 때문에 시리즈 버블이 어떤 파동 특성을 가지고 있다고 특정 짓기 어렵다는 것이다. 이런 결과들로부터 주기성을 가진 버블은 극히 예외적인 경우이고 이 주기성이 우연한 것일 수도 있기 때문에 물리적 의미를 부여하는데 주의해야 한다는 결론이다.

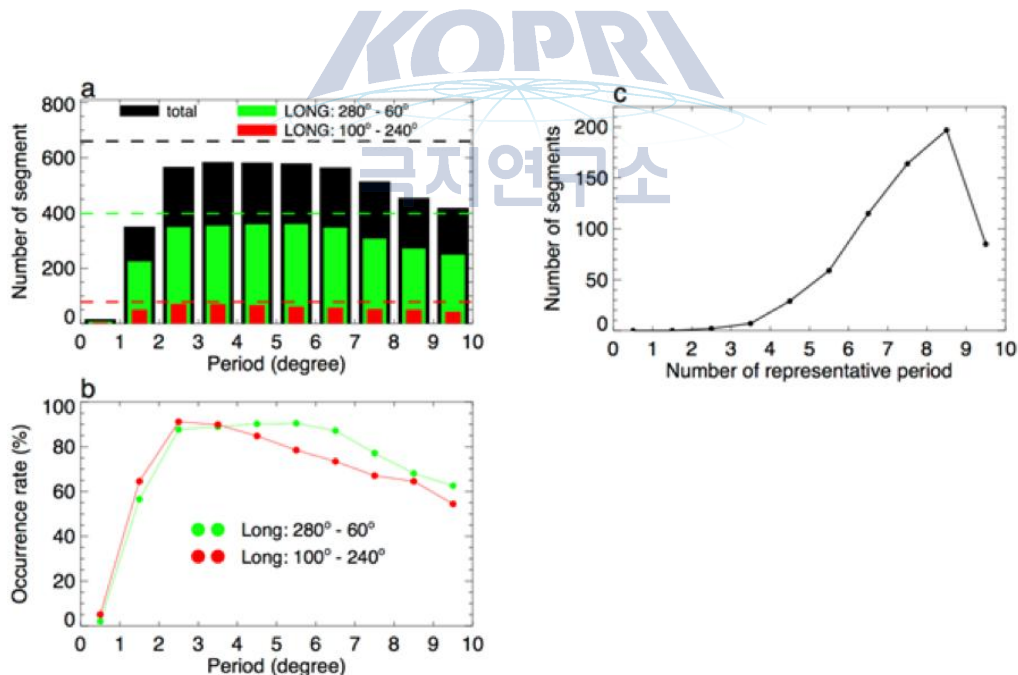


그림 8 (a) 대표주기의 분포. 검은 막대바는 전체 데이터에 대한 분포이고 두 경도지역에 대한 분포는 녹색과 빨간색 바로 구별하였다. (b) 두 경도 지역에서 대표주기의 백분을 분포 (c) 각 시리즈버블 구간에서의 대표주기수 분포. [Choi et al.,2016]

버블이 나타나는 양상으로부터 F층 바닥의 중량파 특성을 찾기 위해서는 버블이 중량파의 어느 특정 위치에서만 나타난다는 가정이 성립해야한다. 그림9의 이상적인 상황은 버블이 중량파의 마디에서만 하나씩 발달한다는 가정을 하였다. 이 경우 버블의 간격은 중량파의 파장과 정확히 일치하기 때문에 버블간격으로부터 바로 중량파의 특성을 알 수 있다. 하지만 실제의 경우, 버블은 마디의 위치에서만 발달하지 않으며, 어느 마디에서는 버블이 생성되지 않을 수도 있고, 버블이 위성의 위치까지 도달하지 않을 수 있고, 버블이 항상 똑바로 발달하는 것이 아니며, 버블이 진화하면서 여러 개로 나눌 수도 있고 하기 때문에 버블이 나타나는 양상으로부터 중량파의 특성을 찾기는 극히 어려운 일이라고 보인다.

