

자기권-전리권 연구

Study of magnetosphere-ionosphere



경희대학교산학협력단

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “우주환경과 극지저층대기에서 유입되는 에너지에 의한 극지고층 대기변화 규명”과제의 위탁연구“자기권-전리권 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.



(본과제) 총괄연구책임자	: 지 건 화
위탁연구기관명	: 경희대학교
위탁연구책임자	: 김 관 혁
위탁참여연구원	: 권 종 우
“	: 신 재 혁
“	: 박 재 희
“	: 김 기 정

## 보고서 초록

위탁연구과제명	자기권-전리권 연구				
위탁연구책임자	김관혁	해당단계 참여연구원수	4	해당단계 연구비	150,000,000 원
연구기관명 및 소속부서명	경희대학교(국제캠퍼스) 우주과학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자이내)				보고서 면수	
<p>과학 분야: 자기권 플라즈마 파동의 전리권 전파과정 이해</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 내부 자기권에서의 전자기이온회전(electromagnetic ion cyclotron: EMIC) 파동 발생지역 및 파동 특성 조사. 서브오로라 위도 지역 Athabasca 지상관측소 자료를 이용한 자기권 플라즈마 파동의 전리권 전파 특성 연구: EMIC 파동 주파수의 지방 시 의존성을 통계 자료 분석을 통해 관측하였으며 이러한 EMIC 파동 주파수의 지방시 의존성은 지구로부터 플라즈마권계면 거리의 지방시에 따른 불균일성에 의한 것으로 제안.</li> <li>• 독일 Neumayer 남극기지 자기장 자료와 전리권 NOAA 위성 입자 자료, Swarm 위성 자기장 자료, 자기권 RBSP 위성 자기장, 입자 자료를 이용한 자기권-전리권 파동 에너지 전달과정 조사: 고에너지 입자와 EMIC 파동의 상호작용 현상 관측</li> <li>• 장보고기지-독일 Neumayer 남극기지-세종기지 서치코일 자기장 측정기 자료를 이용한 EMIC 파동 전리권 전파 특성 연구: Neumayer 기지에서 가장 강한 세기로 관측된 EMIC 파동은 전리권을 따라 전파되어 고위도 장보고 기지와 저위도 세종기지에서 같은 주파수 대역의 파동으로 관측되었다. Swarm 전리권 위성의 자기장 자료를 분석하여 지상관측 EMIC 파동의 주기와 위성 관측 EMIC 파동 주기의 차이를 확인하였으며 원인으로서는 위성 궤도 운동에 의한 도플러 효과가 제안됨.</li> <li>• 전리권 Swarm 위성 자기장 자료를 이용하여 전리권 자기장 섭동 특성을 조사함.</li> </ul> <p>기술 분야: 지상용 우주환경 서치코일 자기장 측정기 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 2기의 서치코일 자기장 측정기를 개발하여 독일 Neumayer 남극기지와 세종기지에 설치.</li> <li>• 개발된 자기장 측정기는 현재 운영 중</li> </ul>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	전자기이온회전파동, 전리권, 자기권, 플라즈마 파동, 서치코일 자기장 측정기			
	영 어	Electromagnetic ion cyclotron wave, ionosphere, magnetosphere, plasma wave, search coil magnetometer			

# 요 약 문

## I. 제 목

자기권-전리권 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

자기권 EMIC 플라즈마 파동의 전리권 전파과정 이해 및 지상용 우주환경 서치코일 자기장 측정기 개발

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 남극 지상 자료와 전리권/자기권 위성 자료를 이용한 자기권 EMIC 플라즈마 파동의 전리권 전파과정 이해
- 지상용 우주환경 서치코일 자기장 측정기 개발

## IV. 연구개발결과

- 내부 자기권 EMIC 플라즈마 파동 발생 지역 및 특성 이해
- 자기권 EMIC 파동의 지상 전파 관측 장비 “서치코일 자기장 측정기” 개발
- 개발된 자기장 측정기 독일 Neumayer 남극기지, 세종기지 설치 및 운영

## V. 연구개발결과의 활용계획

- 자기장 측정기 자료를 이용한 남극 우주환경 자기장 관측 네트워크 구축
- 서치코일 자기장 측정기 원천기술 확보 및 근지구 우주탐사에 활용

# S U M M A R Y

## I. Title

Study of magnetosphere-ionosphere

## II. Purpose and Necessity of R&D

Understanding how EMIC plasma waves generated in the magnetosphere propagate to the ionosphere and developing ground-based search coil magnetometer to detect magnetospheric EMIC plasma waves on the ground

## III. Contents and Extent of R&D

- Study of ionospheric propagation of magnetospheric EMIC plasma waves using the magnetic field data obtained from antarctic stations and ionospheric satellite
- Development of ground-based search coil magnetometer

## IV. R&D Results

- Understanding where and how EMIC plasma waves are generated and their properties
- Developing search coil magnetometers to detect magnetospheric EMIC plasma waves on the ground.
- Search coil magnetometers are installed at Neumayer and Sejong antarctic stations.

## V. Application Plans of R&D Results

- Buil a network monitoring antarctic magnetic field variations using magnetometers
- Having core technology to produce search coil magnetometer and contribute to space technology for space mission

# 목 차

제 1 장 서론

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 6 장 참고문헌



# 제 1 장 서 론

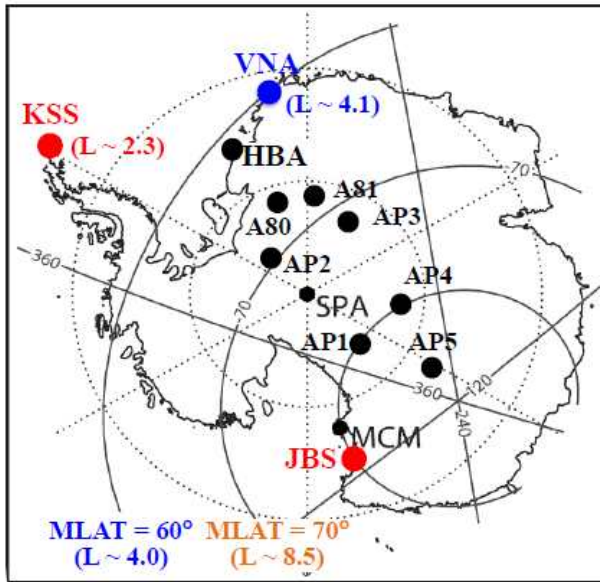
## 제 1 절 연구개발의 목적

본 과제에서는 자기권 EMIC 플라즈마 파동이 어디서 발생했으며 어떻게 전리권-지상으로 전파되는지 파동 에너지의 "자기권-전리권-지상" 전달과정 이해를 목적으로 한다. 또한 지구 자기권에서 발생한 EMIC 플라즈마 파동을 지상에서 관측하기 위해 우주핵심기술 중의 하나인 "지상용 우주환경 서치코일 자기장 측정기"를 개발하고 남극 독일 Neumayer 기지와 세종기지에 설치 운영을 목적으로 한다.

## 제 2 절 연구과제의 필요성

"경희대학교 우주탐사학과"에서는 "자기권-극지 전리권 연동계" 물리량 변화 연구를 위해 2015-2016년 극지연구소 위탁과제를 수행하여 국내 최초로 우주환경 플라즈마파동 관측을 위한 지상용 서치코일 자기장 측정기를 개발하였다. "지상용 우주환경 서치코일 자기장 측정기"는 장보고기지 (JBS, 그림 1 참조)에 2016년 12월 설치하여 2017년 1월부터 자기장 측정기 장비를 운영하고 있다. 지구 자기권에서 물리적 변화는 태양풍 변화와 연동되어 시·공간적 자기장 및 플라즈마의 공간적 비균일성 의해 다양한 종류의 파동 형태로 자기권에서 발생한다. 이러한 자기권 기원 파동들은 지구 자기력선을 따라 전리권에 전달되므로 태양풍-자기권-전리권 에너지 전달과정 규명을 위해 파동 발생 메카니즘과 파동의 전파 특성 규명이 중요한 연구대상이 되고 있다.

단일 관측지점에서 얻어진 자료만을 이용하여 "자기권 우주환경 변화가 어떻게 지구 전리층으로 전달되는가?"를 규명하기에는 상당히 어려움이 있다. 이러한 이유로 미국-영국 등 우주 선진국에서는 남극기지에 다수의 서치코일 자기장 측정기 장비를 설치하여 (그림 1에서 검은색 원으로 표시) 플라즈마 파동의 자기권-전리권 연동 연구 즉 파동의 발생 및 전파과정 연구를 수행하고 있다. 비록 다중 관측소의 지상 자료만을 이용하지만 여러 지역에서 측정된 파동의 크기 변화와 파동의 극성 변화 등을 비교하여 우주 공간의 어느 지역에서 플라즈마 파동이 발생했는지 알 수 있다.



**장보고과학기지 (JBS): Polar cap boundary.**

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

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

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

그림 1: 자기권-전리권 연동 연구를 위해 남극대륙에서 운용되고 우주환경 관측기지.

본 위탁과제에서는 이전 과제수행으로 확보된 자기장 측정기 원천기술을 이용하여 3년의 연구 기간 (2017-2019) 동안 2기의 “지상용 우주환경 서치코일 자기장 측정기”를 개발하였으며, 개발된 장비는 플라즈마권계면 근처에 위치한 독일의 “Neumayer 남극 과학기지 (VNA, L ~ 4.1)”와 극지연구소의 “세종과학기지(KSS, L ~ 2,3)”에 설치하여 다중관측소(JBS-VNA-KSS)/다중장비를 이용한 자기권-전리권 연동 현상 연구수행을 하고있다. 본 과제는 자기장 측정기 개발과 함께 개발된 장비를 이용하여 수행되어질 수 있는 자기권 플라즈마 파동의 특성 연구를 병행하여 연구 과제 수행을 진행하였다.

**장보고기지(JBS)-Neumayer기지(VNA)-세종기지(KSS) 장비를 이용한 자기권-전리권 플라즈마 파동 연동연구:** 플라즈마 파동을 관측하는 서치코일 자기장 측정 장비는 제작하는 기관에 따라 장비 특성이 조금씩 차이가 있어 관측된 파동의 절대적 세기를 여러 기관에서 제작된 관측 장비를 통하여 결정할 수 없다. 이러한 단점을 보완하기 위해 한 기관에서 여러 장비를 만들어 관측망을 구축하여 극 우주환경을 연구하고 있다 (그림 1 참조). 그림 2에서 나타난 것처럼 극지연구소에서 장보고기지 (JBS), 세종기지 (KSS), 그리고 독일의 Neumayer (VNA)기지에 설치된 서치코일 장비를 운영하고 있어 플라즈마 파동의 발생지역과 발생원으로부터 남쪽의 내부자기권 지역 북쪽의 극관 경계지역 (polar cap boundary)까지의 넓은 영역에 대한 자기권 플라즈마 파동 발생 및 전달과정 연구를 수행 할 수 있다. 이러한 자료는 다른 연구기관에서도 중요한 자료로 사용될 수 있어 국제 공동연구에 크게 기여할 것으로 생각된다.



## 플라즈마 파동에 의한 자기권-전리권 연동

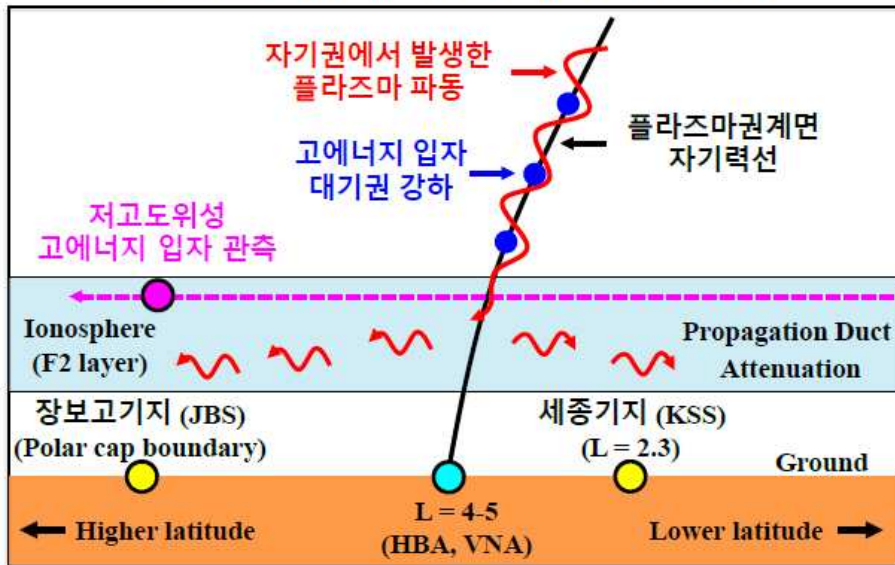


그림 2: 지구자기권 플라즈마권계면 근처에서 발생한 플라즈마 파동의 전리권 전달

**독일 “Neumayer (VNA)기지”의 지리적 중요성:** 플라즈마권계면 (plasmopause)은 우주환경이 극고요한 시기와 격변 시기를 제외하면 일반적으로 지구반경의 약 4-5배 ( $L \sim 4-5$ ) 지역에 위치하고 있다 (그림 3 참조). 이론적으로 자기권에서 발생한 플라즈마 파동은 특정한 시·공간적 우주환경 물리량 변화 시 발생한다고 알려져 있고 특히 지구 자기장 및 플라즈마 분포의 공간적 변화가 심한 곳에서 잘 발생한다고 한다. 이러한 이유로 지구 자기권 내부에 존재하는 플라즈마권계면 지역이 파동 발생 선호 지역으로 제안되고 있다. 원지점이  $L > 8$ 에 위치한 위성들은 궤도운영 특성상 플라즈마권계면 지역에서 오래 머물지 못하고 순간적으로 통과하기에 플라즈마 파동 발생의 공간적 분포에서 플라즈마권계면 지역이 파동 발생빈도가 적어 최근 연구에서는 플라즈마권계면 근처 지역이 발생 원 지역에서 배제되고 있다. 파동 발생에 대한 이론적 제안과 위성 관측 결과의 불일치성에 대한 문제 제기가 본 연구책임자 그룹에서 2015-2016 위탁과제 수행으로 국제학술지에 제안되어 졌고 플라즈마 파동의 이벤트 연구와 통계적 연구를 통하여 플라즈마권계면에 대한 중요성을 강조하였다.

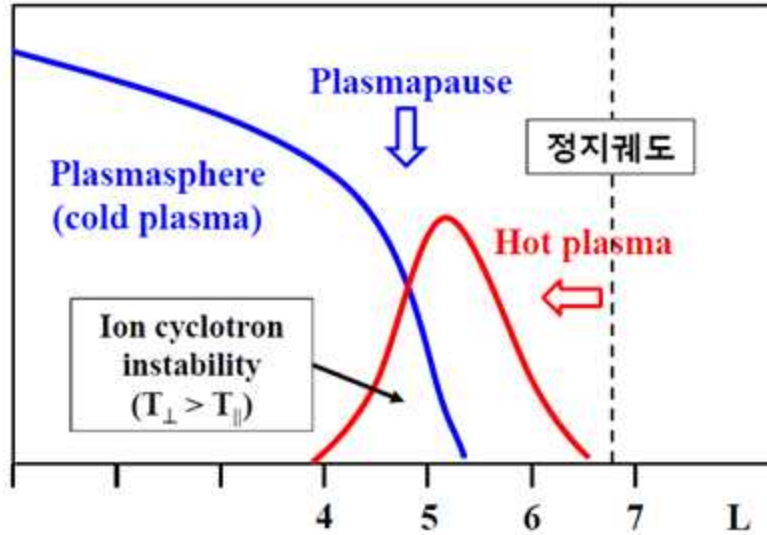


그림 3: 플라즈마권계면과 고온 플라즈마 비등방성 공간분포

현재 남극에서 유일하게 영국이 운영하는 Halley 관측소 (HBA)가 플라즈마권계면 근처에 위치하고 있으며 (그림 1 참조) 서치코일 자기장 측정 장비를 이용하여 플라즈마 파동 연구를 수행하고 있다. 본 과제 수행으로 개발된 서치코일 자기장 측정 장비가 지방시적으로 HBA 관측소와 약간 떨어진 플라즈마권계면 근처의 VNA 관측소에서 운영된다면 자기권 플라즈마 파동 발생 및 전파에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다.

**국제협력의 중요성:** 플라즈마 파동은 수 mHz의 극초저주파수 (ULF) 파동과 달리 발생 지역이 공간적으로 상당히 제한되어 있어 플라즈마 파동에 의한 자기권-전리권 연동 연구를 위해 파동 발생원 근처에 다수의 관측소가 요구되어진다. 독일에서 운영하고 있는 Neumayor (VNA) 관측소는 플라즈마권계면 근처에 위치하고 있으나 현재 서치코일 장비가 없어 플라즈마 파동 연구를 수행하고 있지 않다. 극지연구소에서 서치코일 장비를 제공하면 독일 VNA 관측소는 장비 관리 및 운영을 위한 예산을 지원할 예정이다. 현재 자기권-전리권 연동 연구는 여러 국가 (미국, 유럽, 일본, 중국 등)의 남/북극 관측소에서 운영되는 장비 및 관측자료 공유를 통하여 국제 협동 연구로 수행되고 있다. 현재 우리나라는 국제공동연구를 위한 극지 우주환경 관측 장비 및 공유할 자료가 없어 개인적으로 여러 기관의 자료를 받아 연구를 진행하고 있다.

NJIT (New Jersey Institute Technology, 미국) 기관은 현재 미국에서 가장 활발하게 다수의 극기지에서 자기권-전리권 연동연구를 위한 장비를 운영하고 있고

UNH (University of New Hampshire, 미국)는 고정밀 자기장 측정기 개발 기술을 보유하고 있다. 2017-2019년 극지연구소 위탁연구 과제를 수행하여 극지연-경희대-NJIT-VNA-UNH 국제협력체를 구성하고 태양풍-자기권-전리권 연동연구를 수행하면 국제 경쟁력 있는 연구결과가 도출 될 수 있으며 극지연구소의 국제적 위상이 높아질 것으로 기대된다.

### 제 3 절 연구개발 범위

1. 서브오로라 위도 지역의 Athabasca 지상관측소 서치코일 자기장 자료를 이용한 자기권 EMIC 플라즈마 파동 특성 연구: Athabasca ( $L = 4.6$ ) 지역의 자기력선은 지구 자기권 플라즈마권계면 ( $L = \sim 4-5$ ) 근처 지역의 자기력선과 연결되므로 Athabasca 관측소에서 측정된 EMIC 파동의 통계 분석을 통해 다양한 우주환경에서의 파동 발생 빈도 및 파동의 특성 (주기, 극성, 편광 정도)을 조사한다.
2. 독일 Neumayer 남극 기지에 설치된 서치코일 자기장 측정기 자료와 전리권 NOAA 위성 입자 자료, Swarm 위성 자기장 자료, 자기권 RBSP 위성 자기장, 입자 자료를 이용한 자기권-전리권 파동 에너지 전달과정을 조사한다.
3. 장보고기지-독일 Neumayer 남극기지-세종기지 서치코일 자기장 측정기 자료를 이용한 EMIC 파동 전리권 전파 특성 연구: Neumayer 기지에서 가장 강한 세기로 관측된 EMIC 파동은 전리권을 따라 전파되어 고위도 장보고 기지와 저위도 세종기지에서 같은 주파수 대역의 파동으로 관측되었다. 장보고기지와 세종기지에서 관측된 파동의 세기를 Neumayer 관측소 파동 세기와 비교하여 전리권 전파 시 파동의 감쇄를 조사한다. 또한, 전리권 Swarm 위성의 자기장 자료를 지상 자료와 비교 분석하여 전리권에서 지상으로 어떻게 EMIC 파동이 전파되는지 조사한다.
4. 서브스톰 발생 시 저위도 지역에서 관측되는 자기장 섭동과 전리권 자기장 섭동 상관관계 이해를 위해 전리권 Swarm 위성 자기장 자료와 저위도 지상 자기장 자료를 조사한다.
5. 자기권 EMIC 플라즈마 파동은 지구 자기력선을 따라 지상으로 전파되어진다. 이러한 파동을 관측하기 위해 지상 우주환경 서치코일 자기장 측정기를 개발한다.
6. 개발된 우주환경 자기장 측정기를 독일 Neumayer 남극기지와 극지연구소 세

종기지에 설치 운용한다.



## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국내 관련분야 기술개발 현황

1. 우리나라의 우주환경 변화 연구는 여러 국가기관 연구그룹 (극지연구소, 국립전파연구원, 한국천문연구원, 기상청 국가기상 위성센터)에서 수행하고 있으며 국가 차원에서 우주환경에 의한 재난방지 우주환경 예·경보 사업을 진행하고 있다.
2. 극지연구소는 우주환경 변화와 극 지역 전리권/고층대기 연동 현상 및 오로라 활동에 대한 연구에 많은 관심을 가지고 있다. 극지 연구소의 장보고 과학기지는 자기권 극관 지역과 오로라 발생 지역의 경계에 위치하여 다양한 우주환경 관측장비 (서치코일 자기장 측정기, VIPIR, 오로라 이미지 관측 장비, FPI 등) 운영을 하고 있으며 이러한 우주환경 자기권-전리권 관측 장비 자료를 이용하여 태양풍 변화에 의한 지구 자기권-전리권 연동 연구에 활용할 수 있다.
3. 국립전파연구원은 전리권 측정기, 지전류 측정기, 우주환경 자기장 측정기, 태양풍 측정기를 이용하여 태양폭발에 의한 우주전파환경 감시 사업을 수행하고 있으며 NASA 및 NOAA SWPC와 우주환경 관련 국제 협력 사업도 추진 중이다. 최근에는 위성 사업에도 관심을 가지고 있어 지상 우주환경 관측 뿐만 아니라 우주공간에서의 직접 관측을 통해 우주 재난 방지를 위한 우주환경 예·경보 사업을 계획하고 있다.
4. 한국천문연구원도 우주환경 예·경보 센터를 구축하였으며 우주환경 모델 및 관측 자료를 이용하여 우주환경 감시사업을 진행하고 있다. 특히 우주환경 고에너지 입자 기원에 대한 가속 및 유실 연구를 주로 수행하고 있으며 현재 내부 자기권에서 운용 중인 미국 NASA의 Van Allen Probes 위성 자료 수신을 위해 한국천문연구원 본원에서 대형 안테나를 운영 중이다. 또한 보현산 관측소에서 우주환경 자기장 변화를 관측하는 자기장 측정기 장비를 일본으로부터 구매하여 2007년에 설치하여 현재 운영 중이다.
5. 기상청 국가기상 위성센터는 2018년 12월 천리안 위성 2A를 발사하여 현재 한반도 상공 정지궤도에서 운영중에 있다. 천리안 2A 정지궤도 위성에는 우주환경 자기장·입자 탑재체가 실려 있어 한반도 상공에서의 우주 환경 변화를 감시한다. 우주환경 자기장 측정기는 유럽 ESA에서 개발하여 제공하였으며 입자 측정기는 경희대학교 우주탐사학과에서 개발하였다. 입자 측정기의 에너지 관

측 범위가 수 MeV의 전자입자 측정이 가능하여 위성 자료를 파동과 입자의 상호작용 연구에 사용할 수 있으며 입자의 가속 메카니즘 및 유실 연구에 활용될 것으로 기대된다.

