

TSPE16090-028-5

우주환경 변화에 의한 자기권-극지  
전리권 · 고층대기 연동현상 연구

Study of magnetosphere-polar ionosphere · upper  
atmosphere coupling during space environment changes



경희대학교(국제캠퍼스)

# 제 출 문

극지연구소장 귀하

본 보고서를 “북극 4-D 대기 관측망 구축 및 고층대기와 기후변화의 상호관계 규명(부제: 극지 고층대기와 우주환경 변화 연구)”과제의 위탁연구“우주환경 변화에 의한 자기권-극지 전리권·고층대기 연동현상 연구”과제의 최종보고서로 제출합니다.



2017. .

총괄연구책임자 : 지 건 화  
위탁연구기관명 : 경희대학교  
위탁연구책임자 : 김 관 혁  
위탁참여연구원 : 신 재 혁  
“ : 권 종 우

## 보고서 초록

위탁연구과제명	우주환경 변화에 의한 자기권-극지 전리권 · 고층대기 연동현상 연구				
위탁연구책임자	김관혁	해당단계 참여연구원수	4	해당단계 연구비	100,000,000원
연구기관명 및 소속부서명	경희대학교(국제캠퍼스)/ 우주과학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 :		상대국연구기관명 :		
요약(연구결과를 중심으로 개조식 500자 이내)				보고서 면수	
<p>과학 분야: 자기권 에너지 극지 전리권 · 고층대기 전달과정 규명</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 행성간 충격파 통과 시 자기권 전기장 · 자기장 변화 연구</li> <li>• Super DARN 자료를 이용하여 전리층 전기장 변화와 위성에서 관측한 자기권 전기장 · 자기장 변화의 상관관계를 조사</li> <li>• 전리권 전기장 변화는 자기권 자기장의 시간적 변화에 의한 결과로 설명됨을 확인</li> <li>• 위성자료를 이용한 극고요 우주환경에서 플라즈마권계면의 위치 통계적 연구</li> <li>• 이전 연구와 달리 극고요 우주환경 플라즈마권계면의 평균거리는 정지궤도 근처에서 형성됨</li> <li>• 자기권 관측 플라즈마 파동과 지상관측 플라즈마 파동의 상관관계 연구</li> <li>• 극고요 우주환경에서 정지궤도 플라즈마 파동의 공간적 분포 통계 연구 수행</li> <li>• 플라즈마권계면 근처에서 플라즈마 파동 발생 확인 및 지상 전달과정 연구</li> </ul> <p>기술 분야: 지상용 우주환경 자기장 측정기 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 국내 최초로 지구 자기권에서 발생한 플라즈마 파동 관측 서치코일 자기장 측정기 장비 개발</li> <li>• 개발된 자기장 측정기 장보고 기지에 설치 및 운영 중</li> </ul>					
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	행성간 충격파, 지구자기권, 플라즈마권계면, 플라즈마 파동, 서치코일자기장 측정기			
	영 어	Interplanetary shock, Earth magnetosphere, plasmopause, plasma waves, search coil magnetometer			

# 요 약 문

## I. 제 목

우주환경 변화에 의한 자기권-극지 전리권·고층대기 연동현상 연구

## II. 연구개발의 목적 및 필요성

격변 우주환경 시 자기권 에너지의 극지 전리권·고층대기 전달과정 규명 및 지상용 우주환경 자기장 측정기 개발

## III. 연구개발의 내용 및 범위

- 위성자료와 지상 자료를 이용한 격변 우주환경의 전기장/자기장 전달과정 조사
- 지상용 우주환경 자기장 측정기 개발

## IV. 연구개발결과

- 우주환경 변화에 의한 극지 전리권·고층대기 물리량 변화의 시공간적 인과관계 이해
- 지구 자기권에서 발생하여 지구로 전파되는 전자기파 측정 장비 서치코일 자기장 측정기 개발
- 개발된 자기장 측정기 장보고 기지에 설치 및 운영

## V. 연구개발결과의 활용계획

- 극지연구소 지자기 측정기 자료 활용에 따른 국제 우주환경 분야에 극지연수도 인지도 향상.
- 국내 최초로 자기장 측정기 개발에 의한 원천기술 확보 및 근지구 우주 사업에 활용.

# S U M M A R Y

## I. Title:

Study of magnetosphere-polar ionosphere • upper atmosphere coupling during space environment changes

## II. Project Goal and The need

Understanding how magnetospheric energy is transported to the polar ionosphere • upper atmosphere during sudden space environment change and developing search coil magnetometer to detect magnetic perturbations.

## III. Objectives & Scopes

- Study of magnetic energy transfer to the polar ionosphere • upper atmosphere using spacecraft data and ground data
- Development of ground-based search coil magnetometer.

## IV. Result

- Understanding a causal relationship between physical parameters in magnetosphere and polar ionosphere • upper atmosphere.
- Developing a search coil magnetometer to observe electromagnetic waves propagating from the magnetosphere to the Earth.
- Search coil magnetometer is installed at Jang Bogo station.

## V. Application Plan

- Contribution to rising global awareness of KOPRI using developed magnetometer data in the international space weather society.
- Having core technology to produce magnetometer and contribution to space technology for near-Earth 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 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 7 장 참고문헌



# 제 1 장 서 론

## 제 1 절 연구개발의 목적

본 과제에서는 태양풍 변화에 의한 “자기권-극지 전리권·고층대기 연동계” 물리량 변화 연구와 우주핵심기술 중의 하나인 “지상용 우주환경 자기장 측정기”를 개발하려 한다. 즉 “과학 분야”와 “기술 분야”를 병행하여 연구 과제를 수행하였다.

## 제 2 절 연구과제의 필요성

1. 태양의 흑점폭발 (코로나 질량 방출 및 태양플레어)에 의해 다량의 자기에너지가 태양으로부터 방출되어 지구자기권을 통과하면서 자기권 우주환경이 급격하게 변화하고 지구환경에 직접 영향을 미치는 사례가 보고되어지고 있다. 그러한 예로서 통신 교란 및 두절 현상이 있다. 태양폭발은 태양활동 극대기/극소기에 모두 발생하고 있어 태양-지구계 우주환경 제 물리현상을 이해하고자 세계 여러 국가들이 태양-지구계 물리현상의 인과관계 연구를 수행하고 있다.
2. 본 과제 과학 분야에서 수행하려고하는 급격한 우주환경 변화에 의한 자기권-극지 전리권·고층대기 연동현상 연구는 지구 자기권으로 유입된 태양풍 에너지가 어떻게 지구의 여러 지역으로 전달되어지는가를 이해하기 위한 것으로 태양-지구계 연동된 물리계 이해를 위해 중요한 연구주제 중의 하나이다.
3. 자기권 에너지가 가장 많이 그리고 가장 먼저 도달하는 지역은 극지 전리권으로 장보고기지에서 운용될 극지우주환경 장비로부터의 자료 활용이 우주환경 이해를 위해 중요하다고 사료된다. 이러한 이유에서 본 과제가 수행하는 자기권-극지 전리권·고층대기 연동현상 연구 우리나라 극지우주환경 연구에 큰 역할을 할 것이다.
4. 본 과제에서는 과학 분야와 함께 기술 분야를 병행하여 과제를 수행하고 있다. 현재까지 우리나라에서 우주환경 자기장 관측을 위해 국가기관이나 대학에서 자기장 측정기를 개발한 적이 없어 원천기술이 전무한 상태이다. 본 과제에서는 국제 수준의 자기장 측정기 개발을 목표로 하고 있으며 2차년도에 개발이 완료되면 장보고 기지에 설치하여 운용할 예정이다. 본 과제 수행으로 국내 처음으로

로 지상 우주환경 자기장 측정기 원천기술 확보가 가능하다고 사료된다.

### 제 3 절 연구개발 범위

1. 격변 태양풍에 의한 지구 자기권 우주환경 물리량 변화 조사: 행성간 충격파 통과 시 우주공간물리에서 가장 기본이 되는 전기장, 자기장 변화를 Van Allen Probes 위성, 정지궤도 위성, 및 THEMIS 위성 자료를 이용하여 조사 한다.
2. 저위도 지상 자기장 자료와 고위도 중위도 SuperDARN 자료를 이용하여 지구 자기권으로부터 지구 전리층으로 전달된 자기장·전기장 변화를 조사 한다.
3. 격변 우주환경 연구를 수행하기 전에 정온상태 즉 극 고요한 지구자기권 특성을 THEMIS 위성 자료를 이용하여 통계적 연구 수행. THEMIS 위성은 우주환경 분야에서 지금 가장 관심을 많이 받고 있는 위성으로 THEMIS 위성 포텐셜 자료를 이용하여 극고요한 우주환경에서의 내부 자기권의 분포를 통계적으로 조사 한다. (Kwon et al., 2015).
4. 우주공간에서 온도비등방성에 의해 발생하는 electromagnetic ion cyclotron (EMIC) 파동은 지구 자기력선을 따라 지구로 전파되어지며 지상에서 EMIC 파동관측을 위해 지상용 우주환경 자기장 측정기 개발 한다.
5. 개발된 우주환경 자기장 측정기를 극지연구소 장보고기지에 설치 운용 한다.



## 제 2 장 국내외 기술개발 현황

### 제 1 절 국내 관련분야 기술개발 현황

1. 국내 여러 국가기관 연구그룹 (국립전파연구원, 한국천문연구원, 기상청 국가기상 위성센터)에서 태양활동에 의한 우주환경 변화 연구를 수행하고 있으며 국가 차원에서 격변 우주환경에 의한 재난방지를 우주환경 예·경보 사업을 진행하고 있다.
2. 국립전파연구원은 전리층 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.
3. 한국천문연구원도 우주환경 예·경보 센터를 구축하여 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 중에 있다.
4. 기상청은 정지궤도 위성인 천리안 기상위성을 운용하고 있다. 격변 우주환경이 정지궤도 위성에 어떤 영향을 주는가에 많은 관심을 가지고 있으며 여러 우주기상변화 감시를 위한 연구 과제를 수행하고 있다.
5. 최근에 극지연구소에서도 우주환경 변화와 극 지역 전리층/고층대기의 연동현상에 관심을 가지고 많은 예산이 극지역의 전리층 및 고층대기 감시를 위한 연구과제에 투자되고 있으며 국제 경쟁력을 가지기위해 많은 노력을 하고 있다.
6. 근지구 우주환경 분야와 관련된 기초연구는 경북대학교, 경희대학교, 충남대학교, 충북대학교, KAIST 등에서 수행되고 있으며 자기권에서의 태양활동에 의한 근지구 우주환경 교란 연구는 본 과제의 주관연구기관에서 가장 활발히 진행하고 있다.

7. 우주환경 기술 분야의 경우 고에너지 입자측정기는 미국/일본 등 선진국과 공동 개발하여 한국천문연구원, KAIST, 경희대학교 등 국내 우주과학관련 기관 및 대학에서 일부의 기술을 보유하고 있으나 거의 모든 과학위성에 실려 있는 우주 자기장 측정 장비는 우리 기술로 개발하여 탑재한 적이 없다.
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 태양폭발에 의한 위성운용 및 통신, 항법, 지상의 장거리 전력망과 통신망, 그리고 무선 통신 등에 심각한 장애를 일으키는 사례들이 보고되어지면서 우주환경 예·경보 프로그램을 국가차원에서 운용하고 있다.
2. 우주환경 예·경보 프로그램은 다수의 위성과 지상관측에서 태양활동에 의한 지구 자기권, 전리권, 고층대기에서의 물리적 변화를 조사하고 있으며 태양-지구계 연동된 시스템에서의 물리현상들을 이해하기위해 국제 협동연구들이 진행되고 있다.
3. 위성사업의 경우 막대한 비용이 요구되어지고 운용기간이 길지 않아 지상관측 장비를 이용한 우주환경 연구가 미국, 일본, 중국, 유럽국가 등에서 활발히 진행되고 있다.
4. 특히 극지역의 경우 우주환경 변화가 가장 활발하게 발생하므로 자기장 측정기, SuperDARN, 오로라 관측장비 등을 이용하여 다양한 자기권-극지 전리권·고층대기 연동연구를 수행하고 있다. 우주선진국들은 이러한 우주환경 관측 장비를 직접 개발할 수 있는 원천기술을 확보하고 있다.

## 제 3 절 국·내외 기술개발현황에서 차지하는 위치

1. 과학 분야: 본 과제에서 수행하고 있는 태양폭발에 의한 우주환경 변화 연구는 지구 자기권에서 에너지들이 어떻게 여러 지역으로 전달되어지는가를 이해하기

위한 것으로 태양-지구계 연동된 물리계 이해를 위해 중요한 연구주제 중의 하나이다. 본 과제 연구책임자는 격변 우주환경 시 지구 자기권에서 발생한 에너지 전달과정을 다수의 사전 연구를 수행하여 국제학술지에 발표하였다 (Kim et al., 2012; Park et al., 2012; Park et al., 2014). 이전 연구의 경우 자기권내에서 격변 우주환경 에너지의 전달 과정 이해를 목적으로 하였으나 본 과제에서는 자기권 에너지가 지구 극 전리층 지역으로 어떻게 전달되는지를 연구하고 있다. 현재 우리나라에서는 자기권-극지 전리권·고층대기 연동연구가 거의 수행되지 않고 있으므로 본 연구사업의 과학 분야 연구주제는 우리나라 극지 우주환경 연구에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

2. 기술 분야: 우리나라는 1995년 우주개발 사업으로 인공위성이 발사한 지 20년 지났음에도 우주환경 자기장 관측 장비의 원천기술이 전무한 상태이다. 본 연구 사업은 국내 처음으로 우주환경 연구를 위한 지자기 측정기 개발을 진행하고 있다. 경희대학교 우주탐사학과 대학원생들이 직접 자기장 측정기 제작에 참여하고 있으며 본 사업을 통하여 우주환경 지상 자기장 측정기 원천기술 확보를 기대하고 있다.

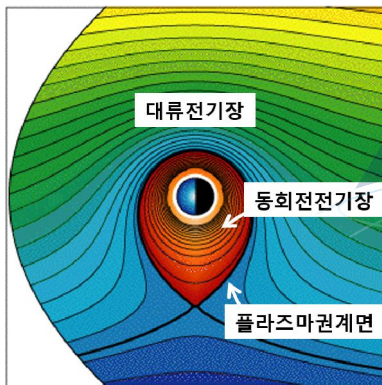


### 제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

#### 제 1 절 정온상태 자기권에서의 플라즈마권계면

##### 1. 배경

지구 내부 자기권의 한 부분을 차지하고 있는 플라즈마권(plasmasphere)은 낮은 에너지 영역의 밀도가 높은 플라즈마로 구성되어 있다. 이러한 플라즈마의 특성은 주변 자기권 플라즈마들과 확연한 차이를 보이기 때문에 플라즈마권계면(plasmapause)에서는 플라즈마의 급격한 밀도변화가 관측된다. 일반적으로 플라즈마권계면의 위치는 지구 자전에 의해 형성되는 동회전 전기장(corotating electric field)과 태양풍에 의한 대류 전기장(convection electric field)에 의해 결정된다(그림 1 참조).



플라즈마권계면의 위치는 그림 1과 같이 두 전기장이 만나서 균형을 이루는 지역에 형성되며 일반적으로 전리권으로부터 약 4~5 지구반지름 정도 떨어진 위치에 만들어진다. 동회전 전기장의 경우 일정한 지구 자전속도로 인해 항상 일정한 세기를 나타내지만 대류 전기장은 태양풍의 변화에 따른 지구 자기권의 상태에 따라 그 세기가 변화한다. 따라서 플라즈마권계면의 위치 역시 대류 전기장의 변화에 따라 변화하게 된다.

그림 1 . 대류전기장과 동회전전기장에 의한 플라즈마권계면

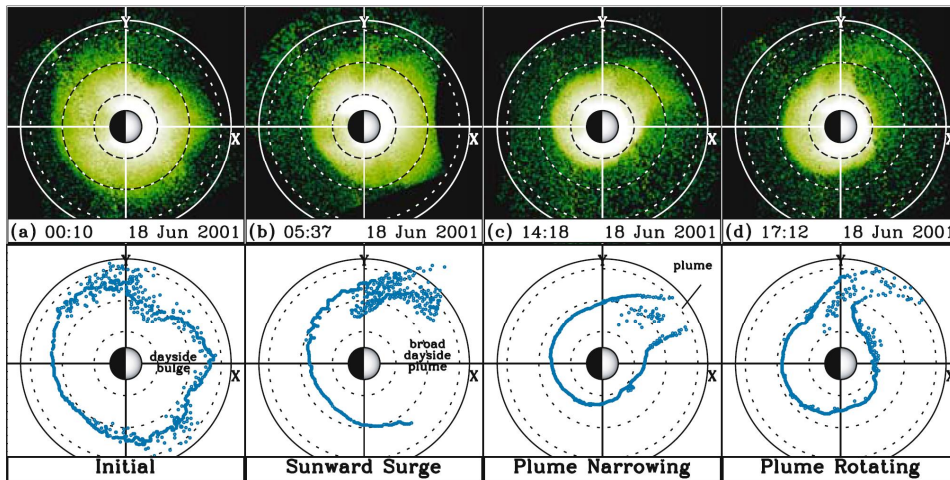


그림 2 . 지자기 활동성변화에 따른 플라즈마권의 변화

플라즈마권계면의 위치가 변하면서 플라즈마권의 형태 또한 지구 자기권의 활동성에 따라 변화한다. 그림 2는 IMAGE 위성에서 관측한 지자기 폭풍의 진행에 따른 플라즈마권의 형태 변화를 보여준다(Goldstein and Sandel, 2005). 2001년 6월 18일 하루 동안 관측한 이미지를 보여주고 있으며 이 날 03 UT에 지자기 폭풍이 발생하였다. 지자기 폭풍이 발생하기 이전인 그림 2(a)를 보면 플라즈마권계면이  $L = 4 \sim 6$  사이에 위치하고 있다. 이후 지자기 폭풍이 진행되면서 플라즈마권이 점점 줄어들어 아침 지역의 경우  $L = 2$ 에서 플라즈마권계면이 관측되었으며 정오 이후지역은 plume이 형성되어 자기권계면쪽으로 길게 늘어져 있다(그림 2(c)).

태양방향을 향하는 plume 이외에 저녁 지역에서 주로 관측되는 플라즈마 용기(plasmapheric bulge) 현상도 플라즈마권의 주요한 특징 중 하나이다. 플라즈마 용기는 플라즈마권계면을 형성하는 동회전 전기장과 대류 전기장의 상호작용에 의해 발생하며 많은 연구들을 통해서 발생지역이 자기권의 활동성에 따라 변화하는 것이 확인되었다(Carpenter, 1970). 즉, 자기권의 활동성이 증가하면 정오부근으로 회전하고(Kim et al., 2007), 반대로 감소하면 자정 방향으로 회전하는 것이 확인되었다.

플라즈마권계면의 위치는 고에너지 양성자가 분포하는 환전류(ring current)와 반앨런 방사능대(Van Allen Radiation belt)와 겹쳐진다. 따라서 플라즈마권계면의 위치는 내부 자기권에서 발생하는 입자-파동 상호작용 등 연구에 있어서 중요한 부분을 차지한다(Gary et al., 1994; Summers et al., 2007). 특히 electromagnetic ion cyclotron wave(EMIC)의 경우 플라즈마권계면 부근( $L = 4 \sim 5$ )에서 고에너지 전자들과 상호작용한다고 보고되었다(Nishimura et al., 2014). 최근 발표된 Hyun et al.(2014) 논문에 의하면 정온상태 자기권에서 정지궤도 부근의 플라즈마권계면에서 발생한 EMIC 파동이 상대적 전자를 지구 전리권으로 유입시키는 주요한 역할을 하는 것이 확인되었다.

이전 연구들에서 이러한 플라즈마권계면의 위치에 대한 통계적인 연구가 많이 이뤄졌으며 그 결과 여러 경험적 모델들이 제시되었다(Moldwin et al., 2002; O'Brien and Moldwin, 2003). 이러한 경험적 모델들은 정온상태에서 플라즈마권계면이  $L = 6$ 보다 가까운 곳에 위치하고 있다고 예측하고 있다. 그러나 이전 연구들에서 사용된 플라즈마권계면 통과 이벤트의 경우 정온상태에서 발생한 경우가 극히 적기 때문에 정온상태에서의 정확한 플라즈마권계면 위치를 예측한다고 보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 THEMIS 위성의 관측 자료를 이용하여 정온상태에서의 플라즈마권계면 분포를 통계적으로 알아보려고 한다.

## 2. 연구내용

정온상태 자기권에서의 플라즈마권계면 위치를 통계적으로 알아보기 위해 Time



History of Events and Macroscale Interactions during Substorms(THEMIS) 미션의 다섯 개 위성(A, B, C, D, E) 중 공전 주기가 약 하루 정도인 A, D, E 위성의 관측 자료를 이용하였다.

앞에서 언급하였듯이 플라즈마권계면의 위치는 낮은 에너지 영역의 플라즈마 밀도의 급격한 변화를 통해 확인된다. THEMIS 위성에는 Electrostatic analyzer(ESA)와 Solid State Telescope(SST)라는 플라즈마 관측 장비가 탑재되어 있다. 그러나 이 두 장비 모두 플라즈마권을 구성하는 플라즈마의 에너지 영역에 비해 높은 범위의 플라즈마를 관측한다. 따라서 본 연구에서는 Electric Field Interument(EFI)에서 측정된 spacecraft potential을 이용하여 계산된 총 전자밀도를 이용하여 플라즈마권계면 위치를 확인하였다. Spacecraft potential로부터 총 전자밀도를 계산하는 식은 Mozer(1973)와 Pederson et al.(1998)이 소개한 방법을 THEMIS 위성에 적합하도록 수정된 식을 사용하였다(Nishimura et al., 2013). 이미 이전에 발표된 연구(Li et al., 2010, Nishimura et al., 2013, 2014, Takahashi et al., 2010)를 통해 이 방법에 대한 검증이 이뤄졌으며 계산된 총 전자밀도는 약 두 배 정도의 오차범위를 갖는 것으로 알려져 있다. 본격적인 연구에 앞서 본 연구에서 계산된 값들의 오차범위를 확인하였다. 그림 3은 위성에서 2008년에서 2009년까지 2년간 THEMIS 위성에서 관측된 플라즈마권계면에서의 spacecraft potential( $V_{sp}$ )과 그로부터 계산된 총 전자밀도( $N_{sp}$ )사이의 관계를 보여준다. 작은 회색 점은 각각의 플라즈마권계면 위치를 나타내며 두 개의 큰 점은 차후 소개할 두 개의 이벤트에 대한 관측 값이다. 또한 검은 실선은 위성 자료를 이용한 피팅 결과를 나타내며 점선은 두 배의 오차범위를 나타낸다.  $V_{sp}$ 가 작은 값을 가질 때, 즉 2~3 사이에서의  $V_{sp}$ 와  $N_{sp}$ 는 기존 연구에서 나타난 오차범위 이내에 분포하고 있지만  $V_{sp}$  값이 커질수록 오차범위가 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 플라즈마권계면으로 선택된 위치가 약 2~4 정도의 오차범위를 가지고 있을 것으로 확인되었기 때문에 본 연구에서는  $N_{sp}$  이외에 ESA 장비에서 검출된 Nesa 자료도 동시에 이용하여 플라즈마권계면을 최종적으로 확인하였다. 위성이 플라즈마권으로 들어오는 경우 플라즈마권계면을 통과하면서  $N_{sp}$ 는 급격하게 증가하고 Nesa에서 관측된 총 전자밀도는 cutoff 에너지 범위 이하로 떨어지는 현상이 동시에 나타날 때 플라즈마권계면으로 선택하였다. 또한 플라즈마권계면으로 선정되기 위한 조건은 이전 연구에서 사용된 것과 동일하게 위성이 0.5L 만큼 이동하는 동안  $N_{sp}$ 가 다섯 배 이상 증가하는 경우를 플라즈마권계면으로 선정하였다(Carpneter and Anderson, 1992). 또한 컴퓨터를 이용해 자동적으로 선택되어진 플라즈마권계면을 직접 다시 확인하는 작업을 거쳤다.