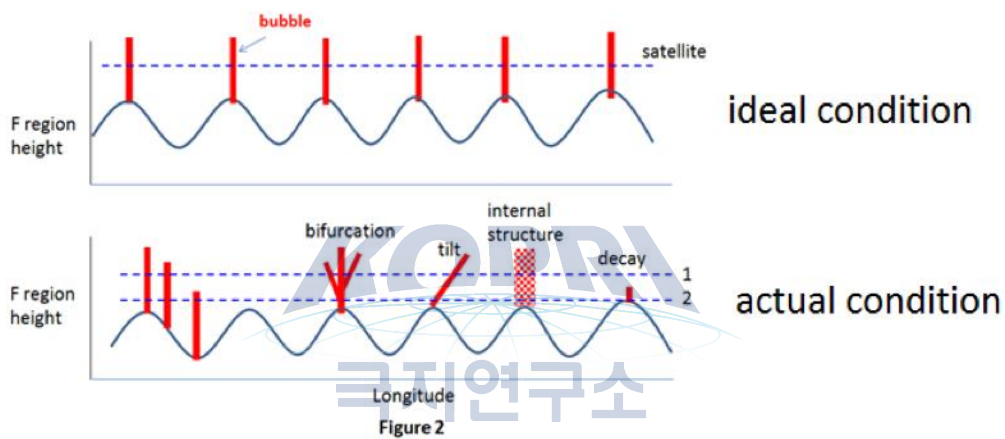


그림 9 중량파와 버블과의 관계 다이어그램. 이상적인 상황은 버블이 중량파의 마디에서만 하나씩 발달함을 가정하였다. 이 경우 버블간의 간격은 바로 중량파의 파장을 나타낸다. 실제의 경우 버블은 중량파의 마디에서만 하나씩 발달하지 않기 때문에 버블이 나타나는 양상으로부터 중량파의 특성에 관한 정보를 얻기는 어렵다.

표 1. 과거 연구들의 버블간격 조사

ID	Bubble spacing (km)	Technique	Observation year	Authors
1	201-640	Trans-equatorial HF propagation	1971	<i>Röttger</i> [1973]
2	~ 680	JRO incoherent scatter radar	1979	<i>Kelley et al.</i> [1981]
3	~ 400	ALTAIR incoherent scatter radar	1979	<i>Tsunoda & White</i> [1981]
4	~ 50	JRO coherent scatter radar	1984	<i>Hysell et al.</i> [1990]
5	~ 130	ALTAIR incoherent scatter radar	1990	<i>Huang et al.</i> [1993]
6	~ 200	ALTAIR incoherent scatter radar	2004	<i>Hysell et al.</i> [2006]
7	370-1000	Sumatra coherent scatter radar	2004	<i>Fukao et al.</i> [2006]
8	150-770	Sanya coherent scatter radar	2011	<i>Li et al.</i> [2012]
9	150-800	AE-E satellite	1976-1981	<i>Singh et al.</i> [1997]
10	~ 100	AE-E satellite	1976-1979	<i>Hei et al.</i> [2005]
11	350-630	Taiyo satellite	1975	<i>Oya et al.</i> [1982]
12	500-1000	C/NOFS satellite	2012	<i>Huang et al.</i> [2013]
13	100-300	All-sky imager at Cariri	2005	<i>Takahashi et al.</i> [2009]
14	100-500	All-sky imager at CTIO	2009	<i>Makela et al.</i> [2010]
15	100-550	GPS TEC	2011	<i>Buhari et al.</i> [2014]