6. 근지구 우주환경 분야와 관련된 기초연구는 경북대학교, 경희대학교, 충남대학교, 충북대학교 등에서 수행되고 있다. 경북대학교의 경우 우주환경 변화와 태양활동 상관관계 연구를 진행하고 있으며 충남대학교에서는 주로 전리권 연구를 수행하고 있으며 최근 자기권 전문가를 영입하여 자기권 내에서 입자와 파동 상관관계 연구를 진행하고 있다. 충북대학교는 자기권 내에서의 상대론적 전자 운동학적 특성 연구를 수행하고 있다. 자기권에서의 태양활동에 의한 근지구 우주환경 교란 연구는 본 과제의 주관연구기관에서 가장 활발히 진행하고 있다.
7. 우주환경 기술 분야의 경우 위성용 고에너지 입자측정기는 한국천문연구원, KAIST, 경희대학교 등 국내 우주과학관련 기관 및 대학에서 개발하였다. 한국천문연구원의 경우 SNIPE 큐브셋 저위도 위성 미션을 준비하고 있으며 고에너지 입자 측정기를 탑재하여 오로라 활동 및 전리권 우주환경 변화 연구를 수행할 예정이다. 경희대학교에서는 기상청-항공우주연구원과 공동으로 고에너지 입자 측정기를 개발하였으며 천리안 2A위성에 탑재하여 현재 한반도 정지궤도 상공에서 우주환경 변화를 감시하고 있다. 자기장 측정기의 경우 경희대학교 충북대학교 센서피아 산업체에서 위성 자세제어 및 우주환경 관측을 위해 개발하고 있다.
8. 본 과제에서는 위성용 자기장 측정기 개발의 이전 단계로 지상에서 우주환경 자기장 변화를 측정하는 지상 자기장 측정 장비를 국내 최초로 개발하고 있으며 이 사업을 통하여 축적된 자기장 측정기 원천기술을 이용하여 향후 국내 우주환경 위성사업에 참여하여 위성용 자기장 측정기 장비를 개발할 예정이다.

## 제 2 절 국외 관련분야 기술개발현황

1. 우주선진국에서는 자기권 우주환경 변화의 전파 및 전리권 영향 등을 연구하기 위해 열린 자기장 영역인 극지방에 자기장 측정기를 비롯하여 전리권 관측 레이더 장비 (SuperDARN, EISCAT, PANSY 등), 오로라 관측장비 등의 다수의 지상 관측장비를 운용하고 있다.
2. 남극의 경우 북극에 비해 접근성이 떨어지기 때문에 규모가 큰 레이더 과학장

비 등은 미국, 일본, 유럽 국가의 남극 과학기지에 설치되어 있으며 이를 이용한 국제협력연구가 활발하게 진행되고 있다.

3. 이에 반해 제작 및 설치가 용이한 자기장 측정기는 남극 과학기지뿐만 아니라 그림 1에서와 같이 미국의 주도로 1990년대부터 무인 관측소 형태로도 운영되고 있다. 특히 단일 관측으로는 파동의 발생 및 전파에 대한 연구가 어렵기 때문에 동일한 자기장 측정기가 여러 지역에 설치되어 운용되고 있다.
4. 특히 자기권 우주환경의 급격한 변화에 따라 전리권 상태는 민감하게 반응하기 때문에 여러 장비를 종합적으로 이용한 연동연구가 활발하게 진행되고 있다. 우주선진국들은 이러한 우주환경 관측장비를 직접 개발할 수 있는 원천기술을 확보하고 있다.

### 제 3 절 국·내외 기술개발현황에서 차지하는 위치

1. 과학 분야: 지구 자기권에서의 물리 현상들은 태양 활동과 연계되어 발생하며 섭동된 물리량들은 자기권 지역에서만 한정되지 않고 지구 자기력선을 따라 전리권과 지상으로 전파되어진다. 따라서 “자기권-전리권” 연구는 “태양-지구계” 연동 물리계 이해를 위해 중요한 연구주제이며 국제 근지구 우주환경 물리 커뮤니티에서 많은 관심을 받는 분야이다. 본 과제 연구책임자는 다양한 우주환경에서 자기권-전리권 연동 연구를 수행하였으며 특히 자기권 파동 에너지가 어떻게 전리권으로 전파되며 지상에서 관측되는지 다수의 연구 결과를 국제학술지에 발표하였다. 이전 연구와 달리 본 과제에서는 자기권 파동 에너지가 어디에서 발생되며 어떻게 전리권으로 전파되는지 다중 위성 및 지상 자료를 이용하여 연구를 진행하였다. 현재 우리나라에서는 자기권-전리권·고층대기 연동 연구가 거의 수행되지 않고 있다. 본 연구사업에서 수행된 전리권-자기권 연동 연구는 우리나라 전리권 우주환경 연구에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.
2. 기술 분야: 본 과제에서 개발하는 지상 우주환경 서치코일 자기장 측정기는 다양한 산업 분야에 이용되는 장치이다. 우주 분야의 경우 미세한 자기장 섭동 변화를 측정하여 고주파수 파동 관측연구에 사용되며 국방 분야에서는 수중 물체 감시 및 공격에 사용되는 장비이다. 우리나라는 현재 우주환경 자기장 관측 장비의 원천기술이 선진국에 비해 많이 부족한 상태이며 서치코일 장치를 개발은 극지연구소 사업으로 시작되었다. 본 사업 수행으로 경희대학교 우주탐사학과 대학원생들이 직접 서치코일 자기장 측정기 제작에 참여하였으며 2기를 개발하여 독일 Neumayer 남극기지와 극지연구소 남극 세종과학기지에 설치하여

현재 운영 중에 있다. 기 설치된 극지연구소 남극 장보고 과학기지 서치코일 자료를 이용하여 남극대륙 지구 자기장 섭동을 감시할 수 있는 네트워크 구축이 가능하며 우주환경 연구자들에게 자료를 제공하므로 국제 우주환경 커뮤니티에 기여 할 것으로 기대되며 특히, 본 사업을 통하여 우주환경 지상 자기장 측정기 원천기술 확보를 기대하고 있다.





### 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

#### 제 1 절 서브오로라 지역 지상관측소에서 관측된 자기권 EMIC 플라즈마 파동 특성

##### 1. 연구내용

이전에 수행된 위성 자료를 이용한 통계 연구들은 EMIC Pc1-Pc2 파동이 내부 자기권 ( $L < 6$ )보다 외부 자기권 ( $L > 6$ )에서 자주 발생한다고 보고하였다 (Anderson et al., 1992a, 1992b). 이런 결과는 파동의 발생지역이 외부 자기권에 있음을 의미하나, 이론 연구에 따르면 플라즈마권계면 ( $L \sim 4-5$ )에서의 급격한 밀도변화도 EMIC 파동을 발생 시킬 수 있는 주요한 이유로 제안되고 있다 (Cornwall, 1965; Kennel and Petschek, 1966). EMIC 파동은 지구반경의 약 4-6배 범위의 공간에 퍼져 있는 지구 자기권 방사선대의 상대론적 전자 소멸의 주원인으로 주목받고 있어 고에너지 입자-파동 상호작용의 이해를 위해서는 플라즈마권계면 근처에서의 EMIC 파동 특성 연구가 필요하다. 본 연구에서는 플라즈마권계면의 자기력선 위치의 Athabasca ( $L=4.6$ ) 지상관측소 자료를 이용하여 (그림 4 참조) EMIC Pc1-Pc2 파동 특성 연구를 수행하였으며, 해당 파동이 외부 자기권에서 발생되어 전파된 것이 아닌 해당 지역에서 발생한 것이라는 것을 증명하기 위해 Athabasca 관측소로부터 서쪽으로 지방시 1.5시간 떨어진 곳에 있는 지상정지궤도 위성 GOES 11의 자료를 함께 이용하여 분석하였다 (그림 4 참조).

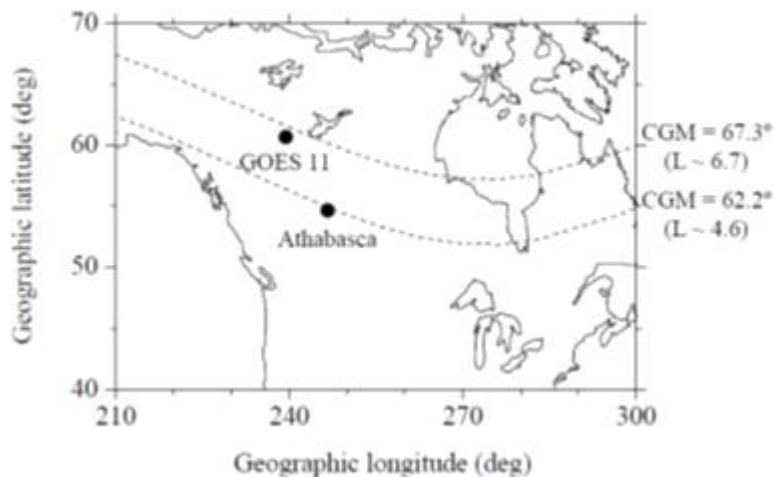


그림 4: Athabasca 관측소 위치 및 GOES 11 위성의 궤점 위치

Athabasca 서치코일 시계열 자료와 스펙트럼 분석을 통해 EMIC Pc1-Pc2 파동을

선정하고 통계분석을 통해 2007-2008년 동안의 파동 특성 (주파수, 세기, 편광 정도, 타원율)을 조사하였다. 그림 5는 2007년 3월 10일 UT 9시 ~ UT 24시의 GOES 11 위성과 Athabasca 관측소 자료의 다이내믹스펙트럼 자료로 각각 (a) GOES 11의 x 성분(MFA 좌표계), (b) Athabasca H 성분, (c) Athabasca D 성분을 나타내며 흰색 선은 GOES 11 자기장 자료를 이용해 구한 헬륨 및 산소 회전주파수(a)와 지구 자기장 쌍극자 모델을 이용해 계산한 헬륨 및 산소 회전주파수(b, c)이다. 해당 시간 범위에서 Athabasca 자료에는 헬륨 밴드 영역 (헬륨 이온 회전주파수와 산소 이온 회전주파수 사이의 주파수 범위)에서 강하게 파동이 나타나는 것을 확인할 수 있으나(그림 5b, 그림 5c), GOES 11에서는 파동 현상이 확인되지 않는다(그림 5a).

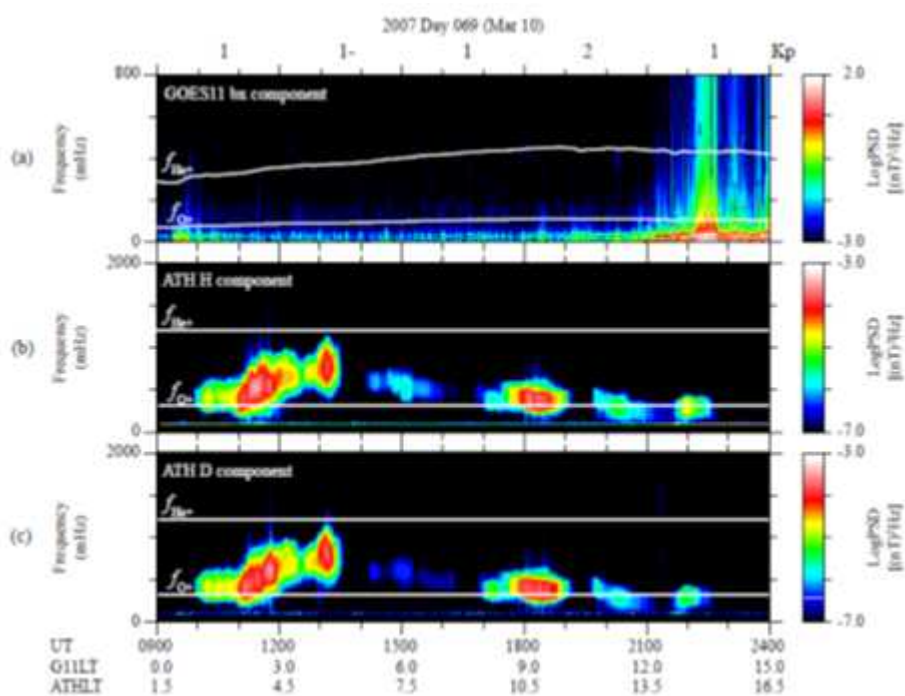


그림 5: 2007년 3월 10일 자료의 다이내믹 스펙트럼 (a) GOES 11 위성 x 성분, (b) Athabasca H 성분, (c) Athabasca D 성분

그림 6은 그림 5에서 보인 시간 중 UT 12:00부터 UT 12:03까지 구간을 고속 푸리에 변환 시켜 주파수에 대한 파동 특성을 그린 것이다. 그림 6a의 검은 점은 H 성분과 D 성분의 세기를 합한 값 (PSD H+PSD D)이 가장 큰 주파수를 표시한 것이며, 그림 6b, 그림 6c의 검은 점은 해당 주파수에서 각 파동 특성의 값을 표시한 것이다. 이러한 주파수를 피크 주파수로 정의하고, 피크 주파수에서의 세기가  $2.4 \times 10^{-8} \text{ (nT)}^2 \text{ Hz}$  이상인 경우 파동이 발생한 것이라고 정의했다. 해당 파동은 10분 이상 지속되어야 의미 있는 것으로 정의하였다. 정의된 피크 주파수 하나는 3분 시간 간격을 의미하므로 연속 4개 이상의 피크 주파수가 연달아 정의돼야 EMIC Pc1-Pc2 파동인 것으로 여긴다. 이러한 방법으로 정의한 이벤트에 대해 통계분석을 실시하였

다.

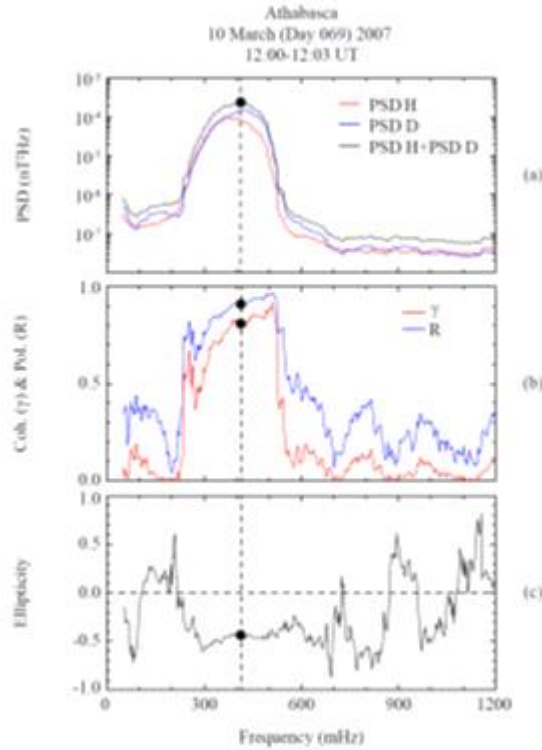


그림 6: 2007년 3월 10일 UT 12:00 - 12:03의 파동 특성 그래프

## 2. 연구결과

그림 7은 위와 같은 방법으로 그림 5에서 보인 시간에 관해 파동 특성을 표시한 그림이다. 그림 7a의 빨간색 원은 해당 시간에서 매 3분마다 정의되는 피크 주파수를 표시한 것이고 위아래로 선을 그리듯 일정한 검은색 점은 헬륨과 산소 이온 회전주파수이다. 해당 구간 내의 대부분의 이벤트들이 헬륨 밴드 영역에 있는 것을 확인할 수 있다. 그림 7b는 파동 세기를 나타내는 그래프이며 가로 점선으로 최소 세기 조건을 표시하고 있다. 해당 세기 이하의 이벤트들은 조건 미만족으로 이벤트 목록에서 제외됐다. 그림 7c는 편광 정도 (파란색 원), 코히런스 (빨간색 원)이며 코히런스가 높은 경우에만 파동 특성의 정의가 의미가 있는 값이 돼 코히런스가 0.7 초과인 경우에만 편광 정도와 타원을 들을 구해 분석하였다. 그림 7d는 파동의 타원을 코히런스 조건이 0.7 초과인 이벤트만 표시되어 있으며 해당 간격에선 모두 음수 값을 나타내므로 왼손법칙을 따르는 편광이다.

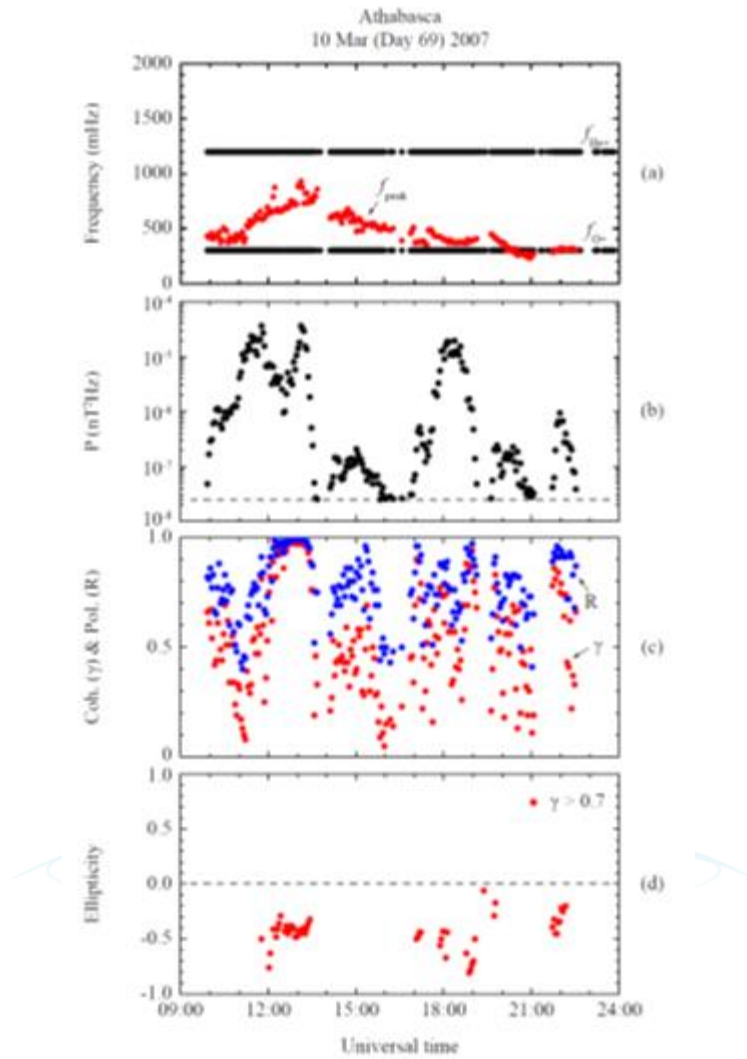


그림 7: 2007년 3월 10일 UT 09:00 - UT 24:00 파동 특성 그래프

그림 8은 위와 같은 방법으로 2007-2008년 전체 시간에 걸쳐서 GOES 11과 Athabasca 자기장 자료에서 정의한 파동의 주파수를 UT에 따라 그린 것이고 UT 아래에는 GOES 11과 Athabasca의 지방시가 각각 표시되어 있다. 두 개의 두꺼운 빨간색 선은  $L = 4.6$  지역에서 모델 자기장 값을 이용한 헬륨 이온과 산소 이온의 회전주파수이다. 통계 분석을 위해 1시간 지방비 내에 분포한 값들의 중간값을 파란 원으로 표시했고, 파란색 수직선은 분산 정도를 표시하는 25%, 75% 사분위값이다. GOES 11에서는 총 12113개의 이벤트, Athabasca에서는 10494개의 이벤트가 정의됐다.

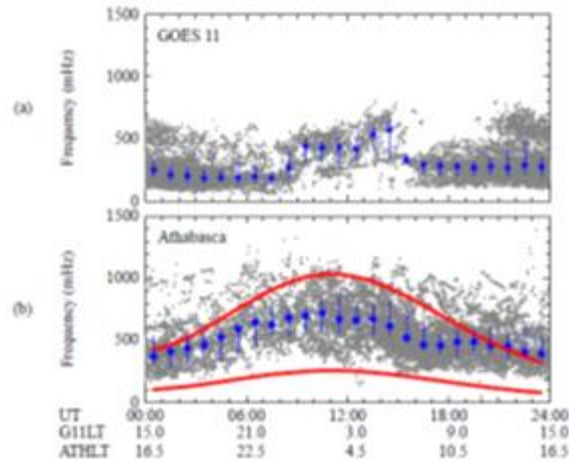


그림 8: GOES 11과 Athabasca EMIC Pc1-Pc2 파동의 UT-주파수 분포

그림 8a에서 GOES 11 이벤트는 UT 00시부터 UT 9시까지의 구간에서 주파수 중간값의 변화가 거의 없으나 그림 8b에서 Athabasca 이벤트는 서서히 증가하였다. Athabasca에서는 대부분의 이벤트가 헬륨 이온 회전주파수와 산소 이온 회전주파수 사이에 있는 헬륨 밴드에서 나타났으나, GOES 11 위성에서는 헬륨 이온 회전주파수 이상의 주파수 (양성자 밴드)에서도 파동이 나타나고, 그림 7a에서도 400-500 mHz를 기준으로 위쪽 (양성자 밴드)과 아래쪽 (헬륨 밴드)가 구분되는 것을 확인할 수 있다. 이는 이전 연구의 예상과도 일치하는 경향이다 (Kim et al., 2016). 그림 9는 Athabasca와 GOES 11에서 동시에 관측된 이벤트의 주파수를 함께 표시한 것이고 총 972개 (Athabasca 이벤트의 약 9%)의 이벤트 포인트가 정의됐다. 대부분의 주파수 구간에서, GOES 11에서의 주파수가 Athabasca보다 적은 것을 확인할 수 있으며 이러한 결과를 통해 Athabasca에서 관측된 이벤트는 L이 더 큰 지역에서 발생한 이벤트와는 별개로 L = 4.6 지역에서 발생한 이벤트라고 제안할 수 있다.

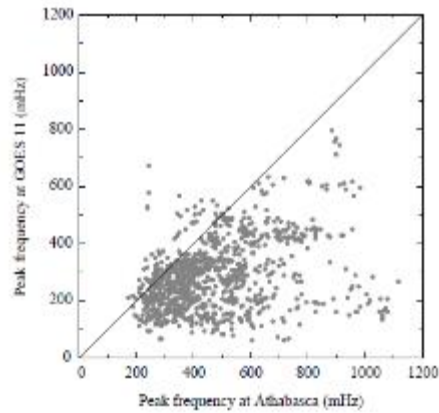


그림 9: Athabasca와 GOES11에서 동시에 관측된 이벤트의 주파수 비교

자기권 섭동 정도는  $K_p$  지수로 표시될 수 있는데  $K_p$  지수가 1 이하인 경우 자기권은 외부 섭동이 없는 고요한 경우에 해당하며  $K_p$  지수가 2 이상인 경우 자기권은 중간 섭동 이상에 해당한다. 그림 9는 이러한  $K_p$  인덱스에 따라 분류한 이벤트들의 지방시별 피크 주파수 변화 그림이다. 파란색 원과 수직선은 각각 1시간 내의 자료들의 중간값과 사분위값이다. 그림 10a-그림 10c은 실제 관측된 피크 주파수이며 그림 10d-그림 10f는  $L = 4.6$ 일 때의 양성자 이온 회전주파수로 정상화시킨 주파수 값이다. 양성자 이온 회전주파수를 구할 때는 쌍극자 지구 자기장 모델로 계산하였다. 그림 10d-그림 10f를 통해 대부분의 이벤트가 헬륨 밴드 이벤트라는 것을 다시 한번 확인할 수 있다.