이 연구에서는 정온상태 자기권 상태의 플라즈마권계면 위치를 통계적으로 확인하기 위해 2008년과 2009년, 2년 동안의 관측 자료를 사용하였다. 그 이유는 이 기간이 다른 기간에 비해 태양활동이 매우 약하여 상대적으로 자기권이 조용한 기간이 많았기 때문이다(그림 4 참조). 2년 동안 THEMIS 위성이 플라즈마권계면을 통과한 횟수는 총 3737번

이나 위에서 설명한 조건을 만족하는 플라즈마권계면 통과 이벤트의 수는 전체의 약 55%인 2075개로 나타났다. 2075개의 플라즈마권계면 통과 이벤트를 지자기 활동성에 따라 구분하면 1103개 이벤트가 정온상태( $Kp \leq 1$ )에서 발생하였으며 이 중 약 절반가량인 543개 이벤트는 12시간이상 정온상태가 유지된 상황에서 발생하였다. 반면 중간정도(moderate)의 자기권 상태에서 관측된 플라즈마권계면 통과 이벤트 수는 총 534개로 나타났다.

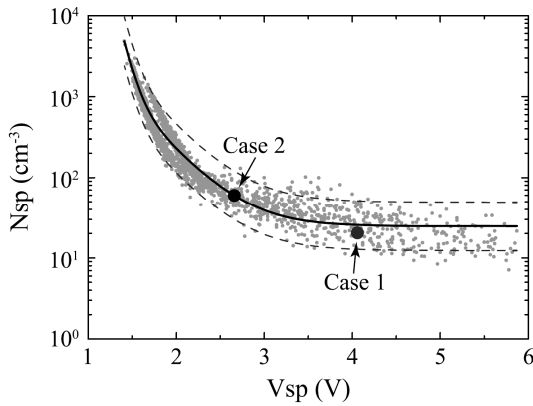


그림 3 . Spacecraft potential( $V_{sp}$ )와 그로부터 계산된 총 전자밀도( $N_{sp}$ ) 사이의 관계

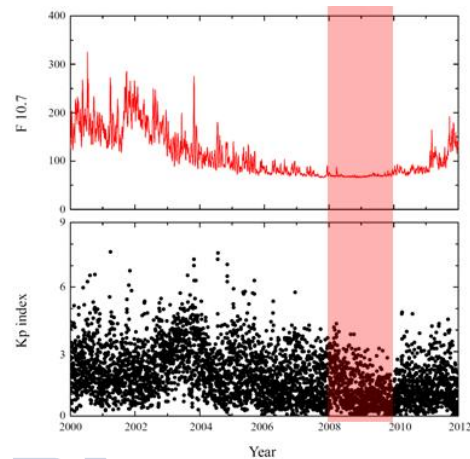


그림 4 . 2000년에서 2012년 까지의 태양활동 및 Kp 지수 변화

그림 5는 2009년 5월 19일에 THEMIS-D가 자정부근(~23 MLT)에서 관측한 플라즈마권계면 통과 이벤트이다. 그림 5(a)에서 푸른 선과 붉은 선은 각각 spacecraft potential에서 계산된 전자밀도( $N_{sp}$ )와 ESA 장비에서 관측된 전자밀도( $N_{esa}$ )를 나타내며 그림 5(b)는 ESA에서 관측된 플라즈마 스펙트럼이다.

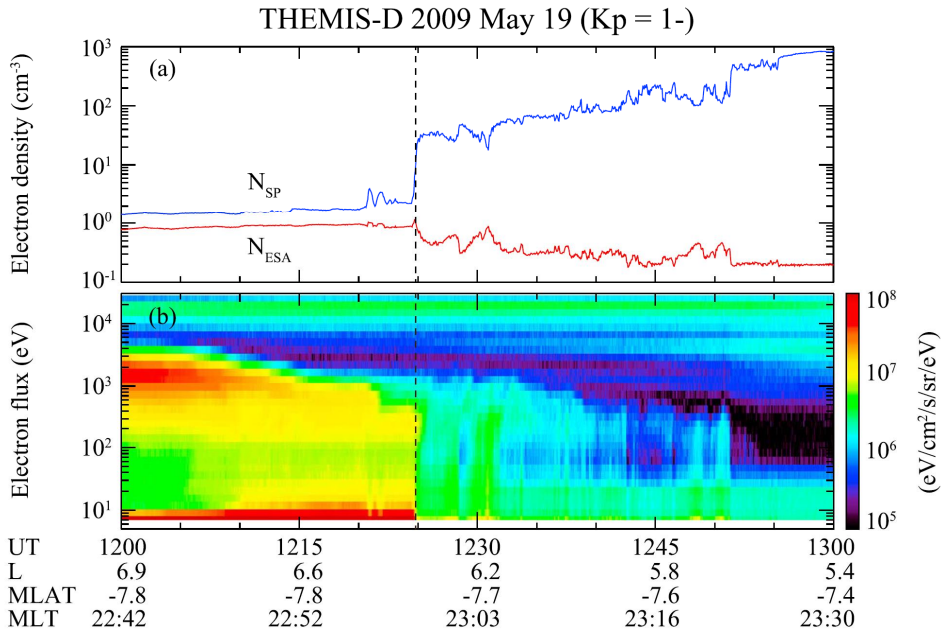


그림 5 . 2009년 5월 18일 THEMIS-D에서 관측된 플라즈마권계면 통과 이벤트

점선으로 표시된 12:24 UT 때의 전자밀도 변화를 보면,  $N_{sp}$ 는 급격하게 증가하는 반면  $N_{esa}$ 는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 5(b)의 스펙트럼에서도 그 시간을 기점으로 자기권을 구성하는 플라즈마의 성질이 급격하게 변하는 것이 확인된다. 따라서 12:324 UT에 위성이 플라즈마권계면을 지나간 것을 확인할 수 있다. 이때 위성의 위치는  $L = 6.3$  이다. 위성이 플라즈마권계면을 통과할 때의  $K_p$  지수는 1-였으며 이전 12시간 동안의 최대  $K_p$  지수도 1-로 확인되었다. 즉, 이 이벤트는 지속적인 정온상태일 때의 플라즈마권계면의 위치를 보여준다. 또한 그림 5(b)의 스펙트럼 변화를 보면 200eV에서 3keV 사이에서 에너지에 따라 플라즈마권 내부로 들어오는 정도가 다른 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 THEMIS-A에서 2008년 9월 1일에 관측한 플라즈마권계면 통과 이벤트를 보여준다. 이때 위성은 낮 지역에 위치하고 있었으며 플라즈마권계면을 통과했을 때, 약  $L = 6.75$ 에 위치하고 있었다. 플라즈마권계면 통과 당시  $K_p$  지수는 1-로 확인되었으며 이전 12시간동안의 최대  $K_p$  값은 1+로 나타났다. 즉, 이전 이벤트와는 달리 통과 당시에는 본 연구에서 정한 정온상태 자기권을 만족하지만 지속적인 정온상태에서 관측된 현상은 아니다. 그러나 지속적인 정온상태가 아님에도 불구하고 정지궤도 부근에서 플라즈마권계면이 위치하고 있다는 것을 보여주는 이벤트이다. 이전 이벤트와 마찬가지로 총 전자밀도는 플라즈마권계면을 통과하면서  $N_{sp}$ 와  $N_{esa}$ 가 분명하게 다른 형태로 변화하는 것으로 보여주며 스펙트럼에서도 낮은 에너지를 가진 전자가 높은 에너지를 가지는 전자에 비해 플라즈마권 내부로 더 깊숙이 침투하는 것을 보여준다.



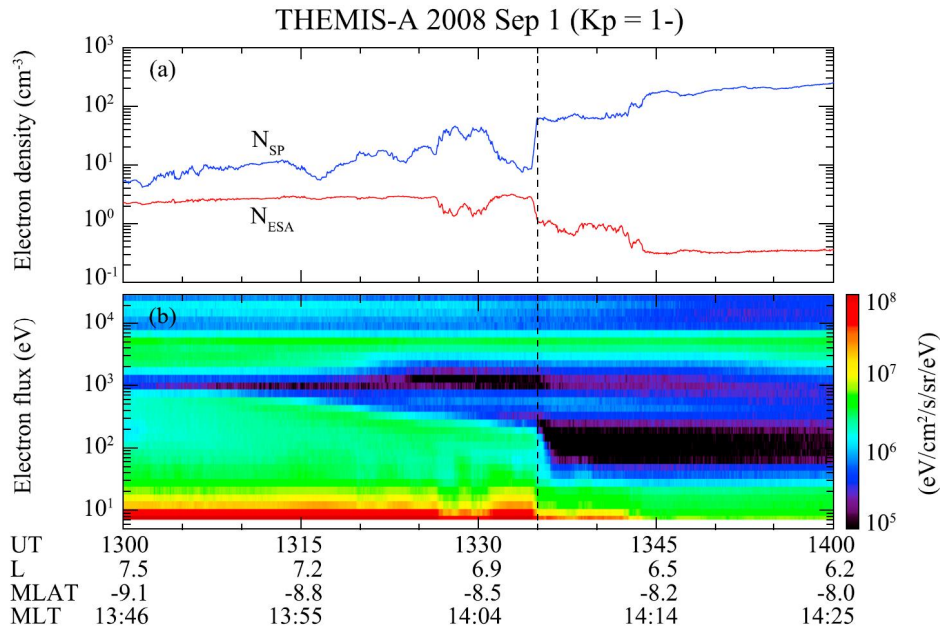


그림 6 . 2008년 9월 1일 THEMIS-A에서 관측된 플라즈마권계면 통과 이벤트

### 3. 연구결과

그림 7은 2008~2009년동안 관측된 플라즈마권계면 통과 이벤트의 통계적인 결과를 보여준다. 자기권의 상태는 중간정도의 활동성을 가지는 moderate 상태와 정온상태(quiet), 지속적인 정온상태(steady quiet)로 구분하였으며 그림 7(a)~(f)에서 오렌지색 점은 각각의 이벤트를, 검은색 실 선과 큰 점은 각 자기지방시별로 계산된 플라즈마권계면 위치의 중간값(a~c)이나 평균값(d~f)을 나타낸다. 각 중간값(또는 평균값)에서 표시된 선은 상한/하한 사분위수(표준편차)를 나타낸다. 검은 점선은 각각 L = 4, 6, 8, 10의 위치를 나타내며 푸른색 선은 정지궤도의 위치를 나타낸다. 그림 7(g)~(i)는 각 MLT에 따른 이벤트 분포를 보여준다. 중간값(평균값)의 경우 지속적인 정온상태의 18~24MLT 범위를 제외하고는 매시간 간격으로 계산되었다. 이 범위의 경우 그림 7(i)에서 알 수 있듯이 이벤트 수가 다른 지역에 비해 상대적으로 적기 때문에 2시간 간격으로 중간값을 계산하였다. 각 지자기 상태에 따라 (a)~(c)와 (d)~(f)를 비교해보면 중간값과 평균값의 분포가 크게 차이나지 않는 것을 알 수 있다.

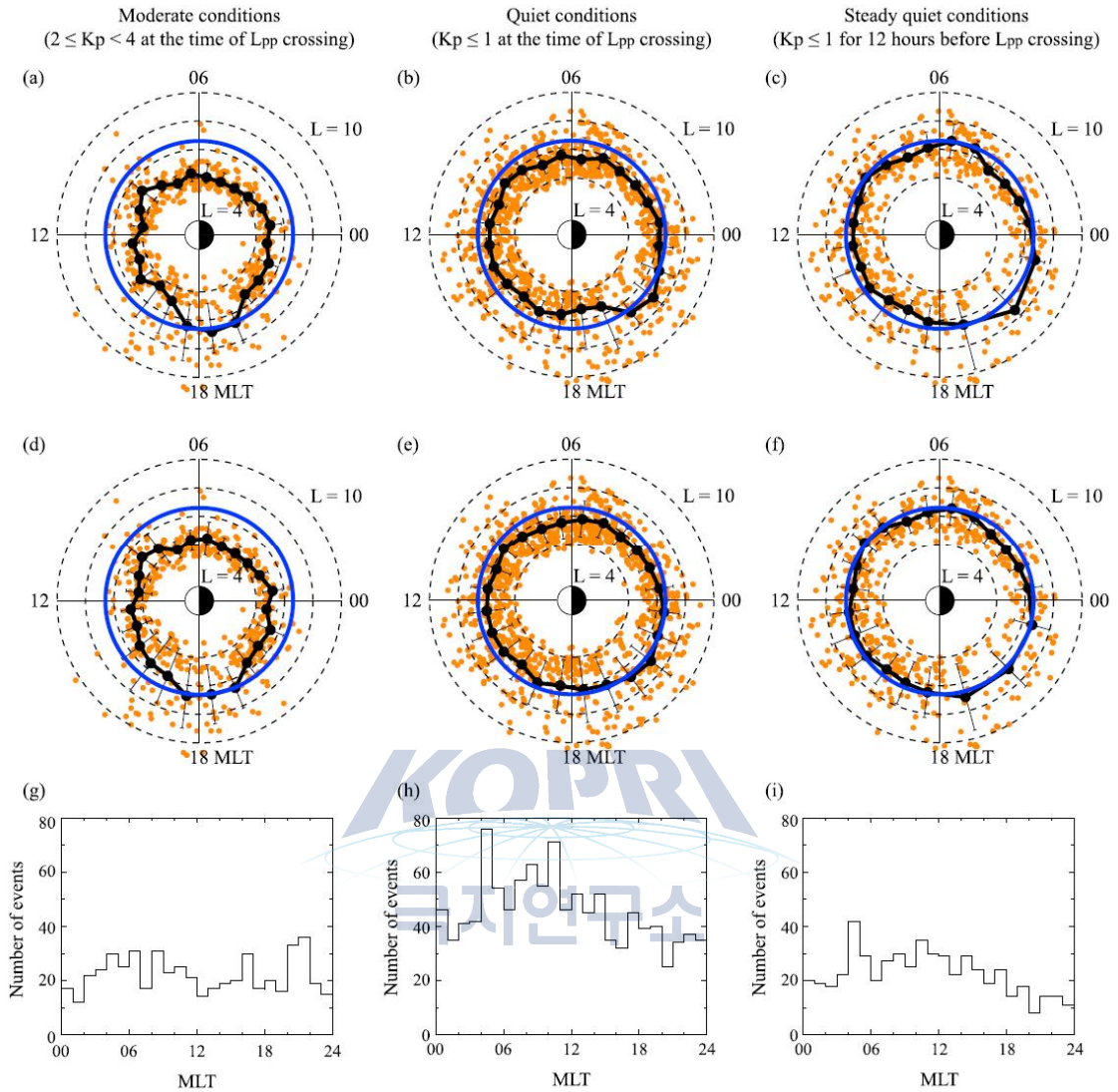


그림 7 . 자기권 상태에 따른 플라즈마권계면의 위치 변화

Moderate 조건 하에서 16~20 MLT 지역을 제외한 대부분의 플라즈마권계면은 정지궤도 안쪽에서 관측되었다. 16~20 MLT 지역의 경우 플라즈마권계면의 위치 분포가 다른 지역에 비해 상당히 넓게 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 정오부근과 자정부근의 중간값 또는 평균값을 보면 자정부근의 플라즈마권계면이 정오부근에 비해 더 멀리 있는 것으로 나타났으며 이러한 결과는 2012년에 발표된 Moldwin의 연구 결과와 동일한 결과가 도출되었다. 또한 저녁부근에 분명한 플라즈마 용기 (plasma bulge) 현상이 관측되었다. 특히 용기지역은 플라즈마권계면 위치의 중간값/평균값이 정지궤도까지 확장되었으며 경도상으로 약 3시간 정도의 범위로 확장되어 있는 것으로 확인되었다. 이러한 플라즈마 용기의 위치 및 범위는 1971년 발표된 Chappell et al.의 논문 결과와 유사하다.

Moderate 상태에서 플라즈마 용기가 저녁지역에 관측되는 것은 지구 자전에 의한 동회전 전기장과 태양풍에 의해 야기된 새벽-저녁 방향의 전기장의 중첩현상에 의한 것으로 알려져 있다. 이러한 새벽-저녁 방향의 플라즈마권계면 불균형 현상은 밤 지역 플라즈마권계면 위치에도 영향을 미친다. 그림 7(a), 7(d)에서 볼 수 있듯이 자정을 기준으로 자정 이전이 자정 이후에 비해 플라즈마권의 크기가 더 큰 게 형성된다. 이러한 구조적인 특징은 이전 논문 (Kwon et al., 2012)에서 Pi2 파동의 주파수를 이용한 연구를 통해 제안되었다. 플라즈마권 내부에서 발생하는 Pi2 파동 주파수는 플라즈마권의 크기에 따라 변화한다. 지구 전리권과 플라즈마권계면 사이의 거리가 가까울수록 주파수는 커지고 반대로 거리가 멀어질수록 주파수는 작아진다 (Takahashi et al., 2003). Kwon et al.(2012) 논문에서는 Kp 지수가 2 정도인 자기권 환경 내에서 지상에서 관측된 Pi2 파동의 주파수가 자정 이전에서 약 10 mHz로 관측되었다가 자정 이후에는 20 mHz 정도로 증가하는 현상을 확인하였다. 이러한 Pi2 파동 주파수를 변화시키는 원인으로 플라즈마권계면의 위치가 MLT에 따라 달라지기 때문이라고 설명하였으며 이번 연구를 통해 인공위성의 직접관측을 통해 플라즈마권계면의 불균일성이 확인되었다.

정온상태(quiet) 자기권에서의 플라즈마권계면은 대부분  $L = 4 \sim 8$  범위에 위치하고 있는 것으로 확인되었다. 특히 정지궤도 부근에서 플라즈마권계면이 관측된 경우가 많았으며 중간값/평균값은  $L = 6$  정도의 값을 갖으며 moderate 상태와는 달리 MLT에 대해 비교적 균일한 위치에서 관측되었다. 중간값의 경우 20~22 MLT 부근에서 약한 용기 현상이 관측되었으며 이 부분의 플라즈마권계면 중간값은 정지궤도보다 먼 거리에서 나타났다. 평균값의 경우 같은 지역이 다른 MLT 지역에 비해 약간 더 큰 값으로 계산되었지만 큰 차이를 보이지 않았다.

정온상태에서 플라즈마권의 형태를 통해 자기권이 조용하면 동회전 전기장이 정지궤도에서도 주요하게 작용하며 이에 따라 플라즈마권의 형태가 동회전 전기장의 흐름에 따라 원형에 가깝게 나타난 것을 알 수 있다. 또한 상대적으로 대류 전기장의 세기가 moderate에 비해 약해지면서 플라즈마 용기가 저녁부근이 아닌 20~21 MLT 부근에서 형성되었다.

지속적인 정온상태는 플라즈마권계면 통과 이전 12시간 동안 최대 Kp 지수가 1 이하인 경우를 선별하였다. 그림 7(c)와 7(f)에서 나타난 지속적인 정온상태에서의 플라즈마권계면 위치는 정온상태와 비슷한 구조적인 형태를 보이면서 정지궤도에 근접한 위치에서 중간값/평균값이 확인되었다. 또한 플라즈마 용기 지역 역시 정온상태에서의 관측과 같이 21 MLT 부근에서 관측되었다. 정온상태가 12시간 지속되었을 때 좀 더 먼 지역에서 플라즈마권계면이 관측된 것으로 보아 정온상태가 유지될수록 플라즈마권이 지속적으로 확장하는 것을 알 수 있다.

본 연구의 목적은 이전 플라즈마권계면 모델들에서 계산된 정온상태에서의 플라즈마권계면 위치와 실제 관측 결과와 비교하는 것이다. 그림 8은 THEMIS 위성에서 관측한 지속적인 정온상태에서의 플라즈마 권계면 위치의 (a) 중간값, (b) 평균값과 이전 모델들과의 관계를 보여준다. 그림 8에서 검은 점은 THEMIS 관측결과를 나타내며 붉은 점과 푸른 점, 갈색 점은 각각 Modwin et al. (M02), O'Brien and Moldwin (OM03), Global Core Plasma Model(GCPM)의 결과를 나타낸다. 각 모델의 오차범위는 같은 색의 실선으로 표시하였다. 이전 모델들에서 계산된 오차범위는 전체  $K_p$  지수에 대한 선형 피팅에 의한 결과를 의미하지만 본 연구에서 계산된 오차범위는 일정한  $K_p$  지수 하에서 계산된 값이기 때문에 같은 의미의 오차범위는 아니다.

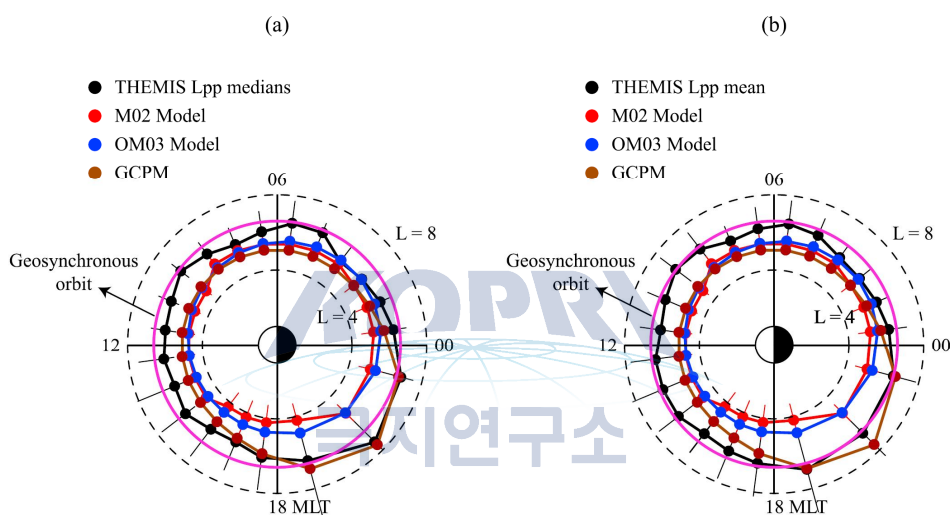


그림 8 . THEMIS 위성에서 관측한 결과와 이전 모델들과의 비교

그림 8(a)를 보면 16~03 MLT 구간에서 THEMIS 관측결과와 GCPM 모델 결과가 잘 맞는 것을 알 수 있다. 그러나 다른 시간대에서는 GCPM 모델에서 예측된 플라즈마 권계면의 위치가 실제 관측결과에 비해 지구 쪽으로 더 가깝게 나타난 것을 알 수 있다. 통계적인 관측에서 계산된 평균값의 경우 중간값에 비해 플라즈마 용기 형태가 뚜렷하지 않기 때문에 GCPM 모델에 비해 더 가까운 거리에서 플라즈마 권계면 위치가 나타났다. 03~16 MLT의 경우 세 가지 모델의 예측값이 비슷하게 나타났다. 즉, 이 지역에서는 모델 예측값이 관측결과에 비해 1 L 정도 작게 예측되었다. M02, OM03 모델의 경우 플라즈마 용기 형태도 제대로 예측하지 못하였기 때문에 그 지역에서의 관측값과의 차이는 더 크게 나타났다. 결론적으로 GCPM에서 예측된 플라즈마 용기 지역을 제외하고는 대부분의 모델 예측값이 지속적인 정온상태에서의 플라즈마권계면 위치를 관측에 비해 작게 예측하고 있는 것으로 확인되었다.