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

2년 동안 (2015, 2016) 극지연 과제의 지원 하에 총 4편의 연구 논문이 Journal of Geophysical Research에 출판되었고 그 결과들이 국제 컨퍼런스에서 발표되었다. 우주과학 분야 최상위 저널에 출판된 것은 연구 결과들의 우수함과 중요성을 증명한 것으로 판단할 수 있다. 본 연구과제 기간 동안 관측 자료와 시간의 부족으로 마무리되지 못한 결과들은 2017년에 출판할 계획이다. 한국의 극지연구원과 천문우주연구원 그리고 미국과 일본의 기관들과 공동연구를 통하여 결과를 얻었으며, 이런 공동연구 성과들은 극지연구소가 전리권/고층대기 분야의 전문성을 가진 기관으로 국내외적으로 인식되는데 기여하리라 생각된다. 아래는 본 과제의 지원 하에 출판된 페이퍼들이다

1. Choi, J.-M., H. Kil, Y.-S. Kwak, J. Park, W. K. Lee, and Y. H. Kim (2016), Periodicity in the occurrence of equatorial plasma bubbles derived from the C/NOFS observations in 2008-2012, J. Geophys. Res. Space Physics, 121, doi:10.1002/2016JA023528.
2. Kil, H., W. K. Lee, L. J. Paxton, M. R. Hairston, and G. Jee (2016), Equatorial broad plasma depletions associated with the evening prereversal enhancement and plasma bubbles during the 17 March 2015 storm, J. Geophys. Res. Space Physics, 121, doi:10.1002/2016JA023335.
3. Kil, H., E. S. Miller, G. Jee, Y.-S. Kwak, Y. Zhang, and M. Nishioka (2016), Comment on "The night when the auroral and equatorial ionospheres converged" by Martinis, C., J. Baumgardner, M. Mendillo, J. Wroten, A. Coster, and L. Paxton, J. Geophys. Res., 121, 10,599-10,607, doi:10.1002/2016JA022662.
4. Yang, T.-Y., Y.-S. Kwak, H. Kil, Y.-S. Lee, W.-K. Lee, and J.-J. Lee (2015), Occurrence climatology of F region field-aligned irregularities in middle latitudes seen by a 40.8 MHz coherent scatter radar at Daejeon in South

Korea, J. Geophys. Res., 120, 10.107-10.115, doi:10.1002/2015JA021885.



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

전리권 전자밀도 분포와 전자밀도 불규칙성의 특성과 원인에 대한 연구는 계속될 것이며 본 과제를 통해 얻은 결과들을 앞으로의 연구 방향을 정하는데 활용할 것이다. 전자밀도 불규칙성의 발생빈도와 원인에 대한 연구 결과를 바탕으로 극지에서 현재 그리고 미래에 관측하는 결과들과 한반도에서 얻는 관측자료를 같이 사용해서 고위도의 전리권/고층대기로 외부의 에너지가 어떻게 유입되고 이 에너지가 중-저위도로 어떻게 퍼져나가는지에 대한 조사를 계속할 계획이다. 한반도와 같은 중위도 지방에서 약하지만 전리권에 전자밀도 불규칙성이 자주 나타나는데 그 원인은 아직 잘 알지 못한다. 특히 북한과 대치하고 있는 한국의 상황에서는 통신이나 항법 시스템의 문제가 전리권의 변화뿐만 아니라 북한의 전파방해로 발생할 수도 있기 때문에 전리권의 상태에 대한 정확한 정보를 필요로 한다. 현재 중위도 지방에서 전자밀도의 불규칙성이 나타나는 이유가 고위도 지방에서 일어나는 열권의 변화가 저위도 지방으로 TID형태로 전파되면서 형성되는 것으로 이해되고 있지만 TID가 없을 때에도 불규칙성이 나타나기 때문에 다른 기작, 예를 들면, E층에서 일어나는 sporadic E현상, 과의 관련성의 연구가 필요하다. 우리의 연구결과들은 이런 연구들에 활용할 계획이다.