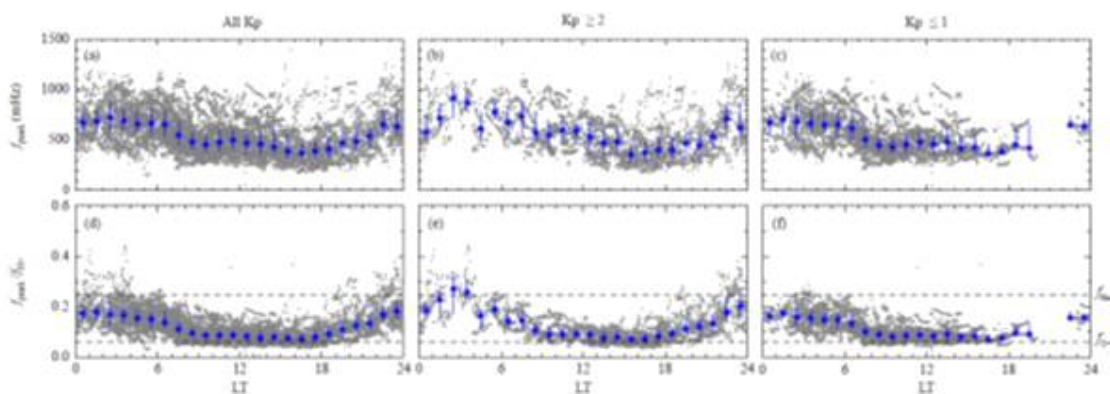


그림 10:  $K_p$  인덱스에 따른 지방시별 피크 주파수 값

이러한 관측은 플라즈마권계면 근처에서 발생한 EMIC Pc1-Pc2 파동들은 수소이온 플라즈마보다 더 무거운 성분으로 이루어진 수소-헬륨-산소 이온 플라즈마에서 발생하였다고 제안될 수 있다.  $K_p$  인덱스를 고려하지 않고 보았을 때 (그림 10a) 흥

미로운 경향은 파동의 주파수가 자정-이른 새벽 지방시에 높고, 늦은 오후 지역에서 낮다는 것이다. 본 연구에서는 이러한 통계적 결과를 플라즈마권계면의 지방시에 대한 비대칭 분포와 상관관계가 있음을 제안하고 있다. 일반적으로 플라즈마권계면은 지방시를 따라 지구로부터 균일한 거리에 분포하지 않고 비대칭적으로 분포하며 만약 Athabasca 관측소에서 측정된 EMIC Pc1-Pc2 파동들이 이른 연구에서 제시된 플라즈마권계면에서 발생되었다면 지구로부터 먼 거리에 위치한 플라즈마권계면 지역은 가까운 지역보다 자기장 세기가 약하므로 낮은 주파수 대역에서 EMIC 파동이 발생한다. 반대로 지구와 가까운 플라즈마권계면 지역 지역에서 발생한 EMIC 파동은 높은 주파수를 가지므로 그림 10에서의 주파수-지방시 의존성은 지방시에 따른 비균일 플라즈마권계면 위치로 설명되어질 수 있다. 또한 그림 10b와 그림 10e의 지방시별 주파수가 그림 10c와 그림 10f와 다른 값을 보이는 것도 Kp 인덱스 값에 따라 플라즈마권계면의 위치가 달라져 나타나는 현상으로 설명할 수 있다. 그림 11은 직접적으로 Kp가 고요할 때 ( $K_p \leq 1$ )와 중간 섭동 이상일 때 ( $K_p \geq 2$ )의 지방시별 주파수를 비교한 그림이며 자정-정오 지역에서 중간 섭동 이상일 때 ( $K_p \geq 2$ ) 주파수가 더 높은 것이 분명하게 보이며, 이는 플라즈마권계면이 보다 위축되 지구 쪽에 가까워져 더 높은 자기장 환경에서 높은 주파수의 EMIC Pc1-Pc2 파동이 발생할 수 있다.

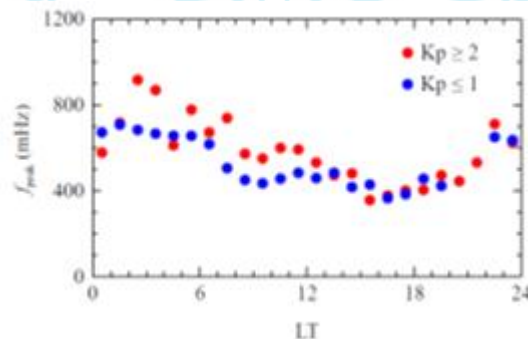


그림 11: Kp가 조용할 때와 그렇지 않을 때의 지방시별 주파수 값 비교

그림 12는 지구 자기권 섭동 정도에 따른 지방시에 대한 이벤트 발생 빈도를 나타낸다. 그림 12a는 각 Kp 정도에 따른 지방시별 센서의 총 관측 시간, 그림 12b는 각 지방시별 정의된 이벤트 숫자, 그림 12c-그림 12e는 Kp 조건에 따라 이벤트 숫자를 관측 시간으로 정상화시킨 발생 빈도이다. “ $K_p \geq 2$ ”인 경우 이벤트들은 오후 지역에서 크게 발생하였으며 이 결과는 플라즈마권계면이 오후 지역에 지구로부터 공간적으로 더 확장되어 있고 EMIC 파동의 발생원인 고에너지 이온들의 표류운동이 자정 지역으로부터 서쪽 방향으로 이동하므로 자연스럽게 오전지역보다 오후지역에서 EMIC 파동이 더 많이 발생되어질 수 있다. 고요한 경우 (“ $K_p \leq 1$ ”)는 발생

빈도가 오후 지역에서 오전-정오 지방시 대역에서 크게 나타난다. 이러한 이유는 고요한 우주환경의 경우 플라즈마권계면이 지구로부터 균일한 거리에 분포하고 있으며 발생 기작은 밤 지역에서 입사된 고에너지 이온보다는 낮 지역에서의 태양풍 동압력이 주원인으로 설명될 수 있다.

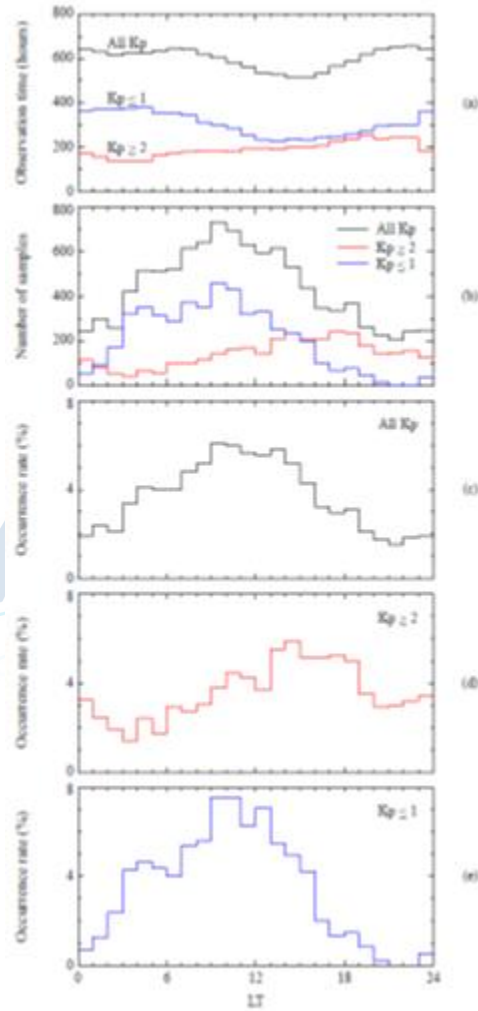


그림 12: Kp에 따른 지방시별 이벤트 발생률

그림 13은 코히런스가 0.7 초과인 경우에 정의되는 타원율을 지방시별로 그린 그림이다. 타원율은 양수일 때 우측 방향 편광, 음수일 때 좌측 방향 편광, 0일 때 선형 편광이라 하는데, Athabasca에서 관측된 이벤트들은 약간 좌측 방향으로 편광된 이벤트가 많지만 전체적으로 고른 편광 분포를 보인다.



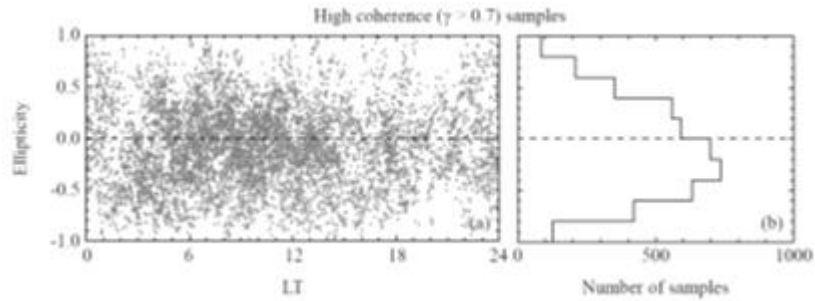


그림 13: Athabasca 이벤트의 타원율

그림 14는 앞서 언급한 플라즈마권계면 위치와 EMIC Pc1-Pc2 파동의 발생주파수 간의 결과를 보인다. 그림 14a는 앞서 보였던 모든 Kp 조건 하에서의 지방시별 피크 주파수 중간값이고 그림 14b는 이전 연구 (Kwon et al., 2015)에서 Kp가 중간 섭동 ( $2 \leq Kp \leq 4$ )일 때 THEMIS 위성을 이용해 정의한 플라즈마권계면의 L값이다. 피크 주파수가 작아질 때 플라즈마권계면 위치가 더 큰 L값이 나타나고, 피크 주파수가 커질 때는 더 작은 L값이 나타나는 현상을 확인할 수 있다. 앞서서 Athabasca에서 관측된 이벤트들이 다른 곳에서 발생한 것이 아닌 Athabasca의 L값 위치에서 발생한 것이 확인되었고, 발생률 분포와 주파수-플라즈마권계면 위치를 본 결과로도 서로 높은 상관관계를 보이므로 해당하는 EMIC Pc1-Pc2 파동이 플라즈마권계면에서 발생한 것이라고 제안할 수 있다.

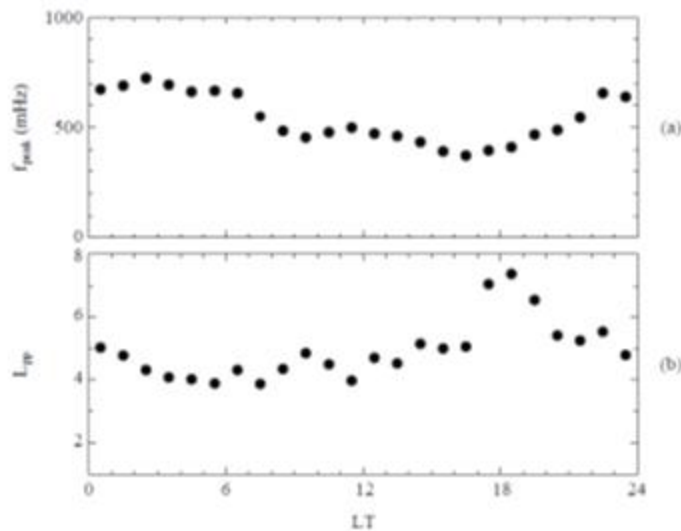


그림 14: 지방시별 Athabasca 주파수 및 플라즈마권계면 위치

## 제 2 절 전리권 Swarm 위성 자기장 자료를 이용한 Pc2 파동 특성

### 1. 연구내용

Swarm 위성은 저고도 극궤도 위성으로, 2013년 11월 22일에 발사되어 이전까지는 없던 고분해능 전리권 자기장 자료를 생성하고 있다. 또한 Swarm은 3대의 위성이 편대를 이뤄 비행하고 있으므로, 전리권 자기장의 시간적, 공간적 변화를 분석하기에 더욱 용이하다. 이런 Swarm 위성 자료를 이용해 다양한 극저주파수 (Ultra Low Frequency: ULF) 파동 연구가 있었으나, Pc2 (주파수 0.1 - 0.2 Hz) 대역 대의 파동은 크게 주목된 바가 없다. 본 연구에서는 Pc2 파동이 특별한 통계적 특성을 보이는 것 같아 분석에 착수하였다.

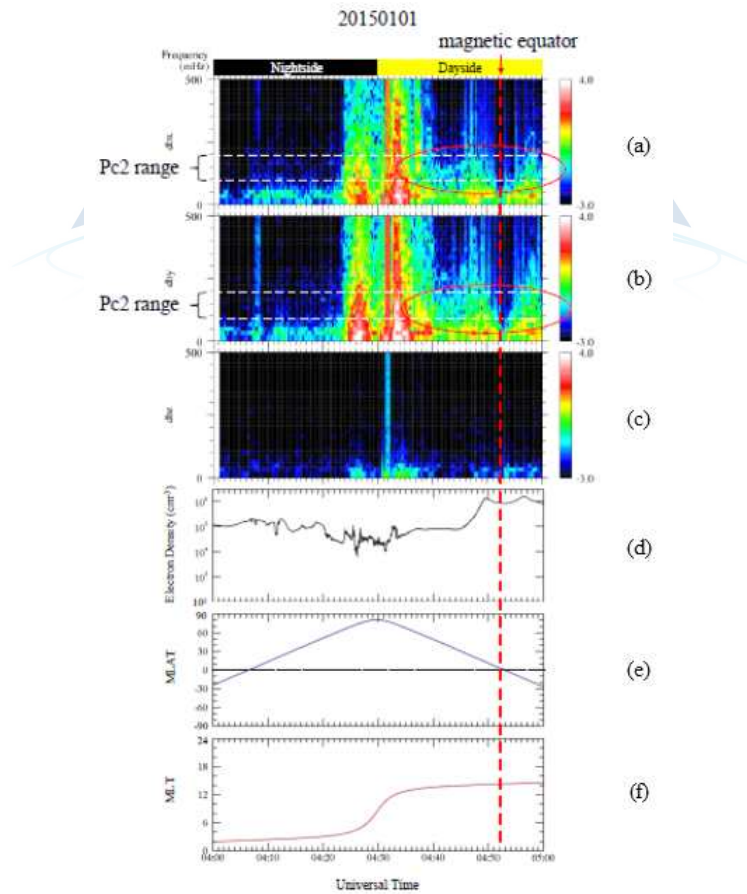


그림 15: Swarm A 위성 자료의 UT04:00 - UT05:00 다이내믹 스펙트럼

그림 15는 Swarm A 극궤도 위성의 2015년 1월 1일 UT 6시부터 UT 7시까지 1시간 동안의 다이내믹 스펙트럼 (그림 15a, 그림 15b, 그림 15c)과 전자밀도 (그림

14d), 위성의 위치정보 (그림 15e, 그림 15f)이다. 해당 시간 동안 Swarm A 위성은 북극에서 시작해 남극까지 하행하고 있으며 (그림 15e) 남극을 지나 상행하기 전까지 낮지역 (지방시 12시~14시)을 지나고 있다. 그림 15a, 그림 15b, 그림 15c는 배경 자기장 (Background field-aligned) 좌표계로 x, y, z 성분의 자기장 다이내믹 스펙트럼을 나타낸 것이고, Pc2 대역 대에서 x와 y성분에서만 파워가 강하게 나타나는 횡파의 모습을 보인다. 또한 그림 15e의 자기위도의 변화와 다이내믹 스펙트럼의 x, y 파워가 변하는 양상을 함께 보면, 해당 파동은 자기위도에 따라 주파수 밴드 폭이 변화하여 자기적도가 약  $\pm 30$ 도 근처에서 가장 넓고 자기적도 지역에서는 파동이 사라지는 형태를 보인다. 주파수 0.022 - 0.1 Hz 대역의 파동은 Pc3 대역 파동이라고 하는데, Pc2 대역 파동과는 다르게 자기적도 지역에서 파워가 줄어들지 않아 이벤트를 두 대역대로 나눠 Pc3 대역의 분석을 차후 연구에 진행하도록 하였다. UT 0435 ~ UT 0436에 그림 15a, 그림 15b에서 보이는 전 주파수에 걸친 강한 파워는 오로라 지역의 입자 유입으로 인한 심한 자기장 섭동으로, 해당 영역에서는 본 연구의 연구대상인 Pc2 파동을 구별할 수 없어 연구대상을 오로라 위도 이하로 한정하였다. 그림 16은 그림 15에서 보인 시간 중 일부의 시계열 자료와, 다시 그 일부의 확대본이다. 파동형태를 확인할 수 있으며 크게 진동하는 파동 (Pc3)과 작게 진동하는 파동 (Pc2)가 보인다. 작은 파동의 경우 대략 5-6초 주기를 가지며 이는 Pc2 대역대이다.

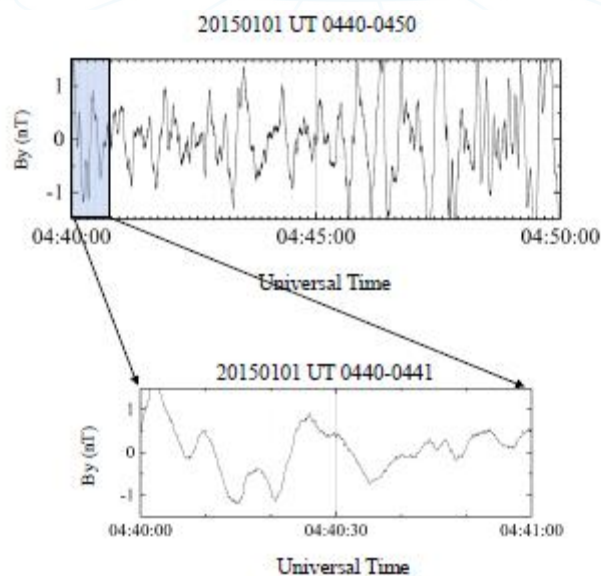


그림 16: Pc2 파동 시계열 자료

그림 17은 2015년 1월 1일 UT04:40 - UT04:41 영역의 시계열 자료를 고속 푸리에 변환시켜 얻어낸 파워 스펙트럼 밀도 (PSD) 그림이다. 파란색 음영 처리된 부분이 Pc2 영역이고 해당 영역 내에 주파수 극대점이 있는 것을 확인할 수 있다. 이 극대점은 보다 낮은 주파수의 Pc3 대역 극대와도 독립적으로 보이고, 설정한 세기

기준값보다 (가로 파선) 높은 것을 확인할 수 있다. 이러한 기준을 가지고 이벤트를 선정하여 통계적인 분석을 진행하였다.

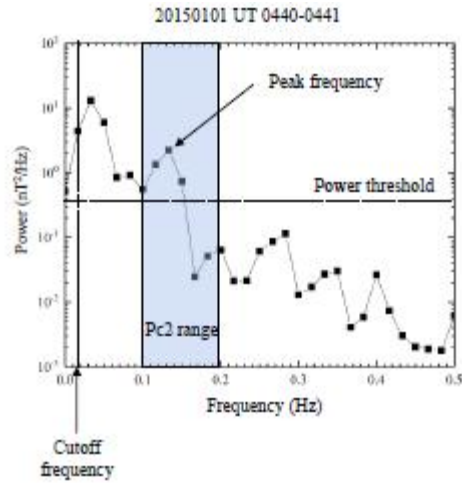


그림 17: 2015년 1월 1일 UT04:40 - UT04:41의 파워 스펙트럼 밀도 그림

## 2. 연구결과

선정된 이벤트로 파동 특성에 관한 통계분석을 진행한 결과, 피크 주파수와 파워에 있어서는 눈여겨 볼만한 특이사항이 발견되지 않았다. 그림 18은 파동의 타원율과 방위각을 각각 자기지방시와 자기경도에 따라 표시한 것이다. 타원율 그래프를 보면, 지방시나 경도에 관련 없이 거의 선형 편광인 파동인 것을 확인할 수 있다. 방위각은  $\pm 45^\circ$ 에 가까울 때  $y$  성분이 우세함을 나타내는데 타원율 그래프와 함께 본다면 대부분의 경우  $y$  성분의 세기가 강했던 것이 반영되어 선형편광인 것으로 나타난 것으로 이해할 수 있다. 특이한 점은 자기지방시에 대한 방위각 그래프에선 방위각이  $+45^\circ$ 와  $-45^\circ$  근처에서 고르게 나타나는데 자기경도에 대한 그래프에선  $-45^\circ$  쪽으로 쏠림이 있다는 것이다.

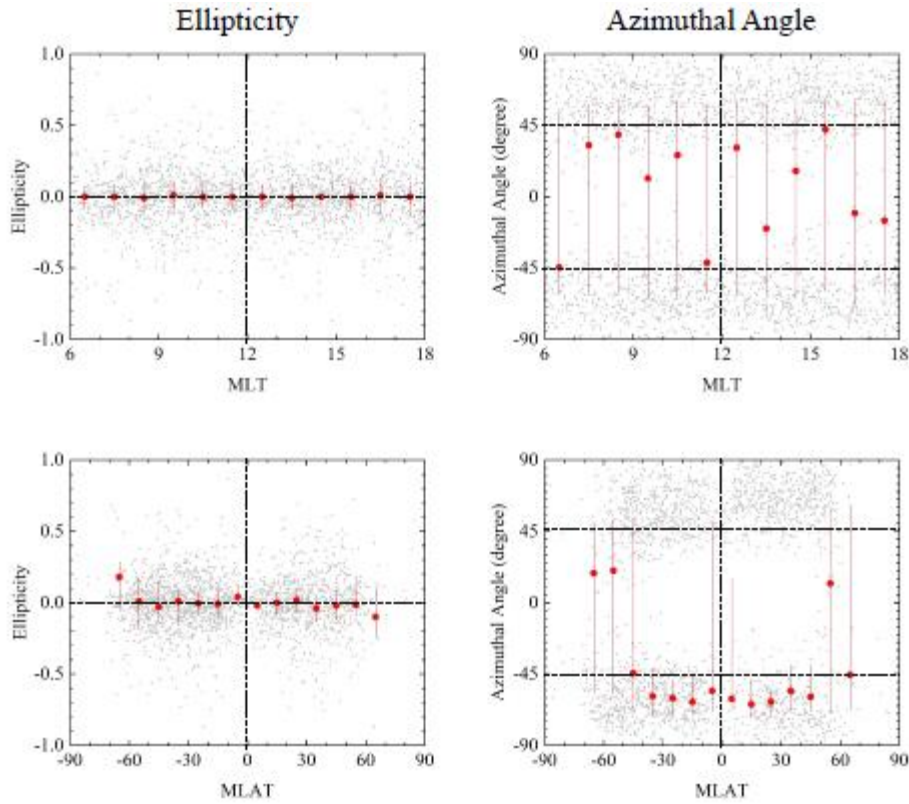


그림 18: Pc2 파동의 타원율과 방위각 그래프

그림 19는 Pc2 파동의 총 관측시간, 이벤트 관측시간, 발생률 그래프이다. 가로축은 자기 지방시이며, 세로 축은 자기경도이고 색으로 발생률 정도를 표시하고 있다. 발생률을 살펴보면, 낮지역에 자기경도  $\pm 40$ 도 부근에서 발생률이 높게 나타나고, 정오 직전 지역과 정오 직후 지역의 발생률이 약간 차이가 있다. 또한 남북반구간에도 약간의 발생률 차이를 보인다. 여러 특징 중에 가장 주목할 만한 것은 적도에서 발생률이 사라지는 현상인데, 이는 태양풍으로부터 유래하는 Pc3 파동과도 다르고 일반적인 EMIC Pc2 파동과도 다르다. 이러한 경향성들은 부폭풍 현상의 정도를 나타내는 AE 지수나, 전지구적인 자기장 섭동을 나타내는 Kp 지수에도 상관없이 늘 일정한 특성을 보였으므로 공간적인 원인에 따른 이벤트로 보인다. 향후 7-8분 차이로 비슷한 궤도를 돌고 있는 Swarm B 위성과 Swarm C 위성의 자료를 이용한다면 보다 확실한 결론을 도출할 수 있을 것이다. 현재로써는 이전의 수치계산 연구에서 발표한 전리권 알펜 공명자 (IAR)의 기본 주파수가 Pc2 대역대이고, IAR이 적도 지역에서 세기가 감소하는 경향이 있는 것이 확인돼 (Lysak et al., 2013) 해당 현상을 본 연구의 Pc2 파동의 발생 원인이라 가정하고 보다 확실한 증거를 찾고 있다.

