

남극 자기장 네트워크 및 위성 자료를 이용한
플라즈마 파동 전파현상 연구

A study of propagation of ULF waves using Antarctic
magnetometer network and satellite measurements



한국해양과학기술원
부설 극지연구소

신진연구(우수신진연구) 최종보고서

| ① 부처사업명(대) | 기초연구사업 | 보안등급(보안, 일반) | 일반 | | | | | |
|--------------------------------|--|---|-----------------------|---------------|-------------------|-------------------|-----------------|------------|
| ② 사 업 명(중) | 신진연구 | 공개가능여부(공개, 비공개) | 공개 | | | | | |
| ③ 세부사업명(소) | 우수신진연구 | | | | | | | |
| ④ 과제성격(기초, 응용, 개발) | 기초 | ④-1 실용화 대상여부(실용화, 비실용화) | 비실용화 | | | | | |
| ⑤ 연구개발과제명 | 국 문 | 남극 자기장 네트워크 및 위성 자료를 이용한 플라즈마 파동 전파현상 연구 | | | | | | |
| | 영 문 | A study of propagation of ULF waves using Antarctic magnetometer network and satellite measurements | | | | | | |
| ⑥ 주관연구개발기관 | 극지연구소 | | | | | | | |
| ⑦ 연구책임자 | 성 명 | 권혁진 | 직급(직위) 기술원(무) | | | | | |
| | 소속부서 | 대기연구본부 | 전 공 우주과학 | | | | | |
| ⑧ 연구개발비 및 참여연구원수 (단위: 천원, M·Y) | | | | | | | | |
| 연 도 | 정부지원 연구개발비 (A) | 기업체부담금 | | | 정부외 출연금 (B) | 상대국 부담금 (F) | 합계 G=(A+B+E) | 참여 연구원수 |
| | | 현금 (C) | 현물 (D) | 소계 E=(C+D) | | | | |
| 1년차 | 150,000 | | | 0 | | | 150,000 | 0 |
| 2년차 | 50,000 | | | 0 | | | 50,000 | 0 |
| 3년차 | 100,000 | | | 0 | | | 100,000 | 1 |
| 4년차 | | | | 0 | | | 0 | |
| 5년차 | | | | 0 | | | 0 | |
| 합계 | 300,000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 300,000 | 1 |
| ⑨ 총연구개발기간 | 2020. 03. 01 ~ 2023. 02. 28 (O.O.C.36개월) | | | | | | | |

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2023 년 3 월 29 일

연구책임자 : 권 혁 진

주관연구개발기관의 장 : 강 성 호

과학기술정보통신부장관 귀하

※ 전자접수이므로 연구책임자 및 주관연구개발기관의 장 서명(인, 직인)은 생략

〈 연구결과 요약문 〉

| | | | | | | |
|--|---|----------|---------------------|-----------|--------------|--|
| 연구개요 | <p>본 연구는 국내 연구진이 개발하여 남극에 설치한 세 기의 자기장 측정기를 포함한 국제 관측 네트워크 및 저궤도 인공위성 관측자료를 종합적으로 이용하여 극저주파 전자기 파동(Ultra-low frequency wave)의 특성 파악을 목표로 하고 있다. 또한 지상 관측 네트워크의 확장을 위해 국내 기술을 활용한 무인 관측소 개발 및 설치를 목표로 하고 있다.</p> | | | | | |
| 연구 목표대비 연구결과 | <p>본 연구과제에서 목표로 한 세부 연구 주제는 아래와 같다.</p> <ul style="list-style-type: none"> - 고위도 지상 관측자료를 이용한 관측지역에 따른 플라즈마 파동의 특성 연구 - 지상 관측을 기반으로 플라즈마 파동의 전파현상 분석 - 위성과 지상 자료를 이용한 자기권-전리권-지상 플라즈마 파동 전파 현상 검즈 - 남극 한국형 무인기지 네트워크 구축 <p>각 연구 주제에 대해 수행된 연구 결과는 아래와 같으며 연구 분야의 경우 계획한 내용을 모두 수행하였으나 한국형 무인기지 네트워크 구축은 외부적인 요인에 의해 계획했던 네트워크를 구성하지 못하였다. 종합적으로 약 90% 정도의 달성율을 보인다.</p> <ul style="list-style-type: none"> - 남극 장보고 과학기지 자기장 자료를 활용한 극관 지역 Pc1-2 파동 특성 분석 - 남극 대륙 관통 플라즈마 파동 이벤트 선정 및 전리권 파동 전파현상 연구 - 지자기 폭풍 발생에 따른 자기권-전리권 상호작용 연구 - 지상과 위성에서 동시에 관측된 Pc1-2 파동의 주파수 차이 확인 및 원인 규명 - 지상 관측 네트워크 및 위성 자료를 이용한 M-I Coupling 분석 연구 - 자기권 EMIC 파동 발생에 의한 저에너지 헬륨 가열 현상 연구 - 한국형 무인 관측소의 시험 모델 제작 및 필드 테스트 | | | | | |
| 연구발성과의 활용 계획 및 기대효과 (연구개발결과의 중요성) | <p>본 연구과제에서는 다양한 고위도 및 극지방 지상 관측자료 및 저궤도 위성 자료를 이용한 연구를 진행하였다. 이러한 결과는 향후 극지방 우주 과학 연구, 특히 자기권-전리권-열권 상호작용 연구에 활용도가 매우 높을 것으로 기대된다.</p> <p>또한 본 연구를 통해 국내에서 개발된 서치코일 자력계 자료를 활용함으로써 해당 장비의 과학적 연구 활용 가능성을 확인하였다. 현재 관측 자료는 극지연구소 데이터 센터에 공개되어 있으며 다수의 외국 연구자들과의 공동연구에 활용할 예정이다.</p> <p>필드 테스트 진행 중인 무인 관측소는 현재 준비 중인 남극 내륙기지의 사전 연구활동으로 남극 내륙에서의 자기장 및 오로라 관측을 수행할 예정이다. 내륙기지는 세종, 장보고 과학기지와 달리 월동기간 중 무인으로 진행할 가능성이 크기 때문에 무인 관측소 네트워크 구축을 통해 얻은 노하우를 활용하여 내륙기지에서 안정적인 무인 관측 시스템을 구축할 예정이다.</p> | | | | | |
| 중심어 | 국문 | 극저주파 파동 | 파동 전파현상 | 남극 | 자기권-전리권 상호작용 | |
| | 영문 | ULF wave | Ionospheric ducting | Antarctic | M-I Coupling | |

〈 목 차 〉

| | |
|---|----|
| 1. 연구개발과제의 개요 | 00 |
| 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용 | 00 |
| 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도 | 00 |
| 4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도 | 00 |
| 5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획 | 00 |
| 6. 자체점검표 | 00 |
| 7. 참고문헌 | 00 |
| <붙임1 세부 정량적 연구개발성과> | 00 |
| <붙임2 연구책임자 대표적 연구실적 및 증빙(요약문 및 사본)> | 00 |



1. 연구개발과제의 개요

본 연구는 국내 연구진이 개발한 서치코일 자기장 측정기 자료 및 남극 자기장 네트워크 관측자료와 위성 자료를 종합적으로 활용하여 남극 지역에서 관측된 Pc 1-2 밴드의 ULF 파동의 특성을 분석하는 것으로 목표로 하였다.

Pc 1-2 ULF 파동은 자기권에서 발생한 양이온의 온도 비등방성에 의해 발생하며 주로 플라즈마권계면 부근에서 이러한 현상이 주로 발생한다고 알려져 있다. 그러나 지상 자료를 보면 플라즈마권계면과 연결된 지역 이외에서도 동일한 파동이 동시에 관측되는 경우가 많이 보고되고 있다. 이러한 현상은 전리권에서 발생한 파동 전파 현상에 의한 것으로 지난 수 십년간 ULF 파동 연구에서 중요한 주제였다. 최근 들어 이러한 파동의 전파와 전리권으로 전파된 전자기적 변화가 전지구적으로 확산할 수 있다는 것이 확인되어서 본 연구에서는 국내 자료를 활용하여 이러한 현상을 분석하고자 한다.

또한 본 연구를 통해 남극 장보고 과학기지의 경우 이러한 자기장 측정기 외에도 전리권 레이다, 대기광 관측 자료 등 여러 우주 환경적 변화를 측정할 수 있는 장비가 운용 중이므로 ULF 파동 분석에 국한하지 않고 극지방에서 발생하는 여러 현상들을 종합적으로 분석하여 자기권-전리권-열권(Magnetosphere-Ionosphere-Thermosphere) 상호작용에 대한 연구를 수행할 수 있다.

자료 분석을 기반으로 한 연구와 더불어 현재 해양수산부 및 극지연구소에서 진행 중인 남극 내륙기지 기반 연구활동을 대비하여 한국형 무인 관측소를 개발 및 관련 기술을 습득함으로써 향후 내륙기지 연구에 활용하는 것을 추가적인 목표로 삼고 있다.

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

· 극관 지역 Pc 1-2 파동 특성 분석

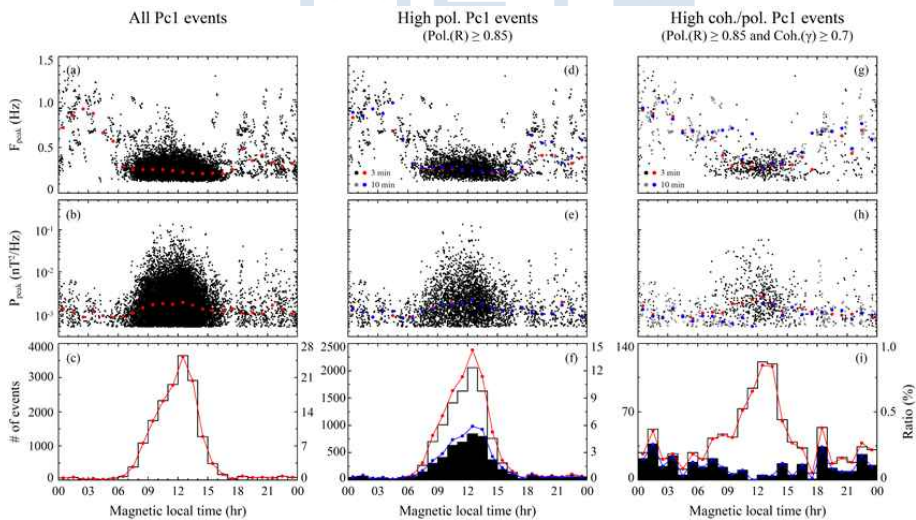


그림 1 남극 장보고 과학기지에서 관측된 Pc1 플라즈마 파동의 시간에 따른 분포

- 그림 1은 2017~2018년 동안 남극 장보고 과학기지에서 관측된 Pc1 플라즈마 파동의 시간에 따른 발생빈도의 변화를 보여주고 있다. 2년간의 자료를 분석한 결과 상당수의 파동의 낮 시간대에서 관측된 것을 확인할 수 있었다.
- 주파수 및 파동 세기의 변화의 경우, 주파수는 낮 지역(09~15 자기지방시)보다 밤 지역

(21~03 자기지방시)에서 주로 높게 관측되었으며 파동 세기는 그와 반대되는 경향을 가지는 것으로 나타났다.

- 파동의 스펙트럼 분석을 이용한 coherence와 polarization의 분포를 통해 이전 연구와 다른 점이 확인되었다. 밤 지역에서 발생한 Pc1 파동의 경우 낮 지역의 파동에 비해 전반적으로 coherence 및 polarization이 상당히 높은 것이 확인되었다.
- 이러한 차이는 두 지역에서 발생한 플라즈마 파동이 서로 다른 기작에서 기인했을 가능성이 크기 때문에 현재 추가 분석을 통해 두 가지 파동의 발생 원인을 확인하고 있다.
- 전리권을 통한 플라즈마 파동의 전파에 따른 변화 양상 분석

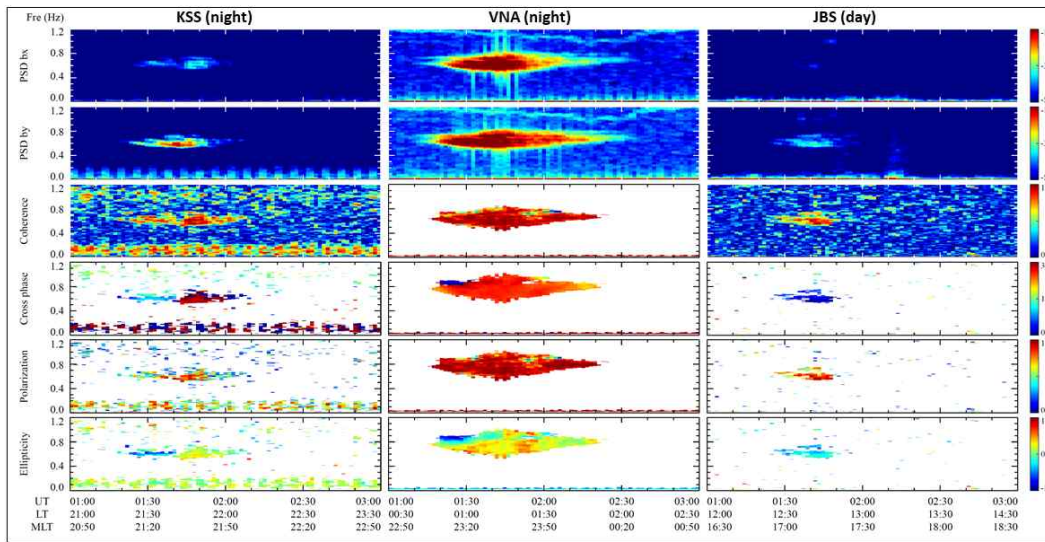


그림 2 남극 장보고 및 세종 과학기지, Neumayer 기지에서 동시에 관측된 Pc1 플라즈마 파동

- 그림 2는 2019년 5월 28일에 남극 장보고 및 세종과학기지와 Neumayer 기지에서 동시에 관측된 Pc1 플라즈마 파동을 보여준다.
- Pc1 플라즈마 파동 발생 이론에 따르면 Pc1 파동은 플라즈마의 성격이 급격하게 바뀌는 플라즈마권계면 부근에서 주로 발생하며 우주공간에서 발생한 파동은 자기력선을 따라 전리권 및 지상으로 전파되고 이후 전리권을 따라 수평방향으로 전파하면서 파동의 세기가 점차 약해진다.
- 위의 관측 결과를 보면 플라즈마권계면과 연결된 자기력선이 수렴하는 Neumayer에서 파동의 세기가 가장 강하게 나타났다. Pc1 파동의 전리권 전파 이론을 적용하면 이 파동은 우주공간에서 Neumayer 기지 주변으로 유입되었으며 이후 장보고 및 세종 과학기지 방향으로 전파되었음을 알 수 있다.
- 본 연구에서는 2019년 1년동안 Neumayer 기지에서 관측된 113개 이벤트를 대상으로 전리권에서의 파동 전파에 따른 변화 양상을 확인하였다. 그 결과 113개 파동 중 약 40%인 45개 파동이 세종 과학기지에서 동시에 관측되었으며 장보고 과학기지에서는 그 중 17개(15%) 파동만이 동시에 관측되었다.
- 파동의 전파 방향을 보면 고위도 보다는 저위도 방향으로 주로 전파하는 것으로 확인되었으며, 고위도 방향(장보고 기지)으로만 전파된 파동은 확인되지 않았다. 향후 추가 연구를 통해 이러한 파동의 전파 방향을 결정하는 요소가 무엇인지 확인할 필요가 있다.
- 파동의 전파 방향에 따른 감쇄 정도를 확인하기 위해 그림 3과 같이 세종과 장보고로 동

시 전파된 17개 이벤트를 대상으로 Neumayer 기지를 중심으로 전파 방향에 따른 세기 변화를 확인하였다.