KOPRI
극지연구소

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

Swarm위성자료가 전리권 연구자들에게 각광을 받고 있는데 한 가지 이유는 일반 사람들이 데이터를 쉽게 인터넷을 통해 받을 수 있기 때문이며 또 다른 이유는 현재 유일하게 400-550km 고도대에서 3대의 위성이 전리권 데이터를 제공하기 때문이다. Swarm 데이터를 이용해서 전리권 전자밀도 분포와 불규칙성의 발생에 대한 연구가 활발히 수행되고 있고, 외국의 연구자들이 유럽의 EISCAT 레이더와 Swarm 관측을 연계해서 하는 연구들을 계획하고 있다. 본 연구 책임자와 극지연구소 연구자도 이런 연구에 동참할 계획이다. 2016년 12월에 극지연구소와 천문연구소가 EISCAT레이더를 사용할 수 있는 시간을 얻었으며 JHU/APL의 DMSP/SSUSI 가 EISCAT를 가까이 지나는 기간의 레이더 데이터를 얻었다. 이 데이터를 이용해서 고위도로 유입되는 에너지를 계산하는데 사용할 계획이다.

전자밀도 불규칙성은 미국 NASA의 Living With a Star (LWS) 프로그램이 2016년에 선정한 4가지의 Focused Science Topic중의 하나인데 본 과제가 수행했던 연구들이 이와 관련돼 있다. 극지연구소의 관측 장비들에서 얻은 전리권과 고층대기 관측 자료들에 대한 외국 연구자들의 관심이 높아지리라 예상되며, 이 자료들은 국제적 공동연구와 데이터를 공유하는데 크게 도움이 되리라 생각된다.

제 7 장 참고문헌

- Basu, S., et al. (2001), Ionospheric effects of major magnetic storms during the International Space Weather Period of September and October 1999: GPS observations, VHF/UHF scintillations, and in situ density structures at middle and equatorial latitudes, *J. Geophys. Res.*, 106 (A12), 30,389-30,413, doi:10.1029/2001JA001116.
- Burke, W. J., A. G. Rubin, N. C. Maynard, L. C. Gentile, P. J. Sultan, F. J. Rich, O. de La Beaujardiere, C. Y. Huang, and G. R. Wilson (2000), Ionospheric disturbances observed by DMSP at middle to low latitudes during the magnetic storm of June 4-6, 1991, *J. Geophys. Res.*, 105(A8), 18,391-18,405, doi:10.1029/1999JA000188.
- Choi, J.-M., H. Kil, Y.-S. Kwak, J. Park, W. K. Lee, and Y. H. Kim (2016), Periodicity in the occurrence of equatorial plasma bubbles derived from the C/NOFS observations in 2008-2012, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, doi:10.1002/2016JA023528.
- Greenspan, M. E., C. E. Rasmussen, W. J. Burke, and M. A. Abdu (1991), Equatorial density depletions observed at 840 km during the great magnetic storm of March 1989, *J. Geophys. Res.*, 96(A8), 13931-13942, doi:10.1029/91JA01264.
- Huang, C.-S., O. de La Beaujardiere, P. A. Roddy, D. E. Hunton, R. F. Pfaff, C. E. Valladares, and J. O. Ballenthin (2011), Evolution of equatorial ionospheric plasma bubbles and formation of broad plasma depletions measured by the C/NOFS satellite during deep solar minimum, *J. Geophys. Res.*, 116, A03309, doi:10.1029/2010JA015982. C. -S., O. de La Beaujardiere, P. A. Roddy, D. E. Hunton, J. O. Ballenthin, M. R. Hairston, and R. F. Pfaff (2013), Large-scale quasiperiodic plasma bubbles: C/NOFS observations and causal mechanism, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 118, 3602-3612, doi:10.1002/jgra.50338.
- Hysell, D. L., E. Kudeki, and J. L. Chau (2005), Possible ionospheric preconditioning by shear flow leading to equatorial spread F, *Ann. Geophys.*, 23, 2647-2655, doi:10.5194/angeo-23-2647-2005.
- Kelley, M. C., M. F. Larsen, C. LaHoz, and J. P. McClure (1981), Gravity wave initiation of equatorial spread F: A case study, *J. Geophys. Res.*, 86(A11), 9087-9100, doi:10.1029/JA086iA11p09087.
- Kil, H., and L. J. Paxton (2006), Ionospheric disturbances during the magnetic storm of 15 July 2000: Role of the fountain effect and plasma bubbles for the formation of large equatorial plasma density depletions, *J. Geophys. Res.*, 111, A12311, doi:10.1029/2006JA011742. H., and W. K. Lee (2013), Are plasma bubbles a prerequisite for the formation of broad plasma depletions in the equatorial F region?, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 3491-3495, doi:10.1002/grl.50693.
- Kil, H., W. K. Lee, L. J. Paxton, M. R. Hairston, and G. Jee (2016), Equatorial