M02 모델과 OM03 모델이 CRRES 위성 자료를 이용한 경험적 모델임에도 불구하고

고 THEMIS 위성의 관측과 다르게 나온 이유는 두 가지 정도로 예상된다. 우선 CRRES 위성의 궤도가 하나의 원인으로 예상된다. CRRES 위성은 원지점이 6.3 Re, 경사각이 18°인 궤도에서 운용되었다. 따라서 정지궤도(L ~ 7) 부근에서 형성되는 플라즈마권계면의 관측에 어려움이 있다. 실제로 Moldwin et al.(2002) 논문의 그림 4를 보면 플라즈마권계면 위치의 분포가 L = 7 부근에서 제한되어 있는 것을 볼 수 있다. 또한 이벤트 수가 적어서 생긴 통계적인 불확실성이다. M02 모델의 경우 정온상태일 때 관측된 플라즈마권계면 통과 이벤트 수가 20개에 불과하다. 따라서 효과적인 통계적인 결과를 도출하는데 문제가 있으며 또한 이벤트 선정기간인 1990~1991년은 태양 극대기 기간으로 본 연구에서 사용한 2008~2009년에 비해 자기장 활동이 활발한 시기여서 지속적인 정온상태가 유지되는 확률이 떨어진다. 본 연구에서 지속적인 정온상태에서 관측된 플라즈마권계면 통과 이벤트 수는 543개로 M02 모델에서 활용한 20여개의 이벤트에 비해 약 25배 정도 많은 샘플을 이용한 결과이므로 정온상태 및 지속적인 정온상태의 플라즈마권계면 위치에 대한 보다 정확한 정보를 포함하고 있다.





## 제 2 절 격변 우주환경 시 내부자기권 섭동 연구

### 1. 배경

태양폭발에 의해 발생한 행성간 충격파가 지구 자기권을 통과할 때 급격한 태양풍 동압력 증가에 의해 자기권계면이 수축하는 동시에 자기권계면 전류가 강화된다. 이 때문에 전 세계적 인 지상 저위도 지역에서의 자기장 남북(H)성분이 갑작스럽게 증가 한다 (그림 9 참조). 이러한 자기장 증가 상태가 길게는 수 시간 정도 지속되는데 본 연구에서는 급격하게 증가하는 초기 자기장 변화에 집중하여 연구를 수행할 예정이다. 이러한 초기 자기권 반응을 sudden commencement (SC)라 한다. 많은 연구자들이 지상 자료를 이용하여 SC 변화의 시공간적 특성을 보고하고 있으며 위성 자료를 이용하여 SC의 공간적 전파와 지방시에 대한 자기장 변화 분포를 조사하였다.

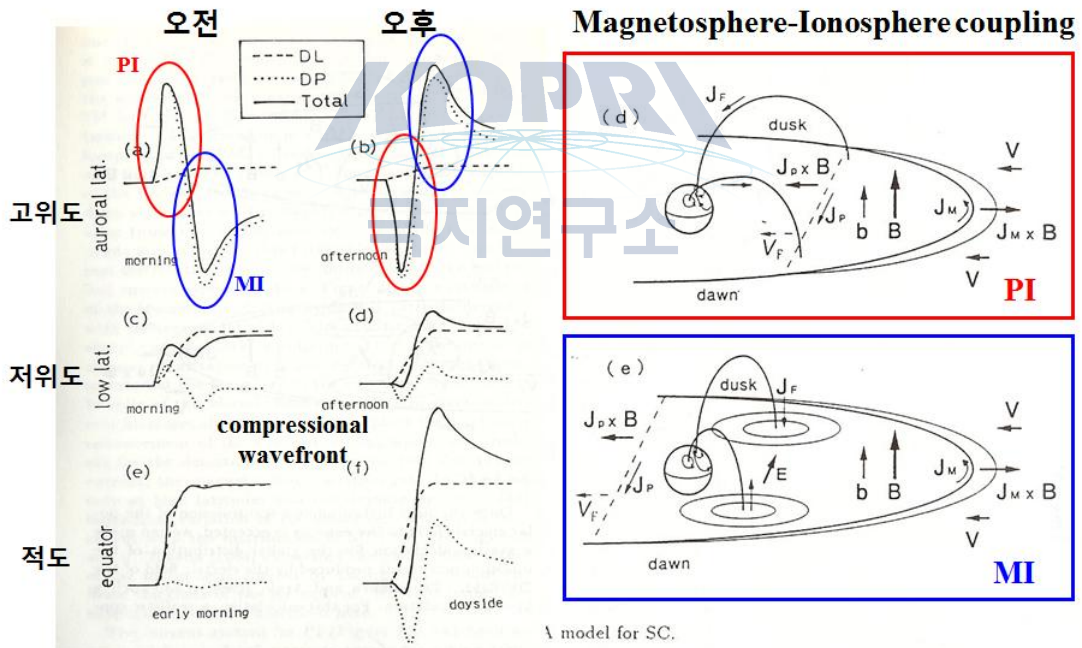


그림 9 . 행성간 충격파 통과 시 고위도, 저위도, 적도에서의 지상 자기장 변화

Araki(1994) 교수는 다양한 위도/경도에서의 지상 자료를 이용하여 행성간 충격파가 지구 자기권을 통과할 때 어떻게 자기장 변화가 발생하는지를 통계적으로 조사하였다. 가장 특징적인 것은 저위도/적도 지역에서 관측되는 계단형식의 자기장 변화와 달리 고위도 (극) 지역에서는 쌍극 형태의 자기장 변화가 관측되어지고 있다 (그림 9 참조). 이 쌍극 형태는 오전지역에서는 “positive-then-negative”의 형태를 보이고 있으며 오후지역에서 반대의 극성, 즉 “negative-then-positive”, 의 형태로

관측되어지고 있다. 이러한 극 지역의 자기장 변화를 설명하기 위해 Araki 교수는 그림 9 오른쪽에 나타난 SC 모델을 제안하였다. 지상 극 지역에서 관측되는 쌍극 형태의 자기장 변화는 자기권의 두 단계 반응으로 설명하고 있는데 첫 번째 단계를 “preliminary impulse (PI)”로 두 번째 단계를 “main impulse (MI)”로 나누어 설명한다. “PI”는 자기권이 압축되면서 압축성 파동이 낮 지역 자기권계면에서 발생하여 지구 쪽으로 전파되면서 자기권에서의 “dusk-to-dawn” 방향의 전기장이 극 전리권으로 전달되면서 발생하였다고 설명한다. “MI”의 경우는 압축된 자기권에서 플라즈마 대류 증가와 연동된 자기권에서의 “dawn-to-dusk” 방향의 전기장이 극 전리권으로 전달되었다고 제안되어지고 있다. 이러한 자기권에서 발생한 전기장이 극 전리권으로 전달되는 과정은 “연자기력선 전류(field-aligned current)”에 의해 설명되어지고 있다. 따라서 “연자기력선 전류”는 자기권-전리권 에너지 전달 과정에서 가장 중요한 물리현상이다. 지금까지 SC 현상을 이해하기 위해 Araki 모델이 사용되어지고 있으나 자기권 내부의 “어디서” 그리고 “어떻게” 연자기력선 전류가 행성간 충격파와 연동되어 발생하는지는 아직 완전히 풀리지 않은 문제로 남아있다.

행성간 충격파 자기권 통과는 그림 10(b)와 10(d) 같이 저위도 H-성분 평균자기장 (SYM-H) 변화를 조사하여 확인할 수 있다.

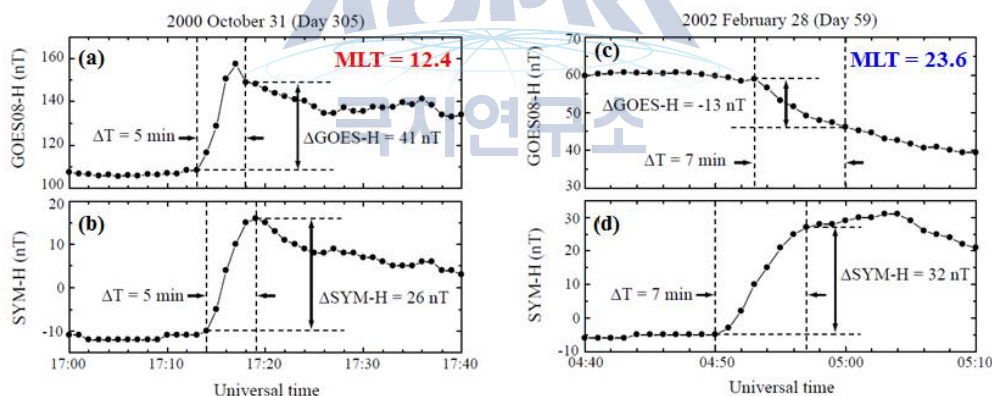


그림 10 . 2000년 10월 31일 SC 이벤트: (a) 정오 근처에서 관측된 정지궤도 자기장 변화. (b) 지상에서 관측한 SYM-H 변화. 2002년 2월 28일 SC 이벤트: (c) 자정 근처에서 관측된 정지궤도 SC 이벤트. (d) 지상에서 관측한 SYM-H 변화량.

지상 저위도 평균 자기장 SYM-H 변화량( $\Delta$ SYM-H)은 행성간 충격파 통과 시 항상 증가하는 모습을 보이고 있으나 자기권에서의 자기장 섭동은 지방시에 따라 다르게 나타난다. 그림 10(a)와 10(b)는 각각 정지궤도 정오지역과 자정지역에서 관측된 SC 이벤트를 나타내고 있다.  $\Delta$ SYM-H와 달리 정지궤도 지역에서는 SC 이벤트 섭동 극성이 지방시에 따라 다르다. 즉 낮 지역에서는 양의 극성으로 증가하고 밤 지역에서는 음의 극성으로 증가한다. 이러한 결과는 사전연구(Park et al., 2012)에

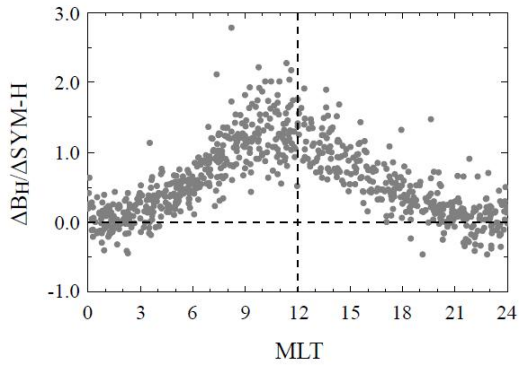


그림 11 . 지방시에 대한 정지궤도 SC 이벤트의 크기

있는지 통계적 연구를 수행하고자 한다.

서 정지궤도 자기장 자료의 통계적 조사를 통해 확인하였으며 (그림 11 참조) 낮 지역은 자기권계면 전류가 밤 지역은 자기권 꼬리 전류의 증가로 설명하고 있다.

지금까지 정지궤도 자료를 이용한 SC 연구는 많이 수행되었으나 정지궤도 안쪽의 내부 자기권( $L < 6$ )에서 SC의 통계적 연구는 많이 보고되어지지 않고 있다. 본 연구에서는 원지점이( $L < 6$ ) 정지궤도 안쪽인 VAPS 위성의 자기장·전기장 자료를 이용하여 정지궤도 관측과 어떤 차이가

## 2. 연구내용

통계적 연구 결과를 도출하기 위해 Van Allen Probes (VAPS) 전기장·자기장 자료 활용가능 기간 동안 (2012년 9월-2014년12월) 발생되어진 행성간 충격파 리스트를 작성하였다.

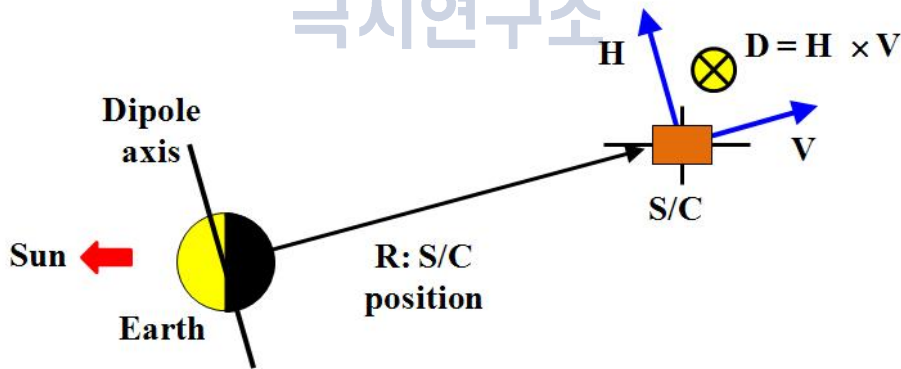


그림 12 . 지구자기장 쌍극자 VDH 좌표계

### 가. 연구방법 1차년도:

위성좌표계: 내부자기권에서의 자기장 섭동 연구를 위해 쌍극자 VDH 좌표계(그림 12)를 사용한다. H 성분은 지구자기장 쌍극자 방향과 평행한 방향이고 V 성분은 H 성분과 수직이면서 지구 반대 방향 이고 D 성분은  $H \times D$ 에 의해 결정된다. 그림 13에서 나타낸 것과 같이 지상과 우주공간에서 자기장 섭동은 동시에 확인될 수 있으



므로 자기장 섭동변화는 우주공간에서의 자기장 변화량을  $\Delta\text{SYM-H}$ 으로 정규화하여 통계적 연구를 수행하였다.

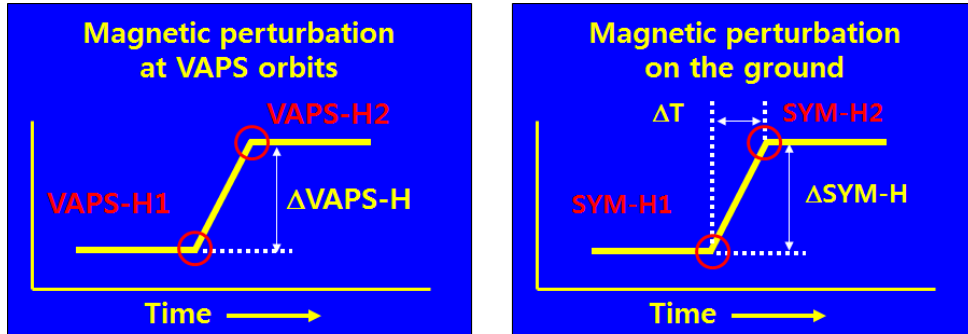


그림 13 . 행성간 충격파와 자기권 통과 시 우주공간과 지상에서의 자기장 변화.

VAPS 위성과 지상에서 행성간 충격파 이벤트 선택: 행성간 충격파가 지구 자기권 통과 시 지상 SYM-H 자료를 이용하여 자기장 변화량의 크기와 지속시간을 조사한다.

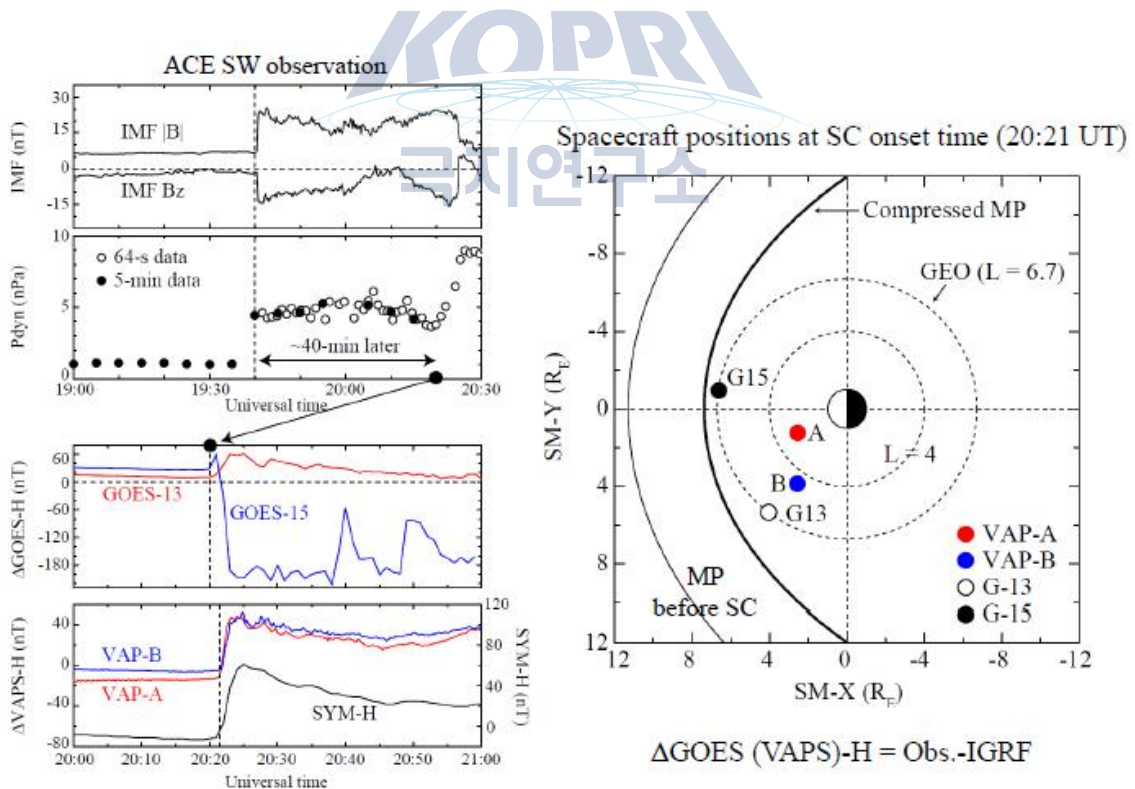


그림 14 . 2008년 10월 8일 태양풍 관측 위성 ACE에서 관측된 행성간 충격파, 정지 궤도, 지구내부 자기권, 저위도 지상에서 관측된 행성간 충격파에 의한 자기장 섭동.

그림 14는 2013년 10월 8일 행성간 충격파 이벤트와 정지궤도 위성(GOES13)과 VAPS 위성 자기장 자료를 나타내고 있다. 행성간 자기장 (Interplanetary magnetic field: IMF)과 태양풍 동압력 (solar wind dynamic pressure:  $P_{dyn}$ )은 태양풍 관측 위성인 ACE 위성에서 관측되었다. 태양풍 물리량인 IMF와  $P_{dyn}$ 은 19시 50분경에 ACE 위성에 의해 급격하게 변하는 것이 관측되었고 약 40분 후에 낮지역에 있는 정지궤도 GOES13 위성과 VAP-A와 VAP-B 위성에서 급격한 자기장 섭동이 관측되었다.

그림 14의 오른쪽에 위성의 위치와 자기권계면(magnetopause: MP)의 위치를 나타내었다 (Shue et al., 1998). 가는 실선은 행성간 충격파가 도달하기 전의 자기권계면의 위치이고 굵은 실선은 행성간 충격파가 도달할 때 압축된 자기권계면의 위치이다. 두 경우의 자기권계면은 ACE 위성에서 관측된 태양풍 자료를 이용하였다.

VAP-A위성과 VAP-B위성에서 관측된 2013년 10월 8일 행성간 충격파에 의해 발생한 sudden commencement (SC) 이벤트를 그림 15에서 나타내었다. 위성의 자기장 자료는 VDH 좌표를 사용하였고 전기장 자료는 modified-GSE 좌표를 사용하였다. VDH 좌표의 H 성분은 배경자기장 성분이기 때문에 행성간 충격파에 의해 자기권이 압축되었을 때 가장 크게 영향을 받는 성분이다 (그림 13 참조).

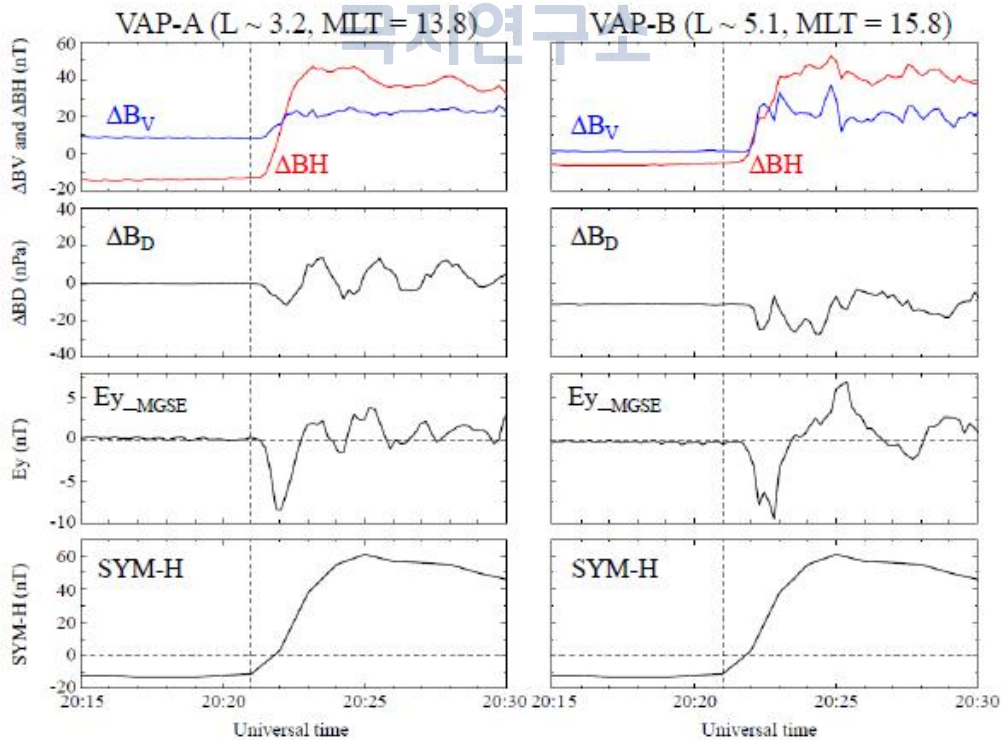


그림 15 . 2013년 10월 8일 VAP-A와 VAP-B에서 관측된 SC 이벤트.

VAP-A와 VAP-B는 SC 이벤트 발생 시 오후 지역 MLT = 13.8과 15.8에 위치하고 있었으며 VAP-A가 VAP-B보다 더 지구에 가깝게 위치하고 있다. SC에 의한 자기장/전기장 섭동 시간을 비교해 보면 지구와 더 가깝게 위치한 VAP-A위성이 먼저 변하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 것은 단순히 섭동된 물리량들이 태양-지구 선상의 방향으로 전달되는 것이 아니고 태양-지구 선상에 대한 임의의 각도로 전파되어지는 것을 의미한다. 즉 행성간 충격파가 면이 자기권계면의 정오지역이 아닌 다른 지역에 먼저 도달된 것으로 예상할 수 있다 (Kim et al., 2012).

본 연구에서의 주 관심은 자기권 내에서 SC의 전파방향이 아닌 VAPS 위성에 의해 관측된 내부 자기권 자기장 섭동의 세기와 GOES 위성에서 관측된 정지궤도 자기장 섭동의 세기 비교이다. Park et al. (2012, 2014)의 연구에 의하면 정지궤도 낮 지역에서의 SC에 의한 자기장 섭동은 낮 지역 자기권계면 전류 증가에 의한 양의 자기장 증가가 항상 관측되어지고 있으나 (+ $\Delta$ BH) 밤의 경우는 양과 음의 (+ $\Delta$ BH 혹은 - $\Delta$ BH) 경우가 관측되어져 행성간 충격파에 의한 자기권 꼬리전류의 위치가 정지궤도 근처에서 발생함을 제안 하였다. 이를 확인하기 위해 내부 자기권 VAPS 위성과 정지궤도 GOES 위성에서 관측된 통계적 SC 이벤트 연구를 수행하였다.