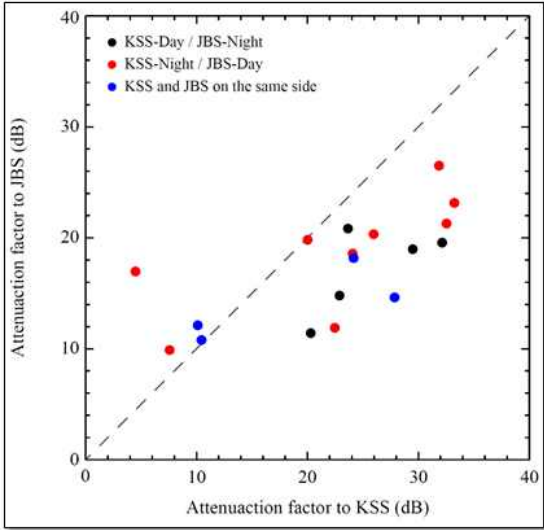


그림 3 파동의 진행 방향에 따른 세기 변화

· 지자기 폭풍 발생 시 극지방 전리권 변화

- 본 연구의 연구 대상인 지상의 Pc1 파동은 우주공간에서 발생한 EMIC (ElectroMagnetic Ion Cyclotron) 파동이 전파된 것으로 알려져 있다. EMIC 파동은 조용한 상태의 양이온이 자기권의 교란 또는 불안정성에 의해 운동 에너지의 비등방성이 동반될 때 다시 초기 상태로 돌아가기 위해 발생하는 것으로 알려져 있다.
- 이러한 EMIC 파동은 지자기 폭풍과 같이 발생빈도가 증가하는 것으로 알려져 있기 때문에 이러한 시기에 파동 전파를 위한 전리권 변화를 확인하기 위해 2019년 5월에 발생한 지자기 폭풍기간 중 장보고 기지의 전리권 변화를 연구하였다.

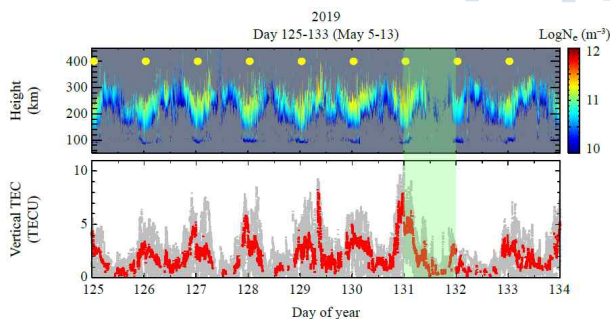


그림 4 장보고 기지의 전리권 변화

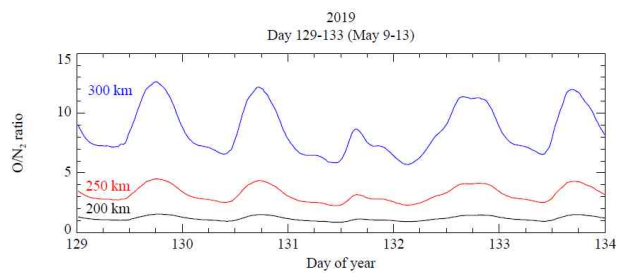


그림 5 TIGCM 모델을 이용한 O/N₂ 비율

- 그림 4은 2019년 5월 5일부터 13일까지의 남극 장보고 기지에 설치된 전리권 레이더에서 관측된 전리권 전자밀도 및 GPS 위성 신호를 활용한 총전자량의 변화를 보여준다. 지자기 폭풍이 발생한 5월 11일(131 day)에 전리권 전자밀도의 감소 현상이 서로 다른 두 관측장비에서 모두 두드러지게 관측되었다.
- 장보고 기지에서 관측된 전자밀도 감소 현상은 전리권에서 발생한 플라즈마의 재결합 증가와 연관되어 있다고 알려져 있다. 이를 확인하기 위해 본 연구에서는 TIEGCM 모델을 이용하여 전리권 고도에서의 O/N₂ 비율 변화를 확인하였다(그림5). 해당 비율의 증가는 재결합의 증가로 전자밀도가 감소했음을 의미한다.

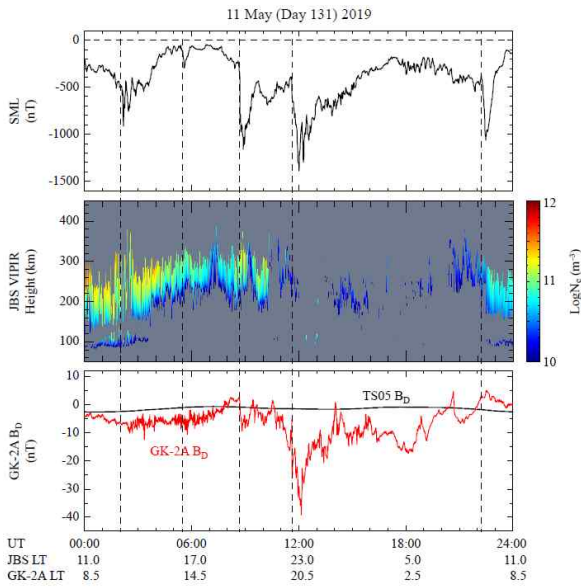


그림 6 지자기 지수, 전리권 레이더, 정지궤도 위성(GK-2A) 관측 자료

- 실제 태양풍 관측값을 이용한 모델 결과를 보면 지자기 폭풍이 발생하기 이전에는 전리권 F 층 고도인 300km를 기준으로 최대 13 정도의 값을 유지하지만 지자기 폭풍이 발생하면서 최대값이 10 이하로 감소한 것이 확인되었다. 즉, O/N₂ 비율이 지자기 폭풍이 영향으로 감소함에 따라 극지방 전리권의 전자밀도가 감소했음을 확인하였다.

- 그림 6은 지자기 지수와 장보고 전리권 관측 결과, 천리안 2호(GK-2A) 정지궤도 위성에서 관측된 자기장 변화를 보여준다. SML 지수의 감소는 자기권 꼬리 지역에서 서브스톰 발생을 의미하는 것으로 2019년 5월 11일에 수 차례 서브스톰이 발생했다(점선 표시).

- 10 UT 이후 세 번째 패널의 정지궤도 자기장의 변화(붉은색)가 조용한 상태(검정색)에 비해 큰 폭을 변화한 것이 확인되며 이 시기는 장보고 기지에서 전자밀도가 감소한 시기와 일치한다. 이러한 자기장의 변화는 서브스톰에 의한 자기권 및 전리권 전류계가 변화했음을 의미한다.

- 이러한 전류계 변화는 전리권의 O/N₂ 비율을 변화시키는 요인으로 알려져 있으나 일반적으로 로라 타원체 지역(지자기 위도 65~75°)에 전류계 변화가 발생하는 것으로 보고되어져 왔다. 본 연구를 통해 장보고 기지(지자기 위도 80°)가 속하는 극관 지역까지 이러한 전류계 영향이 확장되는 것을 확인하였으며 이러한 연구 결과는 2022년 6월에 SCI급 저널에 발표되었다.

· 지상 및 위성에서의 플라즈마 파동 관측

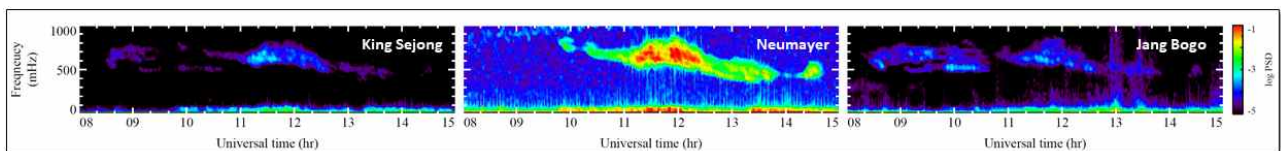


그림 7 2019년 3월 16일에 관측된 Pc1 파동

- 그림 7은 2019년 3월 6일에 세 곳의 관측지점에서 동시에 관측된 Pc1 파동의 다이내믹 스펙트럼 예시이다. 이 기간 중 총 두 개의 Pc1 파동(08~10 UT / 10~14 UT)이 관측되었다. 그러나 관측지에 따른 파동 세기를 보면 첫 번째 파동은 세종과 장보고 기지에서만 관측이 되었으며 두 번째 파동은 세 지점에서 모두 관측되었음을 알 수 있다. 즉, 파동에 따라 전리권을 따라 전파하는 경로가 변함을 확인하였다.

- 우주에서 전리권으로 유입되거나 전리권을 따라 전파하는 플라즈마 파동은 저궤도 위성에서 탑재된 자기장 측정기에서도 관측이 가능하다. 그림 8은 Neumayer에서 파동이 관측되었을 때 (좌) 저궤도 Swarm 위성의 궤도, (우) Neumayer와 Swarm 위성의 다이내믹 스펙트럼을 보여준다.

- Swarm-A와 Swarm-C는 지상에서 Pc1 파동이 관측되었을 때 Neumayer와 세종기지 사이를 지나가는 중이었으며 자기장 교란이 심한 오로라 타원체 지역을 지난 이후 지상과

비슷한 주파수의 플라즈마 파동이 관측되었다(검정색 원).

- 그림 9는 (좌) 관측된 플라즈마 파동의 시계열 자료와 (우) 푸리에 변환을 이용한 파동의 주파수 비교를 보여주고 있다. 플라즈마 파동전파와 관련된 이전 연구에서는 우주공간에서 발생한 파동과 지상에서의 파동은 동일한 주파수를 가지는 것으로 보고되었다.

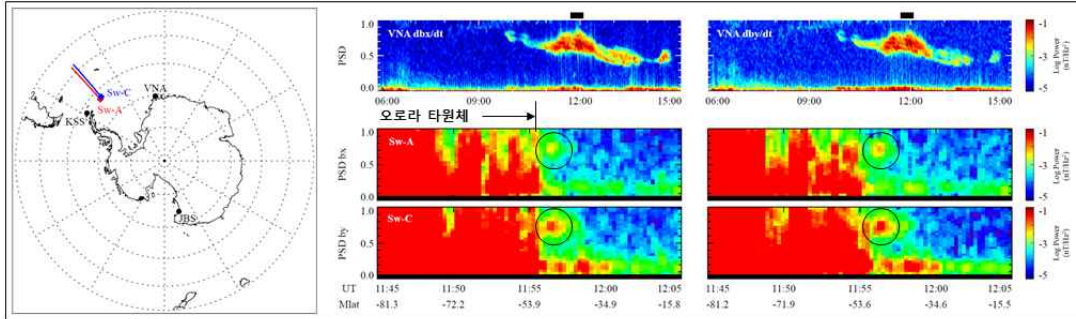


그림 8 Swarm 위성에서의 플라즈마 파동 관측

- 그러나 일반적인 스펙트럼이 아닌 주파수 도메인에서 비교해보면 저궤도 위성은 지상에 비해 약 10% 정도 높은 주파수의 파동을 관측한 것이 확인된다. 본 연구책임자는 이러한 현상이 빠른 속도로 이동하는 저궤도 위성의 운동에 영향을 받은 도플러 효과의 결과로 추정하고 있으며 3차년도 연구를 통해 이러한 현상에 대한 통계적인 분석을 진행할 예정이다.

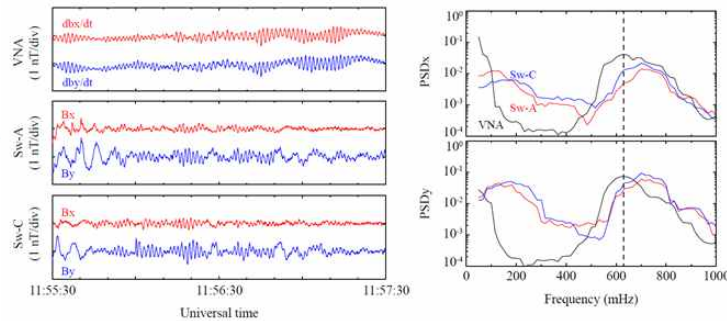


그림 9 지상 및 위성의 시계열 자료와 주파수 비교

· Pc1 전자기 파동과 전리권 변화의 동시관측 분석

- 2020년 3월 19일 북반구에 있는 Kapus kasing(KAP)와 남극 세종 과학기지(KSS)에서는 동일한 Pc1 전자기파동이 관측되었다(그림 10).
- 두 관측소가 동일한 자기력선에 연결되어 있지 않음에도 동일한 파동이 관측된 것은 자기력선을 따라 우주에서 전리권으로 전파된 파동이 전리권을 통해 전파됨을 의미한다.
- 또한 Pc1 전자기파동 발생과 함께 KAP에 설치된 전천카메라에서는 전자오로라(557.7 nm)와 양성자오로라(486.1 nm)가 동시에 발생한 것을 확인하였다.
- 같은 시간 KPA 부근을 지나간 Swarm B 위성이 양성자오로라를 통과하는 01:36 UT에 0.2~1.0 Hz 주파수를 가지는 Pc1 파동을 관측하였으며(그림 11), 이러한 파동은 압축파 성격의 z 성분 보다 횡파인 y 성분에서 두드러지게 발생하였다.
- 파동 발생과 더불어 위성에서 관측된 전자 밀도 및 연자기력선 자료에서도 오로라와 연관된 현상, 즉 전자밀도의 증가와 하강(downward) 및 상승(upward) 방향의 연자기력선 전류 변화가 동시에 관측되었다.
- 그림 11의 우측 패널은 01:41 UT의 오로라 이미지와 NOAA-18 위성 자료를 보여준다.

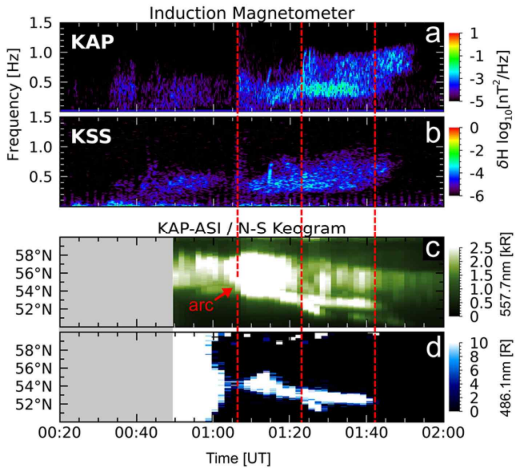


그림 10 지상 자력계 자료와 진천카메라 자료
KAP-ASI 557.7-nm / 01:35:47 UT

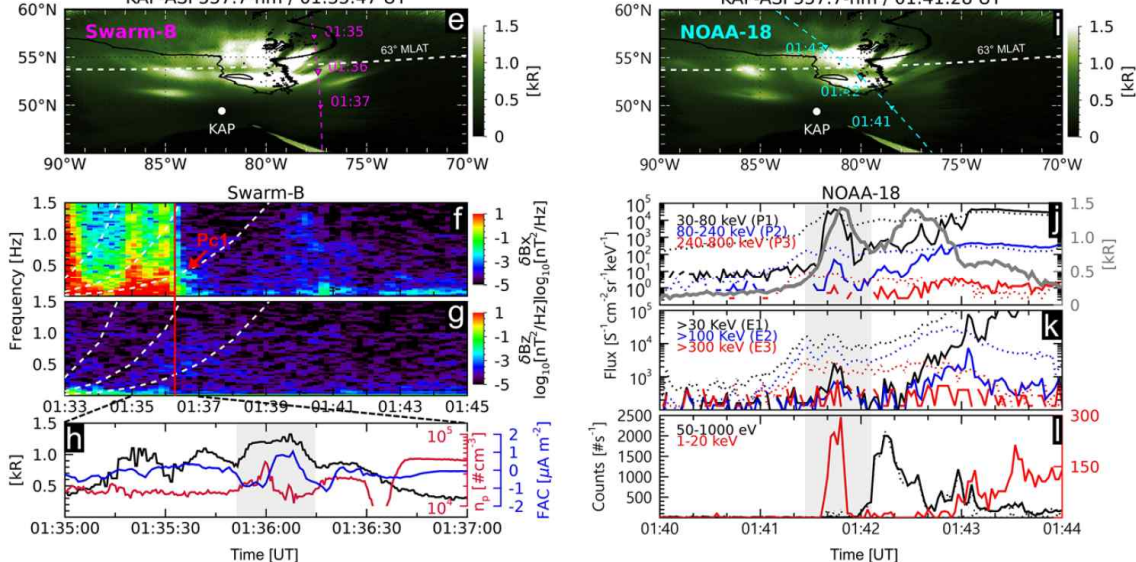


그림 11 2020년 3월 19일 Pc1 파동 발생 시 지상 및 위성 관측 자료

· 초저주파 파동 전파현상 연구

- 본 연구에서는 2014년 1월 3일에 지상과 위성에서 낮 시간대에서 동시 관측된 초저주파 전자기파동(~10 - 50 mHz)의 특성을 분석하였다(그림 12). 다이나믹 스펙트럼에서 보이는 파동의 주파수는 지상과 위성에서 약간의 차이는 있지만 주파수 분포 및 세기 변화 등은 동일하게 확인되었다.
- 자기권 꼬리지역에서 발생하는 서브스톰에 연관된 초저주파 파동은 플라즈마권 내부에 위치한 위성에서만 발생하는 경향이 있으며 이러한 파동은 특정 공간에서 동일한 형태로 관측된다. 그러나 이번에 관측된 파동은 그림 12에 점선으로 표시된 플라즈마권계면의 내부 및 외부에서 모두 관측되었다.
- 두 지점에서 관측된 파동의 coherence를 계산해 보았을 때, 초저주파 밴드에서 높은 연관성을 보이는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 보면 자기권에서 발생한 파동이 지상 관측소로 압축파 형태로 진행했음을 알 수 있다.
- RBSP 위성에서 관측된 파동과 유사한 파동이 지구에서 좀 더 먼 거리에 위치한 THEMIS 위성에서도 관측되었다. 지상 파동과의 유사성을 계산했을 때 RBSP 위성에 비해 낮은 결과가 나왔는데 이는 위성-지구 간 거리에 따른 영향으로 판단된다.