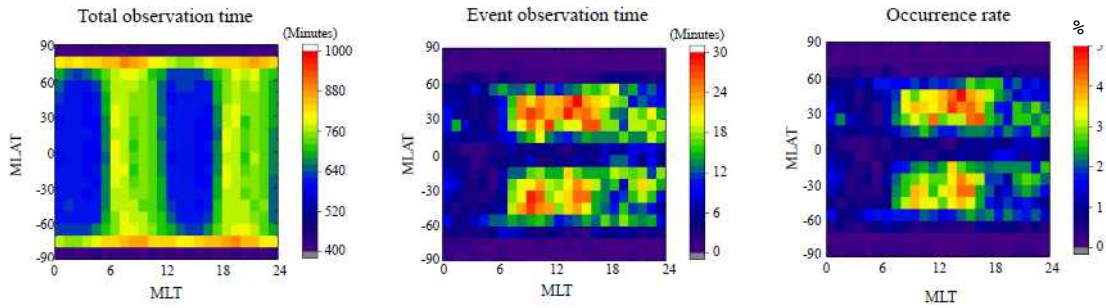


그림 19: Pc2 파동의 총 관측시간, 이벤트 관측시간, 발생률

### 제 3 절 남극 장보고기지 자기장 측정기 자료를 이용한 Pc5 파동 특성

#### 1. 연구내용

본 연구에서는 남극에 설치된 여러 자력계의 자료를 취합하여 고위도에서 발생한 Pc5 플라즈마 파동 (주파수 : 약 2~7 mHz)의 특성을 통계적으로 분석하였다. Pc5 파동의 성격은 위도와 지방시에 따라 다르게 나타나며 자기력선 공명현상과 연관되어 있다고 알려져 있다 (Samson et al., 1971; Chen and Hasegawa, 1974). 자기력선 공명현상에 의해 자기권계면 (magnetopause)에서 발생한 켈빈-헬몰츠 분균일성 (Kelvin-Helmholtz instability)에 의한 플라즈마 파동이 자기권 내부에서 모드가 변환되어 지상에서 관측되어진다. 켈빈-헬몰츠 분균일성은 자기권계면에서의 태양풍과 자기권 플라즈마 대류의 속도차이에 의해 발생하기 때문에 이 발생기작으로 생성된 Pc5 파동은 태양풍 속도에 민감하게 변화한다 (Engebretson et al., 1998). 그러나 남극 장보고 과학기지가 위치하고 있는 오로라 영역 위쪽의 극관지역(polar cap)의 경우 자기장이 자기권 외부로 열려있는 지역이기 때문에 자기권계면의 바깥쪽의 태양풍 영역과 만나게 되고, 따라서 자기력선 공명현상이 아닌 다른 발생기작에 의해 Pc5 파동이 발생할 것으로 예상된다 (그림 20 참조). 따라서 본 연구에서는 남극에 설치된 여러 자력계 자료를 종합적으로 분석하여 관측 지점에 따라 파동의 발생분포 차이를 확인하고 이를 바탕으로 극관 지역 Pc5 파동의 발생기작을 확인하고자 한다.

본 연구에서 2017년 1년 동안의 자기장 자료를 분석하였으며 사용한 자기장 자료가 관측된 좌표는 아래 표에 나와있다. 특히 장보고에 설치된 자기장 측정기는 이전 연구에서 사용된 플럭스게이트 타입이 아닌 자기장의 변화량을 측정하는 서치코일 타입이기 때문에 해당 장비의 적합도를 확인하기 위해 South Pole 기지에 있는 두 종류의 자기장 측정기를 모두 이용하였다.

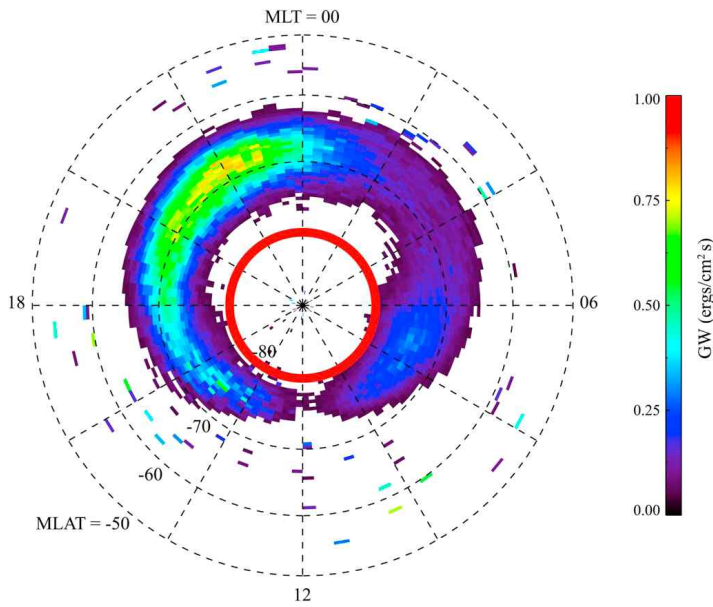


그림 20: 2017년 1~4월의 태양풍 자료를 이용한 OVATION 모델에서 계산된 남반구 오로라의 평균 플럭스량. 붉은선은 남극 장보고 과학기지의 지자기 위도

관측소	지리적 좌표		지자기 좌표		측정기 타입
	위도	경도	위도	경도	
Dome C (DMC)	75.1° S	123.4° E	89.1° S	57.1° E	플럭스게이트
McMurdo (MCM)	77.9° S	166.7° E	80.0° S	33.4° W	플럭스게이트
Jang Bogo (JBS)	76.6° S	164.2° E	79.9° S	53.6° W	서치코일
South Pole (SPA)	90.0° S	0°	74.6° S	18.8° E	플럭스게이트/ 서치코일
AGO3	82.8° S	28.6° E	72.5° S	41.3° E	플럭스게이트

표 1: 남극 자기장 관측소 정보

일반적으로 오로라 타원체 범위인 지자기 위도 65-75도 이상의 지역을 극관지역으로 얘기하지만 본 연구에서 사용된 관측소의 자기력선이 닫힌 자기장구조인지, 열린 자기장 구조인지 확인하기 위해 Tsyganenko 모델을 이용해서 동지와 하지, 춘·추분 때의 자기력선의 위치를 확인하였다.

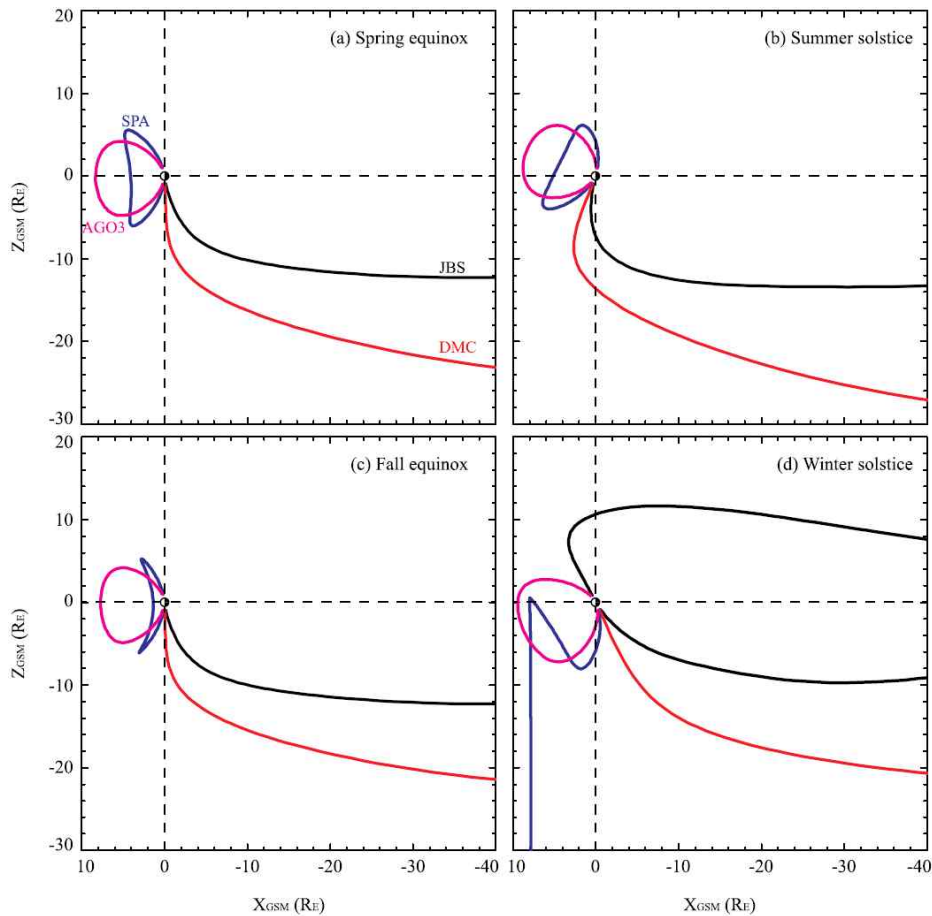


그림 21: Tsyganenko-96 모델에서 계산된 각 관측소의 자기력선

그 결과 그림 21에서 확인할 수 있는 것과 같이 시간 및 태양풍의 조건에 따라서 변하기는 하지만 JBS와 DMC는 열린 자기장 지역에 위치하고 SPA와 AGO3는 닫힌 자기장 지역에 위치하고 있음이 확인되었다.

## 2. 연구결과

그림 22는 2017년 3월에서 4월 동안의 WIND 위성에서 관측된 태양풍 및 지상 Pc5 파동의 세기 변화를 보여주고 있다. 해당 기간에 수 차례 고속 태양풍이 위성에서 관측되었으며 파동의 세기 또한 고속태양풍이 발생한 기간이 다른 기간에 비해 증가하는 것으로 확인되었다. 또한 파동의 세기가 위도에 따라 변하는 것으로 나타났다. 가장 위도가 낮은 SPA에서 파동의 세기가 가장 크게 관측되었으며 DMC에서는 SPA에 비해 약 10배 이상 약한 파동이 관측되었다. 그러나 태양풍 변화에 대한 세기의 변화는 관측지점에 상관없이 비슷하게 나타났다. 즉, 극관 지역을 포함한 고위도 지역의 Pc5 파동의 세기는 이전 연구에서 제안되었던 것과 같이 태양풍 속도 변화에 영향을 받는 것이 확인되었다.



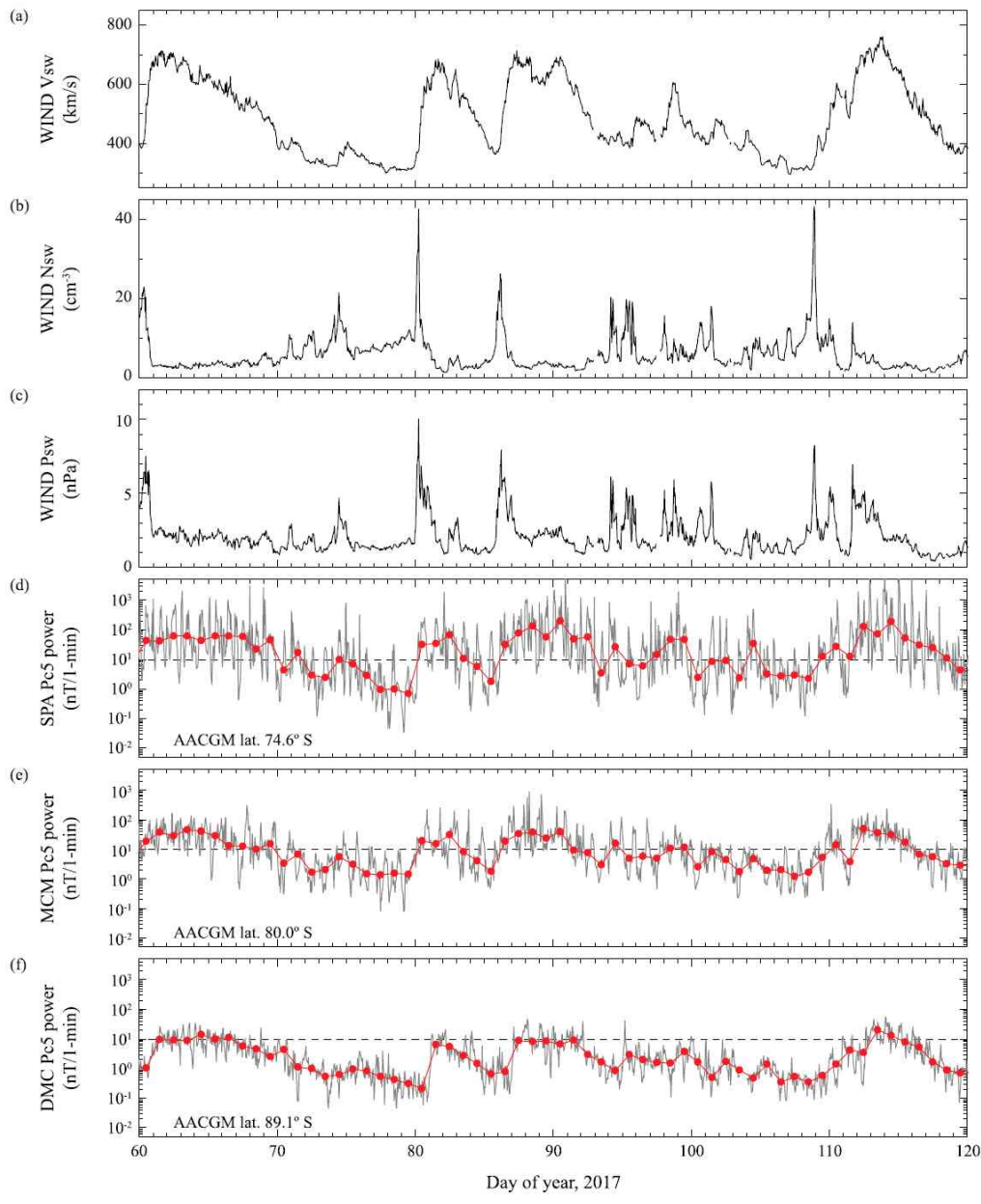


그림 22 태양풍의 속도 및 밀도, 동압력의 변화와 지상 Pc5 파동 세기의 변화

그림 23은 2017년 1년 동안의 자료를 이용하여 1년간의 Pc5 파동 세기 분포를 지방시 및 계절에 따라 나타낸 그림이다. 여기서 알 수 있는 가장 큰 특징은 관측지점에 따라서 세기 분포가 다르게 나타난다는 점이다. AGO3의 경우 오전 시간대와 저녁 시간대에서 파동의 세기가 가장 크게 나타났고, 계절적으로는 3월과 9월, 즉 가을과 봄에서 강하게 관측되었다. SPA에서는 계절적인 분포는 AGO3와 비슷하게 나타났지만 지방시 분포는 저녁 시간의 파동 세기가 AGO3에 비해 많이 약해진 반면 오전 시간대는 AGO3와 비슷하게 나타났다. 반면 비슷한 지자기 위도에 위치하고

있는 MCM와 JBS에서는 정오 부근과 여름철인 12월에서 파동의 세기가 가장 강하게 나타났다. 지자기 위도상으로 가장 고위도에 위치한 DMC의 경우 다른 관측소에 비해 전반적으로 세기는 약하지만, 여름철 및 새벽, 오후 시간대에 세기가 증가하였다.

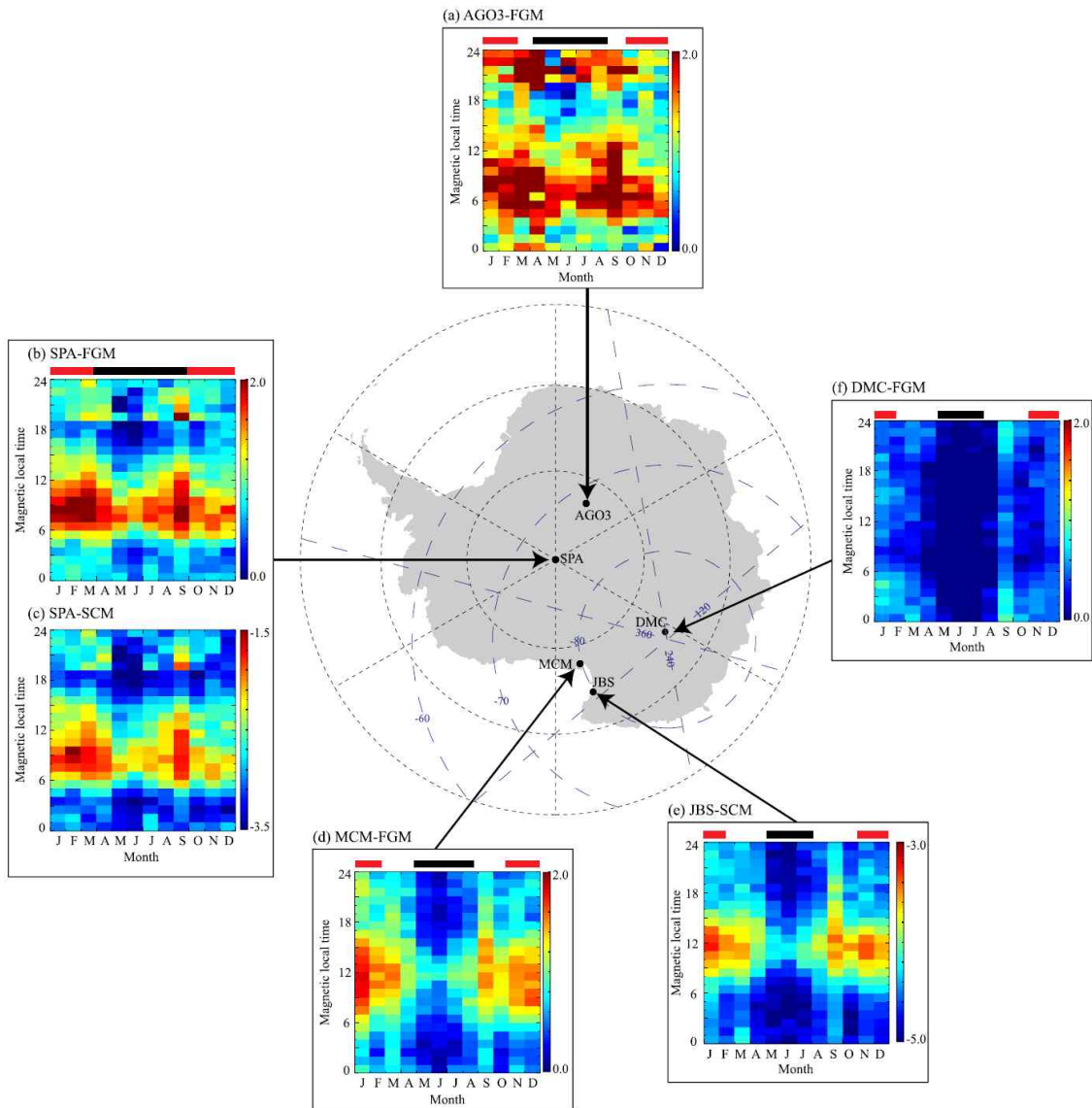


그림 23: 각 관측 지점에서의 자기 지방시 및 계절에 따른 Pc5 세기 분포

또한 SPA의 서치코일과 플럭스게이트 자료를 비교해보면 Pc5 파동의 연간 분포가 세기의 차이는 있지만 비슷하게 나타난 것을 알 수 있다. 즉, 서치코일이 플럭스게이트와 다르게 자기장의 변화만을 측정하기는 하지만 주파수가 낮은 Pc5 영역에서도 파동의 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 켈빈-헬몰츠 분균일성은 두 플라즈마 흐름의 차이가 큰 오전과 저녁 시

간대에 주로 발생하지만 그 세기가 일정하지 않다고 알려져있다 (Nosé et al, 1995; Takahashi et al. 2015). 따라서 AGO3와 SPA에서 보인 오전과 저녁 시간대에서의 강한 파동의 세기는 이러한 켈빈-헬몰츠 불균일성의 특징을 잘 따라간 것으로 보여진다. 반면 극관지역인 MCM과 JBS에서 관측된 결과는 이러한 특징을 따라가지 않고 정오 지역에서 강하게 나타난 것으로 보아 다른 기작에 의해 Pc5 파동이 발생했음을 알 수 있다.

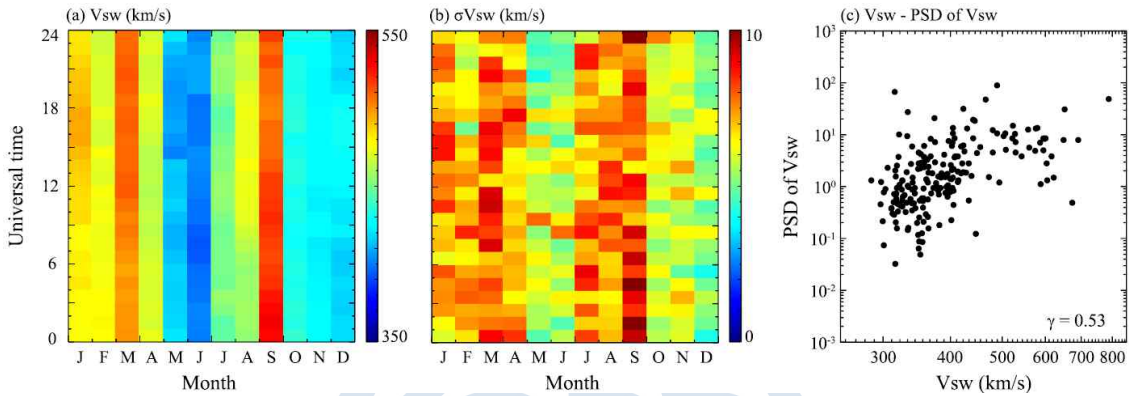


그림 24: 2017년 1년간 태양풍 (a)속도 및 (b)변화량 분포. (c) 두 지표 사이의 상관관계.

그림 24는 1년간의 태양풍 속도 분포 및 Pc5 주파수 범위에서의 태양풍 변화량 세기와 둘 사이의 상관관계를 보여주고 있다. 그림 23의 SPA와 AGO3에서의 Pc5 파동 분포를 보면 3월과 9월에 세기가 가장 강하게 나타났는데, 이는 태양풍 속도 분포와 동일한 것을 알 수 있다. 즉, 태양풍의 세기가 증가한 시기에 켈빈-헬몰츠 불균일성이 더 잘 발생했고, 그로인해 달린 자기장 지역에서 Pc5 파동의 활동성이 증가했음을 의미한다. 이에 반해 JBS와 MCM에서 Pc5 파동의 세기가 증가한 시기와 태양풍 속도 분포를 비교해보면 10월에서 12월까지 태양풍 속도가 약함에도 불구하고 열린 자기장 지역에서 Pc5 파동의 세기가 증가했음을 알 수 있다. 이에 반해 그림 24b의 태양풍 변화정도를 보면 10월에서 12월까지 태양풍 속도는 낮았음에도 변화량은 다른 기간에 비해 많이 차이하지 않았음을 알 수 있다. 즉, 열린 자기장 지역에서 발생한 Pc5 파동은 절대적인 태양풍 속도의 변화보다는 태양풍 속도의 변화 정도에 의해 발생하는 것으로 사료된다.