### 3. 연구결과

## VAPS and GOES positions at SC onset times

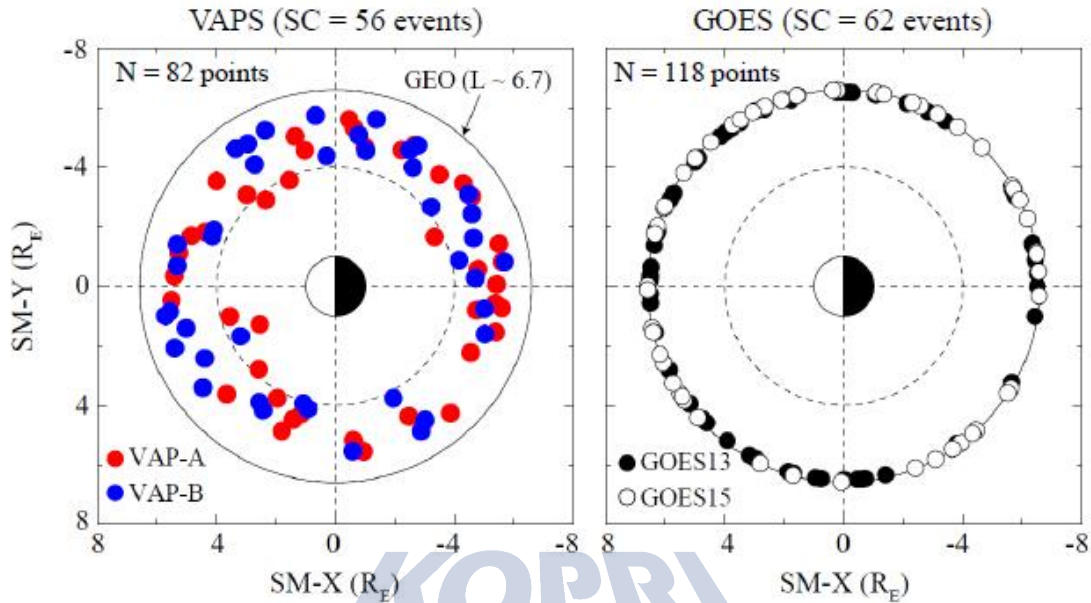


그림 16 : 2012-2014 내부자기권 VAPS 위성과 정지궤도 GOES 위성에서 관측된 SC 이벤트

그림 16은 2012-2014 기간 동안에 내부자기권 VAPS위성과 정지궤도 GOES위성에서 관측된 SC 이벤트의 L-MLT 분포를 나타내고 있다. 전 지방시에 대하여 이벤트가 고루 분포하고 있음을 알 수 있다. VAPS 위성의 경우 원지점이  $L = \sim 6$  정도 이므로 정지궤도 안쪽에서 SC 이벤트를 관측하였다. VAPS의 L값 분포는  $L = \sim 4-6$  위치에서 주로 관측하였다. 빨간색 원은 VAPA 위성을 나타내고 파란색 원은 VAP-B 위성을 나타내고 있다. 정지궤도 위성의 경우 닫힌 원과 열린 원으로 GOES 13과 GOES 15를 표시하였다. SC 이벤트 수는 VAPS의 경우 56개, GOES의 경우 62개 이벤트이다. 각 이벤트의 경우 두 위성에서 동시에 관측된 경우가 있어서 L-MLT 좌표에서 위성의 위치의 수는 SC 이벤트 수보다 많이 표시 되었다. 안쪽의 점선의 원은  $L = 4$  지역의 값을 나타내고 있으며 밖의 원은 정지궤도의 위치를 나타낸다. VAPS의 SC 이벤트수가 GOES에서 관측된 이벤트 수 보다 적은 이유는 VAPS 위성이 근지점 근처에 있을 때 SC 이벤트가 발생하여 자기장 섭동의 양을 결정할 수 없어서 이벤트 수에 차이가 있다.

## Local time distribution of SCs at VAPS and GOES

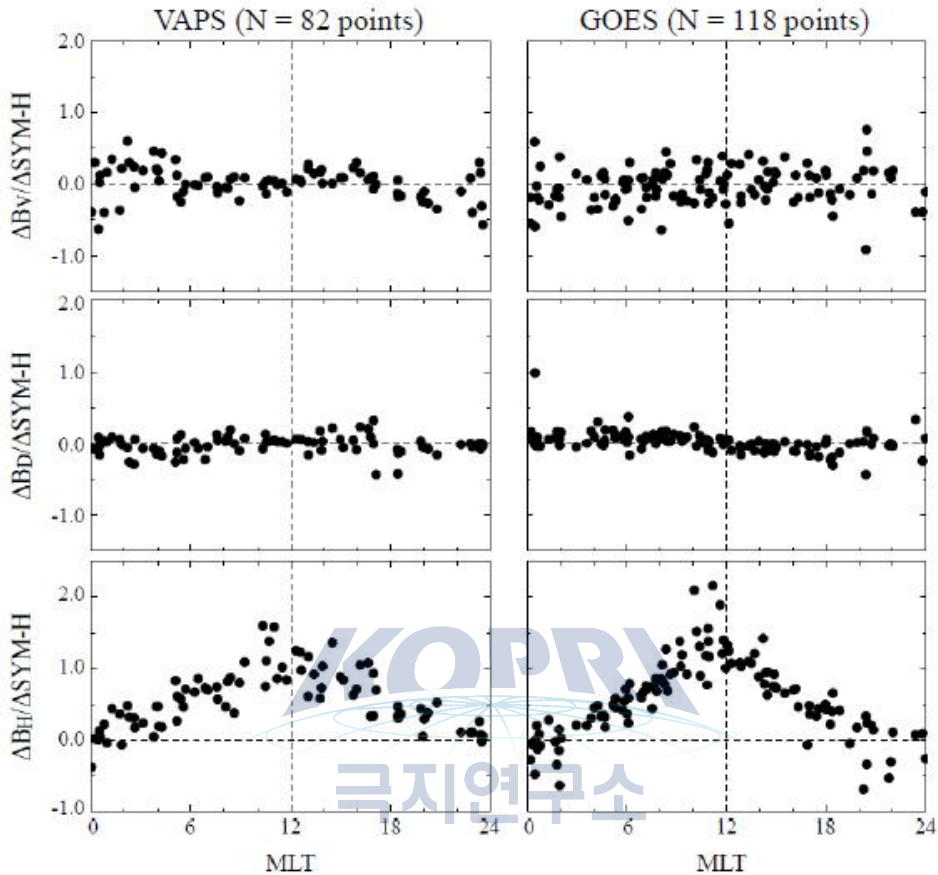


그림 17 . VAPS 위성과 정지궤도 GOES 위성에서의 SC 자기장 섭동.

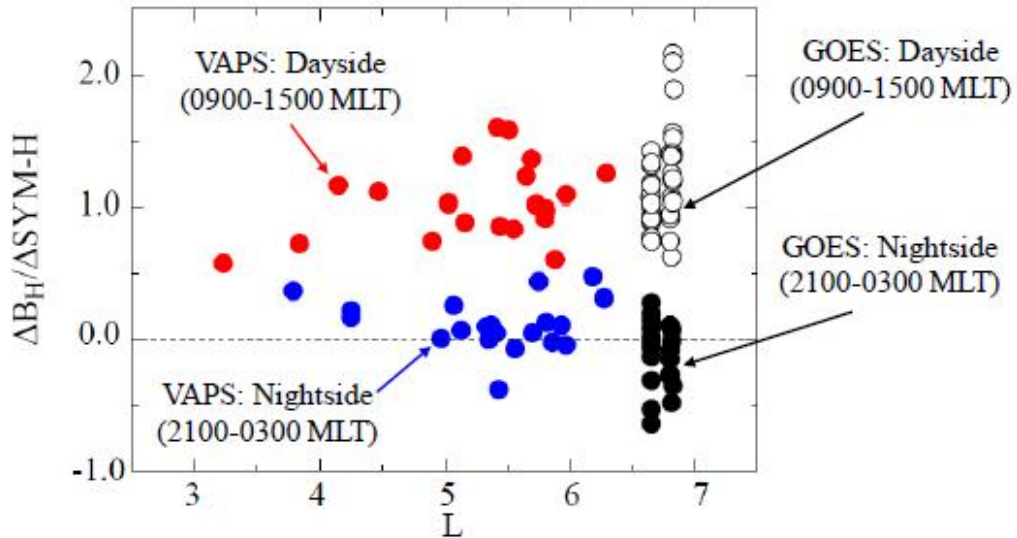
그림 17에서 SC 이벤트가 발생 시 지방시에 대한 자기장 섭동의 크기를 VDH 좌표에서 조사를 하였다. 정지궤도의  $\Delta BH$ 의 경우 이전 연구 (Park et al., 2012, 2014)와 유사한 지방시 분포를 보이고 있다. 즉 낮 지역에서는 항상  $+\Delta BH$ 가 관측되며 밤 지역에서는  $\Delta BH$ 가 양의 경우와 음의 경우가 관측되어지고 있다.  $\Delta BV$ 와  $\Delta BD$ 의 경우는 지방시 의존성이 거의 없다.

내부 자기권에서 VAPS 위성에 의해 관측된 SC 이벤트의 자기장 세기 분포는 정지궤도에서의 자기장 변화와 유사하나 큰 차이는 밤 지역에서의  $\Delta BH$  값이다. 정지궤도에서와 달리 내부자기권에서  $\Delta BH$ 의 값은 주로 양의 값을 보이고 있다. 만약 행성간 충격파가 지구자기권 통과 시 발생한 자기권꼬리 전류에 의해 자기권 섭동이 발생하였다면 자기권 꼬리 전류는 VAPS 위성들 보다 지구로부터 더 먼 지역에서 형성되므로  $\Delta BH$ 의 값은 항상 음의 값을 가져야 한다. 관측 결과는 내부 자기권에서 거의 모든 이벤트가 밤 지역에서 양의 값을 가지고 있으므로 자기권꼬리 전류의 역할이 크지 않음을 예상할 수 있다. 따라서 밤 지역 내부 자기권은 낮 지역 지구자기권계면에서 발생한 자기권계면 전



류의 영향을 더 크게 받는 것을 제안할 수 있다.

## Radial (L) distribution of SCs observed at VAPS



- VAPS Nightside (21 points): **negative  $\Delta B_H/\Delta SYM-H$  (19%)**
- GOES Nightside (21 points): **negative  $\Delta B_H/\Delta SYM-H$  (62%)**

그림 18 . VAPS 위성과 GOES 위성에서 관측된  $\Delta B_H$ 의 낮 지역과 밤 지역 SC 이벤트 비교

그림 18은 낮 지역과 밤 지역의 이벤트 비교를 나타내고 있다. 낮 지역의 경우 지방시가 9시부터 15시까지의 이벤트를 비교하였고 밤 지역의 경우 지방시가 21시부터 3시 사이의 자료를 이용하였다. 낮 지역의 이벤트는 위에서 언급한 대로 내부 자기권과 정지궤도에서 항상  $\Delta B_H$ 가 양의 값을 가지고 있으며 저위도 지상 자기장 H성분의 평균값  $SYM-H$ 의 증가와 거의 같은 증가를 보이고 있다.

밤 지역의 경우 내부 자기권의 경우 19%만이  $\Delta B_H$ 가 음의 값을 보이고 있으며 정지궤도의 경우 62%가 음의 값을 가지고 있다. VAPS의 경우 L값이 5-6정도에서  $\Delta B_H / \Delta SYM-H$ 값이 0 근처에서 분포하고 있음을 확인하였는데 이것은 낮 지역 자기권계면 전류와 밤 지역 자기권꼬리 전류가 밤 지역 L = 5-6 근처에서 서로 상쇄되는 것으로 제안할 수 있다.

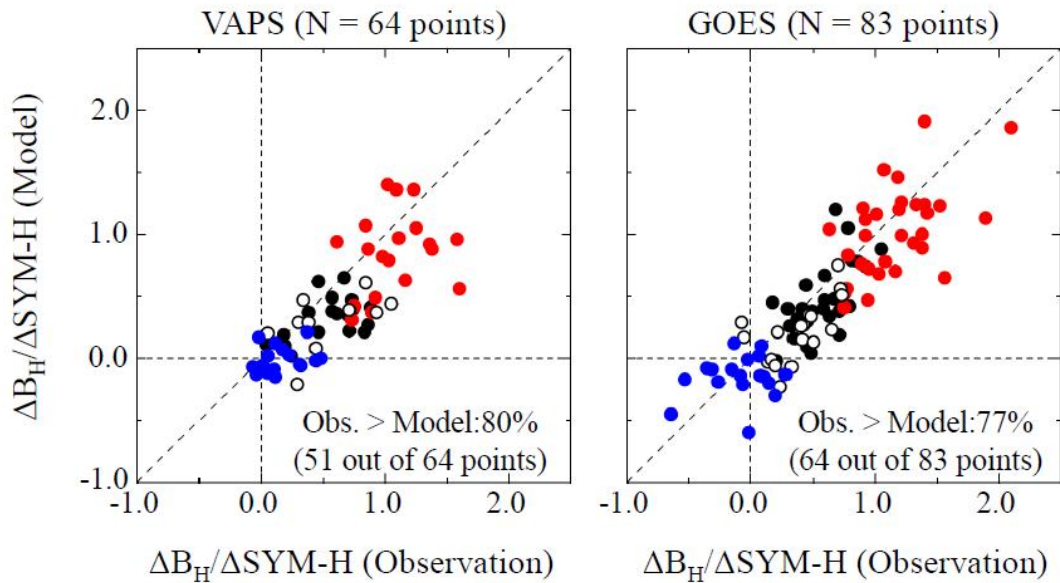


그림 19 . SC 자기장 변화와 TS05 자기장 모델 비교

그림 19는 지구 자기권 연구에서 가장 많이 사용되고 있는 TS05 자기장 모델 (Tsyganenko and Sitnov, 2005)과 관측 값을 비교하여 나타내었다. 빨간 원은 낮 지역의 이벤트로 지방시가 09-15시, 파란 원은 밤 지역 이벤트 지방시가 21-03시, 닫힌 원은 03-09시, 열린 원은 15-21시 지역을 나타낸다. 이벤트 분포가 대각선에 놓여 있으면 모델과 관측 값이 잘 일치하는 것으로 설명할 수 있다. 그러나 약 80%의 이벤트가 대각선 아래에 놓여 있으므로 관측값이 모델 값보다 더 크다는 것을 확인 할 수 있었다. 이 분석 결과를 통하여 TS05 모델은 격변 우주환경 시 자기장 섭동량을 모든 지방시 지역에서 관측 값보다 적은 값으로 계산하고 있으므로 격변 우주환경 시 자기권 전류의 순간적 변화를 TS05 모델에서 수정되어야 함을 제안한다.

## 제 4 절 지상용 우주환경 자기장 측정기 개발

### 1. 배경

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

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

표 1 . ULF 파동의 분류

우주환경 연구를 위해 중요한 장비중 하나는 우주환경 자기장 측정기이다. 이러한 자기장 측정기는 지상과 우주공간에서 우주환경 변화에 의한 지구자기장 섭동량 측정을 위해 사용되고 있으며 많은 우주선진국에서 지상에 설치하여 운용하고 있으며 특히 최근에는 여러 나라가 자기장 네트워크를 구축하여 국제공동연구를 수행하고 있다. 우리나라에서는 우주환경 연구가 활발히 진행되고 있으나 지금까지 자기장 측정기를 국내에서 개발하여 활용된 바가 없다.

본 연구사업은 미국 뉴저지 공과대학에 있는 “김효민 박사”와 공동연구를 수행하여 지상용 우주환경 자기장 측정기를 개발 하고자 한다. 우주환경 연구를 위해 배경 자기장 변화와 파동 자기장 변화 측정이 요구되어진다. 배경 자기장 관측을 위해 “플럭스게이트 자기장 측정기 (fluxgate magnetometer)”가 사용되어지고 있으며 우주공간에서 발생한 플라즈마 파동 관측을 위해 “서치코일 자기장 측정기 (search-coil magnetometer)”가 사용되어지고 있다. 물론 고성능 플럭스게이트 자



기장 측정기를 이용하여 플라즈마 파동을 관측하기도 한다. 그림 20(a)에서 정지궤도위성의 플릭스게이트 자기장 측정기로 관측된 electromagnetic ion cyclotron (EMIC) 파동과 남극에서 서치코일 자기장 측정기로 관측된 Pc1 파동을 나타내었다 (Hyun et al., 2014). 우주공간에서 발생한 시간에 남극에서도 주기는 약간 다르지만 파동이 발생함을 알 수 있다. 그림 20의 경우 정지궤도근처에서 파동이 발생하여 정지궤도 자기력선을 따라 파동이 전리층으로 전파되고 전리층에서 다양한 위도로 파동이 전파되었다고 설명되어지고 있다 (그림 20(b) 참조). 전리층에서의 전파 과정을 설명하기 위해 국제 공동으로 남·북극 지역에 자기장 측정기 망을 설치하여 극 우주환경 연구를 수행하고 있다.

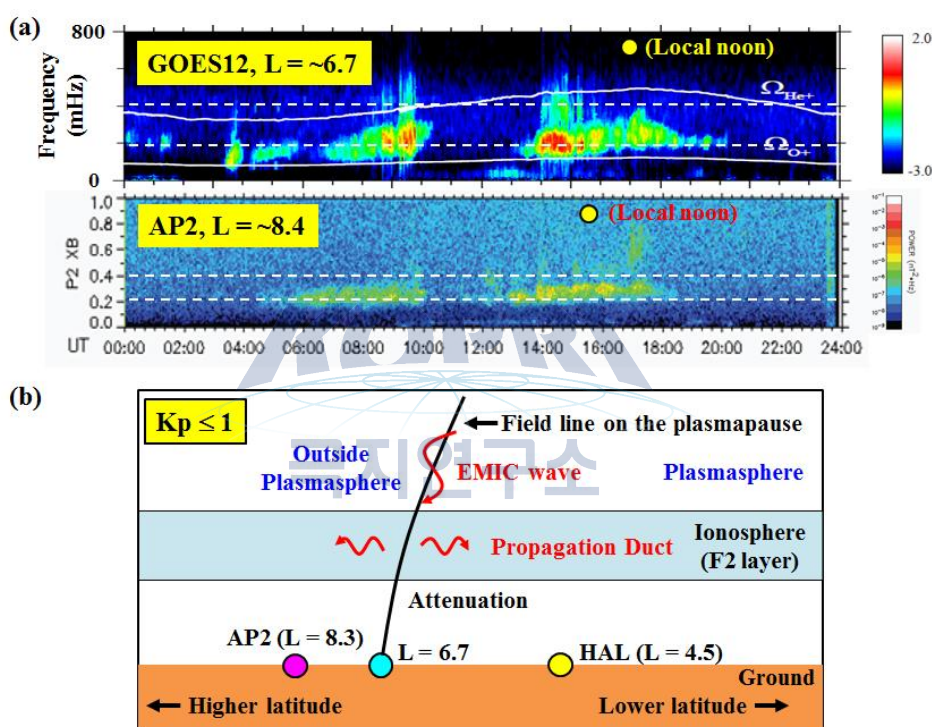


그림 20 . (a) 정지궤도에서 관측된 EMIC 파동과 남극에서 관측된 Pc1 파동 비교. (b) 자기권에서 발생한 EMIC 파동의 지상 전파과정.

남극 장보고 기지 주변에 설치된 국제 서치코일 자기장 측정기 망을 이용하여 미국의 여러 기관(New Hampshire Univ., Augsburg College 등)에서 극지 우주환경 연구를 수행하고 있다 (그림 21 참조). 극지연구소가 국제 경쟁력 있는 극지 우주환경 연구를 위해 남극 자기장 측정망 참여 국가들과 국제공동연구가 필요하며 이를 위해 우리나라도 우주환경 관측 장비가 요구되어진다. 현재 장보고 기지 주변에 운용되는 서치코일 자기장 측정기 사양과 유사한 분해능을 가진 서치코일 자기장 측정기를 개발하고 장보고 기지에 설치·운용된다면 국제 경쟁력 있는 극 우주환경 연구가 수행될 것으로 기대된다.

**Automated Geophysical Observatories (AGOs): U.S. and U.K.**

- The array covers from  $\sim 66^\circ$  to  $85^\circ$  geomagnetic latitudes and from  $\sim 15^\circ$  to  $40^\circ$  geomagnetic longitudes.
- ULF waves in the Pc 1-2 range (0.1-5.0 Hz), associated with electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves.

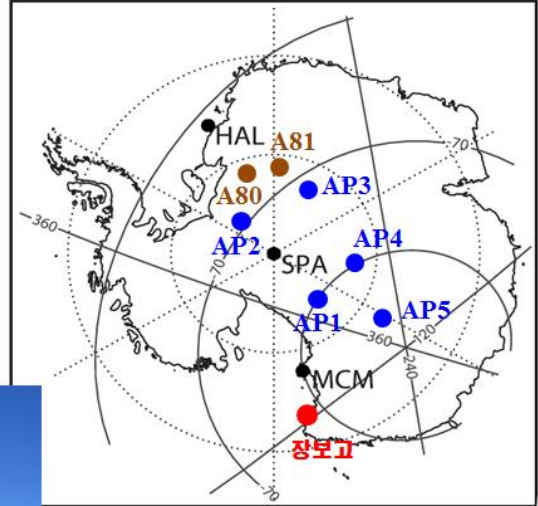


그림 21 . 장보고 주변 남극기지 및 지상용 우주환경 자기장 측정 장비

## 극지연구소

### 2. 연구내용

가. 과학 분야: 장보고기지에 설치 및 운용될 같은 종류의 자기장 측정기 장비로부터 얻어진 자료를 이용하여 선행연구를 수행하였다. 그림 22는 정지궤도 위성의 플럭스게이트 자기장 자료와 지상 Athabasca 관측소의 서치코일 자기장 자료를 나타내고 있다. Athabasca 관측소는 캐나다에 위치하고 있으며 자기플럭스는  $L = 4.6$ 으로 평균된 플라즈마권계면 근처에 위치하고 있다. Athabasca 자기장 자료를 보면 약 20시간 동안 약 200~1000 mHz 범위에서 강한 파동관측을 확인할 수 있다. 이러한 주파수 범위의 파동을 Pc1-2 파동으로 분류되고 있다. 이러한 파동은 지구 자기권에서 차가운 플라즈마 지역에 뜨거운 플라즈마 이동할 때 온도 비등방성에 의해 발생된 이온 회전 불안정성으로 생성된다고 제안되어지고 있다. 따라서 지상에서 관측된 Pc1-2 파동들은 지구 자기권에서 발생한 파동들이 자기력선을 따라 이동하여 지구 전리층으로 전달되었다고 믿어지고 있다. 자기권에서 플라즈마 이온의 온도 불안정성에 의해 발생한 파동을 EMIC (electromagnetic ion cyclotron) 파동이라 한다.

3개의 정지궤도 위성에서는 Athabasca 관측소와 달리 짧은 시간 동안에 파동의 모습을 관측하였다. 이러한 결과로부터 Pc1-2 파동 즉 EMIC 파동은 정지궤도 안

쪽에서 발생되었다고 제안할 수 있다. Athabasca 관측소의 자기력선 위치는 플라즈마권계면 근처에 해당되므로 EMIC 파동들이 플라즈마권계면 근처에서 발생하여 Athabasca 관측소의 자기력선을 따라 지상으로 전파되었다고 생각되어진다.