위성이 오로라를 지날 때 양성자와 전자 플럭스 모두 크게 증가한 것으로 관측되었으며 이는 자기권에서 발생한 입자-파동 상호작용에 의한 결과일 가능성이 있다.

- 이번 연구에서는 예시로 보인 이벤트와 같이 지상 및 위성 관측자료를 통한 자기권-전리권 상호작용 (Magnetosphere-Ionosphere Coupling) 현상을 분석하여 SCI급 저널에 발표하였다.

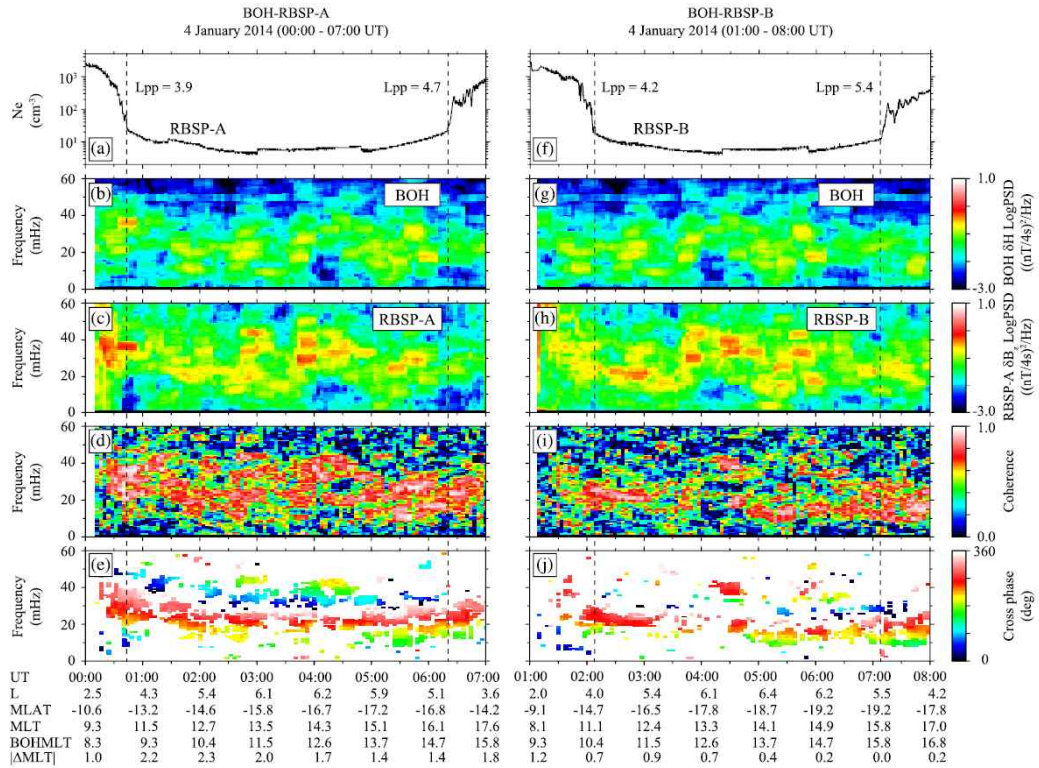


그림 12 지상(BOH), 위성(RBSPs) 자기장 자료에서 관측된 초저주파 파동

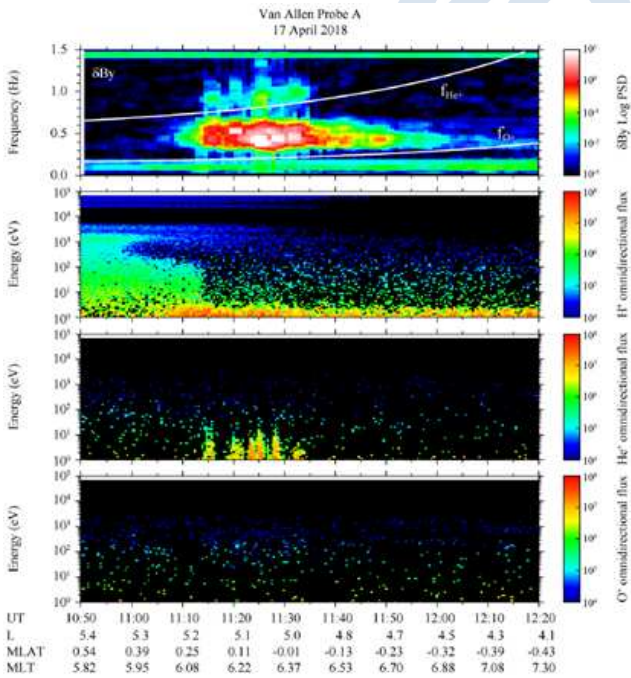


그림 13 2018년 4월 17일 RBSP-A 관측 자료

세기가 증가했을 때 He 이온 특정 에너지 영역에서 플럭스값이 증가한 것이 확인되었다.

- 세부적으로 파동의 세기와 He 이온 증가를 비교했을 때 파동 세기의 증가와 입자 에너지 증가 시기가 일치하는 것을 확인하였으며 자기장에 대해 수직방향의 운동을 하는 입자에서 두드러진 증가가 확인되었다.
- 그림 14는 RBSP-A 위성에서 관측된 EMIC 파동과 극지방 저궤도 위성 NOAA-15에서 측정된 고에너지 양성자의 플럭스 변화량을 보여준다. 39 keV와 115 keV에서 위성이 남

- 본 연구에서는 지상과 위성에서 동시에 관측된 파동의 phase 분석을 통해 해당 파동이 정상파의 특성을 갖는지 아니면 우주에서 지상으로 전파되는 특성을 보이는지 확인해 보았다. 그 결과 비록 하나의 이벤트를 분석한 결과이긴 하지만 우주공간에서 발생한 전자기파동이 플라즈마권계면을 지남에도 불구하고 성격이 크게 변하지 않고 지상까지 전달됨을 확인하였고 이러한 결과를 SCI 저널에 발표하였다.

· EMIC 파동에 의한 저에너지 헬륨 가열 현상 연구

- 그림 13은 2018년 4월 17일에 RBSP-A 위성에서 관측된 자기장 자료와 입자 스펙트럼을 보여준다. 11:10 UT부터 위성에서는 EMIC 파동을 관측하였으며 파동

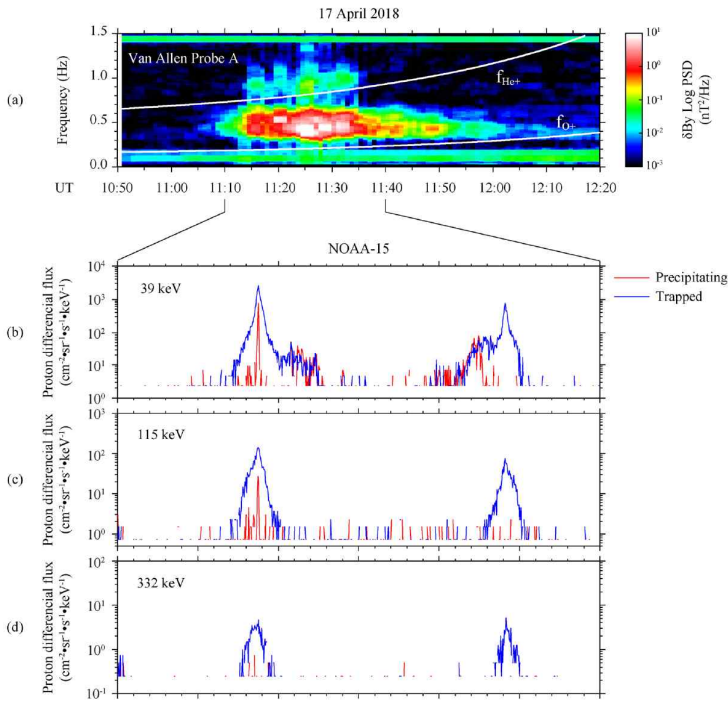


그림 14 EMIC 파동과 그에 의한 고에너지 입자의 지구 유입

· 남극 한국형 자기장 관측 네트워크 구성

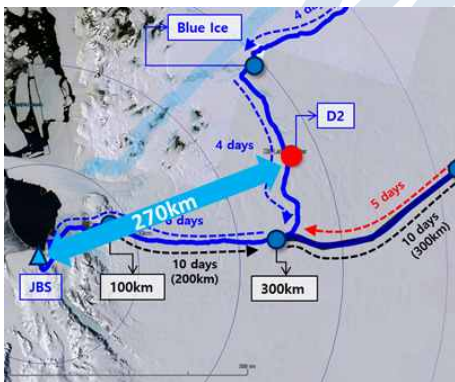


그림 15 KOPRI-KAGO 설치 위치

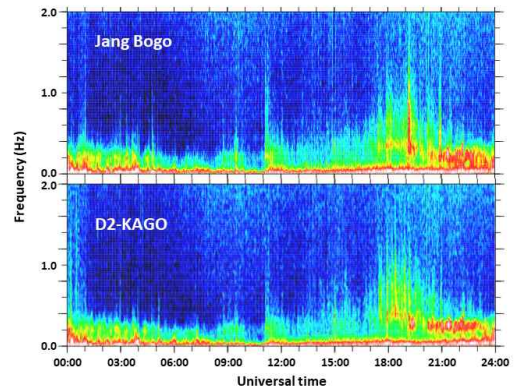


그림 16 장보고 D2-KAGO 비교

- 2차년도 연구 기간 중 극지연구소에서 자체적으로 한국형 무인기지를 개발하였다. 주요 구성은 그림2와 같이 전력을 생산하는 태양광 및 풍력 발전 부분과 지자기 변화를 측정하는 서치코일 자력계와 극관지역 오로라 관측을 위한 전천카메라를 운용하는 관측 장비 부부으로 구성되어 있다.
- 설치 지역은 그림 15에 표시되어 있는 D2 지역(지리적 위치 : 75.41°S / 155.48°E, 지자기 위치 : 82.24°S / 51.61° W)으로 장보고 기지에서 직선거리로 약 270km 정도 떨어져 있다.
- 그림 16 2022년 1월 4일에 장보고 기지와 D2지역에서 관측된 자료를 비교한 것으로 전체적인 플라즈마 파동 발생 경향은 비슷하지만 18~24 UT 부근에서 관측된 파동의 세기 및 주파수 범위가 다소 다르게 나타난 것이 확인된다.
- 코로나-19(2020-2021 하계시즌) 및 남극 해빙 두께 감소(2022-2023 하계시즌)에 의해 남극 하계 연구활동이 제한되면서 1차 테스트 설치 이후 개량형 모델 설치가 연기되었다. 따라서 D2 지역 관측자료는 2023-2024 남극 하계 연구활동을 통해 수집할 예정이다.

반구 극지방을 지나갈 때 지구로 유입되는 성분의 플럭스 증가가 확인되었다. 이러한 양성자의 증가는 EMIC 파동에 의한 고에너지 양성자의 pitch angle scattering에 의한 현상이다.

- 본 연구에서는 플라즈마권 내부에서 발생한 EMIC 파동에 의해 해당 지역의 고에너지 입자의 지구 유입 및 저에너지 양성자의 가열 현상을 확인하였다. 이는 전자기파동과 입자 사이의 입자-파동 상호작용에 의한 것으로 자기권에서의 파동 발생과 이에 대한 지구 자기권 및 전리권 변화를 규명하였으며 해당 결과는 SCI급 저널에 발표하였다.

- 또한 2022-23년 남극 하계 연구 활동을 통해 장보고 기지보다 낮은 지자기 위도에 위치한 Cape Hallett 캠프에 오로라 관측용 무인 관측소 설치를 진행하였다. 이를 통해 해당 지역과 장보고 기지, 내륙 무인 관측소 오로라 관측자료를 활용하여 넓은 범위에서의 오로라 관측이 가능해졌으며 이를 활용하여 오로라의 공간적인 분석이 가능할 것으로 기대된다.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 수준

1) 정성적 연구개발성과(연구개발결과)

본 연구과제에서는 지상 자력계 자료 및 전리권 레이더, 전천카메라 등 다양한 지상 관측 장비와 저궤도 위성 자료를 이용한 연구를 진행하였다. 이를 통해 고위도 및 극지방에서 발생한 ULF 파동 발생과 연관된 다양한 우주환경 변화를 분석하였으며 자기권-전리권-열권 상호작용에 관한 연구를 진행하였다.

2) 세부 정량적 연구개발성과: [붙임1] 참조

3) 목표 달성 수준

| 추진 목표 | 달성 내용 | 달성도 (%) |
|--|--|---------|
| 고위도 지상 관측자료를 이용한 플라즈마 파동 특성 연구 | 남극 장보고 과학기지 자기장 자료를 활용, 극관 지역 Pc1-2 파동 특성 분석 | 100 |
| 지상관측 기반 플라즈마 파동 전파현상 분석 | 남극 대륙 관통 전자기 파동 이벤트 선정 지자기 폭풍 발생 시 전리권 변화 분석 | 100 |
| 위성과 지상자료를 이용한 자기권-전리권-지상 플라즈마 파동 전파현상 검증 | 위성 - 지상 동시 관측된 Pc1 파동의 주파수 차이 확인 지상 및 위성자료를 이용해 M-I Coupling 분석 지상 및 위성 자기장 자료를 이용한 초저주파 전자기파 동 전파현상 연구 자기권 EMIC 파동 발생에 의한 저에너지 헬륨 가열 현상 연구 | 100 |
| 남극 한국형 자기장 관측 네트워크 구성 | 프로토타입 무인관측소 제작 및 테스트 | 70 |

4) 목표 미달 시 원인 분석(해당 시)

4-1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

남극 한국형 자기장 관측 네트워크 구성 목표는 현장 연구가 필수적인 부분이다. 그러나 코로나-19로 인해 2020-2021년 남극 하계 연구활동이 불가능해지고 2022-2023년 하계 연구활동 역시 해빙 활주로 문제로 인해 축소되면서 정상적인 현장 연구활동을 못하였다.