태양풍 속도의 변화는 태양풍 자기장 변화와 결합하여 전기장을 만들어 낸다. 이렇게 발생한 전기장은 자기력선을 따라 극관지역으로 전파하는데, 이러한 전기장의 변화는 극관 지역 전리권에서 전류를 형성하게 된다. 따라서 극관지역에서 발생한 Pc5 파동은 달린 자기장 지역과는 달리 태양풍에서 발생한 다이내모 현상에 의해 전리권에서 발생한 전류에 의해 생성된 것으로 생각된다.

## 제 4 절 장보고기지-독일 Neumayer 남극기지-세종기지 서치코일 자기장 측정기 자료를 이용한 자기권 EMIC 플라즈마 파동 전리권 전파 특성 연구

### 1. 연구내용

2절에서 언급했듯이 EMIC 파동은 주로 자기권의 플라즈마권계면 부근의 적도 지역에서 발생하여 자기력선을 따라 지상 고위도 지역으로 전파한다. 자기권으로부터 전파된 EMIC 파동은 전리권에서 자기력선과 무관한 알펜파 형태로 변환되어 전자 밀도가 높은 전리권 F층을 따라서 여러 방향으로 전파한다 (Manchester, 1966; Altman and Fijalkow, 1980). 전파된 EMIC 파동은 지상 자력계에서 Pc1 파동의 주 파수 대역에서 관측된다. 전리권에서의 EMIC-Pc1 파동 전파 현상은 초기에 이론 연구를 기반으로 진행되었다가 고위도 지역에 다수의 자기장 측정기를 설치한 이후 관측적으로도 확인되었다 (Fraser, 1975; Manchester, 1968; Hayashi et al., 1981; Neudegg et al., 2000; Kim et al., 2010, 2011). 특히 이전 연구 결과에 따른 파동이 진행함에 따라 파동의 세기가 감소하는 것으로 보고되었으며 각 연구에서 사용한 지상 자력계의 분포 범위 및 감쇠하는 정도는 표 2에 나타나있다.

논문	관측 범위 (지자기 위도)	감쇠량 (/1000km)
Hayashi et al. (1981)	53.7-75.1° N	25 - 100 dB
Neudegg et al. (2000)	70.5-75.6° S	41 dB
Kim et al. (2010)	61.2-86.7° S	8-20 dB
Kim et al. (2011)	61.2-86.7° S	1-14 dB

표 2: 지금까지 발표된 EMIC-Pc1 파동 전파 관련 연구

일반적으로 플라즈마권계면은 지구에서부터 4~5 지구반지름 정도 떨어진 위치에 형성되고 해당 위치의 자기력선이 지상에 도달하는 지역을 지자기 위도로 환산하면 60~63.5° 정도이다. 이전 연구에서 사용된 관측지점과 비교해보면 플라즈마권계면 부근에서 고위도 지역에 대한 연구가 주로 진행됐음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 남극 장보고 과학기지 (지자기 위도 : 79.7° S)에 설치된 자력계를 포함하여 이번 연구사업을 통해 추가로 설치된 남극 세종 과학기지 (45.8° S) 및 Neumayer기지(60.5° S)에서의 자기장 관측 자료를 이용하여 기존 연구에서 확인하지 못한 저위도 방향으로의 파동 전파 현상을 확인하고 고위도 방향의 전파와 비교하였다.

### 2. 연구결과

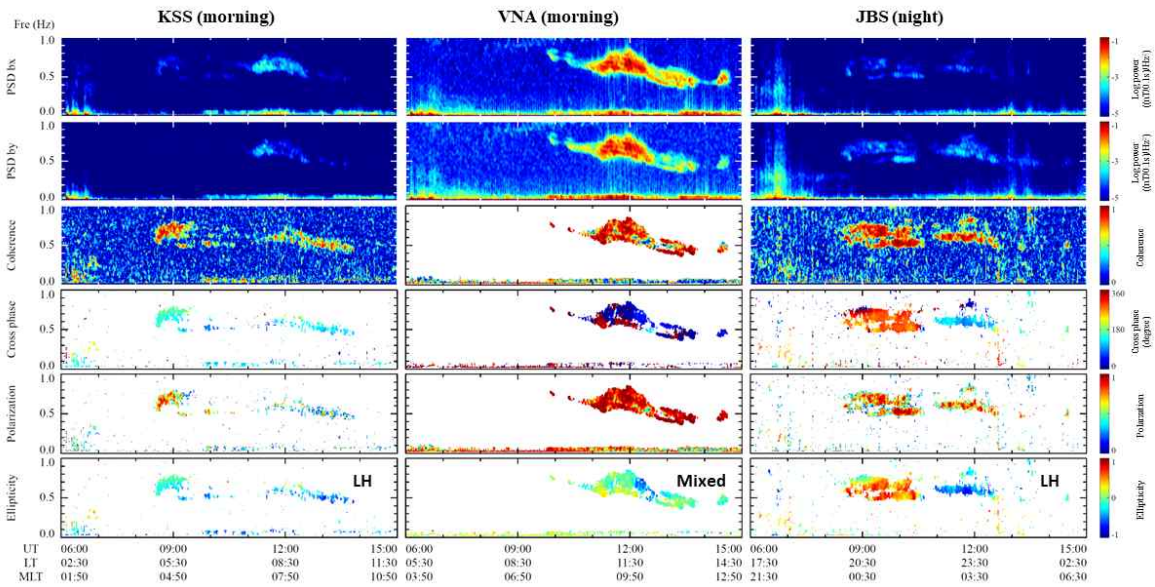


그림 25: 2019년 3월 6일에 관측된 EMIC-Pc1 파동

그림 25는 2019년 3월 6일 10-15 UT 사이에 세 지점의 관측소에서 동시에 관측된 EMIC-Pc1 파동을 보여주고 있다. 파동의 세기는 Neumayer에서 가장 강하게 나타났으며 다른 두 관측소에서는 그에 비해 약하게 나타났다. 이러한 세기 변화는 플

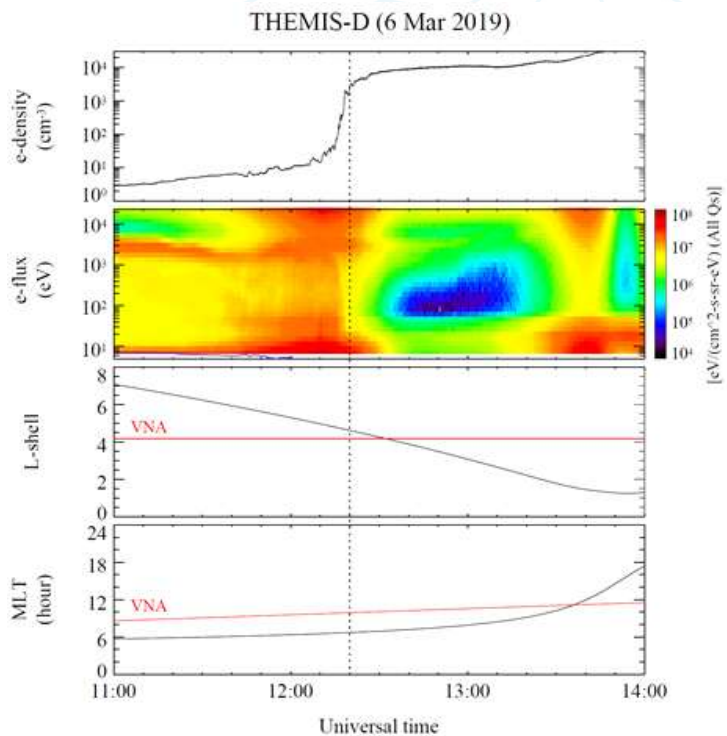


그림 26: THEMIS-D 위성에서 관측된 플라즈마권계면

라즈마 파동이 전리권을 따라 전파함에 따라 세기가 감소하기 때문에 Neumayer 기지가 자기권으로부터 파동이 유입된 지역에서 가장 가까이 위치했음을 의미한다. 파동의 성격도 Neumayer에서는 left-handed와 linear가 혼재하는 것으로 확인되었으나 장보고 및 세종기지에서는 left-handed의 성격이 강하게 확인되었다. 정확한 플라즈마 권계면의 위치를 확인하기 위해 THEMIS-D 위성의 플라즈마 관측자료를 확인한 결과 위성이 Neumayer 기지와 비슷한 자기 지방지에서 플라즈마권계면을 통과하였으며 그 때의 자기구각 L값

은 4.5로 확인되었다. Neumayer의 자기구각이 4.1이기 때문에 자기권에서 발생한 파동이 Neumayer 기지 부근으로 유입되었음을 알 수 있다 (그림 26 참조).

그림 27은 2019년 5월 28일 01:20-02:30 UT에 세 곳의 관측소에 동시에 관측된 EMIC-Pc1 파동을 보여주고 있다. 이 파동 역시 그림 25의 파동과 마찬가지로 Neumayer 부근으로 전파되어서 세종 및 장보고 과학기지 방향으로 전파되었으며 파동이 전파하면서 성격 및 세기가 변했음을 알 수 있다.

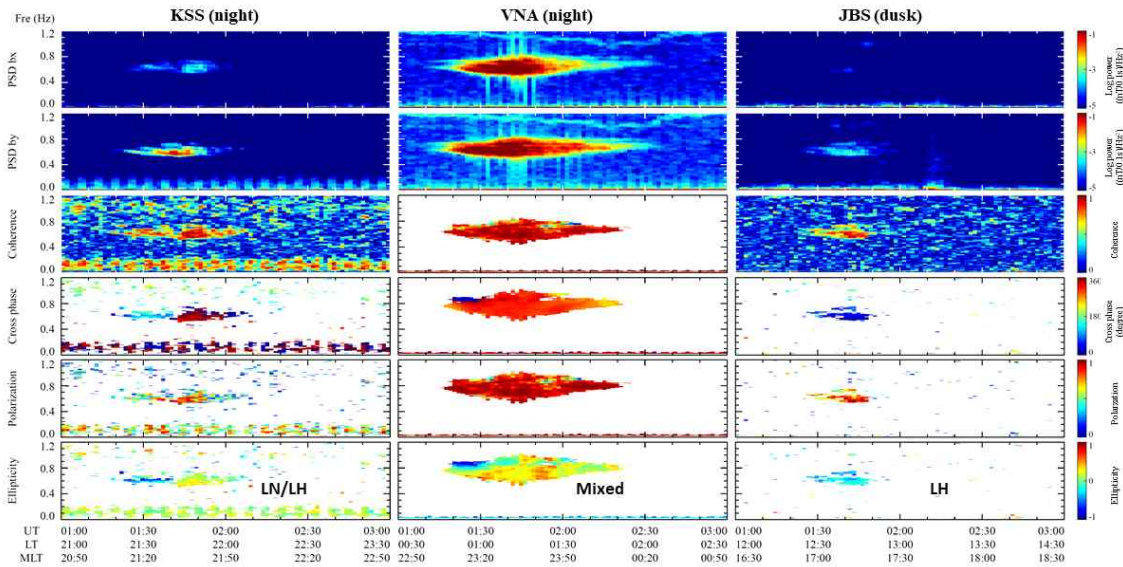


그림 27: 2019년 5월 28일에 관측된 EMIC-Pc1 파동

위에 소개된 두 이벤트는 발생시점에 장보고 과학기지와 세종 과학기지가 다른 지방시 지역에 위치하고 있다. 즉, 첫 번째 3월 6일의 경우에 장보고 과학기지는 밤 지역에 위치하고 있는 반면 세종 과학기지는 낮 지역에 위치하고 있었으며 두 번째 이벤트가 발생했을 때는 장보고와 세종이 각각 낮과 밤 지역에 위치하고 있었다. 이론적인 연구 결과를 보면 EMIC-Pc1 파동은 전리권에서도 전자밀도가 높은 F층을 따라 전파된다고 알려져 있다. 전지구적으로 전자밀도의 분포는 저위도로 갈수록 높아지는 위도에 대한 의존성 외에 태양빛의 영향을 받아 낮지역에서 높고 밤지역에서 낮아지는 지방시 의존성을 가지고 있다. 따라서 두 이벤트를 통해서 EMIC-Pc1 파동의 전파과정이 어떤 조건에 더 민감하게 반응하는지 확인할 수 있다.

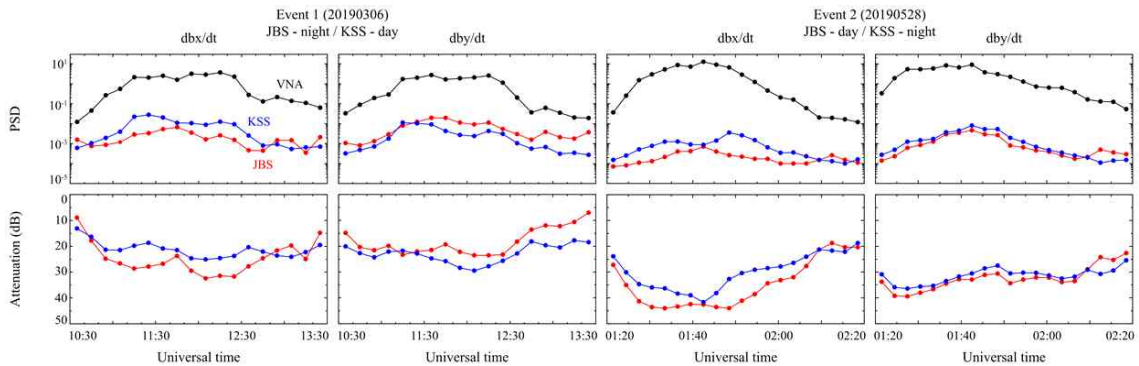


그림 28: 두 이벤트에 대해 관측지점에 따른 파동 세기의 감소 분포

그림 28은 Neumayer 기지를 기준으로 장보고 기지와 세종기지에서 시간에 따라서 파동의 세기가 어떻게 변하는지 보여주고 있다. 그림 25와 27에서 확인했듯이 Neumayer에서 파동의 세기가 가장 강하게 관측되었으며 장보고와 세종에서는 첫 번째 이벤트는 최대 30 dB ( $=10^{-2}$ ), 두 번째 이벤트는 40 dB 이상 감소한 것을 확인할 수 있다. 또한 전반적으로 장보고 기지에서 관측된 파동의 세기가 세종에서의 파동에 비해 더 많이 감소하였다. 세 관측지점의 거리를 고려했을 경우 각 이벤트에 대한 감쇠 정도는 표3에 나타나 있다.

이벤트	관측소	지방시	전파방향	감쇠량(/1000km)	
				bx	by
1	장보고	밤	극방향	8.31	5.90
	세종	낮	적도방향	10.64	12.55
2	장보고	낮	극방향	11.28	10.77
	세종	밤	적도방향	16.77	15.45

표 3: 세 지점의 파동 세기를 바탕으로 계산된 감쇠량

계산된 감쇠량을 비교해 보면 파동의 세기는 관측지역의 태양빛 유무에 따른 전자 밀도 차이보다는 전파 방향에 따른 전자밀도 변화에 더 민감하게 변하는 것으로 확인되었다. 실제 Swarm 위성에서 관측한 전자밀도의 변화를 보면 지방시의 변화보다 위성의 이동 (고위도→저위도)에 의한 전자밀도 변화가 더 큰 것으로 확인되었다.

마지막으로 Swarm 위성의 자기장 자료를 이용하여 지상과 전리권에서 EMIC-Pc1 파동이 어떻게 관측되는지 분석하였다. 그림 29는 Neumayer 관측소와 Swarm-A와 C위성에서 관측된 EMIC-Pc1 파동을 비교한 그림이다. 위의 그림이 첫 번째 이벤트 아래 그림이 두 번째 이벤트에 대한 플라즈마 파동을 보여주고 있다.

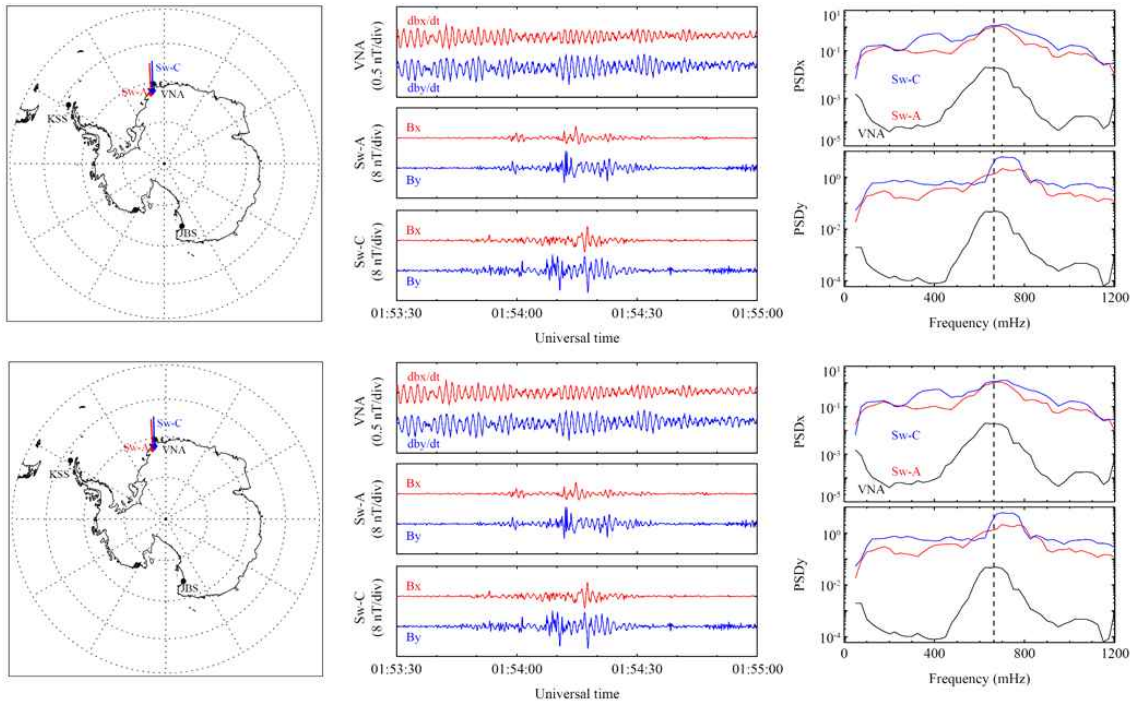


그림 29: Neumayer와 Swarm 위성에서 관측된 EMIC-Pc1 파동의 비교

Swarm 위성의 위치와 시계열 자료를 비교해보면 위성이 Neumayer 상공을 지나갈 때 순간적으로 EMIC-Pc1 파동이 관측된 것을 확인할 수 있다. 이전 연구를 보면 이러한 관측을 자기권에서 지상으로 파동이 전파되는 증거로 설명하고 있다 (Kim et al., 2010). 본 연구에서도 지상 관측소를 지날 때만 파동이 관측된 것으로 보아 자기권에서 발생한 EMIC 파동이 지상으로 전파되는 과정에서 전리권을 지나는 위성 과 지상에서 동시에 관측된 것으로 보인다. 그러나 오른쪽의 스펙트럼 분석을 보면 지상에서 관측된 파동에 비해 위성에서 관측된 파동의 주파수가 다소 높은 것을 확인할 수 있다.

이러한 주파수 차이는 위성의 운동에 의한 도플러 효과에서 기인한 것으로 사료된다 (그림 30 참조). Pc1 파동 보다 낮은 주파수 대역의 Pc5 관련 연구를 보면 저궤도 위성에서 관측된 파동이 지상에서 관측된 파동보다 약 18% 정도 더 높은 주파수를 갖는 것이 보고되었다 (Vellente et al., 2004). 그림 29에서 확인된 지상과 위성에서의 주파수 차이는 약 10%로 이전 연구와 근소한 차이를 보인다. 이러한 차이가 파동의 주파수에 따라 변하는지 여부는 시뮬레이션을 이용한 추가연구를 통해 확인할 예정이다.



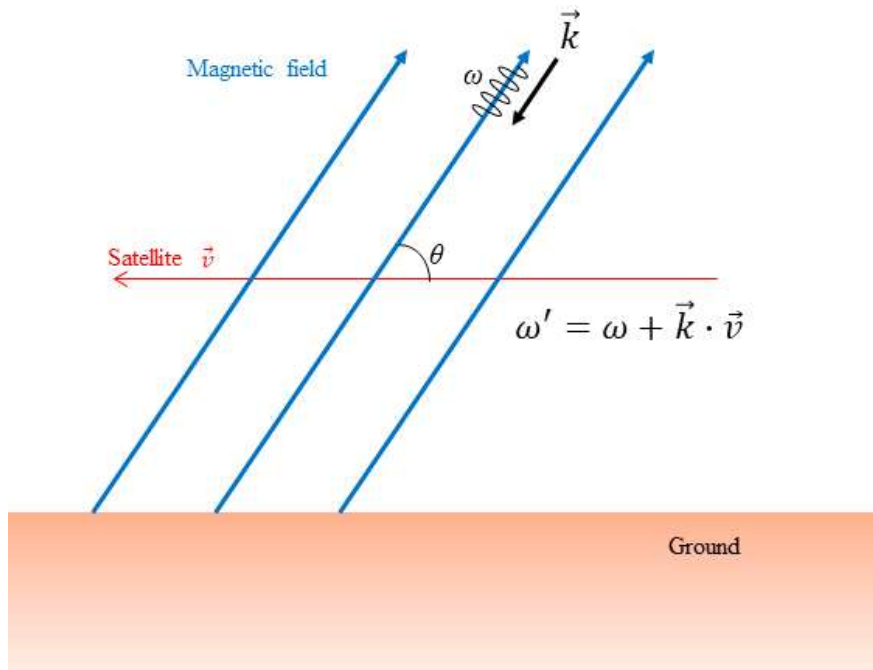


그림 30: 전리권에 관측되는 플라즈마 파동의 도플러 효과

## 제 5 절 서브스톱 발생 시 전리권 자기장 섭동 연구

### 1. 연구내용

지구 자기권 낮 영역에서 행성 간 자기장과 지구 자기장의 재결합에 의해 태양풍 에너지가 지구 자기권으로 전달되며 이러한 에너지는 자기권 꼬리 지역에 축적된다. 특히 행성간 자기장이 남쪽을 향할 때 많은 태양풍 에너지가 자기권으로 입사되며 자기권 꼬리 지역에 축적된 에너지는 꼬리 자기력선이 재결합하여 자기장 에너지를 폭발적으로 방출하게 된다. 축적된 자기장 플럭스의 급격한 재결합은 지구 전리권에서 오로라를 발생시키고 지구 자기권의 다양한 영역에서 지구 자기장과 자기권 플라즈마의 극적인 변화가 관측된다. 이러한 현상은 약 한두 시간에 걸쳐 발생하며 “서브스톱” 현상이라 부른다.

서브스톱 발생은 오로라 활동 정보를 제공하는 오로라 지수인 AE 지수 (Auroral Electrojet Index)로 부터 확인할 수 있다. AE 지수는 북반구 오로라 지역 (자기위도 약 ~65-70도)에 위치한 ~10-13개의 지구 자기장 관측소에서 측정된 수평 성분의 지구 자기장 섭동 변화로부터 얻어진다 (그림 31 참조). 서브스톱 발생 시 고위도 AE 지수 지상관측소에서는 강한 남쪽 성분의 자기장 섭동이 관측되며 이러한 현상은 지상관측소 상공의 전리권에서 동쪽에서 서쪽으로 강한 전류의 흐름에 의한 것으로 설명되고 있다. 중-저위도에서도 다양한 자기장 섭동 현상이 발생하는데 이러

한 현상이 고위도 전류에 의한 것인지 아니면 서브스톰 발생 시 자기권에서 발생한 자기유체파동의 현상인지 아직 명확하게 규명되지 않고 있다.