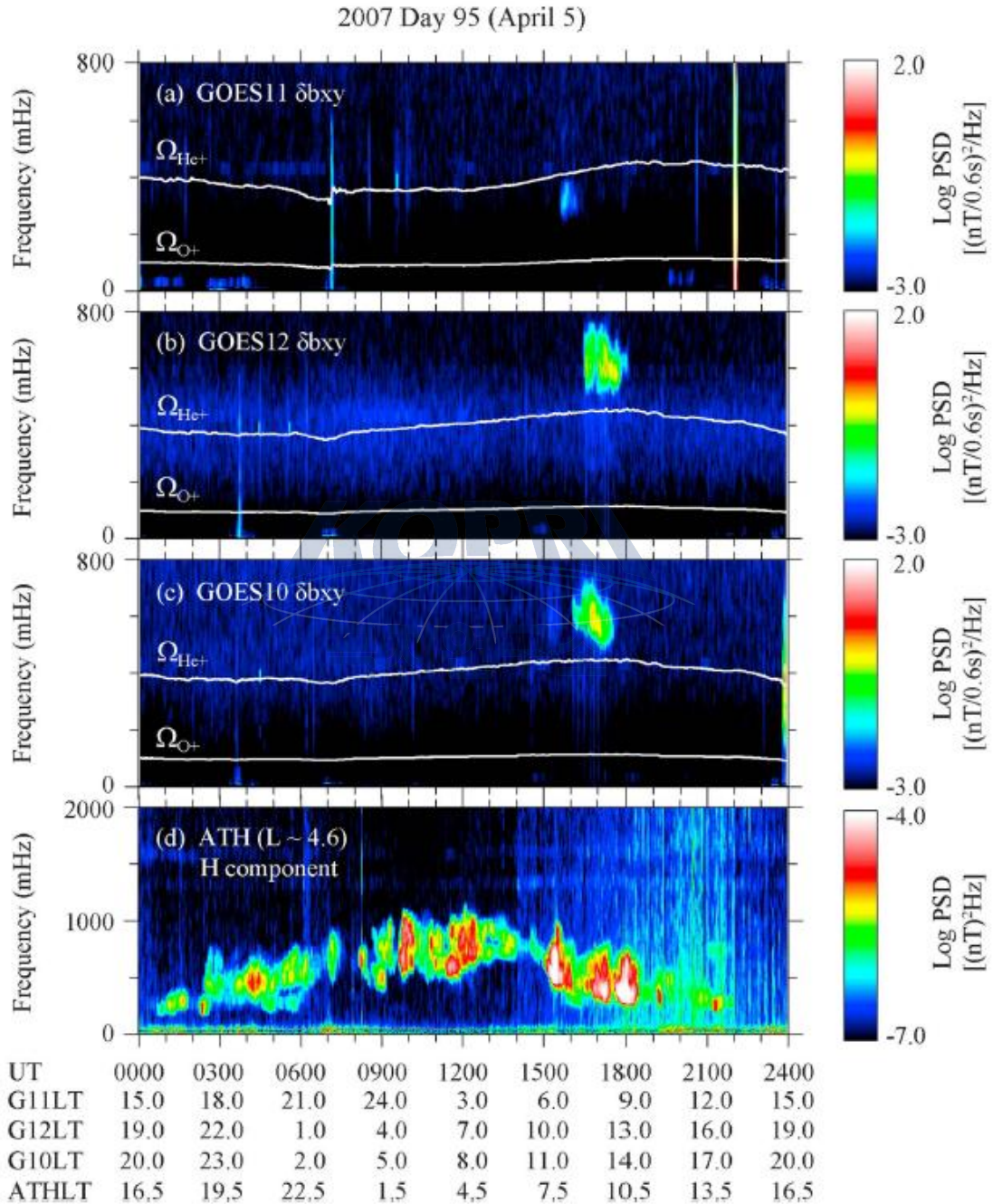


그림 22. 정지궤도 위성 (a) GOES11, (b) GOES 12, (c) GOES 10의 자기장 자료를 이용한 파동 스펙트럼. (d) 지상 Athabasca 서치코일 자기장 측정기 장비에서 관측된 자료의 파동 스펙트럼.



EMIC 파동들이 자기권에서 발생되어지면 고에너지 프로톤입자와 상호작용으로 프로톤입자의 산란각을 감소시켜서 저궤도 위성에서 고에너지 입자를 관측할 수 있다. 이러한 제안을 검증하기 위해 Athabasca 관측소에서 측정된 EMIC 파동들에 대한 입자 상호작용을 저궤도 위성자료를 이용하여 조사하였다 (그림 23). Athabasca 관측소에서 측정된 파동의 주파수는 지방시에 따라 변하는 것은 플라즈마권계면이 지방시에 대하여 비대칭에 의한 것으로 이해될 수 있으며 그러한 증거로서 고에너지 입자 관측 장소가 L-value에 대하여 지방시에 따라 변하는 것을 관측하였다 (그림 23a).

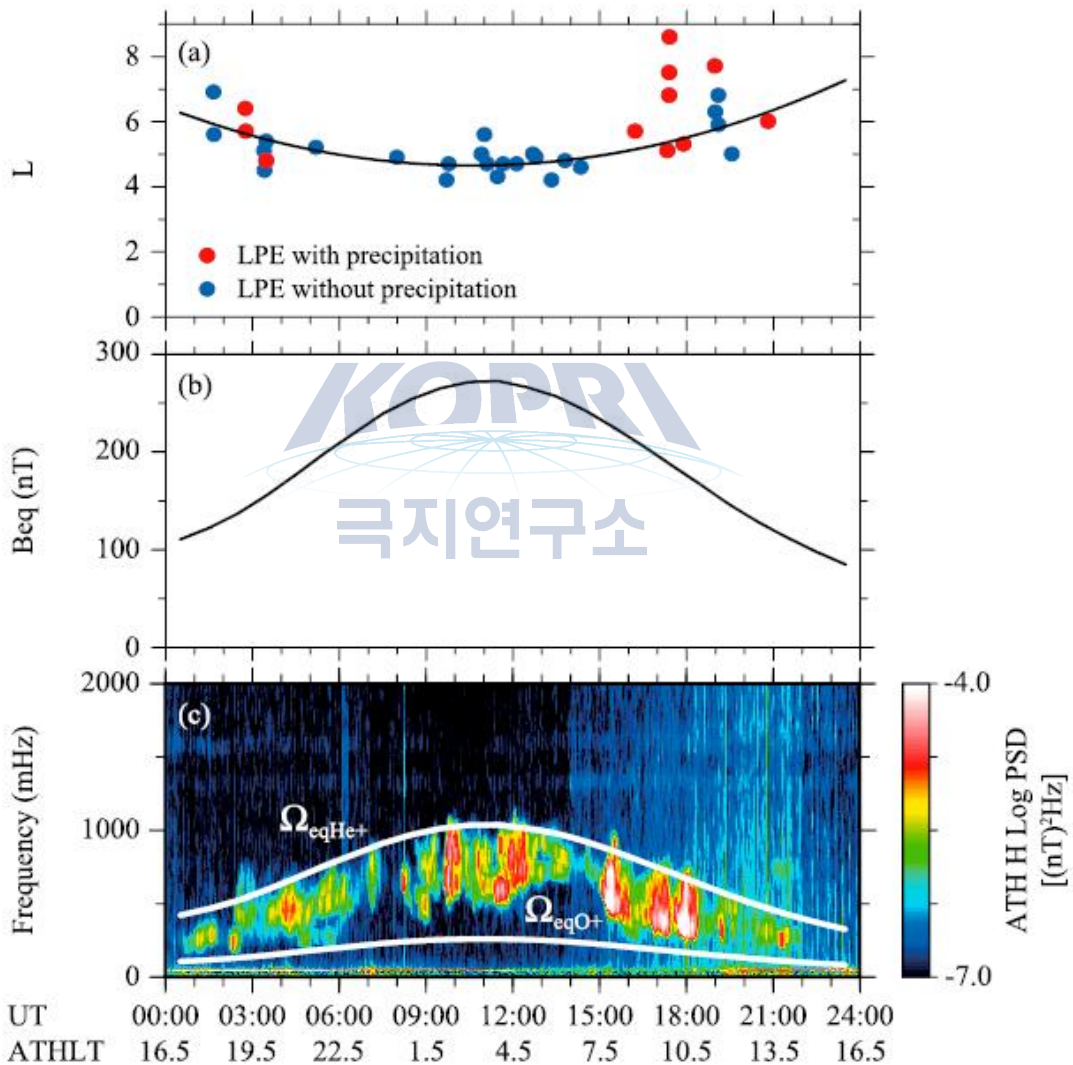


그림 23. (a) 저궤도 위성에서 관측된 고에너지 프로톤입자. 빨간색: 대기권 유실의 경우. 파란색: 자기장에 속박된 입자. 실선은 관측자료를 이용하여 최소 자승법으로 얻어진 커브피팅. (b) 커브피팅값의 L-value에 해당하는 자기권 적도에서의 자기장 세기. (c) Athabasca 관측소의 자기장 자료.

그림 23b는 저궤도에서 관측된 고에너지 입자 관측 자료를 이용한 커브피팅 값들로부터 계산된 지구 자기권 적도지역에서의 자기장 세기이다. 커브피팅 값들의 L-value가 지방시에 따라 변하므로 자기장 세기도 지방세에 따라 변하고 그 값을 이용하여 산소이온과 헬륨이온의 회전주파수를 계산하여 그림 23c에 나타내었다. 흥미롭게도 Athabasca 관측소에서 관측된 EMIC 파동들은 산소이온과 헬륨이온의 회전주파수 사이 즉 헬륨밴드에 존재하는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 플라즈마권계면 근처에서 발생한 EMIC 파동들은 헬륨밴드에서 잘 나타난다는 이론연구의 제안을 증명하는 관측결과라 하겠다.

나. 기술 분야: 자기장 측정기 관련기술 개발 가능성을 분석하고 국외 전문가 자문을 통해 기반 관련 지식을 습득하였으며 자기장 측정기 기술 분석과 검·교정 방법에 대하여 연구를 수행하였다.

### 3. 연구결과

#### 가. 개요

자력계는 측정 성분에 따라 다양한 유형이 존재하며, 그 중 DC 성분 자기장 측정에는 플럭스게이트 타입이, AC 측정을 위해서는 서치코일 (인덕션) 타입이 우주환경 연구 목적으로 주로 활용되고 있다. 서치코일 자력계는 일반적으로 플럭스게이트 보다 크고 무겁다는 단점을 가지고 있지만, 민감도와 내구성이 좋아 필수적으로 사용되고 있다. 지상에서의 미약한 지구 자기장 측정을 위해서 서치코일의 민감도는 중요한 성능이며, 또한 민감도의 한계가 없고 특히 1 Hz 이상의 주파수에서는 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. 경희대학교와 UNH가 공동 개발한 지상용 서치코일 자력계는 ULF 파동의 발생 및 전파 원리 연구를 위해 활용될 것이며, 근 지구 우주공간 연구 목적으로는 국내 최초로 개발된 자력계이다. 본 기기는 2016년 12월 한국 극지연구소에서 운영 중인 남극장보고과학기지에 설치되어 운용 중에 있다.

2014년도에 완공된 장보고과학기지(74° 37.4' S, 164° 13.7' E, L 14)는 킹 조지 섬에 위치한 세종과학기지(62° 13' S, 58° 47' W, L 4.8)와는 달리 대한민국 최초로 남극 대륙상에 세워진 기지이다. 장보고과학기지는 geomagnetic fields가 열려있는 자기권 커스프 지역에 위치하고 있어 직접적으로 행성간 연결되는 IMF (Interplanetary Magnetic Field) 의 관측이 가능하다는 지리적 이점을 가지고 있다. 또한 기지의 지자기 경도가 미국의 맥머도 기지 (McMurdo Station) (77° 51'

S, 166° 404' E, L 11.2)와 근접하기 때문에, 맥머도 기지의 자력계와 함께 서치코일 자력계 측정데이터의 활용도가 높을 것으로 기대하고 있다.

#### 나. 시스템 설계

서치코일 자력계는 자기장 측정이 이루어지는 2축 서치코일 마그네틱 센서, 측정신호의 증폭을 위한 프리앰프보드, 컨트롤 박스와 메인 케이블 그리고 PC로 구성되어있다 (그림 24). 두 서치코일 마그네틱 센서는 서로 수직한 방향 (X, Y축)으로 조립되어 있으며, on-board 증폭회로인 프리앰프보드가 각 센서에 장착되어 있다. X축과 Y축 센서는 실제 운용 시 Cartesian coordinate systems을 따라 각각 지자기의 남북, 동서방향을 향하도록 설치되며, 자기 파동의 2축 벡터 데이터를 제공한다. 서치코일 자력계의 시스템 블록 다이어그램이 그림 25에 나타나있다. 2축 센서에 의해 관측된 자기 측정 신호는 프리앰프보드에 의해 1차 증폭되며, 이는 메인 케이블을 통해 주 전자보드들이 장착되어있는 컨트롤 박스로 송신된다. 이 과정에서 각 센서로부터 측정된 신호들은 센서와 컨트롤 박스 사이에 구성되어있는 정션박스를 통해 하나의 케이블로 접합된다. 컨트롤 박스에는 메인 아날로그보드와 데이터 수집보드 그리고 리니어 파워 서플라이가 장착되어 있으며, 메인 아날로그 보드는 측정신호의 2차 증폭과 측정 주파수 영역의 필터링 기능이 설계되어있다. 데이터 수집 시스템 (DAQ)은 DAQ 전자보드와 프로그램으로 구성되며, 측정신호는 16비트 분해능과 10 samples/sec의 속도로 수집된다. 디지털화된 데이터는 ASCII포맷으로 실시간 PC에 저장되며, 이는 Network Attached Storage (NAS)와 동기화된다.

2축 센서는 프리앰프보드와 함께 센서단으로 구성되며, 이는 정션박스과 함께 야외 지하에 매설되는 방식으로 설치된다. 정션박스와 컨트롤 박스까지는 약 200 m의 메인케이블이 연결되는데, 이는 주변 시설로 인한 외부 노이즈의 자기간섭을 최소화하기 위해 사용되었으며 시설과 센서단까지는 최대 200 m 떨어지게 된다. 컨트롤 박스와 PC, NAS 그리고 GPS는 시설 내부에 설치되게 된다. SCM의 설치 개념도가 그림 26에 나타나 있다.

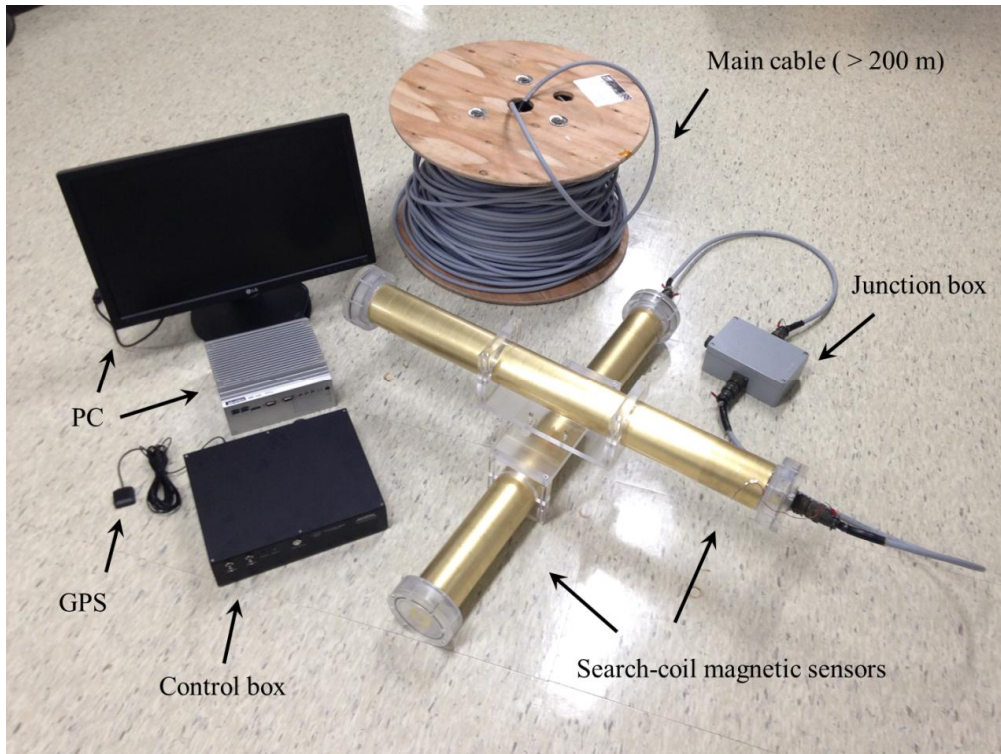


그림 24. 서치코일 자력계의 시스템 구성

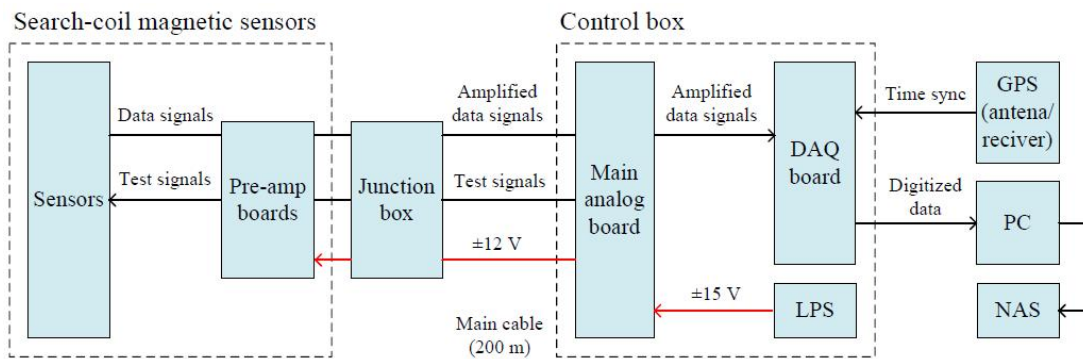


그림 25. 서치코일 자력계의 시스템 블록 다이어그램

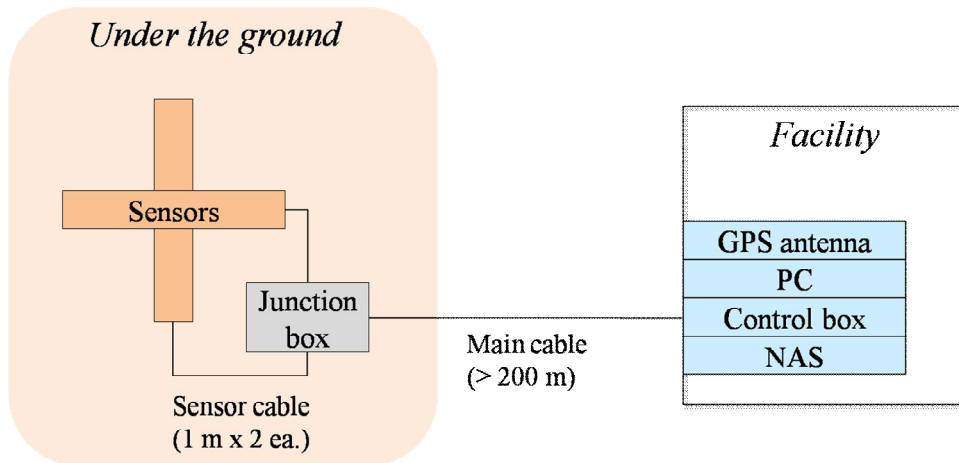


그림 26. 서치코일 자력계의 설치 개념도

#### (1) 서치코일 마그네틱 센서

서치코일 자력계의 센서는 1축 센서 당 920 (L) × 130 (D) mm의 크기와 10.5 kg의 무게를 가지며, 고 투자율의 강자성체 뮤메탈 코어에 마그네틱 와이어가 감겨진 형태이다 (그림 27). 센서를 구성하는 코어는 투자율이 높아 일반적으로 자기 측정 센서의 자기증폭을 위해 사용되며, 이를 통해 기기의 유도 기전력을 높일 수 있어 민감도가 향상된다. 자력계로써 요구되는 민감도 설계를 위해서 센서 당 수십만 턴의 코일 턴 수가 적용되었다. 센서의 코일 권선 작업은 수십만 턴이 요구되기 때문에 작업의 효율성을 위해 자동 권선기가 사용되었다. 서치코일 마그네틱 센서의 코일은 코어 로드에는 한 번에 감겨 있는 것이 아닌, 수십 개의 스펴 (실타래) 구성으로 제작되었다. 이것은 수십만 턴의 코일 제작의 효율성을 높일 수 있을 뿐만 아니라, 센서 코일의 기능검증 면에서도 굉장히 효율적이다. 코일은 스펴 별로 단위화되어 있기 때문에, 기능 확인이 비교적 간단하고 문제가 생긴 스펴은 쉽게 교체할 수 있어 센서의 수리작업 면에서도 실용적이다. 그림 28와 같이 스펴은 실타래와 같은 구조를 가지며, 스펴 간의 체결이 가능하도록 패턴방식으로 설계되었다. 재질은 전기적 성질이 적고 강도가 강한 Acetal (Delrin<sup>®</sup>)로 제작되었으며, 스펴 하나당 수만 턴의 코일이 감겨져 있다. 스펴의 코일작업을 위해 권선기가 사용되지만, 권선에 최적화된 속도와 장력의 설정값이 요구되며 작업 과정에서 발생하는 기계의 미세한 진동으로 인해 오차가 발생할 수 있어 제작과정에 있어 정교함이 요구된다. 센서에는 총 18개의 스펴이 구성되며 이는 하나의 코일로써 상호 연결된다. 센서의 추가적인 자기증폭 향상을 고려하여, 코일이 감겨있지 않은 여유분 스펴이 센서 양 쪽에 2개씩 추가로 장착되어있다.



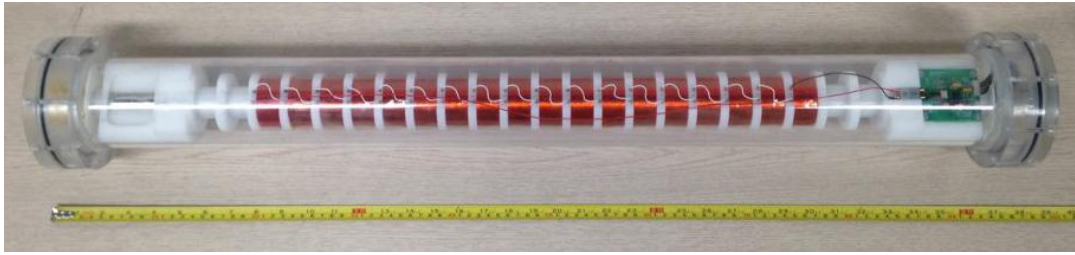


그림 27. 서치코일 마그네틱 센서

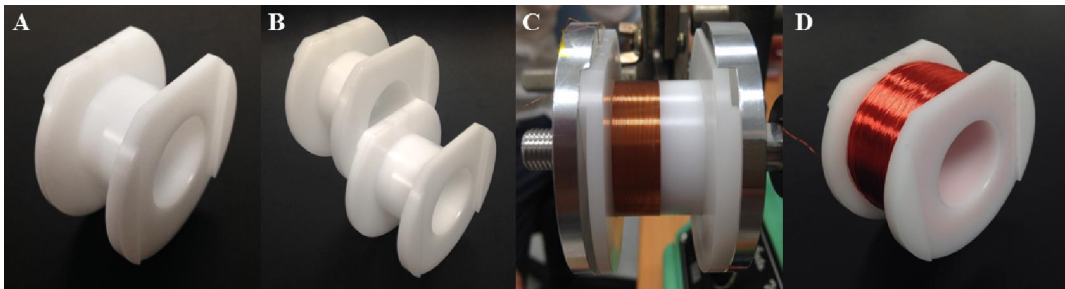


그림 28. A, B) 스푼과 스푼 간의 패턴 조립방식, C) 스푼의 권선 작업 모습, D) 권선이 완료된 스푼

서치코일 마그네틱 센서는 야외 설치용으로써 지하에 묻히는 방식으로 설치된다. 따라서 센서는 적합한 내구성과 방수기능이 요구되며, 이를 위한 부가적 구성품들이 필요하다. 센서는 폴리카보네이트 재질의 튜브에 삽입되어 외부노출로부터 차단되고 튜브의 양 끝 단은 아크릴 재질의 커버로 막아진다. 튜브 내부의 센서 고정과 on-board 프리엠프보드의 장착을 목적으로 Acetal 소재의 부가 구성품들이 센서에 추가적으로 조립되어있으며, 이는 스푼 세트를 중심으로 더미스풀, E-보드 링, 우레탄이 차례로 양쪽 끝 단 방향에 장착되어있다 (그림 29). E-보드 링에는 약 30턴의 테스트용 코일이 감겨져 있는데, 이것은 기기의 자체기능시험을 위해 제작되었으며 메인아날로그보드의 오실레이터와 연결되어 주기적인 자기 파동을 만들어낼 수 있다. E-보드 링은 탈부착이 용이하게 설계되어 프리엠프보드의 교체 및 수리가 수월하도록 제작되었다.