4-2) 자체 보완활동

극지연구소 내부에서 장비 테스트 공간을 별도로 마련하여 해당 공간에서 시험 모델에 대한 테스트를 진행하였다.

4-3) 연구개발 과정의 성실성

현장 연구활동의 제한으로 인해 국내에서 자체 테스트를 진행함으로써 현장에서 발생할 수 있는 문제점을 사전에 파악하여 대비하였다.

4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도(연구개발결과의 중요성)

ULF 파동에 관한 연구는 우주 과학 분야에서 중요한 위치를 차지한다. ULF 파동은 관측된 위치 및 주파수에 따라 발생 기작이 다르며 특히 본 연구과제의 연구 주제인 Pc 1-2 파동은 양이온의 운동과 관련되어 있다. 자기권에서 발생한 Pc 1-2 파동이 자기력선을 따라 지상으로 전파되는 과정에서 단순히 파동의 전파 뿐만 아니라 우주 공간에서의 전자지적 변화가 동반하게 된다. 따라서 본 연구 과제에서 수행된 연구 결과를 토대로 고위도 및 극지방에서 발생하는 다양한 우주 환경적 변화를 설명할 수 있다. 또한 남극 장보고 과학기지에 있는 다양한 관측 장비를 활용함으로써 국제적으로 해당 분야에서 자료의 우수성을 알릴 수 있을 수 있었으며 이를 바탕으로 국제 공동연구를 추진 중에 있다.

5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

본 연구과제에서 도출된 결과를 바탕으로 향후 자기권-전리권-열권 상호작용에 관한 연구를 진행할 계획이다. 남극 장보고 기지 자료를 바탕으로 파동의 발생 분포를 분석하였을 때, 파동의 발생분포가 전리권에서 발생한 특이현상의 분포와 비슷한 것을 확인하였다. 이는 두 현상이 물리적으로 연관되어 있을 가능성이 크기 때문에 추가적인 연구가 필요하다. 또한 전리권에서 발생하는 파동 전파는 이론적으로 전자 밀도와 연관성이 높다고 알려져 있는데, 아직 관측적으로 확인된 부분이 없기 때문에 고위도/극지방에 있는 자기장 관측기 자료 및 전리권 관측 자료를 활용하여 추가 연구를 진행할 것이다.

또한 이번에 개발된 무인 관측소의 경우 현재 추진 중인 남극 내륙 기지에서 활용 가치가 매우 높기 때문에 지속적으로 관리 및 개선 방안을 도출하여 향후 안정적인 운용이 가능하도록 준비할 계획이다.

6. 자체점검표

| 구분 | 아주 우수 | 우수 | 보통 | 미흡 | 불량 | 비고 |
|------------------|-------|----|----|----|----|----|
| 연구성과의 우수성/창의성 | √ | | | | | |
| 연구성과의 파급 효과 | √ | | | | | |
| 연구성과에 대한 활용 가능성 | √ | | | | | |
| 연구수행의 성실도 | √ | | | | | |
| 연구성과에 대한 종합의견 기술 | | | | | | |

7. 참고문헌

[붙임1] 세부 정량적 연구개발성과

| 전문학술지 논문게재 성과정보 | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------|--|--|-----|--|---------|--------|--------|---------------|-----------|-----|
| 과제번호 | 게재연월 | 논문제목 | 총저자명 | 출처 | 학술지명 | 권(호) | 학술지 구분 | sci 여부 | impact Factor | 국제공동 연구논문 | 기여도 |
| 2020R1C1C1003640 | 202008 | Long-Lasting Ground-Satellite High Coherence of Compressional Dayside Pc3-Pc4 Pulsations | Kim, Gi-Jeong; Kim, Khan-Hyuk; Kwon, Hyuck-Jin ; Shiokawa, Kazuo; Takahashi, Kazue; Hwang, Junga; | SCI | JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-SPACE PHYSICS | (0) | 국외 | SCI 등재 | 2.799 | 예 | 20 |
| 2020R1C1C1003640 | 202010 | Characteristics of Ionospheric Irregularities Using GNSS Scintillation Indices Measured at Jang Bogo Station, Antarctica (74.62 degrees S, 164.22 degrees E) | Hong, Junseok; Chung, Jong-Kyun; Kim, Yong Ha; Park, Jaeheung; Kwon, Hyuck-Jin ; Kim, Jeong-Han; Choi, Jong-Min; Kwak, Young-Sil; | SCI | SPACE WEATHER-THE INTERNATIONAL JOURNAL OF RESEARCH AND APPLICATIONS | (0) | 국외 | SCI 등재 | 3.579 | 예 | 20 |
| 2020R1C1C1003640 | 202102 | A Case Study of Transversely Heated Low-Energy Helium Ions by EMIC Waves in the Plasmasphere | Kim, Khan-Hyuk; Kwon, Hyuck-Jin ; Lee, Junhyun; Jin, Ho; Seough, Jungjoon; | SCI | JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-SPACE PHYSICS | 126 (2) | 국외 | SCI 등재 | 2.811 | 아니오 | 30 |

전문화술지 논문게재 성과정보

| 과제번호 | 게재연월 | 논문제목 | 총저자명 | 출처 | 학술지명 | 권 (호) | 학술지 구분 | sci 여부 | impact Factor | 국제공동 연구논문 | 기여도 |
|------------------|--------|---|---|-----|--|-------|--------|--------|---------------|-----------|-----|
| 2020R1C1C1003640 | 202109 | Isolated Proton Aurora Driven by EMIC Pc1 Wave: PWING, Swarm, and NOAA POES Multi-Instrument Observations | Kim, Hyangpyo; Shiokawa, Kazuo; Park, Jaeheung; Miyoshi, Yoshizumi; Miyashita, Yukinaga; Stolle, Claudia; Connor, Hyunju Kim; Hwang, Junga; Buchert, Stephan; Kwon, Hyuck-Jin ; Nakamura, Satoko; Nakamura, Kohki; Oyama, Shin-Ichiro; Otsuka, Yuichi; Nagatsuma, Tsutomu; Sakaguchi, Kaori; | SCI | GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS | (0) | 국외 | SCI 등재 | 4.72 | 예 | 10 |
| 2020R1C1C1003640 | 202206 | Disappearance of the Polar Cap Ionosphere During Geomagnetic Storm on 11 May 2019 | Kwon, H. J. ; Kim, K. H.; Jee, G.; Seon, J.; Lee, C.; Ham, Y. B.; Hong, J.; Kim, E.; Bullett, T.; Auster, H. U.; Magnes, W.; Kraft, S.; | SCI | SPACE WEATHER-THE INTERNATIONAL JOURNAL OF RESEARCH AND APPLICATIONS | (0) | 국외 | SCI 등재 | 4.288 | 예 | 70 |

전문학술지 논문게재 성과정보

| 과제번호 | 게재연월 | 논문제목 | 총저자명 | 출처 | 학술지명 | 권(호) | 학술지 구분 | sci 여부 | impact Factor | 국제공동 연구논문 | 기여도 |
|------------------|--------|--|---|-----|---|--------|--------|--------|---------------|-----------|-----|
| 2020R1C1C1003640 | 202209 | Spacecraft Potential Changes Associated With EMIC Waves in the Inner Magnetosphere | Kim, Khan-Hyuk; Lee, Junhyun; Kwon, Jong-Woo; Lee, Ensang; Kim, Hee-Eun; Jin, Ho; Kwon, Hyuck-Jin ; Baek, Seul-Min; Wygant, John; Mozer, Forrest S.; | SCI | JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-SPACE PHYSICS | (0) | 국외 | SCI 등재 | 3.111 | 예 | 10 |
| 2020R1C1C1003640 | 202209 | Review of Environmental Monitoring by Means of Radio Waves in the Polar Regions: From Atmosphere to Geospace | Lucilla Alfonsi; Nicolas Bergeot; Pierre J Gilliers; Giorgiana De Franceschi; Lisa Baddeley; Emilia Correia; Domenico Di Mauro; CarlFredrik Enell; Mark Engebretson; Reza GhoddousiFard; Ingemar Hggstrm; Youngbae Ham; Georg Heygster; Geonhwa Jee; Antti Kero; Michael Kosch; HyuckJin Kwon ; Changsup Lee; et al. | SCI | SURVEYS IN GEOPHYSICS | 43 (6) | 국외 | SCI 등재 | 7.965 | 예 | 5 |

[붙임2-1] 연구책임자(해당 시 참여연구자(공동) 포함) 대표적 연구실적

○ 논문 및 특허 실적(최대 5개 작성)

| 번호 | 구분 (논문/특허) | 논문명/특허명 | 소속기관명 | 역할 | 논문게재지/ 특허등록국가 | 논문게재일 /특허등록일 | 특기사항 (I.F. 등) |
|----|---------------|--|-------|------|-----------------------------|-----------------|------------------|
| 1 | 논문 | Disapperance of the polar cap ionospheric during geomagnetic storm on 11 May 2019 | 극지연구소 | 제1저자 | Space Weather | 2022.06 | 4.288 |
| 2 | 논문 | Isolated proton aurora driven by EMIC Pc1 wave: PWING, Swarm and NOAA POES Multi-Instrument observations | 극지연구소 | 참여저자 | Geophysical Research Letter | 2021.09 | 5.576 |
| 3 | 논문 | Long-lasting ground-satellite high coherence of compressional dayside Pc3-Pc4 pulsations | 극지연구소 | 참여저자 | JGR Space Physics | 2020.08 | 3.111 |
| 4 | 논문 | A case of study of transversely heated low-energy helium ions by EMIC waves in the plasmasphere | 극지연구소 | 참여저자 | JGR Space Physics | 2021.02 | 3.111 |
| 5 | 논문 | Spacecraft potential changes associated with EMIC waves in the inner magnetosphere | 극지연구소 | 참여저자 | JGR Space Physics | 2022.09 | 3.111 |

○ 기타 실적(논문 및 특허 외 기타 실적 입력)

없음

○ 참여연구자(공동) 변경내역 ※ 공동연구 과제에 한해 필요 시 작성(해당 없을 경우 제출 시 삭제)

| 변경 회차 | 변경 전 참여연구자(공동) | | | 변경 후 참여연구자(공동) | | | 변경사유 |
|----------|----------------|-------|-----------------------------|----------------|----|------|----------------------------|
| | 성명 | 소속 | 참여기간 | 성명 | 소속 | 참여기간 | |
| 1 | 신재혁 | 경희대학교 | 2022.03.01.~ 2022.05.31. | | | | 소속기관 변경에 따른 참여연구원 제외 |

[붙임2-2] 주관연구책임자(해당 시 참여연구자(공동) 포함) 대표적 논문·특허실적 요약문

| | | | | |
|---|----------------|--|---------------------------|------------|
| 연구실적 유형 | | 논문(√) 특허() | | |
| 연구책임자/참여연구자(공동) 구분 및 성명 | | 연구책임자(권혁진) | | |
| 논문/특허명 | | Disappearance of the polar cap ionospheric during geomagnetic storm on 11 May 2019 | | |
| 논문실적정보 <input checked="" type="checkbox"/> | 게재지(저널명) | Space Weather | | |
| | SCI 등재 여부 | 등재 | Impact Factor 및 인용횟수(SCI) | 4.288(01회) |
| | SCOPUS 등재 여부 | 등재 | 인용횟수(SCOPUS) | 00회 |
| | ISSN | 1542-7390 | 게재년월 | 202206 |
| | 역할(제1, 교신, 참여) | 제1저자 | 참여자수 | 12 |
| 특허실적정보 <input type="checkbox"/> | 구분 | | 등록(출원) 국가 | |
| | 등록(출원) 번호 | | 등록(출원)일 | |
| | 등록(출원)자 성명 | | 발명자 성명 | |

요약문

Multi-instrument data from Jang Bogo Station (JBS) in Antarctica were utilized to study ionospheric responses to the 11 May 2019 moderate geomagnetic storm. These include Vertical Incident Pulsed Ionospheric Radar (VIPIR)/Dynasonde, Fabry-Perot Interferometer (FPI), GPS vertical total electron content (vTEC), and magnetometer. The VIPIR/ Dynasonde observed long-lasting (>11 hr) severe depletion of the electron density in the F-region ionosphere over JBS. During the depletion interval, GPS TEC also correspondingly decreased, FPI neutral temperature was significantly enhanced, and the polar magnetic field variations showed positive and negative excursions in the Y (east) and Z (vertical) components, respectively. GK-2 A satellite, located ~2.5 hr west of JBS, observed negative magnetic field perturbations in the azimuthal BD component at geosynchronous orbit during the depletion of ionospheric plasma. Such a BD perturbation at geosynchronous orbit is due to the field-aligned currents flowing out of the ionosphere. From these observations we suggest that transpolar ionospheric currents connected to the field-aligned currents flowing on a substorm wedge-shaped circuit act as a source of polar atmospheric heating during the moderate geomagnetic storm interval and that elevated heavy molecular gases (O₂ and N₂) by atmospheric heating contribute to the electron density depletion via increased recombination rate.

| | |
|---|---|
| 연구 목표 및 연구내용과의 연관성 | 기대성과 및 파급 효과 |
| ULF 파동은 전자기적 변화 뿐만 아니라 이에 연관된 고에너지 입자의 변화 등을 동반한다. 따라서 특정 조건에서 발생한 다양한 우주 환경적 변화의 분석이 필요하다. | 극지방 자기권-전리권-열권 상호작용 연구에 중요한 역할을 할 것으로 기대되며 해당 연구에서 사용된 다양한 관측장비 자료의 사용빈도를 높일 수 있을 것으로 기대된다. |



Space Weather



RESEARCH ARTICLE
10.1029/2022SW003054

Disappearance of the Polar Cap Ionsphere During Geomagnetic Storm on 11 May 2019

H.-J. Kwon¹, K.-H. Kim², G. Jee^{1,3}, J. Seon², C. Lee¹, Y.-B. Ham^{1,3}, J. Hong⁴, E. Kim¹, T. Bullett⁵, H.-U. Auster⁶, W. Magnes⁷, and S. Kraft⁸

Key Points:

- The disappearance of the F-region ionosphere was observed during storm in the polar cap region
- The disappearance is associated with the atmospheric upwelling and resulting enhancement of the recombination
- The polar cap ionosphere can be significantly affected by substorm-induced field-aligned currents

¹Division of Atmospheric Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, Korea, ²School of Space Research, Kyung Hee University, Yongin, Korea, ³University of Science and Technology, Daejeon, Korea, ⁴Space Science Division, Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, Korea, ⁵Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, University of Colorado, Boulder, CO, USA, ⁶Institute of Geophysics and Extraterrestrial Physics, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, ⁷Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz, Austria, ⁸ESOC, European Space Agency, Paris, France

Correspondence to:

H.-J. Kwon and K.-H. Kim,
hjkwon@kopri.ac.kr,
khan@khu.ac.kr

Citation:

Kwon, H.-J., Kim, K.-H., Jee, G., Seon, J., Lee, C., Ham, Y.-B., et al. (2022). Disappearance of the polar cap ionosphere during geomagnetic storm on 11 May 2019. *Space Weather*, 20, e2022SW003054. <https://doi.org/10.1029/2022SW003054>

Received 2 FEB 2022
Accepted 13 MAY 2022

Author Contributions:

Conceptualization: H.-J. Kwon, K.-H. Kim
Data curation: J. Seon, C. Lee, Y.-B. Ham, J. Hong, T. Bullett, H.-U. Auster, W. Magnes, S. Kraft
Formal analysis: H.-J. Kwon, C. Lee, Y.-B. Ham, J. Hong, E. Kim
Funding acquisition: H.-J. Kwon, K.-H. Kim
Investigation: H.-J. Kwon
Methodology: H.-J. Kwon, K.-H. Kim
Project Administration: G. Jee
Resources: T. Bullett
Software: H.-J. Kwon
Supervision: K.-H. Kim, G. Jee
Validation: H.-J. Kwon
Visualization: H.-J. Kwon
Writing – original draft: H.-J. Kwon, K.-H. Kim
Writing – review & editing: H.-J. Kwon, K.-H. Kim, G. Jee, J. Seon

© 2022. The Authors.
This is an open access article under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract Multi-instrument data from Jang Bogo Station (JBS) in Antarctica were utilized to study ionospheric responses to the 11 May 2019 moderate geomagnetic storm. These include Vertical Incident Pulsed Ionospheric Radar (VIPIR)/Dynasonde, Fabry-Perot Interferometer (FPI), GPS vertical total electron content (vTEC), and magnetometer. The VIPIR/Dynasonde observed long-lasting (>11 hr) severe depletion of the electron density in the F-region ionosphere over JBS. During the depletion interval, GPS TEC also correspondingly decreased, FPI neutral temperature was significantly enhanced, and the polar magnetic field variations showed positive and negative excursions in the Y (east) and Z (vertical) components, respectively. GK-2 A satellite, located ~2.5 hr west of JBS, observed negative magnetic field perturbations in the azimuthal B_D component at geosynchronous orbit during the depletion of ionospheric plasma. Such a B_D perturbation at geosynchronous orbit is due to the field-aligned currents flowing out of the ionosphere. From these observations we suggest that transpolar ionospheric currents connected to the field-aligned currents flowing on a substorm wedge-shaped circuit act as a source of polar atmospheric heating during the moderate geomagnetic storm interval and that elevated heavy molecular gases (O_2 and N_2) by atmospheric heating contribute to the electron density depletion via increased recombination rate.