Obs.	Code	Geog. Lat	Geog. Long	Geom. Lat	Geom. Long
Abisko	ABK	68.4°	18.8°	66.1°	115.1°
Dixon Island	DIK	73.6°	80.6°	63.0°	161.6°
Cape Chelyuskin	CCS	77.7°	104.3°	66.3°	176.5°
Tixie Bay	TIK	71.6°	129.0°	60.4°	191.4°
Cape Wellen	CWE	66.2°	190.2°	61.8°	237.1°
Barrow	BRW	71.3°	203.3°	68.5°	241.2°
College	CMO	64.9°	212.2°	64.6°	256.5°
Yellowknife	YKC	62.4°	245.6°	69.0°	292.8°
Fort Churchill	FCC	58.8°	265.9°	68.7°	322.8°
Post-de-la-Baleine	PBQ	55.3°	282.2°	66.6°	347.4°
Narsarsuaq	NAQ	61.2°	314.2°	71.2°	36.8°
Leirvogur	LRV	64.2°	338.3°	70.2°	71.0°

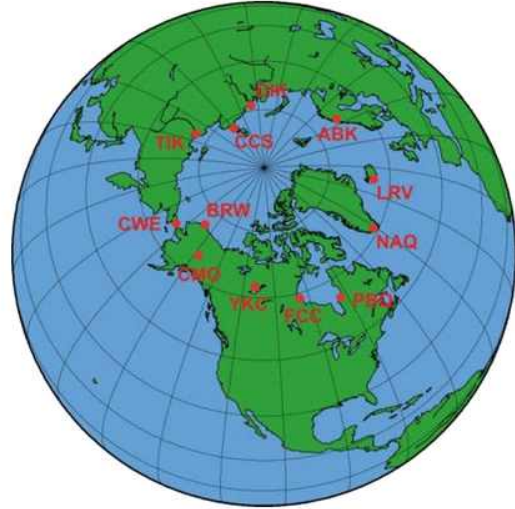


그림 31: 북반구에 위치한 AE 지수 관측소

서브스톰관련 자기유체파동의 경우 자기권 위성 전기장-자기장 자료를 이용하여 많은 파동 특성 연구 보고가 있으며 주로 플라즈마권계면에 한정된 정상파로 이해되고 있다 (Takahashi et al., 1995, 2001, 2003; Kim et al., 2005, 2010; Kwon et al., 2012, 2013). 서브스톰 관련 자기장 섭동은 지구 자기권에서 약 10분 이내의 지속시간 동안 주기가 약 10-150초의 압축성 파동으로 관측된다. 이러한 자기권 압축성 파동은 밤 지역 저위도 지상관측소에서 우주공간에서 관측된 파동과 같은 형태의 모습으로 관측되며 이전 연구에서는 자기권 파동 에너지가 자기권에서 지상으로 전파되었다고 설명하고 있다.

자기권 파동 에너지가 자기권에서 지상으로 전달될 때 반드시 전리권을 통과한다. 본 과제에서는 자기권의 경계지역인 전리권 자기장 섭동이 이전 연구에서 보고된 자기권 내에서 서브스톰 관련 자기장 섭동과 상관관계가 있는지 조사한다. 특히 전리권 자기장 섭동을 전리권 위성 자기장 자료와 지상 자기장 자료를 비교하여 전리권에서 파동 특성이 어떻게 변하는지 조사한다. 본 과제에서는 전리권 자기장 섭동 연구를 위해 전리권 Swarm 위성 자기장 자료와 국내 보현산 관측소 자기장 자료를 이용한다. 그리고 전리권 자기장 섭동 시뮬레이션 자료와 관측결과를 비교한다.

## 2. 연구결과

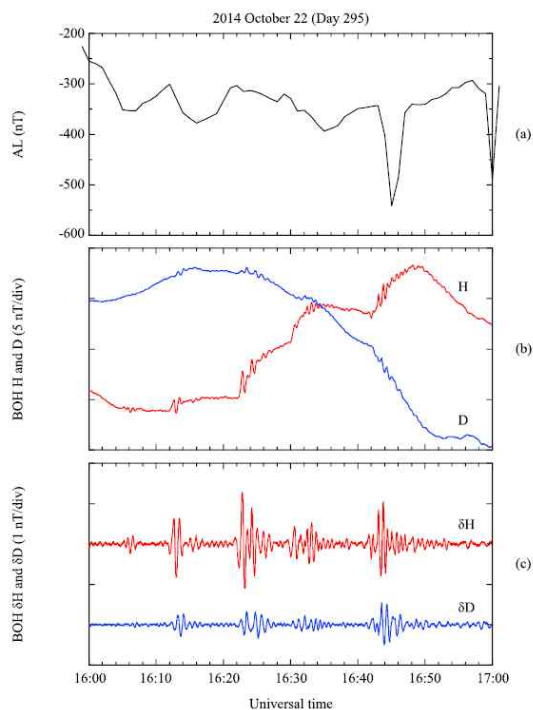


그림 32: 2014년 10월 22일 (a) 오로라 AE 지수, 보현산 (b) H-D 성분 자기장 관측자료, (c) 주변 자기장이 제거된 보현산 H-D 성분

그림 32는 2014년 10월 22일 오로라 AE 지수와 보현산 지상 자기장 측정기 자료를 나타내고 있다. AE 지수가 감소하는 동안 저위도 보현산 자기장 측정기는 소규모 자기장 변화를 관측하였다. 이러한 저위도 자기장 변화를 서브스톰 관련 자기유체 파동으로 설명되며 자기권 우주공간에서 압축성 파동의 형태로 관측된다. 이러한 파동들이 전리권에서는 어떤 모습으로 관측되는지 조사하기 위해 전리권 Swarm 위성의 자기장 자료를 조사하였다.

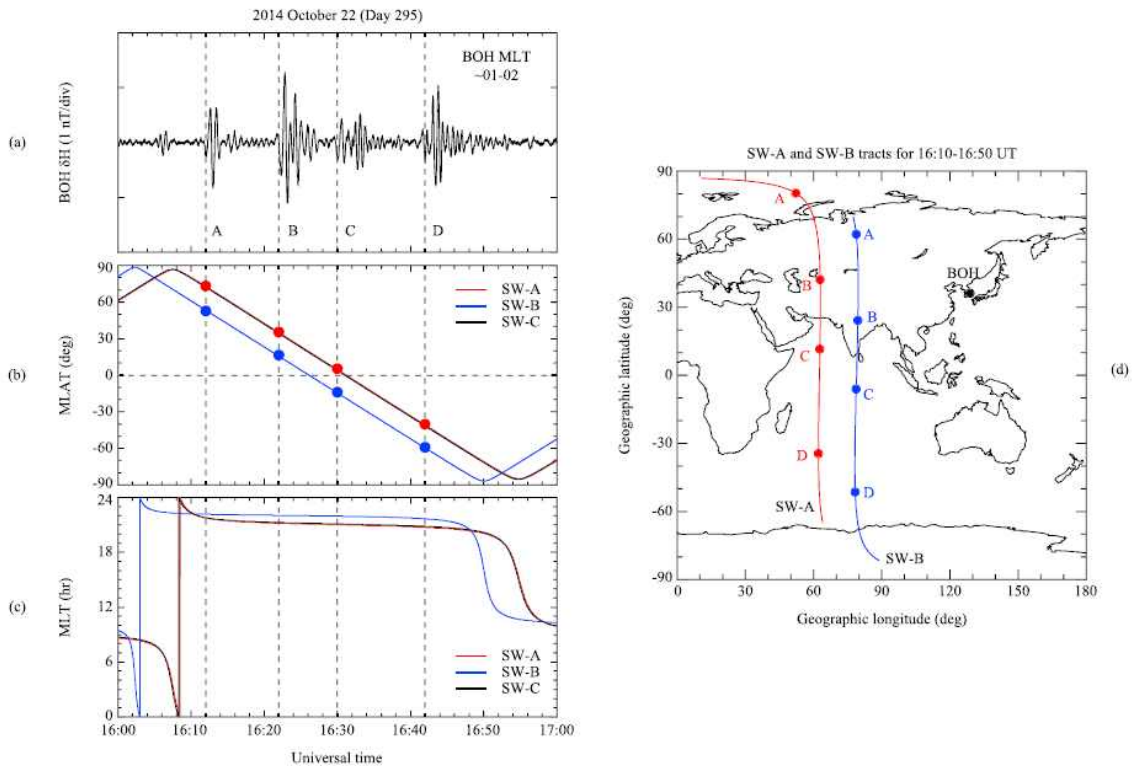


그림 33: 2014년 10월 22일 (a) 보현산 자기장 자료, 전리권 Swarm A, B, C 위성 궤도의 (b) 자기위도, (c) 지방시, (d) 지구 중심좌표 궤도

2014년 10월 22일 16-17시 보현산 관측소에서 서브스톰 관련 자기장 섭동 현상이 관측되는 동안 전리권 Swarm A, B, C 위성들은 밤 지역 지방시 21-22시에 있었으며 북반구에서 남반구로 이동하고 있었다 (그림 33 참조). 보현산 관측소는 지방시 1-2시에 위치하고 있었다. 그림 34은 보현산 관측소에서 이벤트 B가 관측될 때 Swarm A, B, C 위성의 자기장 자료를 나타낸다. Swarm A와 Swarm C 위성은 거의 같은 궤도에서 운영되고 있어서 자기장 섭동 모습이 거의 유사하다. 전리권 Swarm A, B, C 위성은 북반구에 있었으며 보현산 H 성분 자기장 섭동과 같은 위상으로 진동하고 있는 것을 확인하였다. Swarm A 위성과 Swarm B 위성은 지방시 1기산 차이로 궤도 운영을 하고 있고 Swarm B 위성이 적도 지역에 더 가까이 위치하고 있다. Swarm A, B 위성의 압축성 성분 Bz의 값을 비교해 보면 적도 지역에 가까운 Swarm B 위성의 자기장 값이 더 크게 관측되었다. 자오면 방향으로 진동하는 Bx 성분의 세기를 비교하면 적도에서 멀리 위치한 Swarm A 위성의 자기장 세기가 적도 근처에 위치한 Swarm B 위성 보다 더 큰 값을 갖는다. Bx 성분도 보현산 H 성분과 같은 위상으로 진동하고 있으며 Bz과 Bx의 위성 변화를 비교하면 같은 위상으로 진동하고 있음을 확인 할 수 있다.

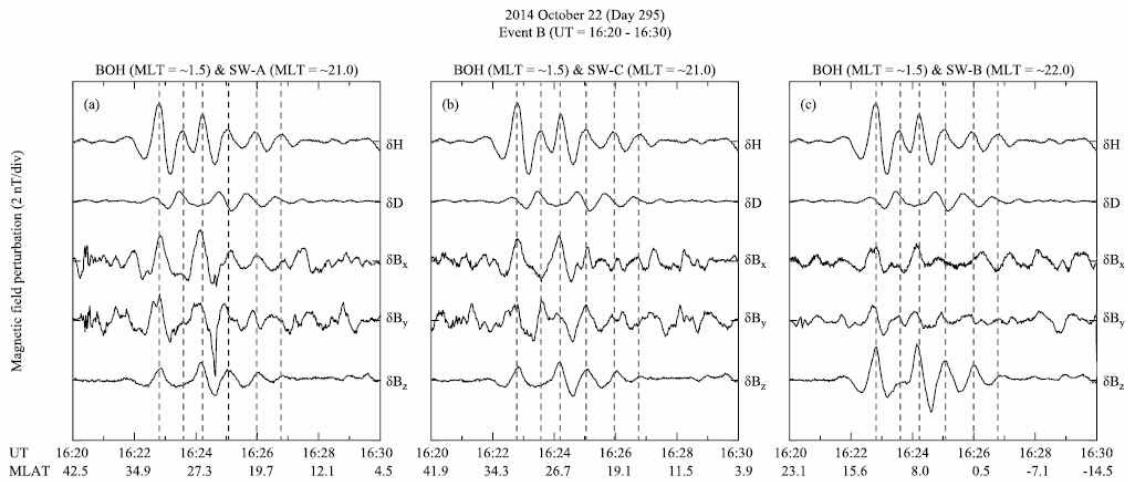


그림 34: 이벤트 B 보현산 H-D 성분 자기장 자료와 Swarm A, B, C 위성 자기장 자료

그림 34에서 Swarm 위성 By 성분의 자기장 섭동은 보현산 H 성분의 자기장 섭동과 비교할 때 유사성이 Bx, Bz 보다 적음을 볼 수 있으며 있다. Bz과 Bx 성분은 자기권 압축 파동에 의한 섭동으로 설명되며 By 성분은 알펜 파동과 관련이 있다. 이전 연구에서 서브스톰 관련 저위도 자기장 섭동은 지구 자기권 압축성 파동 에너지의 지상 전달로 이해되고 있으며 그림 34의 결과 파동 에너지가 자기권을 통과하면서 전리권 영향을 전혀 받지 않음을 알 수 있다.

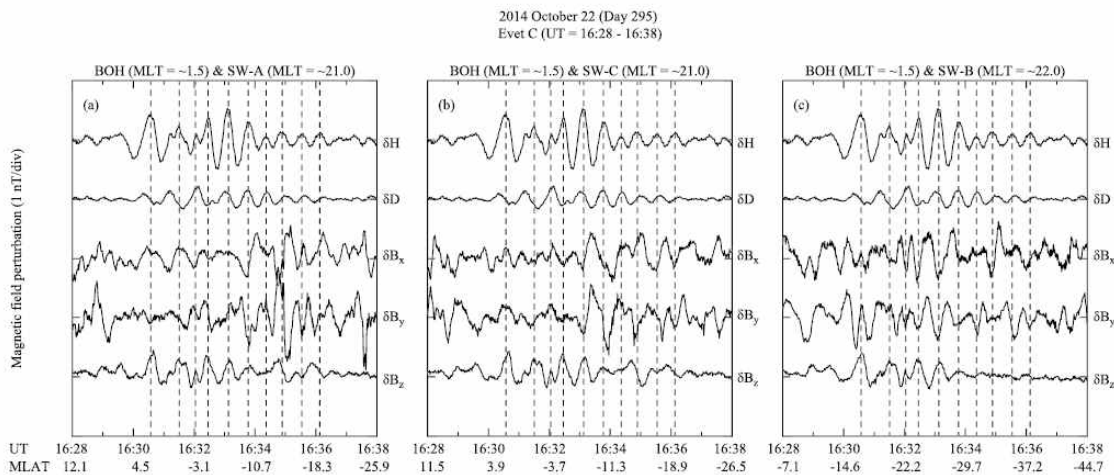


그림 35: 이벤트 C 보현산 H-D 성분 자기장 자료와 Swarm A, B, C 위성 자기장 자료

그림 35는 이벤트 C 동안에 관측된 보현산-Swarm 자기장 섭동 변화를 나타낸다. 이벤트 B와 달리 Swarm 위성들은 주로 남반구에 위치하였으며 보현산 H 성분과

180도 위상 차이를 보인다. 이러한 현상은 자기권 위성 연구 결과와 일치한다.

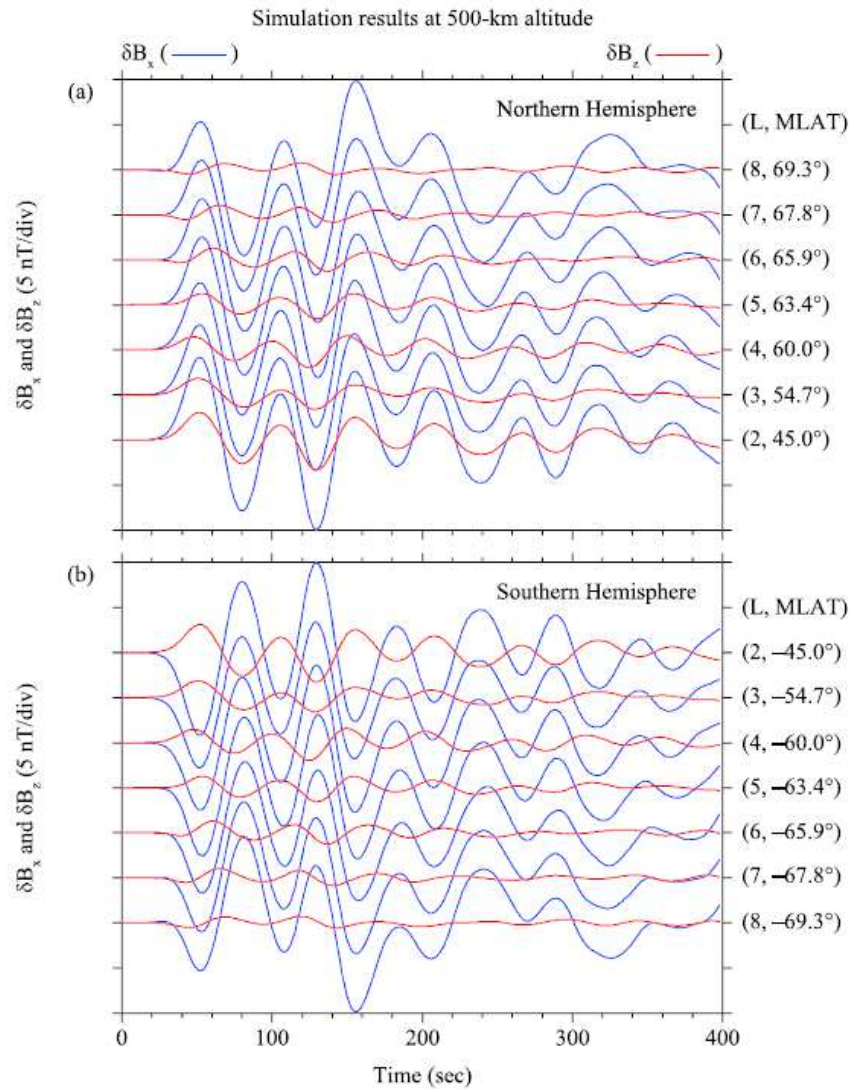


그림 36: 남(b)-북(a)반구 전리권 (고도: 500 km)에서의 Bx(파란)과 Bz(빨간) 자기장 섭동 수치계산 결과.

그림 36은 Swarm 위성 궤도 위치에 해당되는 고도 500 km, 지방시 21시 남-북반구에서의 모델 Bx, Bz 자기장 섭동을 나타낸다. 플라즈마권계면은 L = 5에 위치하고 있다. 플라즈마권에서 Bx와 Bz는 북(남)반구에서는 0도(180도) 위상 차이를 보인다. 플라즈마권계면 내에서 0도 혹은 180도 위상차이는 파동이 플라즈마권에 속박되어 있음을 의미한다. 즉 파동이 정상파로 존재하고 있는 것이다. 이러한 모델 결과는 Swarm 위성에 관측된 남-북반구 Bx와 Bz 위상 차이와 일치한다. 따라서 자기권에서 전상파의 성질이 전리권 자기장에서도 같은 모습으로 관측됨을 확인하였다. 모델 결과를 보면 플라즈마권계면 ( $L > 5$ ) 밖에서 Bx와 Bz의 위상차는 90도

를 보인다. 이것은 파동이 정상파가 아닌 진행파로서 파동 에너지가 어느 공간에 속박되어 있지 않고 한곳에서 다른 곳으로 이동하는 것을 의미한다.

## 제 6 절 지상용 우주환경 서치코일 자기장 측정기 개발

### 1. 시스템 개요

자기장 측정기는 AC, DC 중 어느 성분을 측정하느냐에 따라 서로 다른 종류의 기기를 이용하며, 그중 DC 성분 자기장 측정에는 대표적으로 플럭스게이트 자력계, AC 성분 측정을 위해서는 서치코일 (인덕션) 자력계가 우주환경 연구 목적으로 주되게 활용되고 있다. 서치코일 자력계는 일반적으로 플럭스게이트보다 크고 무겁다는 단점을 가지고 있지만, 민감도와 내구성이 좋고 보다 단순한 구조를 가지고 있어 크기에 제약이 없는 경우 민감도를 쉽고 효과적으로 상승시킬 수 있다. 지상에서의 미약한 지구 자기장 측정을 위해서 서치코일의 높은 민감도는 주요한 고려 사항이며, 민감도의 한계가 없어 특히 1 Hz 이상의 주파수에서는 서치코일이 플럭스게이트보다 좋은 성능을 가지는 것으로 알려져 있다. 지상용 모델로써의 서치코일 자력계는 현재 우주환경 연구를 위해 다양한 위치에서 운용되고 있는 중이다. 대표적인 프로젝트와 기관으로는 CARISMA (Canadian Array for Realtime Investigations of Magnetic Activity), BAS (British Antarctic Survey), Augsburg College 그리고 UNH (University of New Hampshire) 등이 있다.

이미 이전 과제와 본 과제에서 극지연구소 용 서치코일을 제작해 남극에서의 자력계 배열 구성을 시작하였으며 현재 장보고과학기지, 독일 남극기지인 Neumayer station III, 세종과학기지에 동일한 모델의 서치코일이 설치되어 정상운용중에 있다. 이는 근지구 우주공간 연구 목적으로는 국내 최초로 개발된 자력계이다. 측정 데이터는 ULF 파동의 발생 및 전파 원리 연구를 위해 계속적으로 활용되고 있다. 특히 본 과제에서 독일의 Neumayer station III에 설치한 자력계는 Neumayer station III의 위치가 플라즈마권계면의 켈레점 근처에 위치해, 이곳에서 관측된 자료를 동시간대에 다중 자료와 함께 이용하면 플라즈마권계면에서 발생된다고 생각되는 EMIC 파동의 연구에 큰 도움이 될 수 있을 것이며 이미 연구를 진행중이고 자기장 측정기 배열에 포함되는 측정기가 많을수록 보다 정밀한 수준의 연구를 할 수 있게될 것이다.

본 과제에서는 Neumayer station III와 세종기지용 서치코일 두 개를 제작했으며, 2016년에 장보고기지에 설치한 모델과 동일한 형태와 규격으로 제작해 비교 연구의 용이성을 높였고 각각 2017년과 2018년에 해당 남극기지에 설치되었다. 서치코일 자력계는 자기장 측정이 이루어지는 2축 서치코일 센서, 측정 신호를 증폭시키는 프리앰프보드, 파워나 다양한 전자 보드를 포함하는 컨트롤 박스, 300 m 길이의 메인 케이블, GPS 안테나, 저장 및 운영 용 컴퓨터로 구성되었다. (그림 37 참조) 두

서치코일 자력계 센서는 서로 수직으로 조립돼있으며 (X축(자기장 남북방향), Y축(자기장 동서방향)) 센서 내부에는 프리앰프보드와 작동시험용 신호 생성 코일이 끝단에 장착돼 있다. 센서에서 관측되는 신호는 프리앰프보드에서 1차적으로 증폭되고, 센서와 가까운 곳에 위치한 정선 박스에서 두 축의 자료가 모여 하나의 메인 케이블을 지나 컨트롤 박스 내부의 메인 앰프에서 2차적으로 증폭되고, 일정 주파수 이상의 신호는 필터링된다. 증폭된 두 축 신호는 역시 컨트롤 박스 내부의 데이터 수집 (DAQ) 보드로 전달돼 컴퓨터에 기록된다. 측정신호는 16비트 분해능과 20 samples/sec의 속도로 수집된다. 디지털화된 데이터는 ASCII포맷으로 저장되며, Network Attached Storage (NAS)와 동기화된다.