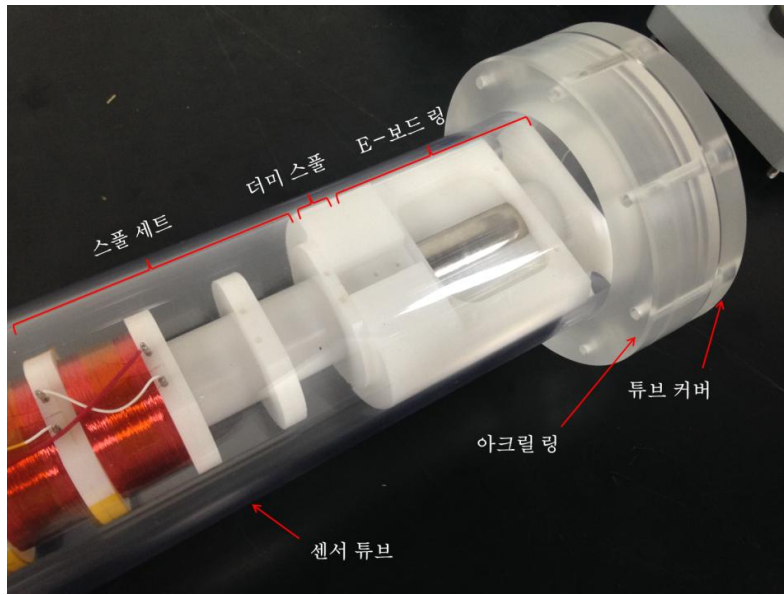


그림 29. 센서 튜브와 아크릴 링, 튜브 커버의 모습 (좌)과 조립된 모습 (우)

센서단의 프리앰프보드는 미약한 측정 신호의 1차 증폭을 위해 사용되며, 센서부터 컨트롤박스까지 연결되는 200 m 메인 케이블로 인한 신호 손실을 최소화시킨다. 프리앰프보드는 수백의 증폭률과 10 Hz의 공진주파수를 가지며, 이는 메인아날로그보드의 주파수 특성과 함께 측정 가능 주파수 범위를 설정한다. 보드의 사이즈는 55 × 50 mm로 센서의 튜브 내에 삽입이 가능한 크기이고 무게는 12 g이며, 인가전압은 ±12 V 이다. 그림 30에는 프리앰프보드의 모습과 E-보드 링과의 장착 모습이 나타나 있다.

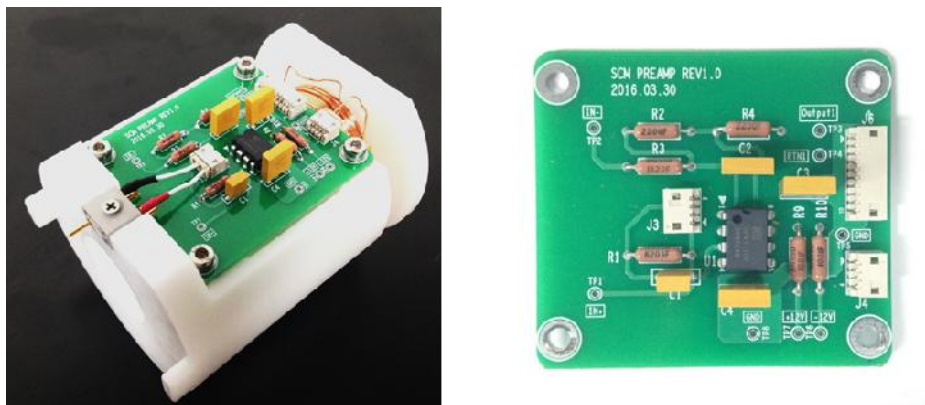


그림 30. 프리앰프보드 (우)와 E-보드 링과의 장착모습 (좌)

### (3) 컨트롤 박스

컨트롤 박스는 서치코일 자력계의 시스템 운용을 제어하며, 이를 위한 전자보드들과 기타 부품들로 구성되어 있다. 컨트롤 박스의 전면 부에는 좌측부터 센서의 측정 신호 확인용도의 BNC 커넥터, 시스템 파워 LED, DAQ 상태 LED, 테스트 시그널 스위치가 장착되어 있고, 후면 부에는 좌측부터 파워 노이즈 필터, 메인 커넥터, DAQ USB 포트, GPS 안테나 커넥터, GPS 포트가 위치해 있다 (그림 31). 내부 구성은 좌측부터 메인아날로그보드, DAQ보드, 리니어 파워 서플라이가 조립되어 있으며, 모두 컨트롤 박스의 샤시 그라운드와 접지되어 있다 (그림 32).



그림 31. 컨트롤 박스의 전면(좌)과 후면부(우)

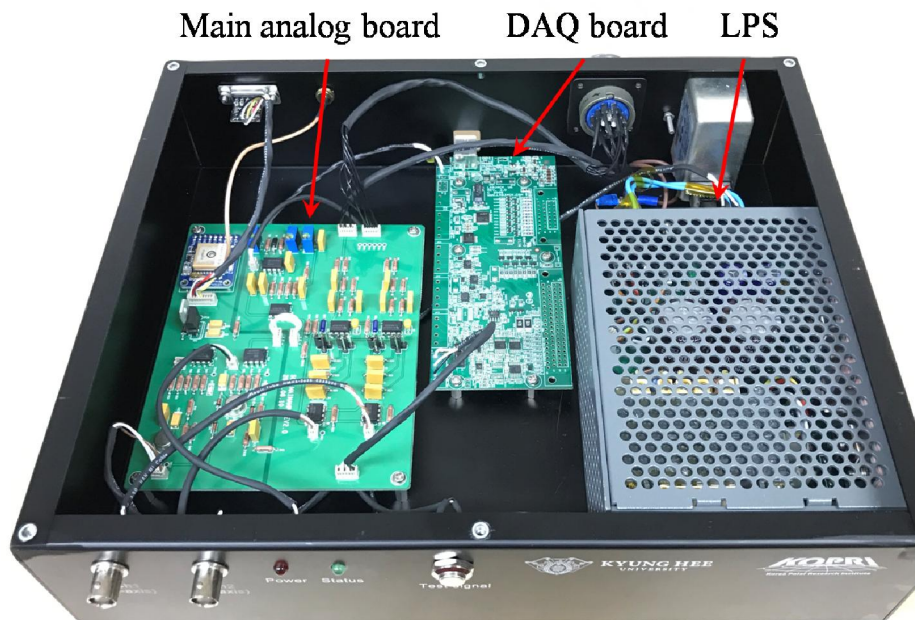
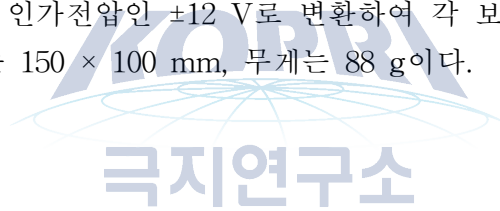


그림 32. 컨트롤 박스의 내부 구성

메인아날로그보드는 시스템 운용에 필요한 2차 신호 증폭, 차단 주파수, 테스트 신호를 발생시키는 오실레이터와 파워 레귤레이터 기능으로 설계되어있으며, 메인 케이블과 연결되어있는 컨트롤 박스의 메인 커넥터를 통해 센서의 측정신호를 전달받는다. 시스템 증폭은 프리앰프보드의 1차 증폭과 메인아날로그보드의 2차 증폭이 적용되어 이는 수만에 이르고, 메인아날로그보드의 증폭 조절기에 의해 1/2, 1, 2배로 선택 가능하다. 따라서 실제 기기 운용에 있어 관측 대상 또는 주변 환경영향을 고려하여 자력계의 증폭률을 설정할 수 있다. 기기의 측정주파수 범위 설정을 위해서 메인아날로그보드에는 차단 주파수 (Low pass filter)가 설계되어 있으며, 이는 6 Hz로 그 이상의 주파수는 필터링된다. 서치코일 자력계에는 시스템의 기능검증을 목적으로 자체 테스트 기능이 설계되어 있으며, 이는 메인아날로그보드의 오실레이터 기능이다. 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. 메인아날로그보드의 사이즈는  $150 \times 100$  mm, 무게는 88 g이다.



라. 시스템 성능 시험 및 결과

서치코일 자력계의 주요 제원은 아래의 표 2에 요약되어있으며, 이에 대한 관련 실험내용은 아래 항목에 각각 나타나있다.

Type	Bi-axial search-coil magnetometer
Frequency response	1 mHz to 5 Hz
Sensor sensitivity	364 $\mu$ V/(nT $\cdot$ Hz)
Resolution	0.1 @ 1 Hz
Noise level	0.07 @ 1 Hz
Sampling rate	10 samples/sec/axis
File size and format	30.4 Mbyte/day (2ch), ASCII

표 2. 서치코일 자력계의 시스템 사양

(1) 응답주파수

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 33에 나타나있다. 테스트 솔레노이드에는 평선제너레이터의 사인파가 전달되며, 이에 따라 센서 외부에 시간에 따라 변하는 인공자기장이 발생된다. 센서의 출력 값은 증폭회로를 통해 오실로스코프로 실시간 모니터링되며, 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 (그림 34), 인가 주파수 이외의 시설로 인한 외부 자기장 노이즈를 차폐하기 위해서 시험에는 자기 쉴딩 케이스가 사용되었다. 시스템의 응답 주파수 시험결과는 그림 35에 나타나있다. 기기의 응답주파수는 3 Hz일 때 가장 큰 출력치가 확인되었으며(공진주파수), 6 Hz 근방에서 -3 dB corner frequency인 차단주파수가 설계치와 동일하게 확인되었다.



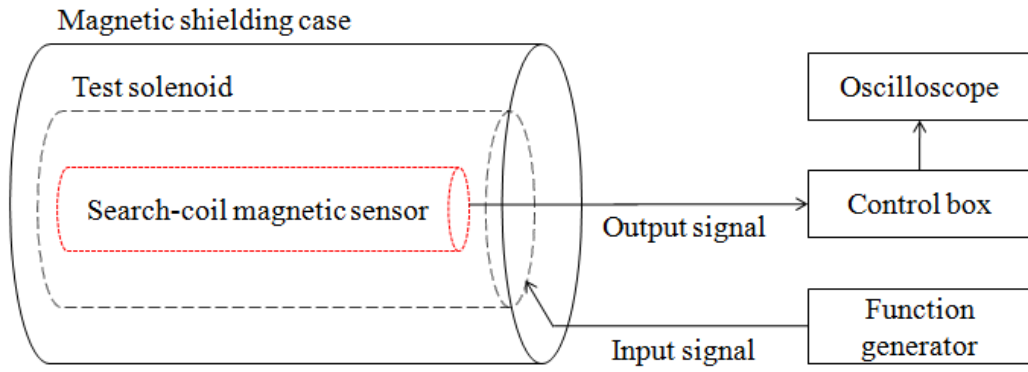


그림 33. 서치코일 자력계 시험 구성 개념도

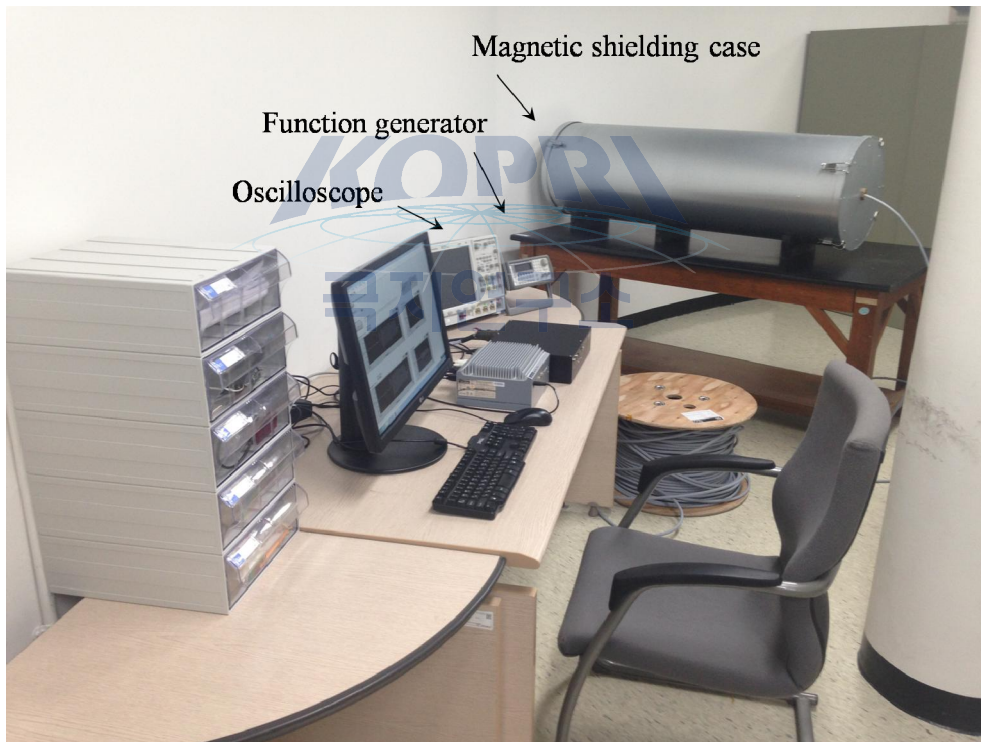


그림 34. 서치코일 자력계 시험 환경

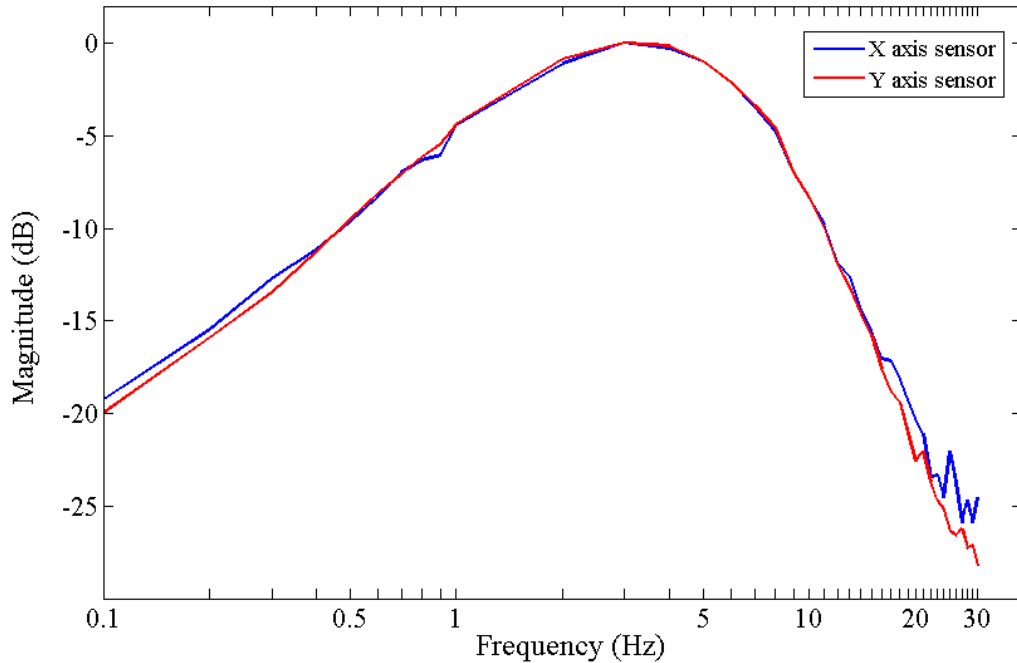


그림 35. 서치코일 자력계의 응답주파수 시험 결과 그래프

## (2) 분해능

분해능은 최소 단위의 자기장 변화를 측정할 수 있는 성능을 의미하며, 이는 자력계의 성능을 확정 짓는데 가장 중요한 사양 중 하나이다. 분해능 시험을 위해서는 정확한 시스템 노이즈 레벨의 확인이 요구되며, 본 챕터에서는 자력계의 분해능과 노이즈 레벨을 어떻게 측정하였는지 기술되어 있다. 해당 시험은 앞서 설명한 응답주파수 시험과 구성은 동일하나 방법에서 약간의 차이가 있다. 인공 자기장 세기는 고정된 채 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 36, 37에 나타나 있다. 서치코일 자력계의 노이즈 레벨 및 분해능은 표 3에 나타나 있다.

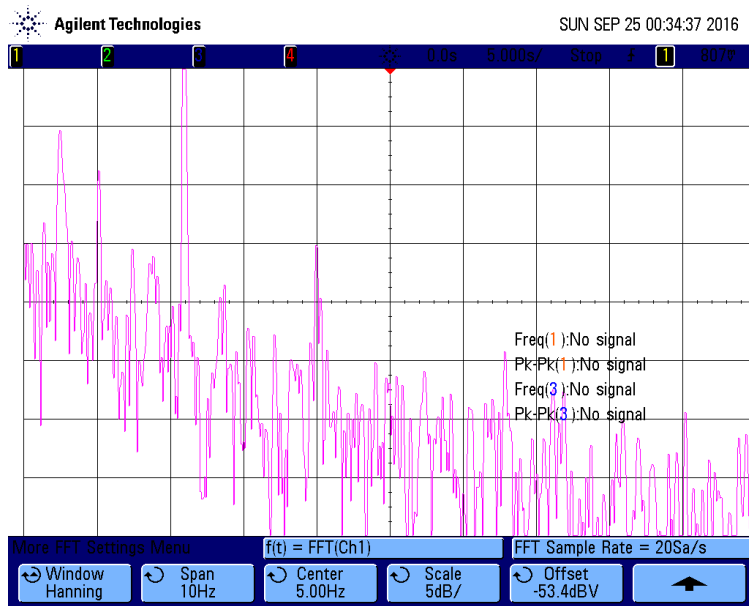


그림 36. 0.5 Hz에서의 분해능 시험 결과

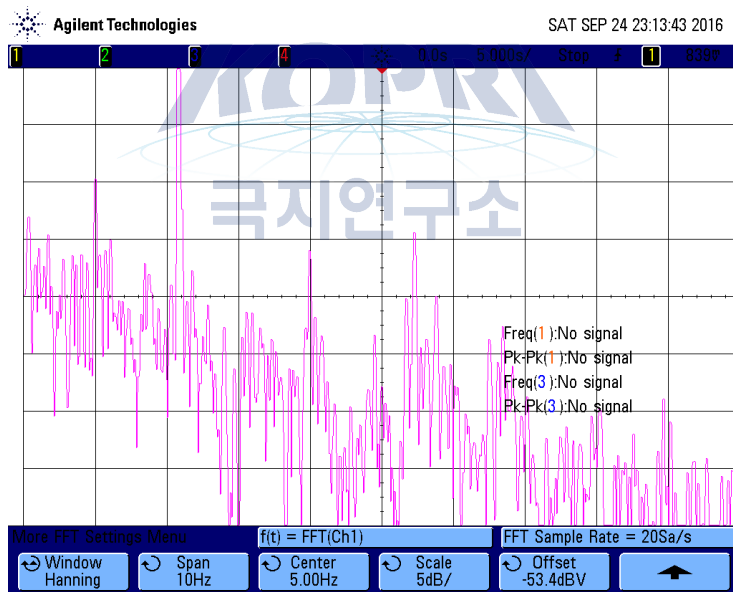


그림 37. 1 Hz에서의 분해능 시험 결과

Sensor (axis)	X	Y	X	Y	X	Y
Frequency (Hz)	0.5		1		2	
Noise level ( $pT/\sqrt{Hz}$ )	0.06	0.07	0.06	0.07	0.06	0.07
Resolution ( $pT/\sqrt{Hz}$ )	0.08	0.1	0.08	0.1	0.09	0.1

표 3. 서치코일 자력계의 노이즈 레벨 및 분해능 사양

### (3) 필드테스트

서치코일 자력계의 최종적인 기능검증을 위해서는 외부 전자기적 간섭이 적은 환경에서의 필드테스트가 필수적이다. 이를 위해 경희대학교 천문대 (37.23, 127.08, L 1.4)와 보현산 천문대 (BOAO) (36.1 N, 128.6 E, L 1.3) 인근에서 2 차례 필드테스트를 수행하였다. 테스트 기간 동안 기기의 설치 작업과 철수 작업, 데이터 수집이 수행되었으며 이는 남극에서 진행 될 실제 작업들에 대한 모의작업이다. 보현산 천문대는 경상북도 영천시 보현산 (1,124 m)의 정상에 위치하고 있으며, 한국천문연구원에서 운영 중인 천문대이다. 필드테스트를 위해서 센서단과 정선박스는 야외에 설치되고, 시설과의 연결을 위해 메인 케이블이 사용되었다. 자력계는 1축 센서단이 사용되었으며, 보현산 천문대의 태양관측동으로부터 약 200 m 떨어진 위치에 센서단이 설치되었다 (그림 38). 센서단은 지자기의 남북방향과 일직선의 평행한 방향으로 또한 local magnetic field line과는 수직한 방향으로 설치가 되었다. 자력계는 근 지구 자기장의 섭동관측을 목적으로 UT 10:07, 25/04/2015부터 UT 24:00, 26/04/2015까지 약 38시간동안 데이터 수집을 수행하였다. 그림 39는 필드테스트 관측결과이며 상단은 시간에 따른 기기의 출력전압을, 하단은 시간에 따른 spectrogram이다. 하단의 그림을 살펴보면 외부 환경으로 인한 백그라운드 노이즈는  $< 10^{-25}$  인 것으로 판단되며, 이것은 1차 필드테스트의 결과보다 약  $10^3$  이상 낮은 PSD (Power Spectrum Density)로 확인되었다. 또한 UT 16:00, 25/04/2015 근방에서 ULF 이벤트로 보이는 관측결과가 확인되었다. 눈에 띄게 강한 세기의 측정결과가 UT 16:00부터 18:00로 확인되었으며, 0.1 Hz이하의 주파수 범위로 보여졌다 (그림39, 붉은 박스). 해당 데이터의 추가확인을 위해 0.1 Hz이내의 주파수범위와 UT 15:00부터 18:00까지 확대된 그래프가 사용되었으며 이는 그림 40 상단에 나타나있다. 관측된 데이터는 UT 16:15부터 17:15에서 불규칙한 형태로 보여졌으며 0.03 Hz 이내의 측정결과에 따라 해당 이벤트는 Pi 2로 예상되었다. Pi2는 자기권 꼬리에서 발생하는 서브스톰에 의해 발생하는 것으로 알려져 있으며, 보현산의 Midnight time (지상에서 자기권 꼬리를 바라보는 시각)은 약 UT 16:00이다. 이에 따라 UT 16:15부터 측정된 이벤트의 시각을 고려해봐도, 이는 서브스톰에 의해 발생한 Pi2가 관측된 것으로 판단되었다. 해당 관측 결과의 데이터 검증을 위해서, 일본의 미네야마 (35.6 N, 135.1 E, L = 1.25)에 설치되어있는 교토대학교의 플럭스게이트 자료를 참고하였다 (그림 40, 하). 플럭스게이트의 설치장소는 보현산의 L값과 비슷한 근사한 위치이며, 측정 자료는 서치코일 자력계의 이벤트 측정 시각과 동일한 시각의 자료이다. 그림의 가로축은 UT, 세로축은 각각 플럭스게이트의 각 좌표계가 나타나있으며, 그 중 H좌표에서 서치코일 자력계의 이벤트 측정 시각과 동일한 시각 (UT 16:30, 17:00, 17:30)에 Pi에 의한 자기 섭동이 관측된 것을 확인할 수 있다.