Plain Language Summary Geomagnetic storms considerably influence the high-latitude ionosphere in its density distributions as well as dynamics. In the present paper, we report results of multi-instruments observations of the storm-time ionospheric changes with simultaneously observed thermospheric and magnetospheric changes. The Vertical Incident Pulsed Ionospheric Radar/Dynasonde and total electron contents measured by ground GPS receiver observed depletion of the ionospheric electron density. We confirmed from model results that the depletion was caused by the upwelling atmospheric molecular gases. The heated neutral atmosphere was also confirmed by the observations for the thermosphere from a Fabry-Perot interferometer. The current system is a key process to enhanced the lower atmospheric temperature. During the depletion interval, the magnetic field on the ground showed significant variations. The geosynchronous satellite also observed negative fluctuations in the azimuthal component at around Jang Bogo Station, which corresponds to the fluctuation of the ground magnetic field. Such fluctuations at geosynchronous orbit are strongly related with field-aligned current that are part of a current system associated with substorm. These observations support that field-aligned current plays as a source of polar ionospheric heating during the moderate geomagnetic storm.

1. Introduction

We have been monitoring the state of the ionosphere since 2015 at Jang Bogo Station (JBS) which is located at Terra Nova Bay in Northern Victoria Land, Antarctica (geographic: 74.62°S, 164.22°E/AACGM geomagnetic: 79.9°S, 53.6°W), using an ionospheric sounding system (Ham et al., 2020; Kwon et al., 2018). The radio pulses transmitted from sounding system are reflected at various ionospheric layers below the peak, and the ionospheric electron densities are determined by analyzing the receiving signals from the bottomside ionosphere.

It is well known that the ionosphere in the polar region has distinct features by comparing with low- and mid-latitude. Figures 1a and 1b show typical daily variations of the ionospheric electron density during summer and

wedge and the intensification of substorm represented by SML in Figure 9a. The positive perturbation in B_x starting at 11:36 UT was followed by a large negative excursion at 12:10 UT. This may be due to the fact that the location of the field-aligned current flowing out of the ionosphere changes from east to west with respect to JBS. Note that the large negative GK-2A B_0 perturbation occurred simultaneously with the large perturbations of the magnetic field almost coincides with the initiation of the ionospheric depletion (~10:30–22:00 UT) over JBS. Therefore, it is concluded that the polar cap ionospheric depletion on 11 May 2019 may be closely associated with substorm-related currents.

5. Conclusions

The ionospheric responses to the 11 May 2019 moderate geomagnetic storm are investigated using multi-instrument data obtained from VIPIR, FPI, GPS, and magnetometer at JBS in the polar cap region and electron flux and magnetic field data measured by GK-2A at geosynchronous orbit. We observed long-lasting (>11 hr) electron density depletion in the F-region ionosphere over JBS. During the F-region depletion interval, the F-region depletion was observed to be correlated with magnetic perturbations in the azimuthal B_0 component at GK-2A satellite, which is located ~2.5 hr west of JBS. Such a B_0 perturbation at geosynchronous orbit is due to field-aligned currents flowing out of the ionosphere. The polar magnetic field variations measured at JBS showed positive and negative excursions in the Y and Z components, respectively, during the negative B_0 perturbation at geosynchronous orbit. The JBS magnetic field perturbations are mainly due to transpolar ionospheric currents connected to the field-aligned currents flowing on a substorm wedge-shaped circuit. These currents act as a source of polar upper atmospheric heating during the moderate geomagnetic storm interval. We suggest that elevated heavy molecular gases (O_2 and N_2) by atmospheric heating contribute to the electron density depletion via enhanced recombination.

Data Availability Statement

The data set recorded at the Jang Bogo Station can be accessed online (at <https://kpedc.kopri.re.kr>). The data of GK-2A are available from National Meteorological Satellite Center (<http://nmssc.kma.go.kr>) and the high-resolution data need to be requested. The solar wind and IMF data are available from NASA Goddard Space Flight Center Space Physics Data Facility (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov>). The SML auroral electrojet index was provided by SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu>). The polar cap magnetic index was obtained from <https://pcindex.org>.

Acknowledgments

This work was supported by the project PE22020 of the Korea Polar Research Institute. The work of H.-J. Kwon was supported by the Basic Science Research Program through NRF funded by NRF-2020R1C1C1003640. J. Hong was supported by a basic research fund from the Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI) (2022185010). We gratefully acknowledge the SuperMAG collaborators.

References

- Bjoland, L. M., Ogawa, Y., Løvhaug, U. P., Lorentzen, D. A., Harch, S. M., & Oksavik, K. (2021). Electron density depletion region observed in the polar cap ionosphere. *Journal of Geophysical Research*, *126*, e2020JA028432. <https://doi.org/10.1029/2020JA028432>
- Brinton, H. C., Grebowsky, J. M., & Bruce, L. H. (1978). The high-latitude winter F region at 300 km: Thermal plasma observations from AEC. *Journal of Geophysical Research*, *83*(A10), 4767–4776. <https://doi.org/10.1029/JA083iA10p04767>
- Bullet, T., Malagnini, A., Pezzopane, M., & Scotto, C. (2010). Application of autoscale to ionograms recorded by the VIPIR ionosonde. *Advances in Space Research*, *45*, 1156–1172. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.01.024>
- Buonsanto, M. J. (1999). Ionospheric storms—A review. *Space Science Reviews*, *88*(3–4), 563–601. <https://doi.org/10.1023/a:1005107532631>
- Clauer, C. R., & McPherron, R. L. (1974). Mapping the local time-universal time development of magnetospheric substorms using mid-latitude magnetic observations. *Journal of Geophysical Research*, *79*(19), 2811–2820. <https://doi.org/10.1029/JA079i019p02811>
- Crowley, G., Carlson, H. C., Basu, S., Denig, W. F., Buchau, J., & Reinisch, B. W. (1993). The dynamic ionospheric polar hole. *Radio Science*, *28*(3), 401–413. <https://doi.org/10.1029/92rs02878>
- Fuller-Rowell, T. J., Codrescu, M. V., Moffett, R. J., & Quegan, S. (1994). Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, *99*(A3), 3989–3914. <https://doi.org/10.1029/93JA02015>
- Gjerøev, J. W. (2012). The SuperMAG data processing technique. *Journal of Geophysical Research*, *117*(A9), A09213. <https://doi.org/10.1029/2012JA017683>
- Ham, Y.-B., Jee, G., Lee, C., Kwon, H.-Y., Kim, J.-H., Jabotin, N., & Bullett, T. (2020). Observations of the polar ionosphere by the Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar at Jango Bogo Station, Antarctica. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, *37*(2), 143–156. <https://doi.org/10.5140/JASS.2020.37.2.143>
- Hill, G. E. (1963). Sudden enhancements of F-layer ionization in polar region. *Journal of the Atmospheric Sciences*, *20*(6), 492–497. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0492:senlii>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0492:senlii>2.0.co;2)
- Hosokawa, K., Kullen, A., Milan, S., Reidy, J., Zou, Y., Frey, H. U., et al. (2020). Aurora in the Polar Cap: A review. *Space Science Reviews*, *216*(15). <https://doi.org/10.1007/s11214-020-0637-3>
- Kil, H., Kwak, Y.-S., Paxton, L. J., Meier, R. R., & Zhang, Y. (2011). O and N_2 disturbances in the F region during 20 November 2003 storm seen from TIMED/GUVI. *Journal of Geophysical Research*, *116*(A2), A02314. <https://doi.org/10.1029/2010JA016227>

| | | | | |
|--|----------------|--|---------------------------|------------|
| 연구실적 유형 | | 논문(√) 특허() | | |
| 연구책임자/참여연구자(공동) 구분 및 성명 | | 연구책임자(권혁진) | | |
| 논문/특허명 | | Isolated proton aurora driven by EMIC Pc1 wave: PWING, Swarm and NOAA POES Multi-Instrument observations | | |
| 논문실적정보 <input checked="" type="checkbox"/> | 게재지(저널명) | Geophysical Research Letter | | |
| | SCI 등재 여부 | 등재 | Impact Factor 및 인용횟수(SCI) | 5.576(05회) |
| | SCOPUS 등재 여부 | 등재 | 인용횟수(SCOPUS) | 00회 |
| | ISSN | 1944-8007 | 게재년월 | 202109 |
| | 역할(제1, 교신, 참여) | 참여저자 | 참여자수 | 16 |
| 특허실적정보 <input type="checkbox"/> | 구분 | | 등록(출원) 국가 | |
| | 등록(출원) 번호 | | 등록(출원)일 | |
| | 등록(출원)자 성명 | | 발명자 성명 | |
| 요약문 | | | | |
| <p>We report the concurrent observations of F-region plasma changes and field-aligned currents (FACs) above isolated proton auroras (IPAs) associated with electromagnetic ion cyclotron Pc1 waves. Key events on March 19, 2020 and September 12, 2018 show that ground magnetometers and all-sky imagers detected concurrent Pc1 wave and IPA, during which NOAA POES observed precipitating energetic protons. In the ionospheric F-layer above the IPA zone, the Swarm satellites observed transverse Pc1 waves, which span wider latitudes than IPA. Around IPA, Swarm also detected the bipolar FAC and localized plasma density enhancement, which is occasionally surrounded by wide/shallow depletion. This indicates that wave-induced proton precipitation contributes to the energy transfer from the magnetosphere to the ionosphere.</p> | | | | |
| 연구 목표 및 연구내용과의 연관성 | | 기대성과 및 파급 효과 | | |
| Pc1 파동 전파에 동반된 양성자에 의한 오로라 현상과 이에 연관된 전류계 변화 분석을 통해 플라즈마 파동의 전리권 영향을 확인하였다. | | 전리권 전류계 변화는 고위도/극지방에서 발생하는 변화에 중요 요인으로 작용하기 때문에 해당 연구 결과는 후속 연구에 활용도가 매우 높다. | | |



Geophysical Research Letters®

RESEARCH LETTER
10.1029/2021GL095090

Key Points:

- We report the concurrent observations of Pc1 wave, proton precipitation, ionospheric perturbation, field-aligned current, and isolated proton aurora (IPA)
- Pc1 waves over the ionospheric F-layer and IPA over the E-layer show different latitudinal widths
- Proton precipitation can cause localized plasma density enhancement, which is occasionally surrounded by wide/shallow density depletion

Supporting Information:

Supporting Information may be found in the online version of this article.

Correspondence to:

H. Kim,
hkim82@alaska.edu

Citation:

Kim, H., Shiokawa, K., Park, J., Miyoshi, Y., Miyashita, Y., Stolle, C., et al. (2021). Isolated proton aurora driven by EMIC Pc1 wave: PWING, Swarm, and NOAA POES multi-instrument observations. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL095090. <https://doi.org/10.1029/2021GL095090>

Received 7 JUL 2021
Accepted 26 AUG 2021

© 2021. American Geophysical Union.
All Rights Reserved.

Isolated Proton Aurora Driven by EMIC Pc1 Wave: PWING, Swarm, and NOAA POES Multi-Instrument Observations

Hyangpyo Kim^{1,2}, Kazuo Shiokawa¹, Jaeheung Park^{3,4}, Yoshizumi Miyoshi¹, Yukinaga Miyashita^{3,4}, Claudia Stolle⁵, Hyunju Kim Connor², Junga Hwang^{3,4}, Stephan Buchert⁶, Hyuck-Jin Kwon⁷, Satoko Nakamura¹, Kohki Nakamura¹, Shin-Ichiro Oyama^{1,8}, Yuichi Otsuka¹, Tsutomu Nagatsuma⁹, and Kaori Sakaguchi⁹

¹Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan, ²Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks, AK, USA, ³Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, South Korea, ⁴Korea University of Science and Technology, Daejeon, South Korea, ⁵GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany, ⁶Swedish Institute of Space Physics, Uppsala, Sweden, ⁷Korea Polar Research Institute, Incheon, South Korea, ⁸National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan, ⁹National Institute of Information and Communications Technology, Tokyo, Japan

Abstract We report the concurrent observations of F-region plasma changes and field-aligned currents (FACs) above isolated proton auroras (IPAs) associated with electromagnetic ion cyclotron Pc1 waves. Key events on March 19, 2020 and September 12, 2018 show that ground magnetometers and all-sky imagers detected concurrent Pc1 wave and IPA, during which NOAA POES observed precipitating energetic protons. In the ionospheric F-layer above the IPA zone, the Swarm satellites observed transverse Pc1 waves, which span wider latitudes than IPA. Around IPA, Swarm also detected the bipolar FAC and localized plasma density enhancement, which is occasionally surrounded by wide/shallow depletion. This indicates that wave-induced proton precipitation contributes to the energy transfer from the magnetosphere to the ionosphere.

Plain Language Summary Electromagnetic ion cyclotron (EMIC) wave is known to precipitate energetic protons into the Earth's atmosphere via pitch angle scattering. Observations from ground-based magnetometers, all-sky imagers, and low Earth orbit satellites have shown that the precipitating protons scattered by EMIC waves can generate proton aurora isolated at a subauroral latitude. This kind of aurora is called isolated proton aurora (IPA, or detached proton auroral arc). In the present paper, we report the observations of concurrent Pc1 wave, proton precipitation, ionospheric perturbation, field-aligned currents (FACs), and IPA using data from ground instruments, and from the Swarm and NOAA POES satellites. The observations show that the latitudinal (L-shell) size of EMIC wave at Swarm altitude is larger than that of the IPA. We also investigated the effects of proton precipitation on the ionospheric F-layer from Swarm satellite data, and found localized plasma density enhancement and FAC near the central IPA region. Our results demonstrate that the EMIC-driven proton precipitation contributes to the energy transfer from the magnetosphere to the ionosphere.

1. Introduction

Electromagnetic ion cyclotron (EMIC) Pc1 waves have been known to precipitate energetic protons (Cornwall et al., 1970; Erlandson & Ukhorskiy, 2001; Jordanova et al., 2001) and relativistic electrons (Miyoshi et al., 2008; Usanova et al., 2014) into the Earth's atmosphere via pitch angle scattering induced by resonant wave-particle interactions. Observations of precipitating protons (>30 keV) associated with Pc1 wave were first reported by Yahnina et al. (2000) using data from the NOAA-12 satellite and the Sodankylä ground magnetometer. Yahnina et al. (2003) investigated energetic proton precipitation with/without lower energy (<20 keV) counterparts during Pc1 wave activity and showed that the type of intervals of Pulsations with Diminishing Periods (IPDP) Pc1 waves is mostly accompanied by lower-energy proton precipitations. Miyoshi et al. (2008) first reported simultaneous observations of relativistic electron and energetic proton precipitations caused by the EMIC wave.