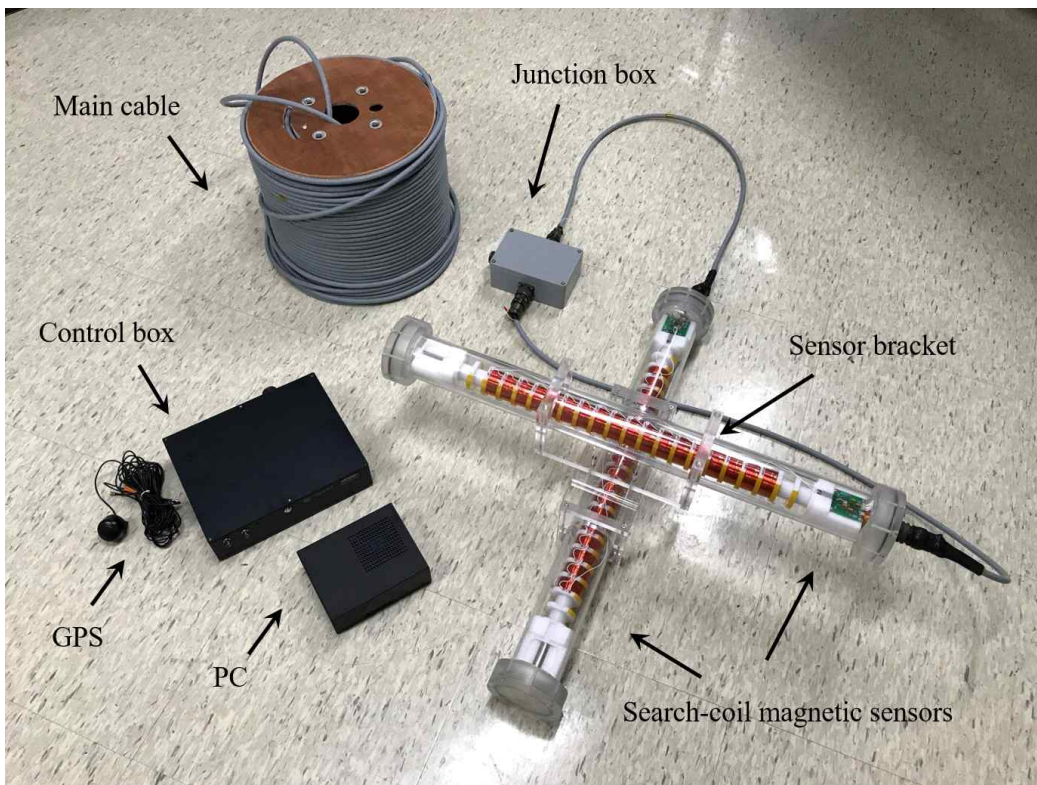


그림 37: 서치코일 자력계의 시스템 구성

장보고기지에 설치된 모델과는 자료수집 분해능이 변경되어 20 Hz 자료를 생성하게 됐고, 보다 작은 컴퓨터를 이용하게 됐다. 시스템 재원은 표 4에 나타나 있다.

Type	Bi-axial search-coil magnetometer	
Compositions (ea.) & size (mm)	Sensor (2)	920 × 130 (D)
	Bracket (1 set)	300 × 300 × 160
	Junction box (1)	190 × 125 × 80
	Main cable spool (1)	400 × 450 (D)



	Control box (1)	320 × 260 × 78
	PC (1)	250 × 150 × 150
	GPS antenna (1)	50 × 50 (D)
Mass (kg)	Instrument (excepted main cable)	< 30
	Main cable	< 50
	Total	< 80
Frequency response	1 mHz to 5 Hz (Ultra Low Frequency)	
Sensor sensitivity	364 $\mu\text{V}/(\text{nT}\cdot\text{Hz})$	
Resolution	1.5 $\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz	
Sampling rate	20 samples/s/axis	
File size and format	60.8 Mbyte/day (2 ch), ASCII	

표 4: 서치코일 자력계의 규격 및 사양정보

## 2. 시스템 설계

### 가. 서치코일 자력계 센서

서치코일 자력계는 센서 한 축 당 크기가 920 (L) × 130 (D) mm, 무게가 10.5 kg이며, 고 투자율의 강자성체 뮤메탈 코어에 구리선이 감긴 형태이다. 강자성체 코어는 투자율이 높아 센서가 보다 민감하게 자기장 변화에 반응하게 해주며, 구리선은 감은 수가 많아질수록 센서의 민감도가 증가한다. 대략 1축당 18만 회를 감아 만들었고, 효율적인 권선을 위해 자동 권선기를 사용했다. 센서의 형태는 코어에 직접 감는 것이 아닌 분리가 가능한 1만 회씩 감긴 스펴을 18개 연결해 만들었다. 이와 같은 제작법은 장비의 이상 작동 시 고장난 곳을 확인 및 수리하기가 쉽다. 결합이 안정적이도록 각 스펴은 패턴 형태로 설계되었고, 재질은 전기적 성질이 적고 강도가 강한 Acetal (Delrin®)로 만들었으며 제작 과정에서 권선기 사용 시의 최적의 속도와 장력을 찾아내기 위해 다수의 시험 제작을 반복했다. 센서 양 끝단은 자기 외곡을 막기 위해 권선을 하지 않고 빈 스펴을 2개씩 추가해 코어 중앙부분에만 선이 감기도록 하였다.

센서의 외부는 야외에 설치되므로 외부환경을 견딜 내구성과 남극의 눈이 녹을 경우의 습기를 대비할 방수기능이 필요하며, 이를 위해 폴리카보네이트 재질의 튜브를 센서 케이스로 이용하였고 양 끝단은 아크릴 재질의 뚜껑으로 막았다. (그림 38 참조)

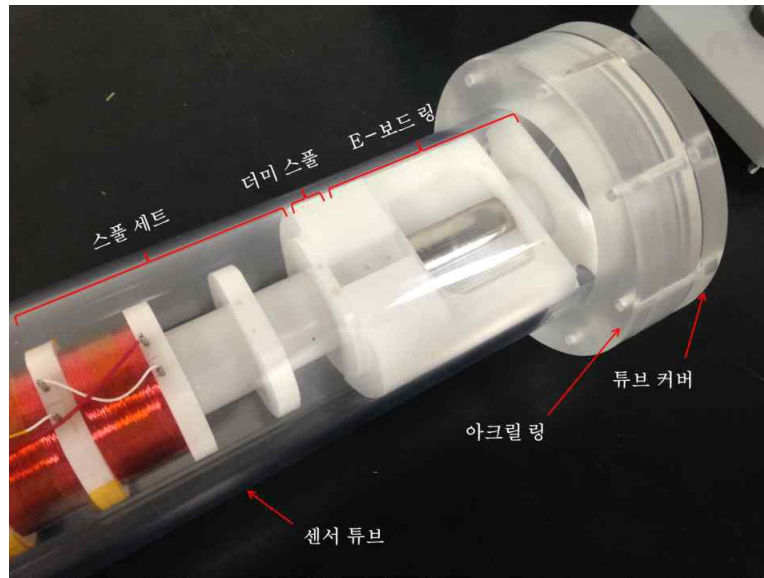


그림 38: 센서 튜브와 아크릴 링, 튜브 커버

센서와 바로 연결된 프리앰프보드는 미약한 측정 신호를 1차로 증폭해주며 메인 케이블에서의 신호 손실을 최소화시킨다. 프리앰프보드는 121배의 증폭률에 10 Hz 공진 주파수가 설정되어 있고, 프리앰프의 공진 주파수와 메인 아날로그 보드의 주파수 특성이 함께 조합돼 측정 가능 주파수 범위가 설정된다. 보드 크기는 55 × 50 mm로 센서의 튜브 내에 삽입이 가능한 크기이고 무게는 12 g이며, 인가전압은 ±12 V 이다. 그림 39는 프리앰프보드의 모습과 E-보드 링과의 장착 모습을 보여준다.

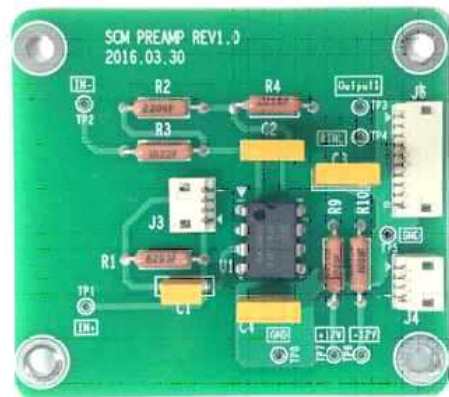


그림 39: 프리앰프보드 (우측)와 E-보드 링과의 장착모습 (좌측)

#### 나. 컨트롤 박스

컨트롤 박스는 주요한 전자 부품들을 포함하고 있고, 외부 전면에 측정신호 확인용 BNC 커넥터, 시스템 파워 LED, DAQ 상태 LED, 테스트 신호 스위치가 장착되어

있고, 외부 후면에는 좌측부터 파워 노이즈 필터, 메인 커넥터, DAQ USB 포트, GPS 안테나 커넥터, GPS 포트가 위치해있다. (그림 40)



그림 40: 컨트롤 박스 전면 (좌측)과 후면 (우측)

컨트롤 박스 내부는 크게 메인 아날로그 보드, DAQ 보드, 파워로 이뤄져있다. (그림 41) 메인 아날로그 보드는 크기가  $150 \times 100$  mm, 무게는 88 g이고, 2차 신호 증폭, 차단 주파수설정을 해주며 테스트 신호를 발생시키는 오실레이터와 일반적인 교류 전원을 12 V로 변경해주는 기능이 있으며, GPS 보드도 포함돼 있다. 메인 아날로그 보드에서 6 Hz 이상 주파수를 필터링하고 수만배로 증폭된 신호는 DAQ 보드로 전달되어 PC에 기록된다.

극지연구소

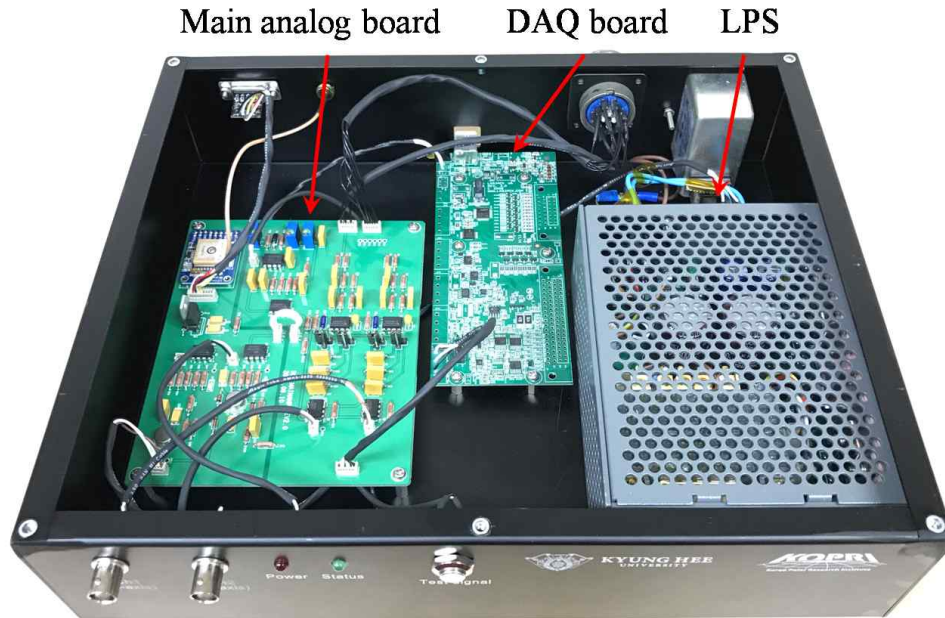


그림 41: 컨트롤 박스 내부 구성

오실레이터는 1 Hz, 11 V의 인가신호를 발생시켜 센서단 E-보드 링에 감겨있는 테스트 코일로 전달한다. 테스트 코일에서는 주기적인 자기섭동이 발생되고, 센서가 이를 측정하는 방식으로 시스템의 기능 검증이 이뤄진다. 오실레이터의 신호 발생은 컨트롤 박스 전면의 테스트 시그널 스위치로 조작되며, 2축 센서가 동시에 확인된다. 마지막으로 메인아날로그보드에는 파워 레귤레이터가 설계되어있어, 리니어 파워 서플라이의  $\pm 15$  V의 전압을 프리앰프와 메인아날로그보드의 인가전압인  $\pm 12$  V로 변환하여 각 보드로 공급한다.

### 3. 시스템 검증 실험

기기의 성능 검증을 위해 반드시 세 가지 실험을 거쳐야 하며, 각각 장기간 구동 실험, 응답주파수 실험, 분해능 실험이다. 그 외에도 다양한 자기장 영향에 대한 실험을 실시했다.

#### 가. 응답주파수 실험

서치코일 자력계의 응답 주파수 시험은 기기의 측정 주파수 범위 검증을 목적으로 가지며, 이는 인가 신호에 따른 시스템의 공진주파수와 차단주파수의 확인을 통해 이루어진다. 시험 구성은 그림 42에 나타나있다. 테스트 솔레노이드에는 평선제너레이터의 사인파가 전달되며, 이에 따라 센서 외부에 시간에 따라 변하는 인공자기장이 발생된다. 센서의 출력 값은 증폭회로를 통해 오실로스코프로 실시간 모니터링

되며, 솔레노이드의 인가 주파수 변화 (0.1 ~ 30 Hz)에 따른 센서 출력 값을 기록 및 비교하여 시스템의 응답 주파수를 확인한다. 시험은 경희대학교 천문대 자력계 실험실에서 진행되었으며, 인가 주파수 이외의 시설로 인한 외부 자기장 노이즈를 차폐하기 위해서 시험에는 자기 쉴딩 케이스가 사용되었다. 시스템의 응답 주파수 시험결과는 그림 43에 나타나있다. 기기의 응답주파수는 3 Hz일 때 가장 큰 출력치가 확인되었으며(공진주파수), 6 Hz 근방에서 - 3 dB corner frequency인 차단주파수가 설계치와 동일하게 확인되었다. (그림 44)

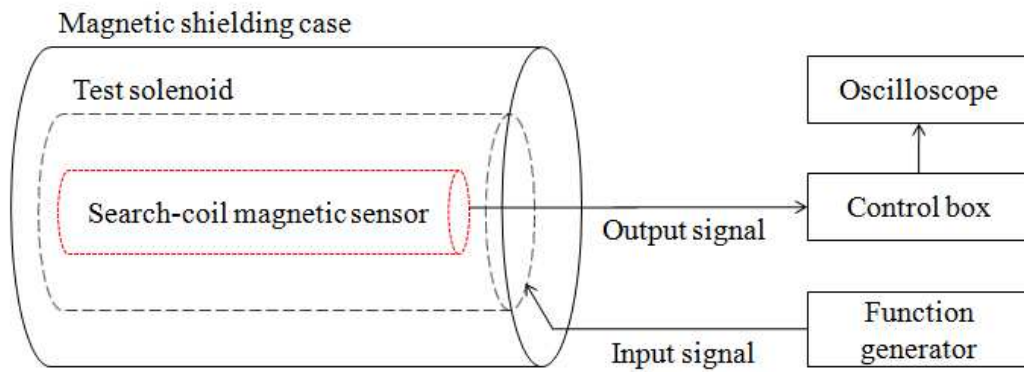


그림 42: 서치코일 자력계 시험 구성 개념도

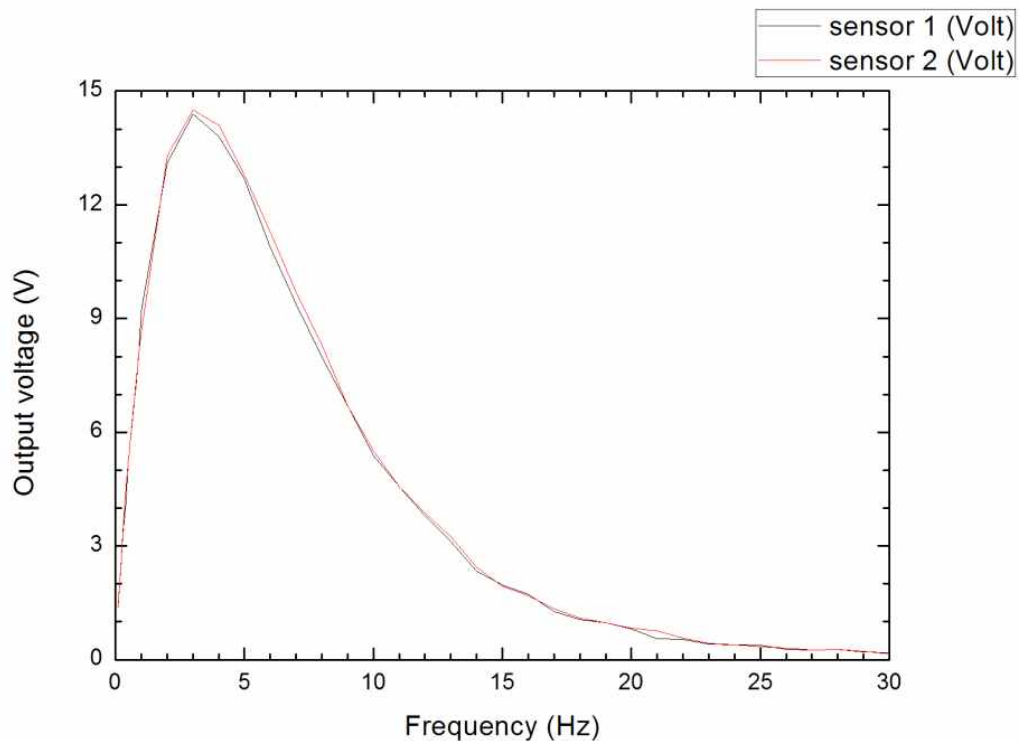


그림 43: Neumayer station III용 기기 응답주파수 실험

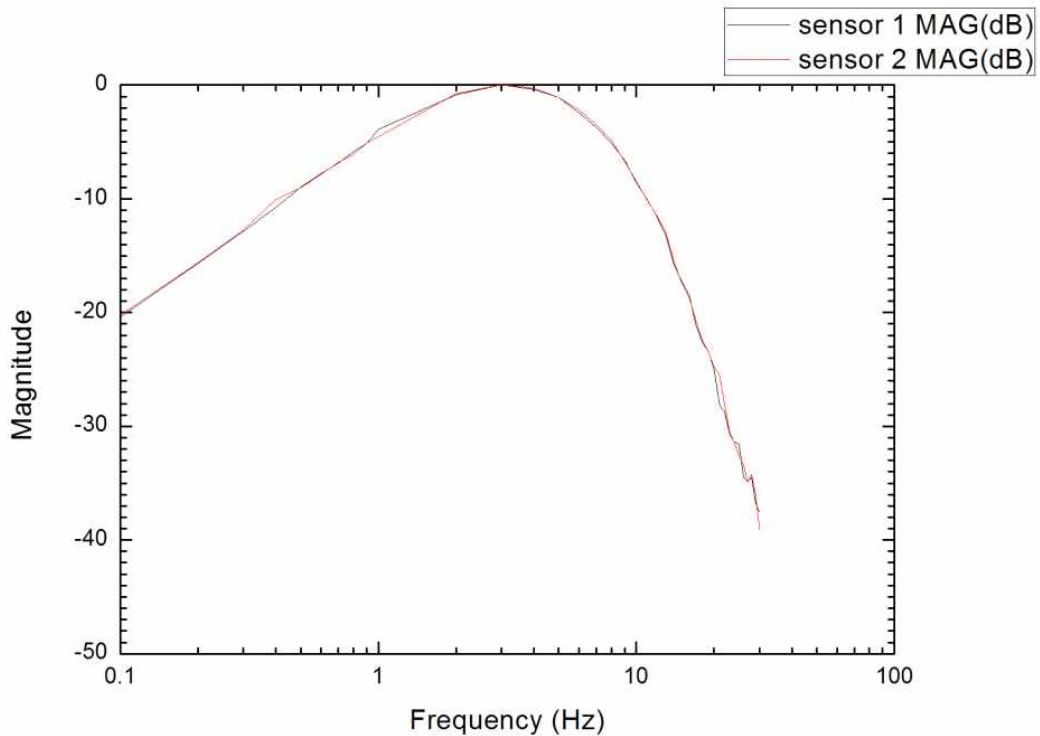


그림 44: magnitude 그래프

#### 나. 분해능

분해능은 자기장 변화를 측정할 수 있는 최소 정도를 의미하며, 자력계의 성능을 확정 짓는데 가장 중요한 사양 중 하나다. 분해능 시험을 위해서는 정확한 시스템 노이즈 레벨의 확인이 요구되며, 본 챕터에서는 자력계의 분해능과 노이즈 레벨을 어떻게 측정하였는지 기술되어있다. 해당 시험은 앞서 설명한 응답주파수 시험과 구성은 동일하나 방법에서 약간의 차이가 있다. 인공 자기장 세기는 고정된 체 여러 주파수에 따라서 기기의 측정값을 확인하는 응답주파수 시험과는 달리, 분해능 시험은 특정 주파수에서의 인공 자기장 세기를 서서히 올려가며 시험을 진행한다. 인공 자기장은 해당 주파수에서의 노이즈 플로어 (Minimum Discernable Signal or MDS) 보다 3 dB 이상 높을 때까지 세기를 올려주게 되며, 이 때의 자기장 세기를 자력계의 분해능 사양으로 결정하게 된다. 이와 같은 시험을 0.5, 1, 2 Hz에서 수행하였으며, 두 센서 각각을 대상으로 진행하였다. 측정을 위해서 오실로스코프가 사용되며, 각 시험에 대한 FFT (Fast Fourier transform) 스크린샷이 그림 45-47에 나타나있다.

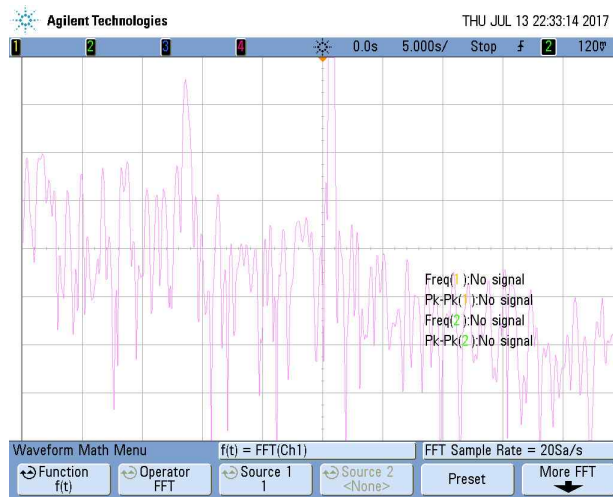


그림 45: Neumayer station III x축 센서의 0.5 Hz에서의 분해능 시험 결과

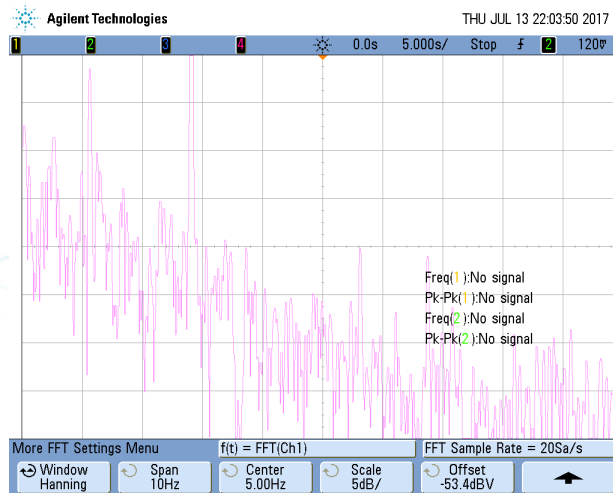


그림 46: Neumayer station III x축 센서의 1.0 Hz에서의 분해능 시험 결과

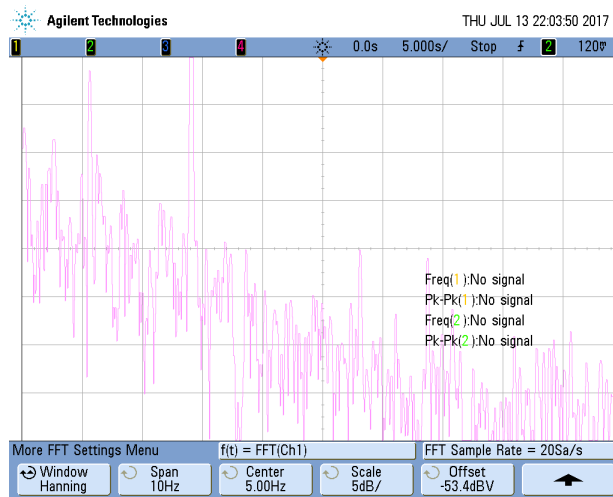


그림 47: Neumayer station III x축 센서의 2.0 Hz에서의 분해능 시험 결과

#### 다. 그 외 실험

장기간 구동실험을 통해 특정 노이즈나, 기기의 이상 종료 등을 확인할 수 있다. 그림 48은 세종 지지용 센서 개발도중, 원인을 알 수 없는 잡음으로 해당 잡음원을 찾기 위해 차폐기를 세워 z축 방향의 잡음을 측정하는 모습이다.