그림 38. 보현산 천문대에서 필드테스트 설치 장소

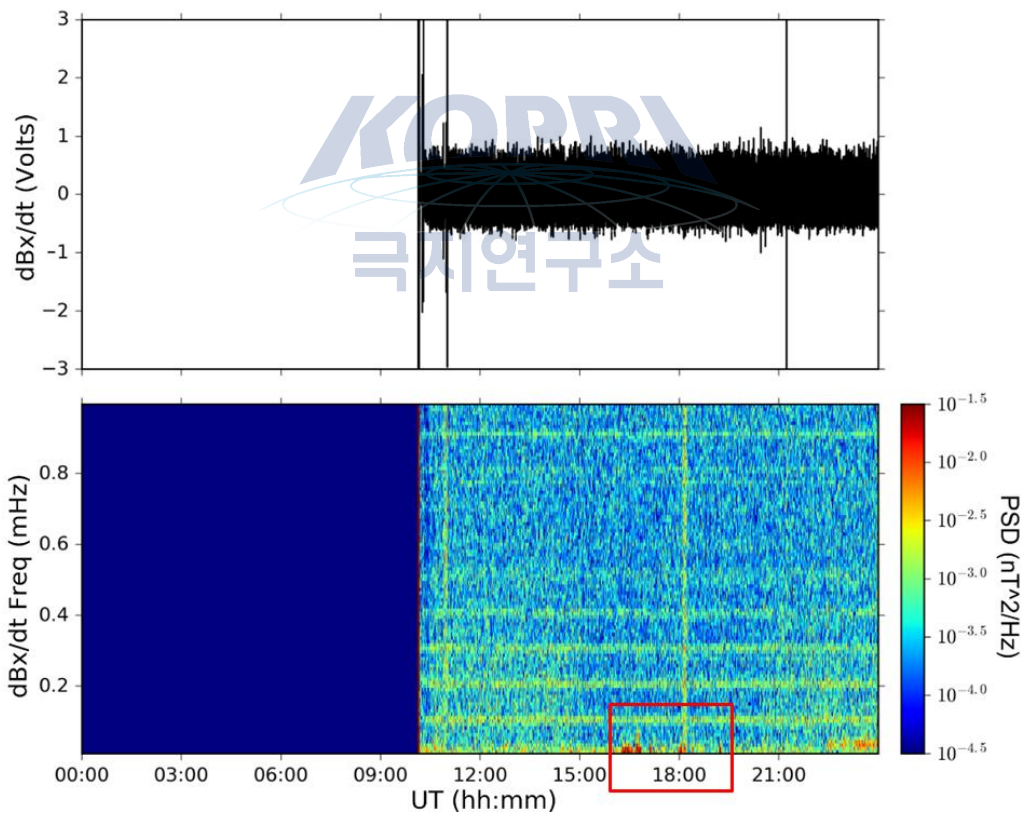


그림 39. 필드테스트 관측결과 그래프 (25/04/2015): 시간에 따른 출력전압 그래프 (상), 시간에 따른 PSD 그래프 (하)



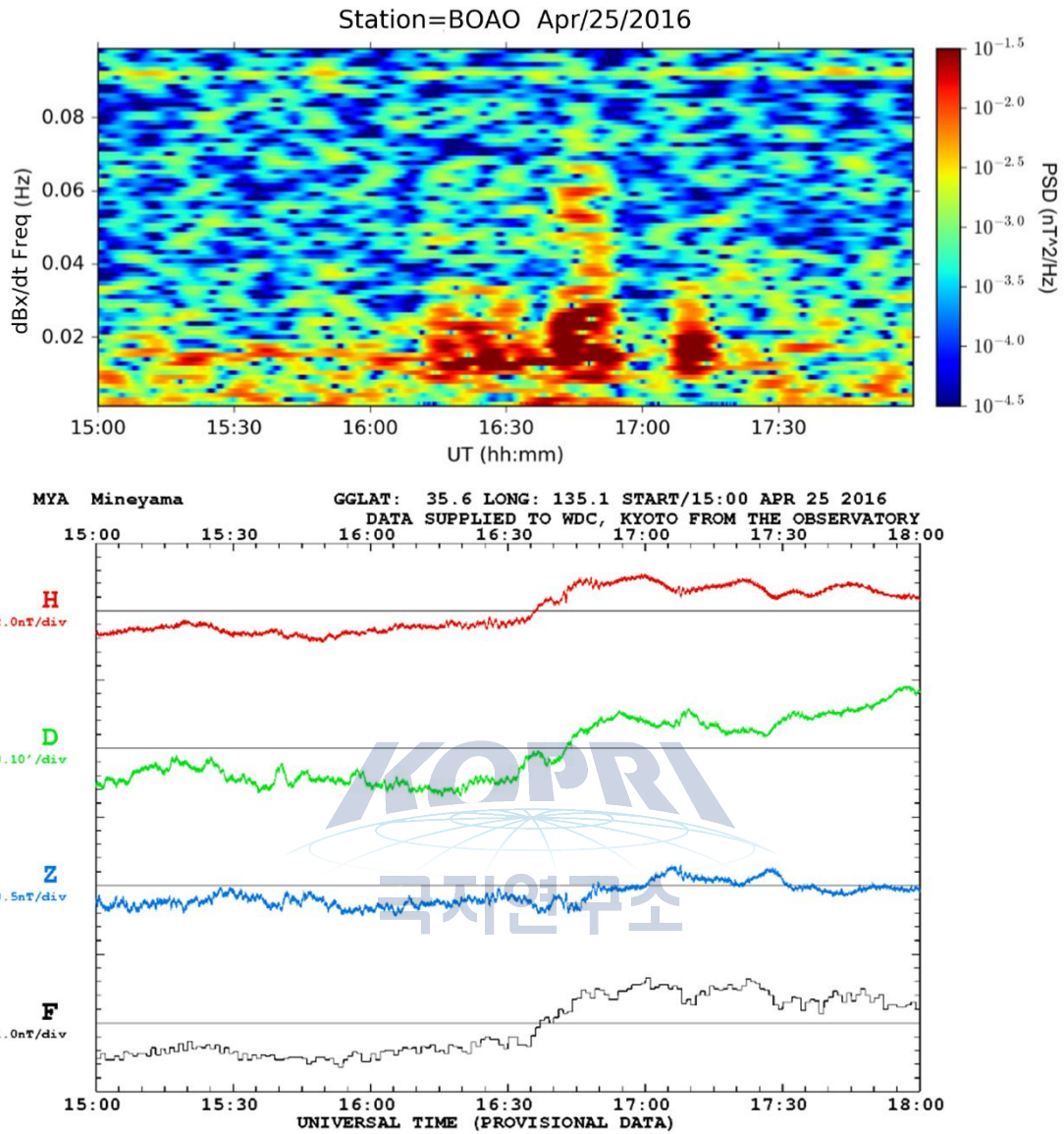


그림 40. 필드테스트 관측결과 그래프 (UT 15:00 - 18:00, 25/04/2015): 서치코일 자력계의 PSD 그래프 (상), 교토대학교 플릭스케이프 자력계의 시간에 따른 출력 전압 그래프 (하)

#### 라. 설치 및 운용

서치코일 자력계는 2016/11/29 ~ 2016/12/25 동안 남극장보고과학기지에 설치 및 시험 운용되었으며, 현재는 정상운용 및 데이터 수집 중에 있다. 기기는 크게 야외에 설치되는 센서부와 실내에 설치되는 장비들로 구성되며 실내장비는 기지의 본관동으로부터 500미터 떨어진 우주기상관측동 내부에, 센서부는 우주기상관측동에서 250미터 이상 떨어진 야외에 설치된다. 센서부 설치장소를 위한 고려대상은

기지 시설인 본관동, 우주기상관측동, Vertical Incidence Pulsed Ionosphere Radar (VIPIR) 타워, Workup 타워 그리고 해안가이다. 각 시설들과 지형구조가 고려된 설치위치는 그림 41에 나타나있다. 설치위치는 workup 타워와의 거리가 최대인 지점이면서, 우주기상관측동으로부터는 250 m, 해안가 지역(하계시즌)으로부터는 최소 250 m 이상 떨어진 장소이다. 설치위치를 결정하기 위해 3 곳에서의 field test를 통해 노이즈 환경을 확인하고, 관측된 노이즈의 원인대상을 추정하였다. 또한 설치위치 선정을 위한 지형 조사 (물 웅덩이, 남극도독갈매기 서식지 등)가 추가로 진행되었다.

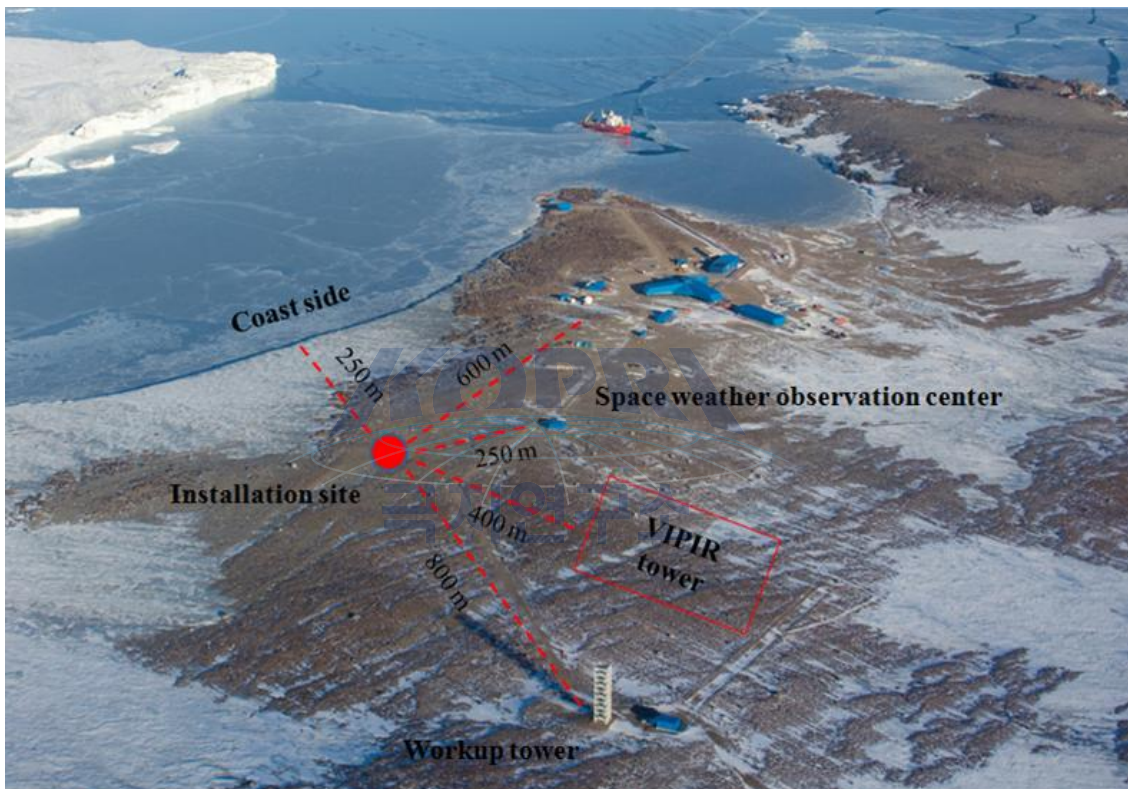


그림 41. 서치코일 자력계 설치위치와 각 시설들과의 거리관계도

(1) 시험 및 결과

서치코일 자력계의 설치작업 이전에 기기 기능시험 (Polarity test)이 1차적으로 진행되었다. 이후 센서부 설치장소를 결정하기 위한 field test 및 노이즈환경 확인 작업이 수행되었으며, 설치작업 이후에는 약 열흘간의 데이터 수집 및 분석이 진행되었다.

(가) Polarity test

각 축 센서의 방향성 검증 (Polarity)은 필수적인 사항이다. 해당 시험을 위해서는 자체 기능시험 및 polarity 검증 목적으로 제작된 test coil이 사용되며, 이것은 각 축 센서에 내장되어있다. Test coil 구동은 컨트롤 박스 전면의 test signal 스위치로 작동되며, 시험을 위한 인공자기장을 발생시킨다. Test coil과 센서 스펴의 코일방향은 동일하다. 센서부는 관측동 실외 부근에 설치되었으며, 시험 결과는 아래 그림 42에 나타나있다. 테스트 시점의 측정 그래프 첫 부분이 상승하는 positive한 결과가 확인되었다.



그림 42. Test coil을 사용한 서치코일 자력계의 self test 결과



(나) 필드 테스트

서치코일 자력계 센서부의 설치위치 선정을 위해 3차례의 필드 테스트(그림 43)가 진행되었으며, 각 테스트에 대한 데이터 및 분석결과가 아래에 명시되어있다.

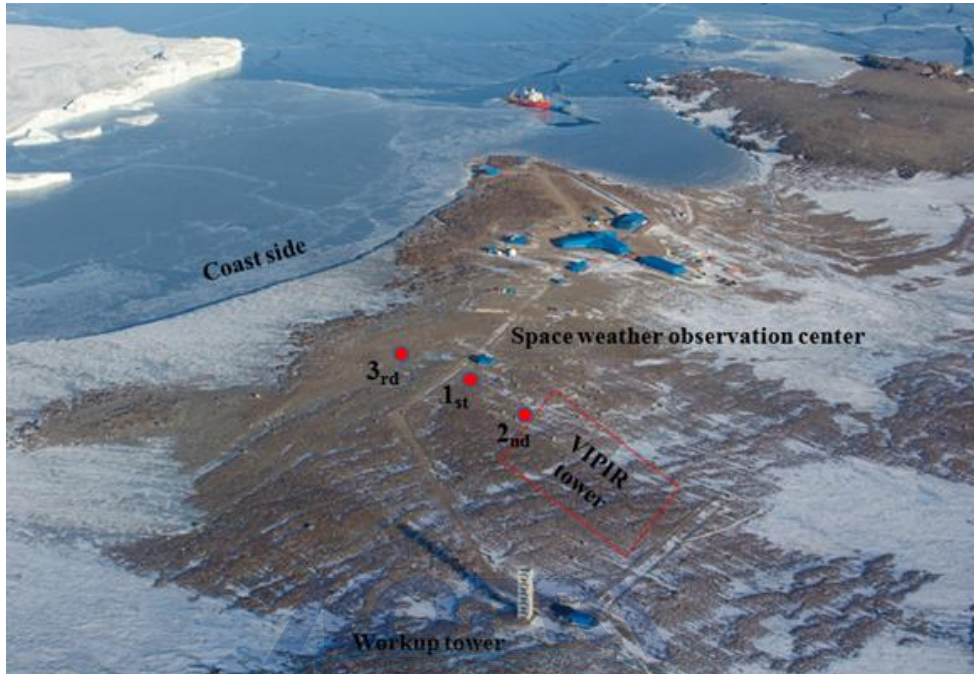


그림 43. 1, 2, 3차 field test 설치위치

1차 시험은 관측동 실내/외(그림 44, a, b)에서 진행되었으며, 관측동 내부 노이즈 비교를 목적으로 실외 설치는 관측동에서 50 m 떨어진 위치에서 수행되었다. 시험결과 (그림 45, 46)는 상단에서 차례로 X, Y축 센서이며, 실내/외 데이터를 비교해보면 노이즈 차이는 약  $10^3$ 인 것으로 확인되었다. Field test 결과 (그림 46)에서 눈에 띄는 사항은 1 Hz에서의 주기성을 가지는 관측결과와, 2.5 Hz에서의 연속적인 노이즈이다. 추정되는 원인은 첫 번째로 센서부 설치위치 동쪽방향의 도로 근처에 매립되어있는 전원케이블의 영향이고, 두 번째로는 VIPIR의 송수신 영향이다. VIPIR 구동은 UT 06:00 즈음 종료되었는데 그림 46의 관측결과 역시 UT 06:00 이후 1.8 Hz에서의 주기적인 노이즈가 없어진 것을 알 수 있다. 추가 확인을 위해서 2, 3차 필드 테스트를 수행하였으며, 위치는 각각 VIPIR 타워 근방과 설치장소(관측동으로부터 70 m 떨어진)방향 부근이다.

2, 3차 필드 테스트의 센서부 설치위치(그림 44, c, d)는 1차 때에 비해 VIPIR에 더 가까이/멀리 설치되었으며, 전반적인 노이즈 비교 목적을 가지고 진행되었다. 또한 2, 3차 시험 각각 절반의 시험기간 중에는 VIPIR를 가동하여 VIPIR 송수신

유무에 따른 환경 비교도 수행되었다. 시험 결과는 그림 47에 나타나있다.

2차 필드 테스트 (11:00~14:40)는 센서부의 설치위치가 VIPIR 근방이며, 관측동과는 약 70 m 떨어져있다. 시험결과 (그림 47)를 살펴보면 12:20부터 13:20까지 0.1 ~ 3.5 Hz 대역에서 노이즈가 관측되었는데 이것은 바이퍼 구동기간과 일치한다. 1차 field test에서 관측되었던 1.8, 2.5 Hz의 주기적인 노이즈가 발견되지 않았다. 2차 field test는 장보고 기지의 정전으로 인해 14:30분 즈음 시험이 종료되었다.

3차 필드 테스트 (15:30~19:00)는 센서부의 설치위치가 VIPIR와 관측동으로부터 약 130 m 떨어진 위치이다. 시험결과를 살펴보면, 바이퍼 구동기간인 15:30 ~ 17:30동안 노이즈가 발견되지 않았다. 17:00 전후로 나타난 노이즈는 관측동 부근으로 지나간 차량에 의한 것이다. 3차 시험 역시 1차 시험에서 발견되었던 1.8, 2.5 Hz에서의 주기성 노이즈가 발견되지 않았다.

결론적으로 1차 시험에서 발견되었던 1.8, 2.5 Hz 주기성 노이즈는 2차, 3차 모두 발견되지 않았으므로 관측동 내부 장비 또는 도로 지하의 전원 케이블 영향인 것으로 판단된다. 1차 시험결과인 그림 23을 살펴보면 관측동 실내에서조차 해당 노이즈가 보이는 것으로 볼 때, 관측동 내부 장비로 인한 영향으로 판단된다. 또한 VIPIR와의 거리가 가장 멀었던 3차 시험 결과는 2차 시험과 달리 VIPIR 송수신 구동기간에 따른 노이즈가 발견되지 않았다. SCM의 최종설치위치는 관측동으로부터 250 m, VIPIR로부터 400 m 떨어진 위치이므로 노이즈가 가장 적은 위치일 것으로 판단되었다.



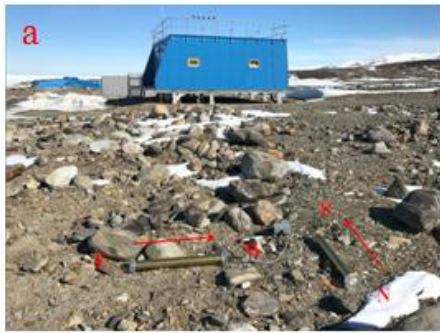
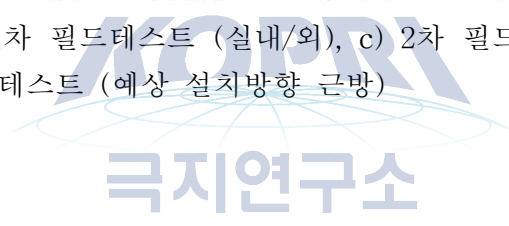


그림 44. a, b) 1차 필드테스트 (실내/외), c) 2차 필드테스트 (VIPIR 근방), d) 3차 필드테스트 (예상 설치방향 근방)



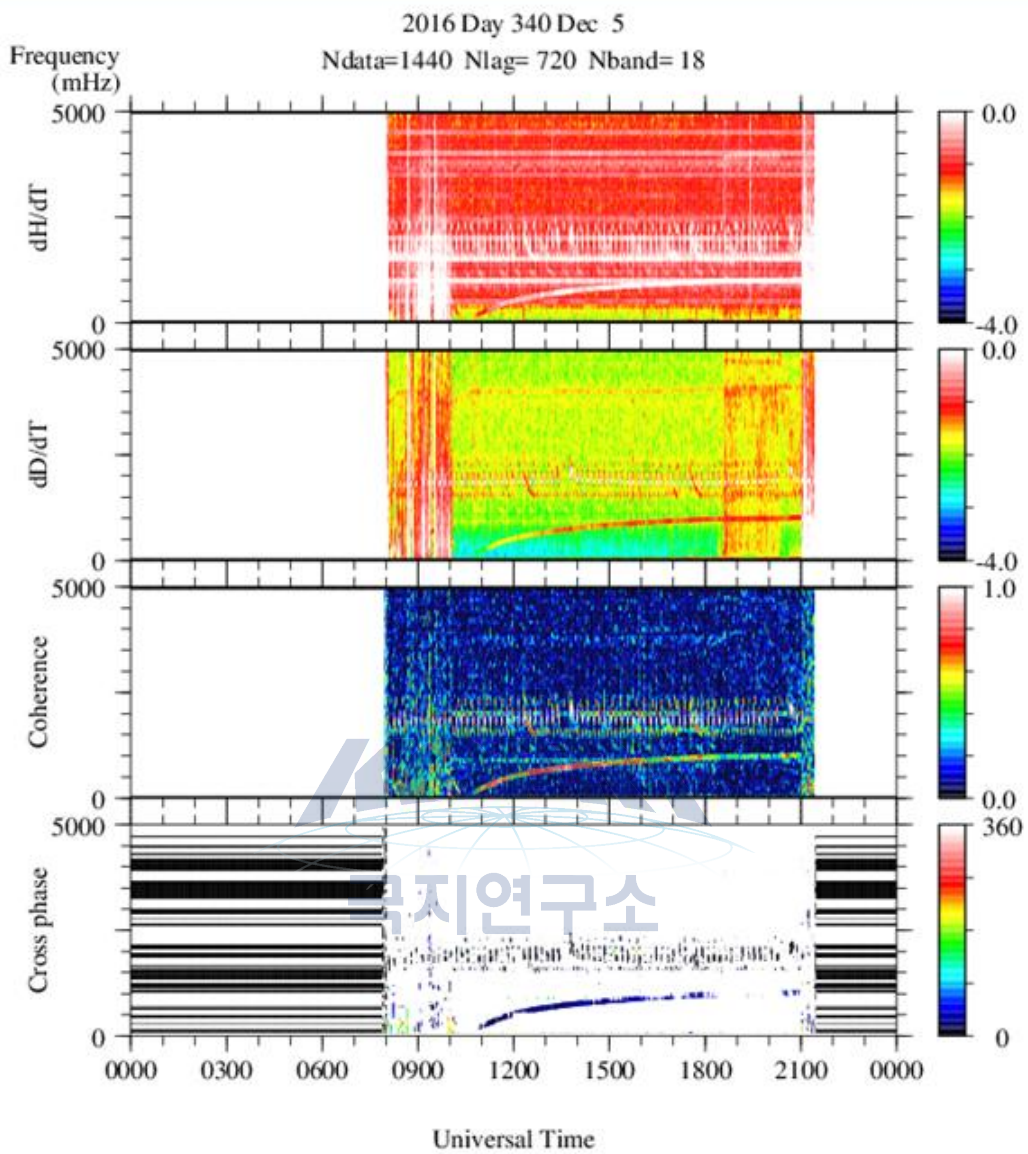


그림 45. 1차 필드테스트 결과 (우주기상관측동 실내)