(e.g., Archer et al., 2019) are accompanied by ionospheric irregularities with local density enhancements (SAR arc) and depletions (STEVE) in the auroral regions. Our study also showed that an IPA event is accompanied by localized plasma density enhancements in the plasma trough. Hence, it is worth investigating the statistical ionospheric response to IPAs based on more events and additional data sets, including magnetospheric satellites. In conclusion, our observations demonstrated that energetic proton precipitation driven by EMIC waves contributes to the energy transfer from the magnetosphere to the ionosphere.

Data Availability Statement

The PWING ASI and induction magnetometer data are distributed from the ERG-Science Center (ASI; <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/data/ergsc/ground/camera/omti/asi/>, Induction magnetometer: <https://ergsc.isee.nagoya-u.ac.jp/data/ergsc/ground/geomag/isee/induction/>) operated by ISAS/JAXA and ISEE/Nagoya University (Miyoshi et al., 2018). The induction magnetometer data set recorded at the KSS is provided by KOPRI (lead institute, South Korea) and can be downloaded at <http://mirl.unh.edu/U/LF/cdf/>. The Swarm Vector Field Magnetometer, Langmuir Probe and FAC data were obtained online from <https://swarm-diss.esa.int/>. NOAA POES SEM-2 data were downloaded at <https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/poes/data/>.

Acknowledgments

The authors thank the THEMIS SPEDAS team for their open-source library of data analysis tools (Angelopoulos et al., 2019). This work was supported by a Grant-in-Aid for Scientific Research of Japan Society for the Promotion of Science (15H05815, 16H06286, 20H01955, and 20H01959) and the NASA grants 80NSSC18K1043 and 80NSSC20K1670. Hyunju K. Connor gratefully acknowledges support from the NSF grants, OIA-1920965 and AGS-1928883, the NASA grants, 80NSSC18K1052, and 80NSSC19K0844. Junga Hwang was supported by the project "A Study on the Forecasting Model of Space Radiation and the Improvement of Measuring Equipment," funded by Korea Foundation of Nuclear Safety. Support for the KSS induction magnetometer was provided by grant PE21020 from the KOPRI. The work of H.-J. Kwon was supported by the Basic Science Research Program through NRF funded by NRF-2020R1C1C1003640.

References

- Angelopoulos, V., Cruce, P., Drozdov, A., Grimes, E. W., Hatzigeorgiu, N., King, D. A., et al. (2019). The Space Physics Environment Data Analysis System (SPEDAS). *Space Science Reviews*, 215, 9. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0576-45>
- Archer, W. E., Gallardo-Lacourt, B., Perry, C. W., St-Maurice, J.-P., Buchert, S. C., & Donovan, E. F. (2019). Steve: The optical signature of intense subauroral ion drifts. *Geophysical Research Letters*, 46, 6279–6286. <https://doi.org/10.1029/2019GL082687>
- Bortnik, J., Cutler, J. W., Dunson, C., & Bleier, T. E. (2007). An automatic wave detection algorithm applied to Pc1 pulsations. *Journal of Geophysical Research*, 112(A4), A04204.
- Capannolo, L., Li, W., Spence, H., Johnson, A. T., Shumko, M., Sample, J., & Klumpar, D. (2021). Energetic electron precipitation observed by FIREHRD-II potentially driven by EMIC waves: Location, extent, and energy range from a multievent analysis. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091564. <https://doi.org/10.1029/2020gl091564>
- Chen, L., Jordanova, V. K., Spasojevic, M., Thorne, R. M., & Horne, R. B. (2014). Electromagnetic ion cyclotron wave modeling during the geospace environment modeling challenge event. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119, 2963–2977. <https://doi.org/10.1002/2013JA019595>
- Cornwall, J. M., Cornetti, F. V., & Thorne, R. M. (1970). Turbulent loss of ring current protons. *Journal of Geophysical Research*, 75(25), 4699–4709. <https://doi.org/10.1029/JA075i025p04699>
- Davidson, C. T. (1965). Expected spatial distribution of low energy protons precipitated in the auroral zones. *Journal of Geophysical Research*, 70, 1061–1068. <https://doi.org/10.1029/JZ070i005p1061>
- Denton, R. E., Jordanova, V. K., & Bortnik, J. (2015). Resonance of relativistic electrons with electromagnetic ion cyclotron waves. *Geophysical Research Letters*, 42, 8263–8270. <https://doi.org/10.1002/2015GL064379>
- Erlundson, R. E., & Ukhorskiy, A. J. (2001). Observations of electromagnetic ion cyclotron waves during geomagnetic storms: Wave occurrence and pitch angle scattering. *Journal of Geophysical Research*, 106(A3), 3883–3895. <https://doi.org/10.1029/2000JA000083>
- Evans, D. S., & Greer, M. S. (2004). In *Polar orbiting environmental satellite Space environment monitor-2 instrument descriptions and archive data documentation*: Space Environ. Lab.
- Fang, X., Liemohn, M. W., Kozlra, J. U., & Solomon, S. C. (2004). Quantification of the spreading effect of auroral proton precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 109, A04309. <https://doi.org/10.1029/2003JA010119>
- Fang, X., Lummerzheim, D., & Jackman, C. H. (2015). Proton impact ionization and a fast calculation method. *Journal of Geophysical Research Space Physics*, 118, 5369–5378. <https://doi.org/10.1002/jgra.50484>
- Frey, H. U., Haerendel, G., Mendé, S. B., Forrester, W. T., Immel, T. J., & Ostgaard, N. (2004). Subauroral morning proton spots (SAMPS) as a result of plasmopause-ring-current interaction. *Journal of Geophysical Research*, 109, A10305. <https://doi.org/10.1029/2004JA010516>
- Fu, S., Ni, B., Lou, Y., Bortnik, J., Ge, Y., Tao, X., et al. (2018). Resonant scattering of near-equatorially mirroring electrons by Landau resonance with H⁺ band EMIC waves. *Geophysical Research Letters*, 45, 873. <https://doi.org/10.1029/2018GL079079>
- Fujii, R., Iwata, Y., Oyama, S., Nozawa, S., & Ogawa, Y. (2009). Relations between proton auroras, intense electric field, and ionospheric electron density depletion. *Journal of Geophysical Research*, 114, A09304. <https://doi.org/10.1029/2009JA014319>
- Fuselier, S. A., Cary, S. P., Thomsen, M. F., Claffin, E. S., Hubert, B., Sandel, B. R., & Immel, T. (2004). Generation of transient dayside subauroral proton precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 109, A12227. <https://doi.org/10.1029/2004JA010393>
- Hendry, A. T., Rodger, C. J., & Clilverd, M. A. (2017). Evidence of sub-MeV EMIC-driven electron precipitation. *Geophysical Research Letters*, 44, 1210–1218. <https://doi.org/10.1002/2016GL071807>
- Hong, J., Kim, J.-H., Chung, J.-K., Kim, Y. H., Kam, H., Park, J., & Mendillo, M. (2020). Simultaneous observations of SAR arc and its ionospheric response at subauroral conjugate points ($L \approx 2.5$) during the St. Patrick's Day Storm in 2015. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125. <https://doi.org/10.1029/2019ja027321>
- Immel, T. J., Mendé, S. B., Frey, H. U., Petricolas, L. M., Carlson, C. W., Gerard, J.-C., et al. (2002). Precipitation of auroral protons in detached arcs. *Geophysical Research Letters*, 29(11), 1519. <https://doi.org/10.1029/2001GL013847>
- Inaba, Y., Shiokawa, K., Oyama, S., Otsuka, Y., Connors, M., Schofield, I., et al. (2021). Multi-event Analysis of plasma and field variations in Source of Stable Auroral Red (SAR) arcs in inner magnetosphere during non-storm-time substorms. *Journal of Geophysical Research*, 125. <https://doi.org/10.1029/2020JA029081>

| | | | | |
|--|----------------|--|---------------------------|------------|
| 연구실적 유형 | | 논문(√) 특허() | | |
| 연구책임자/참여연구자(공동) 구분 및 성명 | | 연구책임자(권혁진) | | |
| 논문/특허명 | | Long-lasting ground-satellite high coherence of compressional dayside Pc3-Pc4 pulsations | | |
| 논문실적정보 <input checked="" type="checkbox"/> | 게재지(저널명) | JGR Space Physics | | |
| | SCI 등재 여부 | 등재 | Impact Factor 및 인용횟수(SCI) | 3.111(00회) |
| | SCOPUS 등재 여부 | 등재 | 인용횟수(SCOPUS) | 00회 |
| | ISSN | 2169-9402 | 게재년월 | 202008 |
| | 역할(제1, 교신, 참여) | 참여저자 | 참여자수 | 6 |
| 특허실적정보 <input type="checkbox"/> | 구분 | | 등록(출원) 국가 | |
| | 등록(출원) 번호 | | 등록(출원)일 | |
| | 등록(출원)자 성명 | | 발명자 성명 | |
| 요약문 | | | | |
| <p>We present observations of broadband (~10-50 mHz) Pc3-Pc4 waves on 4 January 2014. The waves were detected on the dayside simultaneously in a compressional component (δBz) at the Radiation Belt Storm Probes A (RBSP-A) in the inner magnetosphere and in the north-south component (δH) on the ground at a low-latitude Bohyun (BOH) station ($L = 1.3$) during an interval of small interplanetary magnetic field cone angle, suggesting that upstream ultralow frequency (ULF) waves were the source of the magnetospheric Pc3-Pc4 waves. We observed the ground-satellite high coherence between RBSP-A δBz and BOH δH for a prolonged time interval lasting 6.5 hr, which has not been reported previously, during which RBSP-A was on the inbound and outbound legs moving from $L = \sim 3.3$ to ~ 6.3. In order to understand the spatial mode structure of the compressional waves, we examined the ground-satellite cross phase for the high-coherence interval and found that the waves observed in and out of the plasmasphere propagated earthward at the average fast-mode speed of ~ 700-$1,000$ km/s. We also observed cross-phase values smoothly changing with the radial distance of the spacecraft across the plasmopause. This indicates that the presence of the plasmopause has little effect on our fast-mode waves propagating into the inner magnetosphere and to the ground low-latitude station.</p> | | | | |
| 연구 목표 및 연구내용과의 연관성 | | 기대성과 및 파급 효과 | | |
| ULF 파동은 발생 위치에 따라 발생 기작이 다르게 작용한다. Pc1-2 파동에 비해 주파수가 낮은 Pc 3-4 파동을 분석함으로써 두 파동의 차이를 확인하였다. | | 해당 연구에서 사용된 분석기법은 향후 다른 ULF 파동 연구에도 사용될 가능성이 높을 것으로 기대된다. | | |

JGR Space Physics

RESEARCH ARTICLE
10.1029/2020JA028074

Special Section:

Probing the Magnetosphere through Magnetoseismology and Ultra-Low-Frequency Waves

Key Points:

- Pc3–Pc4 waves were simultaneously observed in space and on the ground at a low-latitude station
- The ground-satellite coherence was high in the 10–50 mHz band for a 6.5-hr interval
- The broadband Pc3–Pc4 waves propagated into the inner magnetosphere and to the ground

Correspondence to:

K.-H. Kim,
khan@khu.ac.kr

Citation:

Kim, G.-J., Kim, K.-H., Kwon, H.-J., Shiokawa, K., Takahashi, K., & Hwang, J. (2020). Long-lasting ground-satellite high coherence of compressional dayside Pc3–Pc4 pulsations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125, e2020JA028074. <https://doi.org/10.1029/2020JA028074>

Received 2 APR 2020
Accepted 25 JUN 2020
Accepted article online 16 JUL 2020

© 2020. American Geophysical Union.
All Rights Reserved.

Long-Lasting Ground-Satellite High Coherence of Compressional Dayside Pc3–Pc4 Pulsations

Gi-Jeong Kim¹, Khan-Hyuk Kim¹, Hyuck-Jin Kwon¹, Kazuo Shiokawa², Kazuo Takahashi³, and Junga Hwang^{4,5}

¹School of Space Research, Kyung Hee University, Seoul, South Korea, ²Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan, ³Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, MD, USA, ⁴Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, South Korea, ⁵Department of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology, Daejeon, South Korea

Abstract We present observations of broadband (~10–50 mHz) Pc3–Pc4 waves on 4 January 2014. The waves were detected on the dayside simultaneously in a compressional component (δB_z) at the Radiation Belt Storm Probes A (RBSP-A) in the inner magnetosphere and in the north-south component (δH) on the ground at a low-latitude Bohyun (BOH) station ($L = 1.3$) during an interval of small interplanetary magnetic field cone angle, suggesting that upstream ultralow frequency (ULF) waves were the source of the magnetospheric Pc3–Pc4 waves. We observed the ground-satellite high coherence between RBSP-A δB_z and BOH δH for a prolonged time interval lasting 6.5 hr, which has not been reported previously, during which RBSP-A was on the inbound and outbound legs moving from $L = \sim 3.3$ to ~ 6.3 . In order to understand the spatial mode structure of the compressional waves, we examined the ground-satellite cross phase for the high-coherence interval and found that the waves observed in and out of the plasmasphere propagated earthward at the average fast-mode speed of ~ 700 – $1,000$ km/s. We also observed cross-phase values smoothly changing with the radial distance of the spacecraft across the plasmopause. This indicates that the presence of the plasmopause has little effect on our fast-mode waves propagating into the inner magnetosphere and to the ground low-latitude station.

1. Introduction

In the solar wind upstream of the bow shock, large-amplitude ultralow frequency (ULF) waves (upstream waves) in the Pc3–Pc4 band (7–100 mHz) have been observed when the interplanetary magnetic field (IMF) cone angle is small (Fairfield, 1969; Russell, 1994). It has been known that these upstream waves are generated by ion-beam instability in the solar wind upstream of the bow shock. Since the strength of the IMF is one of parameters for the ion cyclotron resonance condition of the ion beam directed upstream from the bow shock, the IMF magnitude is an important factor controlling the frequency of the upstream waves. Pc3–Pc4 magnetic pulsations are commonly observed in the dayside magnetosphere and are believed to propagate into the inner magnetosphere and to the ground. Previous studies reported that the occurrence probability, amplitude, and frequency of Pc3–Pc4 pulsations detected in the magnetosphere and on the ground depend on the IMF direction and magnitude (Bol'shakova & Troitskaya, 1968; Greenstadt & Olson, 1977; Odera, 1986; Russell & Hoppe, 1981; Troitskaya et al., 1971; Yumoto et al., 1985). These observations have been taken as evidence that upstream ULF waves are a major source of magnetospheric Pc3–Pc4 pulsations.

Pc3–Pc4 pulsations of upstream origin are expected to be in a compressional component in the magnetosphere because only the magnetosonic fast mode is capable of transferring energy across a closed magnetopause (McKenzie, 1970). Spacecraft observations of compressional Pc3–Pc4 magnetic pulsations in the outer magnetosphere (e.g., Matsuoka et al., 1997; Odera et al., 1994; Takahashi, Anderson, et al., 1994; Takahashi, 1994) and in the inner magnetosphere (e.g., Kim et al., 1998; Kim & Takahashi, 1999; Takahashi et al., 2010, 2015) provide strong support for propagation of the external Pc3–Pc4 waves into the magnetosphere. Such compressional waves are also seen at ground stations at high latitude (e.g., Takahashi, Anderson, et al., 1994) and low latitude (e.g., Ansari & Fraser, 1986), indicating propagation of ULF waves from the upstream region to the ground.

Although simultaneous ground-satellite observations provide clear evidence for propagation of external compressional Pc3–Pc4 waves into the inner magnetosphere and to the ground, there remains a question

time delay along a radial path between RBSP-A to BOH as a function of L . The RBSP-A orbit was split into inbound (blue) and outbound (red) legs crossing the plasmapause at 16.6 and 11.1 h MLT, respectively. The average fast-mode velocity and time delay shown in Figures 15b and 15c is a repeat of Figure 9 but plotted separately for the inbound and outbound legs as a function of L . It is confirmed that the time delay (i.e., fast-mode propagation time) is monotonically decreasing as decreasing L without a significant time delay across the plasmapause. This indicates that the presence of the plasmapause has little effect on our fast-mode waves propagating from the outer magnetosphere to the deep magnetosphere.