그림 48: z축 잡음 확인 실험

#### 4. 배송

세종지지용 기기와는 다르게 독일 Neumayer station III에 납품한 기기는 다른 배



송 절차를 거쳐야 해, 극지연구소 직원을 통한 설치가 아닌 독일 AWI에 납품 후 해당 기지 인원들이 설치하는 방식으로 진행되었다. 이를 위해 납품 문서, 패키징 작업, 설치 설명서 작성 및 안내과정이 추가되었다. 아래 표 5와 그림 49~그림 51이 자력계 배송품 목록 및 패키징 모습을 보여준다.

Item	Size (mm)	Mass (kg)	QTY	Contents
Packing case	1500 × 650 × 350	52	1 ea.	MICA-S Compositions (with redundancy bracket)
Main cable spool	400 × 450 (D)	< 50	300 m	wound main cable
Storage box	400 × 300 × 130	< 3	1 ea.	Redundancy 1set (Electronics, Harness, GPS)

표 5: 서치코일 자력계의 배송품 리스트

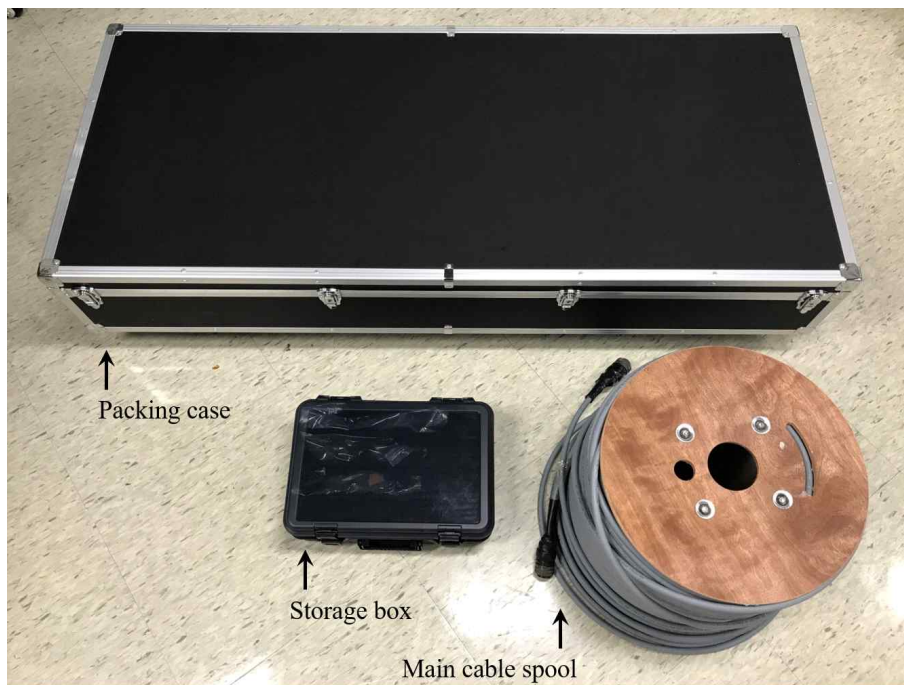


그림 49: 서치코일 자력계의 배송품 구성

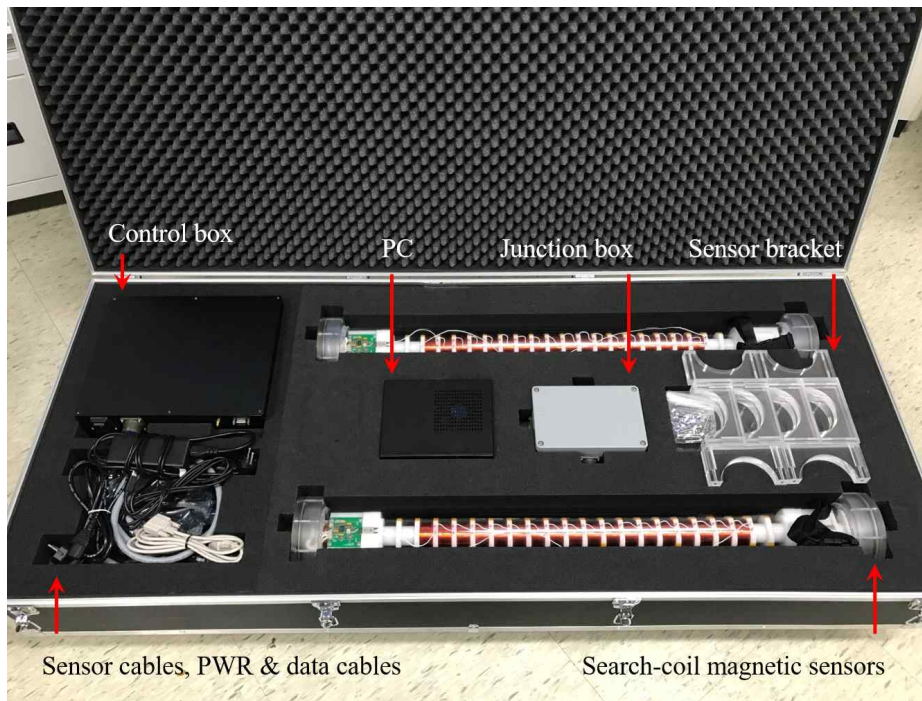


그림 50: Packing case의 내부 구성품



그림 51: Storage box 내부의 구성품 모습 (GPS 및 여유분 전자보드, 케이블)

배송품은 2017년 8월 1일 한국 극지연구소로 납품되었으며, 항공배송을 통해 8월 10일 독일의 브레멘에 도착하였다. 배송된 자력계는 2017년 9월 11일 독일 현지에서

서 기능시험이 진행되었으며 이에 대한 시험 전경은 아래 그림 52와 같다. 시험은 경희대학교와 협력한 NJIT 김효민 박사와 AWI 연구원들이 함께 진행하였다. 자력계는 AWI 관계자들만을 통해 남극기지에 설치되기 때문에 해당 일정동안 자력계 설치를 위한 인수인계도 진행되었다.



그림 52: 독일 AWI에서 진행된 자력계의 기능시험 전경

## 5. 설치 및 운용

### 가. Neumayer station III

설치 컨셉 다이어그램은 그림 53과 같고, 장보고기지와 세종기지와는 다르게 얼음 위에 쌓인 눈 속에 설치되었다. (그림 54) 컨트롤 박스부도 그림 53의 계획과 같이 인원들이 생활하는 장소에서 멀리 떨어진 곳에 따로 방수 상자 안에 설치되었다. (그림 55 참조) 저주파수 영역에서 원인을 알 수 없는 잡음이 있어 원인을 확인 중에 있다. 서치코일 자력계는 2017년 12월 말에 AWI에서 Neumayer III 기지로 배송되었으며 설치되어 2년간 운용되었다.

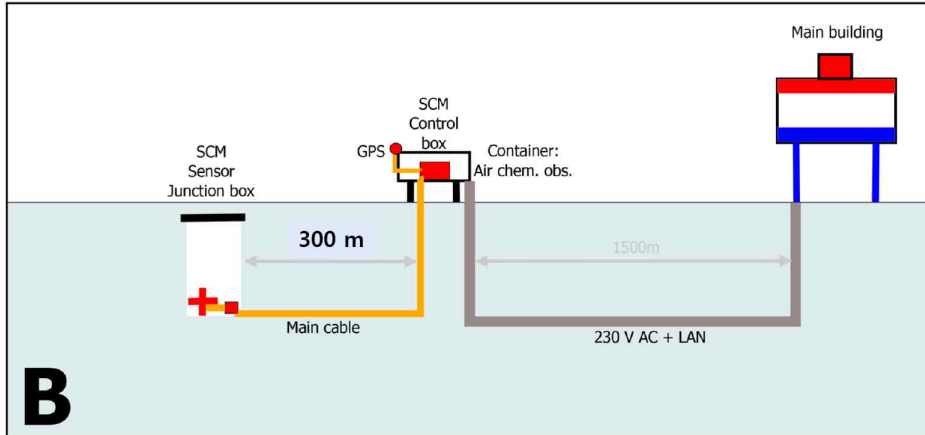


그림 53: 서치코일 자력계의 Neumayer 기지 설치 컨셉 다이어그램

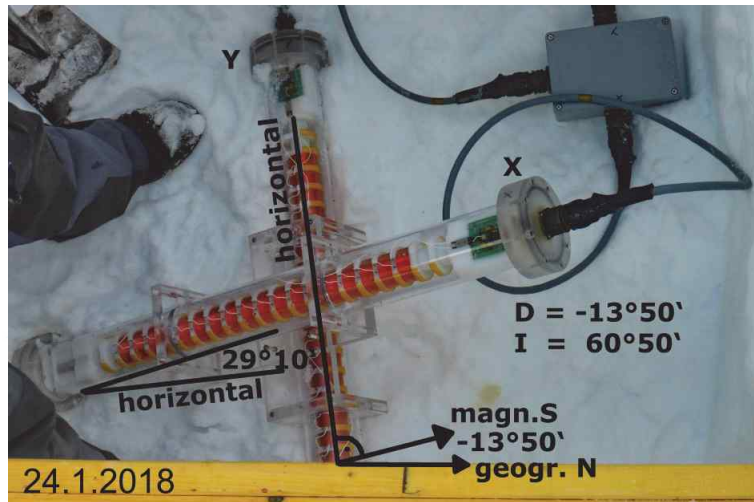


그림 54: 눈 속에 설치한 서치코일 자력계

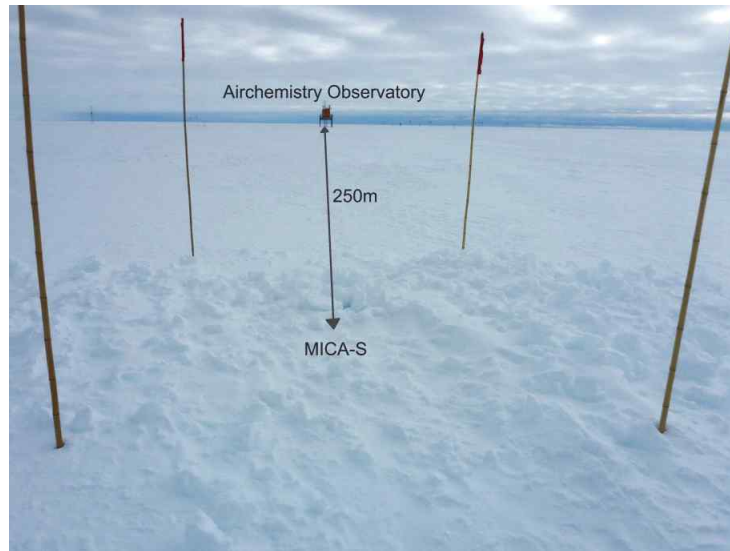


그림 55: 설치 완료 사진

#### 나. 세종기지

세종기지는 극지연구소의 장보고기지에서 서치코일 자력계를 설치 경험이 있는 하계 연구원이 설치하였으며, 지난 과제의 장보고기지과 같은 방식으로 설치하였다. 설치 장소는 그림 56과 같다.



그림 56: 세종기지 서치코일 자력계 설치 위치

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

	목표	결과	비고
SCI 논문	3	5	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 1차년도: SCI급 저널 1건 게재</li> <li>· 2차년도: SCI급 저널 2건 게재</li> <li>· 3차년도: SCI급 저널 2건 게재</li> </ul>
지상 자기장 측정기개발	2	2	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 서치코일 자기장 측정기 2기 개발</li> <li>· 독일 Neumayer 남극기지, 세종기지에 설치 및 운용</li> </ul>

### 1. 과학 분야

#### 가. 논문

1)SCI급(Journal of Geophysical Research, 2017) 게재 1건: SC-associated electric field variations in the magnetosphere and ionosphere convective flows

2)SCI급(Earth, Planets and Space, 2018) 게재 1건: Distribution of equatorial Alfvén velocity in the magnetosphere: a statistical analysis of THEMIS observations

3)SCI급(Journal of Geophysical Research, 2018) 게재 1건: Characteristics of sudden commencements observed by Van Allen Probes in the inner magnetosphere

4)SCI급(Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2019) 게재 1건: Characteristics of Pc5 activity at high latitude stations in Antarctica

5)SCI급(Journal of Geophysical Research, 2019) 게재 1건: Magnetic field oscillations observed by Swarm satellites in the nightside upper ionosphere during low-latitude Pi2 pulsations

#### 나. 학술대회 발표

1)국제(JpGU 일본 2017): Occurrence of EMIC waves and plasmaspheric plasmas derived from THEMIS observations in the outer magnetosphere (구두)

2)국제(JpGU 일본 2018): SC-associated electric field variations in the magnetosphere and ionosphere (구두)

3)국제(Chapman Conference 미국 2018): Relationship between EMIC wave occurrence and cold plasma density distribution in the outer magnetosphere: THEMIS observations (구두)

4)국제(JpGU 일본 2018): Magnetic field oscillations observed by Swarm satellites in the nightside upper ionosphere during low-latitude Pi2 pulsations (구두)

## 2. 기술 분야

### 가. 장비개발

1) 1차년도: 프로토 타입 서치코일 자기장 측정기 개발

2) 2차년도: 서치코일 자기장 측정기 개발, 남극 독일 Neumayer 기지 설치 및 운용

3) 3차년도: 서치코일 자기장 측정기 개발, 남극 세종기지 설치 및 운용



KOPRI  
극지연구소

## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 제 1 절 추가연구의 필요성

#### 1. 과학 분야

극지역은 중위도, 저위도 지역과는 달리 태양풍 에너지가 직접 전달되는 지역으로 자기장 변화가 가장 심하고, 중위도, 저위도와는 다른 특성의 현상들이 많이 관측된다. 자기장의 변화는 극지역 전리권에 흐르는 강한 전류에 의한 경우가 많은데, 이는 태양풍의 영향을 받은 자기권이 운동학적으로 변화한 것과 직·간접적으로 연동되어 있다. 장보고기지에 전리권, 자기권을 비롯해 극지 고층대기를 관측할 수 있는 장비의 숫자가 많아지면서, 자기권-전리권의 연동 현상을 연구하는데 있어 더욱 복합적인 원인 분석이 가능해 여러 현상의 연관성을 조사하고 있다. 특히나 장보고기지에서 처음 예상한 것보다 많은 오로라가 관측되어, 전리권, 자기권의 변화가 오로라 현상과의 연관성도 있는지 주목받고 있다.

본 과제 수행으로 얻어진 자료 분석 기술과 자기권-극 전리권·고층대기 연동에 대한 축적된 과학적 지식을 바탕으로 장보고기지에서 운영하고 있는 전리층 관측 장비, 대기광 자료, 오로라 자료를 이용하여 자기권-극 전리권·고층대기 연구 수행을 할 계획이다. 우리나라 관측 장비를 이용하여 극 전리권·고층대기 연구결과를 국제 학술지에 발표함으로써 극지연구소의 국제 인지도를 향상에 기여할 수 있으므로 자기권-극 전리권·고층대기 연동 연구에 대한 지원이 계속되어야 한다.

#### 2. 기술 분야

우주과학 분야의 국가적 지원으로 1995년 인공위성이 발사된 이래 지금까지 우주환경 자기장 측정기에 대한 국내 원천기술은 전무한 상태였으나 이전 과제와 본 과제를 통하여 서치코일 자기장 측정기 제작 기술을 확보할 수 있었다. 특히나 본 과제에서 독일의 Neumayer station III에도 동일한 모델의 서치코일 자기장 측정기를 설치해 운용하는 데 성공했다. 그러나 미국, 일본, 유럽에서는 다수의 자기장 측정기를 이용하여 네트워크를 구축하여 운영하고 있어 선진국 수준의 연구를 위해서는 넓은 범위에 같은 규격의 자기장 측정기를 다수 설치하여 넓은 지역의 우주환경 변화 연구해야한다. 또한 서치코일을 보다 효율적으로 생산하고, 크기나 무게 등을 조절하는 방향으로 개선하고, 플럭스게이트 등의 더 복잡하고 범용성이 높은 장비의 원천기술을 확보하기 위해서는 개발 사업의 지속이 필요하며, 향후 자기장 측정기 개발사업이 계속된다면 지상 자기장 원천기술 확보가 확실하며 이 기술은 이후의 우주 위성용 자기장 개발에 크게 공헌 할 수 있다고 생각된다.



## 제 6 장 참고문헌

- Anderson, B. J., Erlandson, R. E., and Zanetti, L. J. (1992a), A statistical study of Pc 1-2 magnetic pulsations in the equatorial magnetosphere: 1. Equatorial occurrence distributions. *Journal of Geophysical Research*, 97(A3), 3075-3088.
- Anderson, B. J., Erlandson, R. E., and Zanetti, L. J. (1992b), A statistical study of Pc 1-2 magnetic pulsations in the equatorial magnetosphere, 2. Wave properties. *Journal of Geophysical Research*, 97(A3), 3089-3101.
- Altman, C., and E. Fijalkow (1980), The horizontal propagation of Pc1 pulsations in the ionosphere, *Planet. Space. Sci.*, 288, 61-68
- Chen, L. and A. Hasegawa (1974), A theory of long-period magnetic pulsations: 1. Steady state excitation of field line resonance, *J. Geophys. Res.*, 79, 1024-1032
- Engebretson, M. J., K.-H. Classmeier, M. Stellmacher, W. J. Hughes, H. Lühr (1998), The dependence of high-latitude Pc5 wave power on solar velocity and on the phase of high-speed solar wind streams, *J. Geophys. Res.*, 103, 26271-26283
- Fraser, B. J. (1975), Polarization of Pc1 pulsations at high and middle latitudes, *J. Geophys. Res.*, 80, 2797-2807
- Hayashi et al. (1981), The extent of Pc1 source region in high latitude, *Can. J. Phys.*, 59, 1097-1105
- Kennel, C. F., and Petschek, H. E. (1966), Limit on stably trapped particle fluxes. *Journal of Geophysical Research*, 71(1), 1-28.
- Kim, H., M. R. Lessard, M. J. Engebretson, and H. Lühr (2010), Ducting characteristics of Pc1 waves at high latitudes on the ground and in space, *J. Geophys. Res.*, 115, A09310
- Kim, H., M. R. Lessard, M. J. Engebretson, and M. A. Young (2011), Statistical study of Pc1-2 wave propagation characteristics in the high-latitude ionospheric waveguide, *J. Geophys. Res.*, 116, A07227
- Kim, K.-H., Takahashi, K., Lee, D.-H., Sutcliffe, P. R., & Yumoto, K. (2005). Pi2 pulsations associated with poleward boundary intensifications during the absence of substorms. *Journal of Geophysical Research*, 110, A01217. <https://doi.org/10.1029/2004JA010780>
- Kim, K.-H., Kwon, H.-J., Lee, D.-H., Jin, H., Takahashi, K., Angelopoulos, V., et al. (2010). A comparison of THEMIS Pi2 observations near the dawn and dusk sectors in the inner magnetosphere. *Journal of Geophysical*

- Research, 115, A12226. <https://doi.org/10.1029/2010JA016010>
- Kim, K.-H., Shiokawa, K., Mann, I. R., Park, J.-S., Kwon, H.-J., Hyun, K., Jin, H., Connors, M. (2016). Longitudinal frequency variation of long-lasting EMIC Pc1-Pc2 waves localized in the inner magnetosphere. *Geophysical Research Letters*, 43, 1039-1046. <https://doi.org/10.1002/2015GL067536>
- Kwon, H.-J. et al. (2012), Local time-dependent Pi2 frequencies confirmed by simultaneous observations from THEMIS probes in the inner magnetosphere and at low-altitude ground stations, *J. Geophys. Res.*, 117, A01206, doi:10.1029/2011JA016815.
- Kwon, H.-J., K.-H. Kim, G. Jee, J.-S. Park, H. Jin, and Y. Nishimura (2015), Plasmapause location under quiet conditions ( $K_p \leq 1$ ): THEMIS observations, *Geophys. Res. Lett.*, 42, 6145-6153, doi:10.1002/2015GL066090.
- Kwon, H.-J., Kim, K.-H., Jun, C. W., Takahashi, K., Lee, D.-H., Lee, E., et al. (2013). Low-latitude Pi2 pulsations during intervals of quiet geomagnetic conditions ( $K_p \leq 1$ ). *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118, 6145 - 6153. <https://doi.org/10.1002/jgra.50582>
- Lysak, R., Waters, Colin L., and Sciffer Murray D. (2013), Modeling of the ionospheric Alfvén resonator in dipolar geometry, *Journal of Geophysical Research*, VOL. 118, 1514-1528
- Manchester, R. N. (1966), Propagation of Pc1 Micropulsations from high to low latitudes, *J. Geophys. Res.*, 71, 3749-3754
- Manchester, R. N. (1968), Correction of Pc1 Micropulsations at Spaced Stations, *J. Geophys. Res.*, 73, 3549-3556
- Neudegg, D. A., B. J. Fraser, F. W. Menk, C. L. Waters, G. B. Burns, and R. J. Morris (2000), ULF wave attenuation in the high latitude ionospheric waveguide, *Adv. Space Res.*, 25, 1599-1565
- Nosé, M., T. Iyemori, M. Sugiura, and J. A. Slavin (1995), A strong dawn/dusk asymmetry in Pc5 pulsation occurrence observed by the DE-1 satellite, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2053-2056
- Samson, J., J. Jacobs, and G. Rostoker (1971), Latitude-dependent characteristics of long-period geomagnetic micropulsations, *J. Geophys. Res.*, 76, 3675-3686
- Takahashi, K., M. D. Hartinger, V. Angelopoulos, K.-H. Glassmeier (2015), A statistical study of fundamental toroidal mode standing Alfvén waves using THEMIS ion bulk velocity data, *J. Geophys. Res.*, 120.
- Vellante, M. et al. (2004), Ground/satellite signatures of field line resonance: A

tset of theoretical prediction, J. Geophys. Res. 109, A06210



## 주 의

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