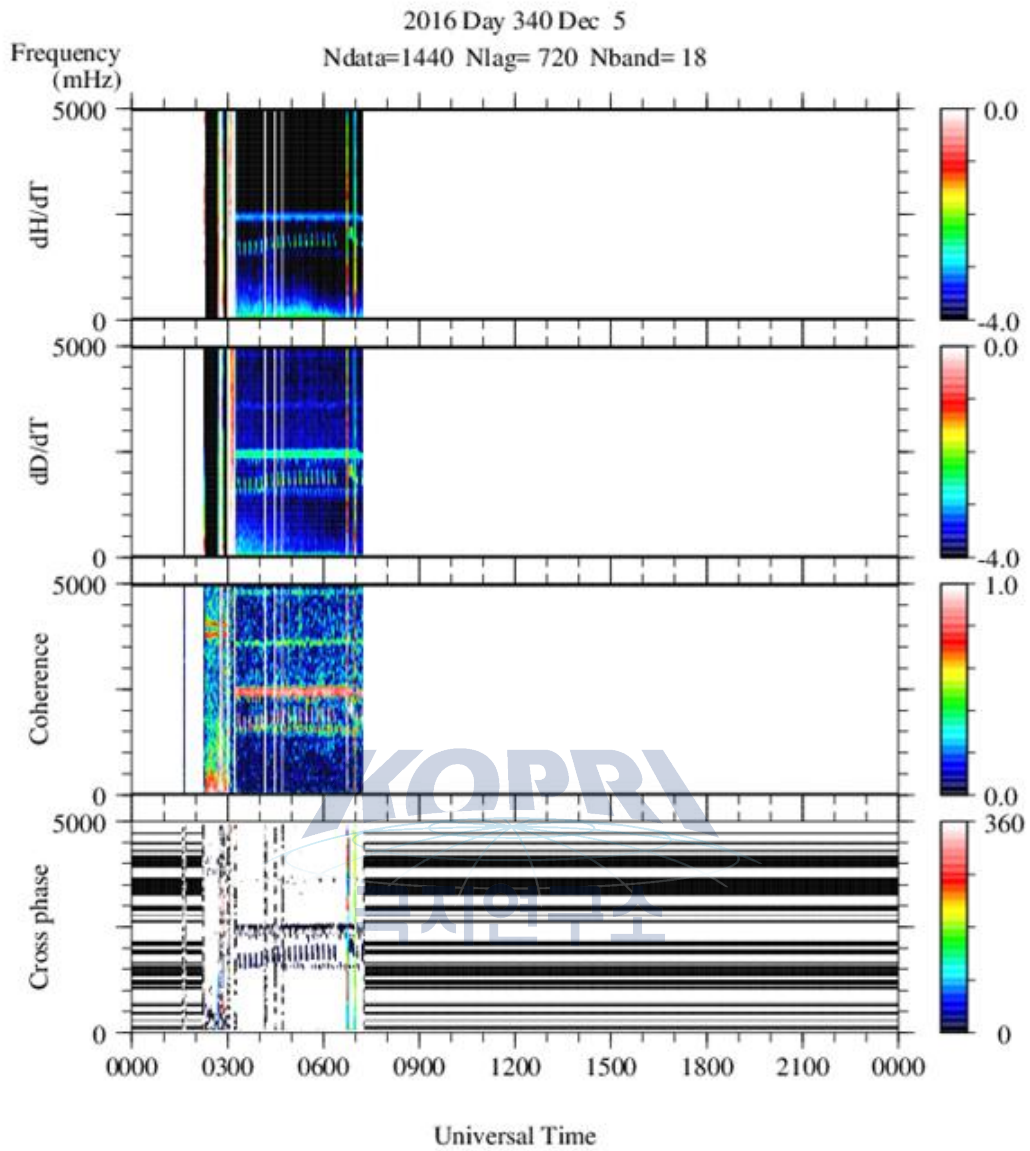


그림 46. 1차 필드테스트 결과 (우주기상관측동 실외 50 m 떨어진 지점)

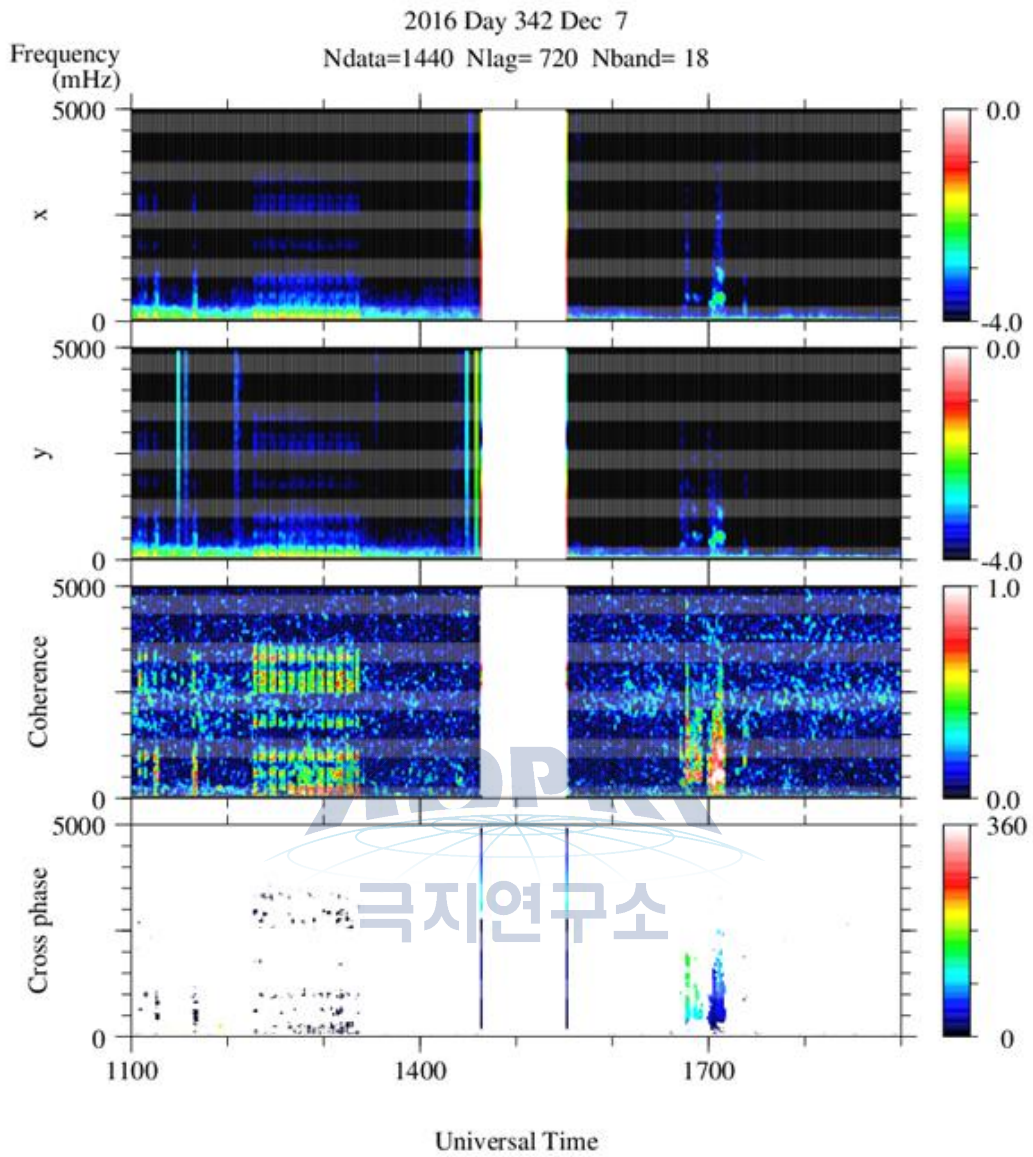


그림 47. 2, 3차 필드테스트 결과 (VIPIR 근방, 예상 설치방향 근방)



(다) 설치 작업 및 결과

서치코일 자력계의 설치일정은 2016/12/14~15로 이틀간 진행되었으며, 설치장소는 그림 41에 표기되어있는 지점이다. 설치과정 및 결과는 아래 그림 48, 49에 각각 나타나있다.



그림 48. 서치코일 자력계의 설치과정



자력계 설치는 크게 2가지로 구성되는데, 센서부의 설치작업 그리고 센서부와 실내장비 연결용도의 메인 케이블 매설작업이다. 그림 48의 a~g는 메인 케이블 매설 (관측동 앞 도로 지하의 철제 파이프 삽입작업 포함), h는 센서부가 넣어질 설치용 박스의 매설작업이 나타나있다.



그림 49. 서치코일 자력계의 설치 완료된 모습

설치완료 된 서치코일 자력계는 그림 49에 나타나있다. 센서부 및 설치용 박스 매설은 각각 a, b와 같으며, 박스 내부의 센서부는 완전히 고정될 수 있도록 모래주머니로 고정되었다. 센서의 X, Y축은 각각 지자기의 남쪽, 동쪽 방향과 얼라인 상태이며, magnetic field line과의 수직성을 위해 inclination은 7.5도가 적용되었다. 자력계의 실내장비 배치 모습은 c에 나타나있으며, GPS 안테나의 설치 모습은 d와 같다.

#### (라) 기기 운용 및 데이터 수집

서치코일 자력계의 시스템은 앞서 이야기한 바와 같이 우주기상관측동 실내장비로 제어할 수 있다. 기기는 컨트롤 박스 후면의 파워 스위치와, 데이터수집프로그램의 실행 여부에 따라 운용이 가능하다. 데이터 파일은 하루에 하나씩 생성되며, 매일 UT 0시 10분에 전날 데이터 파일이 NAS로 백업된다. 서치코일 자력계의 모든 데이터는 극지연구소 네트워크를 통해 접근가능하며, 해당 NAS에 접속하여 다운받을 수 있다.

서치코일 자력계의 데이터는 시간 동기화로 인한 데이터 손실이 존재하나, 손실률은 10/864000 이내이다. 또한 손실된 데이터는 연속하지 않기 때문에 내삽을 통해 무시할 수 있는 정도의 오차이다.

설치된 자력계는 데이터 분석을 통해 기지 및 기타 전자 장비에 의한 노이즈가 거의 나타나지 않는 것이 확인되었다. 그림 50은 Universal Time으로 2016년 12월 21일 하루 동안 실제로 관측된 데이터의 파워스펙트럼이다. 전체적으로 노이즈가 낮은 것을 확인하였고, UT 18시부터 24시까지는 우주공간에서 발생해 들어온 ULF 파동으로 추정되는 이벤트가 관측된 것으로 판단된다. 또한 약 열흘간 비슷한 형태의 관측결과를 확인한 후, 기기운용을 시작하였다.

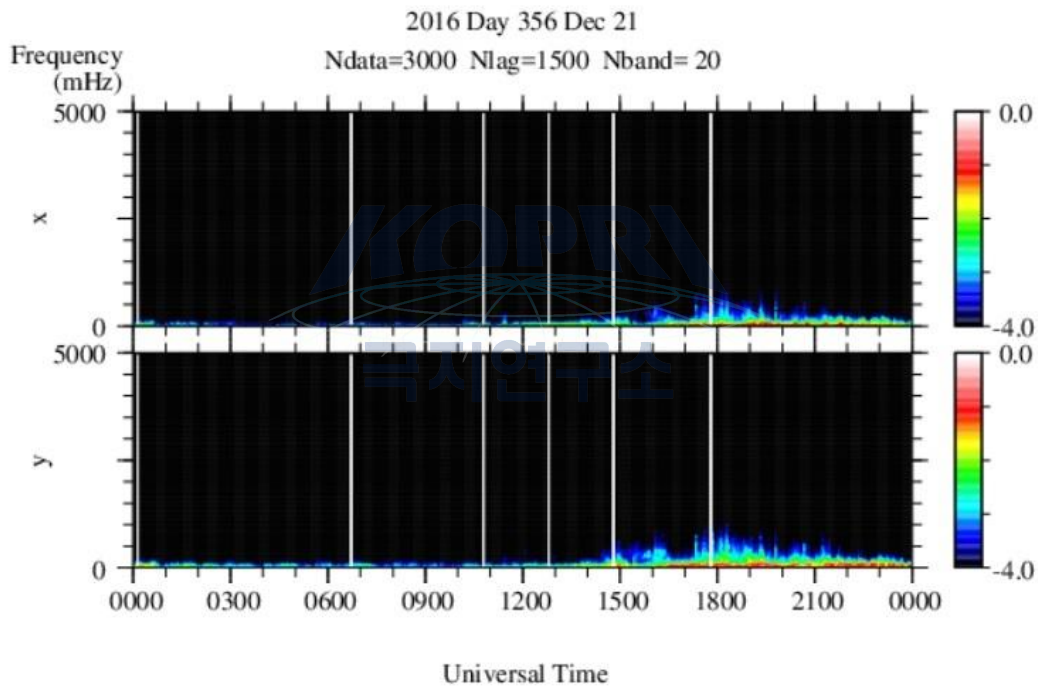


그림 50. 남극장보고과학기지에 설치된 서치코일 자력계의 측정데이터 파워스펙트럼 (2016/12/21)

## 제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

	목표	결과	비고
SCI 논문	2	6	· 1차년도: SCI급 저널 1건 게재 · 2차년도: SCI급 저널 4건 게재 SCI-E급 저널 1건 게재
지상 자기장 측정기개발	1	1	· 서치코일 자기장 측정기 개발 · 장보고기지에 설치 및 운용

### 1. 과학 분야

#### 가. 논문

1)SCI급(Geophysical Research Letters, 2015) 게재 1건: Plasmopause location under quiet conditions ( $K_p \leq 1$ ): THEMIS observations.

2)SCI급(Journal of Geophysical Research, 2016) 게재 1건: EMIC waves observed at geosynchronous orbit under quiet geomagnetic conditions ( $K_p \leq 1$ ).

3)SCI급(Geophysical Research Letters, 2016) 게재 1건: Longitudinal frequency variation of long-lasting EMIC Pc1-Pc2 waves localized in the inner magnetosphere.

4)SCI급(Journal of Geophysical Research, 2016) 게재 1건: Occurrence of EMIC waves and plasmaspheric plasmas derived from THEMIS observations in the outer magnetosphere: Revisit

5)SCI급(Journal of Geophysical Research, 2016) 게재 1건: Spectral characteristics of steady quiet-time EMIC waves observed at geosynchronous orbit.

#### 나. 학술대회 발표

1)국제(JpGU 일본 2015): Characteristics of sudden commencements observed by Van Allen Probes in the inner magnetosphere (구두)

## 2. 기술 분야

### 가. 장비개발

- 1) 1차년도: 프로토 타입 서치코일 자기장 측정기 개발
- 2) 2차년도: 최종모델 서치코일 자기장 측정기 개발  
남극 장보고 기지 설치 및 운용

### 나. 논문

- 1)SCI-E급(Journal of Magnetics, 2016) 게재 1건:  
Development of Ground-Based Search-Coil Magnetometer for Near-Earth  
Space Research

### 다. 학술대회 발표

- 1)국내(KASS 한국 2015): Development of prototype model for ground-based  
Search-Coil Magnetometer (구두)
- 2)국내(KASS 한국 2016): Development of the Ground-Based Search-Coil  
Magnetometer at the Jang Bogo Station in the Antarctica (구두)



## 제 5 장 연구개발결과의 활용계획

### 제 1 절 추가연구의 필요성

#### 1. 과학 분야

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

최근 극지 연구소는 장보고기지에 여러 관측 장비를 설치 운영 및 계획하고 있으며 극지 우주환경 연구를 위해 전리층 관측기 (FPI, VIPER) 운영 중에 있다. 본 과제에서 다루는 격변 우주환경에 의한 자기권-극 전리권·고층대기 연동 연구는 전리층의 전기장 변화가 우주공간에서의 전기장 변화와 어떤 관계를 가지고 있는지 조사하는 것을 목표로 하고 있다. 현재 미국 및 일본에서 운영 중인 극 지역의 SuperDARN 자료를 이용하여 전리층의 운동학적 변화를 조사 중에 있다. 본 과제 수행으로 얻어진 자료 분석 기술과 자기권-극 전리권·고층대기 연동에 대한 축적된 과학적 지식을 바탕으로 장보고 기지에서 운영하고 있는 전리층 관측 장비 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 상태이다. 자기장 측정기는 거의 모든 위성에 실려 위성 자세제어 및 과학 관측에 이용되어지고 있는 중요한 우주기술 중의 하나이다. 본 과제에서는 지상에서 우주환경 자기장 변화를 관측할 수 있는 서치코일 자기장 측정기를 개발하고 이 장비를 장보고 기지에 설치하여 운영하는 것을 목표로 하고 있다. 미국, 일본, 유럽에서는 다수의 자기장 측정기를 이용하여 네트워크를 구축하여 운영하고 있다. 본 과제에서 개발한 같은 규격의 장비를 남극 세종기지에 설치 운영하면 장보고 기지에 설치된 장비와 함께 동시



관측이 가능하여 보다 넓은 지역의 우주환경 변화 연구를 수행 할 수 있다. 따라서 본 과제 이 후에도 차기 사업으로 세종기지 서치코일 자기장 측정기 개발사업이 계속된다면 지상 자기장 원천기술 확보가 확실 하며 이 기술은 향후 우주 위성용 자기장 개발에 크게 공헌 할 수 있다고 생각된다.



## 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

### 제 1 절 위성 자료

1. GOES 정지궤도 위성 및 THEMIS 위성 자료 : <http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>  
가. 자기장/플라즈마 자료 이용.
2. 저궤도 MetOp and NOAA/POE : <http://ngdc.noaa.gov/>  
가. 고에너지 전자/프로톤 입자 자료.
3. 태양풍 자료 : <http://omni.gsfc.nasa.gov/>  
가. 행성간 공간 자기장 및 태양풍 속도/밀도 자료 이용.

### 제 2 절 지상 자료

1. Canadian Array for Realtime Investigations of Magnetic Activity (CARISMA) 자기장 측정기 자료: <http://www.carisma.ca/>
2. Athabasca 자기장 측정기 자료

극지연구소

### 제 3 절 지자기 활동지수 자료

1. AE 지수 : <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>
2. Kp, SYM-H 지수 : <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>

## 제 7 장 참고문헌

- Araki, T. (1994), A physical model of the geomagnetic sudden commencement, in Solar Wind Sources of Magnetospheric Ultra-Low-Frequency Waves, Geophys. Monogr. Ser., vol. 81, edited by M. J. Engebretson, K. Takahashi, and M. Scholer, p. 183, AGU, Washington, D. C.
- Carpenter, D. L. (1970), Whistler evidence of the dynamic behavior of the duskside bulge in the plasmasphere, J. Geophys. Res., 75, 3837-3847.
- Carpenter, D. L., and R. R. Anderson (1992), An ISEE/whistler model of equator electron density in the magnetosphere, J. Geophys. Res., 97, 1097-1108.
- Chappell et al. (1971), The dayside of the plasmasphere., J. Geophys. Res., 76, 7632-7647.
- Gallagher, D. L., P. D. Craven, and R. H. Comfort (2000), Global core plasma model, J. Geophys. Res., 105(A8), 18,819-18,833
- Gary et al. (1994), hot proton anisotropies and cool proton temperatures in the outer magnetosphere, J. Geophys. Res., 99(A12), 23,603-23,615
- Goldstein, J., and Sandel, B. R. (2005), The global pattern of evolution of plasmaspheric drainage plumes, in Inner Magnetosphere Interactions: New Perspectives from Imaging, vol. 159, edited by J. L. Burch, M. Schulz, and H. Spence, p. 1, AGU, Washington, D. C.
- Hyun, K., K.-H. Kim, E. Lee, H.-J. Kwon, D.-H. Lee, and H. Jin (2014), Loss of geosynchronous relativistic electrons by EMIC wave scattering under quiet geomagnetic conditions, J. Geophys. Res., 119, doi:10.1002/2014JA020234.
- Kim, K.-H. et al. (2007), Plasmaspheric drainage plume observed by Polar satellite in the prenoon sector and the IMAGE satellite during magnetic storm of 11 April 2001, J. Geophys. Res., 112, A06237, doi:10.1029/2006JA012030.
- Kim, K.-H., D.-H. Lee, K. Shiokawa, E. Lee, J.-S. Park, H.-J. Kwon, V. Angelopoulos, Y.-D. Park, J. Hwang, N. Nishitani, Y. Hori, K. Koga, T. Obara, K. Yumoto, and D. G. Baishev (2012), Magnetospheric responses to the passage of the interplanetary shock on 24 November 2008, J. Geophys. Res., 117, A10209, doi:10.1029/2012JA017871.
- 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.
- Li et al. (2010), Global distribution of suprathermal electrons observed on THEMIS and potential mechanisms for access into the plasmasphere, *J. Geophys. Res.*, 115, A00J10, doi:10.1029/2010JA015687.
- Moldwin et al. (2002), A new model of the location of the plasmapause: CRRES results, *J. Geophys. Res.*, 107(A11), 1339, doi:10.1029/2001JA009211.
- Mozer, F. S. (1973), Analyses of techniques for measuring DC and AC electric fields in the magnetosphere, *Space Sci. Rev.*, 14(2), 272–313, doi:10.1007/BF/02432099.
- Nishimura, Y. et al. (2013), Structures of dayside whistler-mode waves deduced from conjugate diffuse aurora, *J. Geophys. Res.*, 118, 664–673, doi:10.1029/2012JA018242.
- Nishimura, Y. et al. (2014), Evolution of nightside subauroral proton auroral caused by transient plasma sheet flows, *J. Geophys. Res.*, 119, 5295–5304, doi:10.1002/2014JA020029.
- O'Brien, T. P., and M. B. Moldwin (2003), Empirical plasmapause models from magnetic indices, *Geophys. Res. Lett.*, 30(4), 1152, doi:10.1029/2002GL016007.
- Park, J.-S., et al. (2012), Statistical analysis of SC-associated geosynchronous magnetic field perturbations, *J. Geophys. Res.*, 117, A09212, doi:10.1029/2012JA017648.
- Park, J.-S., et al. (2014), Statistical analysis of geosynchronous magnetic field perturbations near midnight during sudden commencements, *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1002/2013JA019380.
- Perderson, A., F. Mozer, and G. Gustafsson (1998), Electric field measurements in a tenuous plasma with spherical double probes, in *Measurement Techniques in Space Plasmas: fields*, vol. 103, edited by R. F. Pfaff, J. E. Borovsky, and D. T. Young, pp. 1–12, *Geophys. Monogr. Ser.*, AGU, Washington, D. C.
- Shue, J.-H., et al. (1998), Magnetopause location under extreme solar wind conditions, *J. Geophys. Res.*, 103, 17,691.
- Summers, D. et al. (2007), Timescales for radiation belt electron acceleration and

- loss due to resonant wave-particle interaction: 1. Theory, J. Geophys. Res., 112, A04206, doi:10.1029/2002JA009761.
- Takahashi, K. et al. (2010), Multipoint observation of fast mode waves trapped in the dayside plasmasphere, J. Geophys. Res., 115, A12247, doi:10.1029/2010JA015956.
- Tsyganenko, N. A., and M. I. Sitnov (2005), Modeling the dynamics of the inner magnetosphere during strong geomagnetic storms, J. Geophys. Res., 110, A03208, doi:10.1029/2004JA010798.





## 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.