5. Conclusions

We have studied the properties of compressional Pc3–Pc4 pulsations observed on the dayside simultaneously by multiple spacecraft in the magnetosphere over a wide range of radial distance and on the ground at a low-latitude BOH station ($L = 1.3$). From the IMF condition we confirmed that the source of dayside Pc3–Pc4 pulsations is upstream ULF waves. The ground-satellite coherence between RBSP-A δB_z and BOH δH is persistently high in the 10- to 50-mHz band for a prolonged time interval lasting 6.5 h during which RBSP-A was on the inbound and outbound legs moving from $L = \sim 3.3$ to 6.3. We examined the ground-satellite cross phase to determine whether the Pc3–Pc4 compressional waves are propagating or standing in the inner magnetosphere over the high-coherence interval and found that the compressional waves observed in and out of the plasmasphere are propagating earthward. We also observed cross-phase values smoothly changing with the radial distance of the spacecraft crossing the plasmapause. This indicates that the presence of the plasmapause has little effect on our fast-mode waves propagating from the outer magnetosphere to a low-latitude station. It should be noted that the present study examined a single event. More study needs to be conducted to understand the effect of the plasmapause on compressional waves radially propagating into the deep inner magnetosphere and to the ground and also to understand why some events (Takahashi et al., 2009, 2010) appear as radially standing waves in the plasmasphere.

Data Availability Statement

Radiation Belt Storm Probes data used in this study are available online (at <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov>). The THEMIS data were obtained from the THEMIS data website (<http://themis.ssl.berkeley.edu>). Geomagnetic indices were provided by the World Data Center for Geomagnetism, Kyoto University (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>). The OMNI solar wind data are publicly available from the NASA Space Physics Data Facility, Goddard Space Flight Center (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/ow.html>). The Bohyun (BOH) magnetic field data were provided by the Solar and Space Weather Research Group in Korea Astronomy and Space Science Institute (<http://kswrc.kasi.re.kr/en/>). The Lanzhou (LZH) and Learmonth (LMR) are available online (at <https://www.intermagnet.org>).

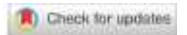
References

- Allan, W., Poulter, E. M., & White, S. P. (1986). Hydromagnetic wave coupling in the magnetosphere-plasma-pause effects on impulse-excited resonances. *Planetary and Space Science*, 34(12), 1189–1200. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(86\)90056-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(86)90056-5)
- Ansari, I. A., & Fraser, B. J. (1986). A multistation study of low latitude Pc3 geomagnetic pulsations. *Planetary and Space Science*, 34(6), 519–536. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(86\)90090-5](https://doi.org/10.1016/0032-0633(86)90090-5)
- Auster, H. U., Glassmeier, K. H., Magnes, W., Aylogar, O., Baumjohann, W., & Constantinescu, D. (2008). The THEMIS fluxgate magnetometer. *Space Science Reviews*, 141(1–4), 235–264. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9365-9>
- Bofshakova, O. V., & Troitskaya, V. A. (1968). Relation of the interplanetary magnetic field direction to the system of stable oscillations. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 180, 4–6.
- Bonnell, J. W., Mozer, F. S., Delory, G. T., Hull, A. J., Ergun, R. R., & Cully, C. M. (2008). The electric field instrument (EFI) for THEMIS. *Space Science Reviews*, 141(1–4), 303–341. <https://doi.org/10.1007/s11214-008-9469-2>
- Cummings, W. D., OSullivan, R. J., & Coleman Jr., P. J. (1969). Standing Alfvén waves in the magnetosphere. *Journal of Geophysical Research*, 74(3), 778–793. <https://doi.org/10.1029/JA074i003p00778>
- Fairfield, D. H. (1969). Bow shock associated waves observed in the far upstream interplanetary medium. *Journal of Geophysical Research*, 74(14), 3541–3553. <https://doi.org/10.1029/JA074i014p03541>
- Fujita, S., & Glassmeier, K. H. (1995). Magnetospheric cavity resonance oscillations with energy flow across the magnetopause. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 47, 1277. <https://doi.org/10.5636/jgg.47.1277>
- Fujita, S., Nakata, H., Itonaga, M., Yoshikawa, A., & Mizuta, T. (2002). A numerical simulation of the Pi2 pulsations associated with the substorm current wedge. *Journal of Geophysical Research*, 107(A3), 1034. <https://doi.org/10.1029/2001JA900137>
- Green, C. A., Odera, T. J., & Stuart, W. F. (1983). The relationship between the strength of the IMF and the frequency of magnetic pulsations on the ground and in the solar wind. *Planetary and Space Science*, 31, 559–567. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(83\)90559-09](https://doi.org/10.1016/0032-0633(83)90559-09)

Acknowledgments

This work was supported by BK21+ through the National Research Foundation (NRF) funded by the Ministry of Education of Korea. The work of K.-H. Kim was supported by the Basic Science Research Program through NRF funded by NRF-2019R1F1A1055444. The work of H.-J. Kwon was supported by the Basic Science Research Program through NRF funded by NRF-2020R1C1C1003640. The work of Hwang was supported by the basic research funding from KASI. K. S. is supported by JSPS KAKENHI (16H06286). Work at JHU/APL was supported by NASA Grant NNX17AD34G.

| | | | | |
|---|----------------|---|---------------------------|------------|
| 연구실적 유형 | | 논문(√) 특허() | | |
| 연구책임자/참여연구자(공동) 구분 및 성명 | | 연구책임자(권혁진) | | |
| 논문/특허명 | | A case of study of transversely heated low-energy helium ions by EMIC waves in the plasmasphere | | |
| 논문실적정보 <input checked="" type="checkbox"/> | 게재지(저널명) | JGR Space Physics | | |
| | SCI 등재 여부 | 등재 | Impact Factor 및 인용횟수(SCI) | 3.111(04회) |
| | SCOPUS 등재 여부 | 등재 | 인용횟수(SCOPUS) | 00회 |
| | ISSN | 2169-9402 | 게재년월 | 202102 |
| | 역할(제1, 교신, 참여) | 제1저자 | 참여자수 | 5 |
| 특허실적정보 <input type="checkbox"/> | 구분 | | 등록(출원) 국가 | |
| | 등록(출원) 번호 | | 등록(출원)일 | |
| | 등록(출원)자 성명 | | 발명자 성명 | |
| 요약문 | | | | |
| <p>The Van Allen Probe A spacecraft observed strong ~ 0.5-Hz helium (He^+) band and weak ~ 0.8-Hz hydrogen (H^+) band EMIC waves on April 17, 2018, at $L = \sim 4.5$-2, in the dawn sector, near the magnetic equator, and close to the plasmapause. We examined low-energy ion fluxes observed by the Helium Oxygen Proton and Electron (HOPE) instrument onboard Van Allen Probe A during the wave interval and found that low-energy He^+ flux (<10 eV) enhancements occur nearly simultaneously with He-band and H-band EMIC wave power enhancements in a direction mostly perpendicular to the background magnetic field without significant low-energy H^+ and O^+ flux variations. We suggest that cold He^+ ions (<1 eV) are preferentially and transversely heated up 10 eV through the interaction with EMIC waves inside the plasmasphere. The low-Earth orbit spacecraft observed localized precipitations of energetic protons in the upper ionosphere at subauroral latitudes near the magnetic field footprint of Van Allen Probe A. Our observations provide a clear evidence that EMIC waves play an important role in the overall dynamics in the inner magnetosphere, contributing to the high-energy particle loss and low-energy particle energization.</p> | | | | |
| 연구 목표 및 연구내용과의 연관성 | | 기대성과 및 파급 효과 | | |
| Pc1 파동의 원인이 되는 EMIC 파동의 발생에 따른 자기권 변화를 분석하였다. 이러한 양이온의 가속 현상은 파동 전파와 함께 지상으로 전파되어 전리권에 영향을 줄 가능성이 높다. | | 기존에 확인되지 않았던 저에너지 입자의 가속 현상을 확인한 결과로 향후 해당 분야에서 해당 입자의 영향을 분석하는데 매우 중요한 기초 연구로 생각된다. | | |



JGR Space Physics

RESEARCH ARTICLE
10.1029/2020JA028560

A Case Study of Transversely Heated Low-Energy Helium Ions by EMIC Waves in the Plasmasphere

Khan-Hyuk Kim¹, Hyuck-Jin Kwon², Junhyun Lee¹, Ho Jin¹, and Jungjoon Seough³

¹School of Space Research, Kyung Hee University, Gyeonggi, South Korea, ²Division of Climate Change Research, Korea Polar Research Institute, Incheon, South Korea, ³Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, South Korea

Key Points:

- EMIC wave activity is clearly correlated with low-energy (<10 eV) He⁺ flux enhancement
- The low-energy He⁺ ions are transversely heated by EMIC waves
- EMIC waves strongly affect the low-energy He⁺ ions rather than the low-energy H⁺ ions

Correspondence to:

K.-H. Kim,
khan@khu.ac.kr

Citation:

Kim, K.-H., Kwon, H.-J., Lee, J., Jin, H., & Seough, J. (2021). A case study of transversely heated low-energy helium ions by EMIC waves in the plasmasphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, e2020JA028560. <https://doi.org/10.1029/2020JA028560>

Received 5 AUG 2020
Accepted 16 JAN 2021

Abstract The Van Allen Probe A spacecraft observed strong ~0.5-Hz helium (He⁺) band and weak ~0.8-Hz hydrogen (H⁺) band EMIC waves on April 17, 2018, at $L = \sim 4.5\text{--}5.2$, in the dawn sector, near the magnetic equator, and close to the plasmapause. We examined low-energy ion fluxes observed by the Helium Oxygen Proton and Electron (HOPE) instrument onboard Van Allen Probe A during the wave interval and found that low-energy He⁺ flux (<10 eV) enhancements occur nearly simultaneously with He-band and H-band EMIC wave power enhancements in a direction mostly perpendicular to the background magnetic field without significant low-energy H⁺ and O⁺ flux variations. We suggest that cold He⁺ ions (<1 eV) are preferentially and transversely heated up 10 eV through the interaction with EMIC waves inside the plasmasphere. The low-Earth orbit spacecraft observed localized precipitations of energetic protons in the upper ionosphere at subauroral latitudes near the magnetic field footprint of Van Allen Probe A. Our observations provide a clear evidence that EMIC waves play an important role in the overall dynamics in the inner magnetosphere, contributing to the high-energy particle loss and low-energy particle energization.

1. Introduction

Early theoretical works described that electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves are generated as transverse left-handed polarized waves near the magnetic equator by anisotropic ($T_{\perp} > T_{\parallel}$) protons with energies of ~10–100 keV, which are typical ion energies in the ring current (e.g., Cornwall, 1965; Kennel & Petschek, 1966). EMIC waves are excited during geomagnetically disturbed intervals associated with geomagnetic storms, substorms, and solar wind dynamic pressure variations (e.g., Fraser & McPherron, 1982; Ishida et al., 1987; Kim et al., 2017, <https://doi.org/10.1029/2020JA028503>; Meredith et al., 2003; Ofson & Lee, 1983; Usanova et al., 2008) and also occur under quiet geomagnetic conditions (K.-H. Kim et al., 2016b, <https://doi.org/10.1029/2020JA028503>; Park et al., 2016) over a wide L range (~4–12) at all local times in the Earth's magnetosphere (e.g., Allen et al., 2015; Anderson et al., 1992a, 1992b; Fraser & Nguyen, 2001; Keika et al., 2013; G.-J. Kim et al., 2016a; Min et al., 2012; Saikin et al., 2015; Usanova et al., 2012). The frequency of EMIC waves observed in the magnetosphere falls in the Pc1-Pc2 geomagnetic pulsation band (frequency = ~0.1–5 Hz). Ground magnetometers located at low to high latitudes routinely detect geomagnetic pulsations in the Pc1-Pc2 band (e.g., Bortnik et al., 2008; Engebretson et al., 2002; Kwon et al., 2020; Mann et al., 2014; Nomura et al., 2011). These ground Pc1-Pc2 pulsations have been attributed to EMIC waves propagating to the ground through the ionosphere along the field lines from the source region in the magnetosphere (e.g., H. Kim et al., 2017; Usanova et al., 2008).

Studies of EMIC waves including cold heavy ions (He⁺ and O⁺) reported that the heavy ions play a significant role in determining the spectral and propagation properties of EMIC waves even though in small concentrations of cold heavy ions (~5%–10% for He⁺ and ~1%–2% for O⁺) (Kozyra et al., 1984; Mauk et al., 1981; Roux et al., 1982; Young et al., 1981). In the presence of such cold heavy ions, EMIC waves can be generated in three distinct bands: a H-band between the local H⁺ gyrofrequency (f_{H^+}) and He⁺ gyrofrequency (f_{He^+}), a He-band between the local He⁺ gyrofrequency (f_{He^+}) and O⁺ gyrofrequency (f_{O^+}), and an O-band below f_{O^+} . In situ observations in the inner and outer magnetosphere have provided clear evidence for the cold heavy ion effects. Statistical studies of EMIC waves using AMPTE/CCE and THEMIS data showed that the He-band occurrence rate is high in the late afternoon at $L = \sim 9$ and that the occurrence rate of H-band

© 2021. The Authors.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

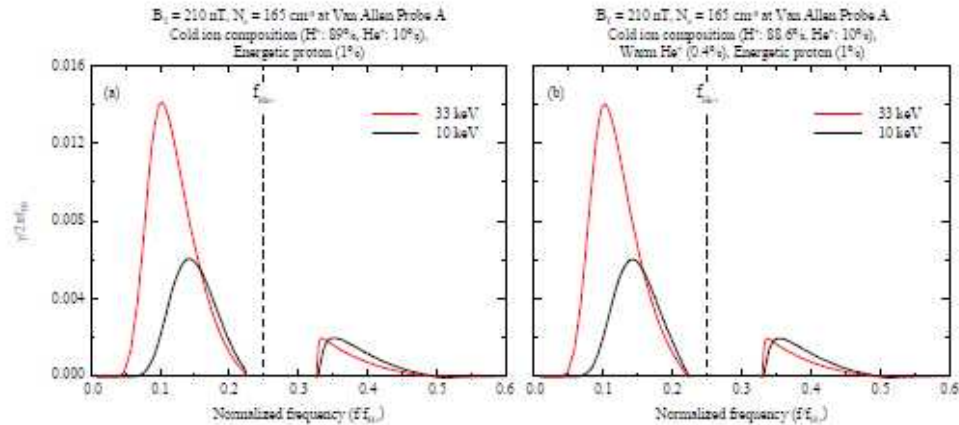


Figure 8. (a) Linear growth rate of EMIC waves as a function of normalized frequency at Van Allen Probe A orbit for a plasma composition assumed to be cold protons (89%), cold helium ions (10%), and energetic protons (1%). The energetic proton populations are considered to be $T_{\perp 1}/T_{\parallel 1} = 2.0$ for two parallel energies of 10 keV (black) and 33 keV (red). The cold plasma density ($N_e = 165 \text{ cm}^{-3}$) and background magnetic field intensity ($B_T = 210 \text{ nT}$) observed at Van Allen Probe A for the interval of 11:24–11:25 UT are used for the calculation. (b) The same as the magnetic field intensity and plasma parameters used to calculate the result shown in Figure 10a except for 0.4% warm He^+ ions, 88.6% cold protons. EMIC, electromagnetic ion cyclotron.

the H-band when the spacecraft was just inside the plasmopause near the magnetic equator. Previous theoretical studies suggested that cold He^+ ions can be heated by H-band and/or He-band EMIC waves. In our case it is likely that He-band waves play a key role in heating the cold He^+ ions.