- broad plasma depletions associated with the evening prereversal enhancement and plasma bubbles during the 17 March 2015 storm, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, doi:10.1002/2016JA023335.
- Kil, H., E. S. Miller, G. Jee, Y.-S. Kwak, Y. Zhang, and M. Nishioka (2016), Comment on "The night when the auroral and equatorial ionospheres converged" by Martinis, C., J. Baumgardner, M. Mendillo, J. Wroten, A. Coster, and L. Paxton, *J. Geophys. Res.*, 121, 10,599-10,607, doi:10.1002/2016JA022662.
- Kim, Y. H., S. S. Hong, J. L. Weinberg, and F (2002), Equatorial spread F found in 5577 Hz and 6300 Hz airglow observations from Hawaii, *J. Geophys. Res.*, 107(A9), 1264, doi:doi:10.1029/2001JA009232.
- W. K., H. Kil, L. J. Paxton, Y. S. Kwak, Y. Zhang, I. Galkin, and I. S. Batista (2014), Equatorial broad plasma depletions associated with the enhanced fountain effect, *J. Geophys. Res.*, 119, 402-410, doi:10.1002/2013JA019137.
- Lomb, N. R. (1976), Least-squares frequency analysis of unequally spaced data, *Astrophys. Space Sci.*, 39, 447-462.
- Martinis, C., J. Baumgardner, M. Mendillo, J. Wroten, A. Coster, and L. Paxton (2015), The night when the auroral and equatorial ionospheres converged, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 120, 8085-8095, doi:10.1002/2015JA021555.
- Scargle, J. D. (1982), Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data, *Astrophys. J.*, 263, 835-853.
- Su, S.-Y., H. C. Yeh, C. K. Chao, and R. A. Heelis (2002), Observation of a large density dropout across the magnetic field at 600 km altitude during the 6-7 April 2000 magnetic storm, *J. Geophys. Res.*, 107(A11), 1404, doi:10.1029/2001JA007552.
- S. V., M. Yamamoto, R. T. Tsunoda, Y. Otsuka, T. Tsugawa, J. Uemoto, and M. Ishii (2009), First observations of large-scale wave structure and equatorial spread F using CERTO radio beacon on the C/NOFS satellite, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L18111, doi:10.1029/2009GL039887.
- R. T., and B. R. White (1981), On the generation and growth of equatorial backscatter plumes 1. Wave structure in the bottomside F layer, *J. Geophys. Res.*, 86(A5), 3610-3616, doi:10.1029/JA086iA05p03610.
- Ram, S., M. Yamamoto, R. T. Tsunoda, H. D. Chau, T. L. Hoang, B. Damtie, M. Wassaie, C. Y. Yatini, T. Manik, and T. Tsugawa (2014), Characteristics of large-scale wave structure observed from African and Southeast Asian longitudinal sectors, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 2288-2297, doi:10.1002/2013JA019712.
- Yang, T.-Y., Y.-S. Kwak, H. Kil, Y.-S. Lee, W.-K. Lee, and J.-J. Lee (2015), Occurrence climatology of F region field-aligned irregularities in middle latitudes seen by a 40.8 MHz coherent scatter radar at Daejeon in South Korea, *J. Geophys. Res.*, 120, 10,107-10,115, doi:10.1002/2015JA021885.



주 의

1. 이 보고서는 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서 시행한 연구 결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원 부설 극지연구소에서 시행한 위탁연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.