The case event in our study shows that the He^+ ions heated up to 10 eV. This energy is lower than that in the previous studies. Since the present study is based on only one event observed on a single Van Allen Probe A pass inside the plasmasphere, we cannot generalize the quantitative argument for the question: What is a critical factor for the EMIC wave-driven He^+ heating? To answer the question, we need to observe the EMIC wave-associated He^+ heating events at various latitudes, longitudes, and radial distances and under various background plasma and magnetic field conditions. Currently, we statistically examine the relationship between EMIC He-band waves and cold ion heating, and the results will be presented in a related publication.

Data Availability Statement

The Van Allen Probe A EMFISIS data were obtained from the University of Iowa (<http://emfisis.physics.uiowa.edu>), and the Van Allen Probe A HOPE data were obtained from the Van Allen Probes ECT website (<https://www.rbsp-ect.lanl.gov/science/DataDirectories.php/>). NOAA-15 data are available at <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov>.

Acknowledgments

The work of K.-H. Kim was supported by the Basic Science Research Program through NRF funded by NRF-2019R1F1A1055444 and also supported by project PE21020 of the Korea Polar Research Institute. The work of H.-I. Kwon was supported by the Basic Science Research Program through NRF funded by NRF-2020R1C1C1003640.

References

- Allen, R. C., Zhang, J.-C., Kistler, L. M., Spence, H. E., Lin, R.-L., Klecker, B., et al. (2015). A statistical study of EMIC waves observed by Cluster: 1. Wave properties. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120, 5574–5592. <https://doi.org/10.1002/2015JA021333>
- Anderson, B. J., Erlanson, R. E., & 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., Erlanson, R. E., & 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.
- Anderson, B. J., & Fuselier, S. A. (1994). Response of thermal ions to electromagnetic ion cyclotron waves. *Journal of Geophysical Research*, 99(A10), 19413–19425.
- Bingley, L., Angelopoulos, V., Sibeck, D., Zhang, X., & Halford, A. (2019). The evolution of a pitch-angle “bite-out” scattering signature caused by EMIC wave activity: A case study. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 5042–5055. <https://doi.org/10.1029/2018JA026292>
- Borink, J., Cutler, J. W., Dunson, C., Bletier, T. E., & McPherron, R. L. (2008). Characteristics of low-latitude Pc1 pulsations during geomagnetic storms. *Journal of Geophysical Research*, 113, A04201. <https://doi.org/10.1029/2007JA012867>
- Carpenter, D. L., & Anderson, R. R. (1992). An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere. *Journal of Geophysical Research*, 97(A2), 1097–1108.

| | | | | |
|---|----------------|---|---------------------------|------------|
| 연구실적 유형 | | 논문(√) 특허() | | |
| 연구책임자/참여연구자(공동) 구분 및 성명 | | 연구책임자(권혁진) | | |
| 논문/특허명 | | Spacecraft potential changes associated with EMIC waves in the inner magnetosphere | | |
| 논문실적정보 <input checked="" type="checkbox"/> | 게재지(저널명) | JGR Space Physics | | |
| | SCI 등재 여부 | 등재 | Impact Factor 및 인용횟수(SCI) | 3.111(00회) |
| | SCOPUS 등재 여부 | 등재 | 인용횟수(SCOPUS) | 00회 |
| | ISSN | 2169-9402 | 게재년월 | 202209 |
| | 역할(제1, 교신, 참여) | 참여저자 | 참여자수 | 10 |
| 특허실적정보 <input type="checkbox"/> | 구분 | | 등록(출원) 국가 | |
| | 등록(출원) 번호 | | 등록(출원)일 | |
| | 등록(출원)자 성명 | | 발명자 성명 | |
| 요약문 | | | | |
| <p>Although electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves are commonly observed in the magnetosphere and are believed to energize background cold ions, it is not clear whether EMIC waves play a significant role in determining spacecraft potential change. In this paper, we present two strong He-band EMIC wave events observed by the Van Allen Probe-B spacecraft inside the plasmasphere. One event occurred on 11 March 2016 when the spacecraft was on the dayside, and the other occurred on 9 October 2016 when the spacecraft was in the postmidnight sector. When a strong He-band EMIC wave activity was detected, low-energy ion flux enhancements occurred nearly simultaneously with the EMIC wave power enhancements. Both events presented in this study are clearly unique in that He-band wave power and enhanced proton flux are extremely high. During the wave activity interval, we found that the spacecraft charged more positively without a significant change in the ambient electron density. We discuss whether low-energy ions energized by EMIC waves can contribute to the spacecraft potential change.</p> | | | | |
| 연구 목표 및 연구내용과의 연관성 | | 기대성과 및 파급 효과 | | |
| EMIC 파동에 의한 변화를 분석한 논문으로 플라즈마 파동이 우주 환경 변화에 미치는 영향을 확인한 연구이다. | | 플라즈마 파동에 동반된 양이온의 에너지 변화는 지상에서 발생하는 오로라 등 다른 현상과 밀접한 연관이 있기 때문에 다양한 연구에서 해당 연구결과의 활용도가 높을 것으로 기대된다. | | |



JGR Space Physics

RESEARCH ARTICLE
10.1029/2022JA.030337

Key Points:

- Low-energy proton and helium ion flux enhancements occur nearly simultaneously with electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves
- Cold protons and helium ions below 1 eV are accelerated by EMIC waves
- More positive surface charging occurs during the interval of EMIC wave activity

Correspondence to:

K.-H. Kim and J. Lee,
khan@khu.ac.kr,
jlee654321@khu.ac.kr

Citation:

Kim, K.-H., Lee, J., Kwon, J.-W., Lee, E., Kim, H.-E., Jin, H., et al. (2022). Spacecraft potential changes associated with EMIC waves in the inner magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 127, e2022JA030337. <https://doi.org/10.1029/2022JA030337>

Received 28 JAN 2022
Accepted 18 AUG 2022

© 2022. American Geophysical Union.
All Rights Reserved.

Spacecraft Potential Changes Associated With EMIC Waves in the Inner Magnetosphere

Khan-Hyuk Kim¹, Junhyun Lee¹, Jong-Woo Kwon¹, Ensang Lee¹, Hee-Eun Kim¹, Ho Jin¹, Hyuck-Jin Kwon², Seul-Min Baek³, John Wygant⁴, and Forrest S. Mozer⁵

¹School of Space Research, Kyung Hee University, Seoul, South Korea, ²Division of Atmospheric Sciences, Korea Polar Research Institute, Incheon, South Korea, ³Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon, South Korea, ⁴School of Physics and Astronomy, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA, ⁵Physics Department, Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, CA, USA

Abstract Although electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves are commonly observed in the magnetosphere and are believed to energize background cold ions, it is not clear whether EMIC waves play a significant role in determining spacecraft potential change. In this paper, we present two strong He-band EMIC wave events observed by the Van Allen Probe-B spacecraft inside the plasmasphere. One event occurred on 11 March 2016 when the spacecraft was on the dayside, and the other occurred on 9 October 2016 when the spacecraft was in the postmidnight sector. When a strong He-band EMIC wave activity was detected, low-energy ion flux enhancements occurred nearly simultaneously with the EMIC wave power enhancements. Both events presented in this study are clearly unique in that He-band wave power and enhanced proton flux are extremely high. During the wave activity interval, we found that the spacecraft charged more positively without a significant change in the ambient electron density. We discuss whether low-energy ions energized by EMIC waves can contribute to the spacecraft potential change.

Plain Language Summary In the Earth's magnetosphere the spacecraft potential is determined by the current balance between escaping photoelectrons and incoming ambient electrons. Since the ions are considerably more massive than the electrons, implying that electrons are more mobile than ions, the ion currents from the ambient plasma have been neglected for the current balance. Spacecraft interactions with the ambient plasma give rise to spacecraft charging. During the interval we focus on in this study, the spacecraft charged positively, indicating that the photoelectron current is larger than the electron current from the ambient plasma. When the spacecraft observed strong electromagnetic ion cyclotron (EMIC) wave activity, low-energy proton, and helium ion flux enhancements occurred nearly simultaneously with the EMIC power enhancements. At the time of EMIC waves, the spacecraft charged more positively. From these observations, we suggest that wave-associated low-energy ion flux enhancements, corresponding to the accumulation of positive ions from the surrounding plasma on spacecraft surface, lead to more positive surface charging.

1. Introduction

The spacecraft potential is primarily determined by the balance between the incoming thermal electron current from the surrounding plasma and the photoelectron current emitted from the spacecraft in the Earth's magnetosphere where both currents are dominant current sources (e.g., Escoubet et al., 1997; Pedersen, 1995). Spacecraft interactions with the ambient plasma give rise to spacecraft charging. Negative charging is predominant since the electron flux is about two orders of magnitude greater than the ion flux as long as the ion and electron energies are of the same order of magnitude. During intense electron flux periods, electrons generate a strong incoming electron current and cause large negative spacecraft charging by overtaking the photoelectron current (Mullen et al., 1986; Olsen, 1983; Sarno-Smith et al., 2016). That is, there is a connection between negative charging and electron fluxes. When a satellite is in sunlight, positive charging is measured. This is due to photoelectron current, which is exceeding the thermal electron current from the ambient plasma. The ions are considerably more massive than the electrons, implying that electrons are more mobile than ions, and thus, the ambient electron flux is much greater than that of the ambient ions. Consequently, the electron current is much larger than the ion current. In a usual magnetospheric condition, the ion currents from the ambient plasma have been neglected for the current balance. High-energy electrons produce secondary electrons, which cause extra electron loss, forcing the spacecraft body to charge positive to reattract them and achieve current balance (e.g., Garrett, 1981).

5. Conclusions

We have studied two intervals exhibiting spacecraft potential changes associated with strong He-band EMIC waves observed by Van Allen Probe B inside the plasmasphere. We conclude the following:

1. During the He-band EMIC wave events, low-energy proton, and helium ion flux enhancements occurred nearly simultaneously with the EMIC power enhancements.
2. When the low-energy proton fluxes are strongly enhanced, the spacecraft charged more positively without a significant change in the background electron density.
3. EMIC waves energize cold ions up to suprathermal energies (tens of eV–a few hundred eV).
4. We quantitatively examined whether EMIC wave-associated ion flux enhancements can lead to positive spacecraft charging.
5. Our quantitative analysis indicates that the enhanced proton current estimated in this study is neglected for the current balance, determining the spacecraft potential.
6. Enhanced photoelectron escape driven by EMIC wave electric fields may contribute to more positive surface charging.

Data Availability Statement

Van Allen Probe B EMFISIS data were obtained from the University of Iowa (<http://emfisis.physics.uiowa.edu>), the Van Allen Probe-B HOPE data were obtained from NASA Goddard Space Flight Center Space Physics Data Facility Coordinated Data Analysis Web (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/pub/data/rbsp/>), and Van Allen Probe-B EPW data were obtained from the University of Minnesota (<http://www.space.umn.edu/missions/rbsp-fw-home-university-of-minnesota>).

Acknowledgments

The work of K.-H. Kim was supported by Korea Polar Research Institute (KOPRI) grant funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (KOPRI PE22020). The work of H.-J. Kwon was supported by the Basic Science Research Program through NRF funded by NRF-2020R1C1C1003640. H. Jin was supported by NRF Grant NRF-2021M1A3A4A06098620.

References

- Anderson, B. J., Erlanson, R. E., & Zaretti, L. J. (1992). A statistical study of Pc 1–2 magnetic pulsations in the equatorial magnetosphere: I. Equatorial occurrence distributions. *Journal of Geophysical Research*, 97(A3), 3075–3088. <https://doi.org/10.1029/91JA02706>
- Anderson, B. J., & Fuselier, S. A. (1994). Response of thermal ions to electromagnetic ion cyclotron waves. *Journal of Geophysical Research*, 99(A10), 19413–19425. <https://doi.org/10.1029/94JA01235>
- Chappell, C. R., Huddleston, M. M., Moore, T. E., Giles, B. L., & Delcourt, D. C. (2008). Observations of the warm plasma cusp and an explanation of its formation in the magnetosphere. *Journal of Geophysical Research*, 113(A9), A09206. <https://doi.org/10.1029/2007JA012945>
- Comfort, R. H., Waite, J. H., & Chappell, C. R. (1985). Thermal ion temperatures from the retarding ion mass spectrometer on DE-1. *Journal of Geophysical Research*, 90(A4), 3475–3486. <https://doi.org/10.1029/JA090iA04p03475>
- Escoubet, C. P., Pedersen, A., Schmidt, R., & Lindqvist, P. A. (1997). Density in the magnetosphere inferred from ISEE 1 spacecraft potential. *Journal of Geophysical Research*, 102(A8), 17595–17609. <https://doi.org/10.1029/97JA00290>
- Fu, X., Cowee, M. M., Jordanova, V. K., Gary, S. P., Reeves, G. D., & Winske, D. (2016). Predicting electromagnetic ion cyclotron wave amplitude from unstable ring current plasma conditions. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(11), 10954–10965. <https://doi.org/10.1002/2016JA023303>
- Funsten, H. O., Skoug, R. M., Guthrie, A. A., MacDonald, E. A., Baldonado, J. R., Harper, R. W., et al. (2013). Helium, Oxygen, Proton, and Electron (HOPE) mass spectrometer for the radiation belt storm probes mission. *Space Science Reviews*, 179(1–4), 423–484. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9968-7>
- Garnett, H. B. (1981). The charging of spacecraft surfaces. *Reviews of Geophysics*, 19(4), 577–616. <https://doi.org/10.1029/RG019004p0577>
- Goldstein, J. S., Pascuale, S. D., Kletzing, C., Kurth, W., Genestreti, K. J., Skoug, R. M., et al. (2014). Simulation of Van Allen probes plasma-pause encounters. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(9), 7464–7484. <https://doi.org/10.1002/2014JA020252>
- Kennel, C. F., & Petschek, H. E. (1966). Limit on stably trapped particle fluxes. *Journal of Geophysical Research*, 71(C1), 1–28. <https://doi.org/10.1029/JZ071i001p00001>
- Kim, G.-J., Kim, K.-H., Lee, D.-H., Kwon, H.-J., & Park, J.-S. (2016). Occurrence of EMIC waves and plasmaspheric plasmas derived from THEMIS observations in the outer magnetosphere: Revisit. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(10), 9443–9458. <https://doi.org/10.1002/2016JA023108>
- Kim, K.-H., Kwon, H.-J., Lee, J., Jin, H., & Seough, J. (2021). A case study of transversely heated Low-Energy helium ions by EMIC waves in the plasmasphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(2), e2020JA028560. <https://doi.org/10.1029/2020JA028560>
- Kletzing, C. A., Kurth, W. S., Acuna, M., MacDowall, R. J., Torbert, R. B., Averkamp, T., et al. (2013). The electric and magnetic field instrument suite and integrated science (EMFISIS) on RBSP. *Space Science Reviews*, 179(1–4), 127–181. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9993-6>
- Kozlra, J., Cravens, T., Nagy, A., Fomheim, E., & Ong, R. (1984). Effects of energetic heavy ions on electromagnetic ion cyclotron wave generation in the plasmapause region. *Journal of Geophysical Research*, 89(A4), 2217–2233. <https://doi.org/10.1029/JA089iA04p02217>
- Kurth, W. S., De Pascuale, S., Faden, J. B., Kletzing, C. A., Hospodarsky, G. B., Thaller, S., & Wygant, J. R. (2015). Electron densities inferred from plasma wave spectra obtained by the Waves instrument on Van Allen Probes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 120(2), 904–914. <https://doi.org/10.1002/2014JA020857>
- Lee, J., Kim, K.-H., & Lee, E. (2021). A statistical study of Low-Energy ion flux enhancements by EMIC waves in the inner magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126(8), e2021JA029793. <https://doi.org/10.1029/2021JA029793>

주 의

1. 이 보고서는 극지연구소에서 수행한 한국연구재단 우수신진연구의 연구결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 극지연구소에서 수행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.