J. Space Technol. Appl. 4(3), 210-219 (2024)
https://doi.org/10.52912/jsta.2024.4.3.210

우주기술과 응용
Journal of Space Technology and Applications
pISSN 2765-7469 eISSN 2799-3213

연구논문

2024년 5월 G5 지자기 폭풍 때 한반도 상공 전리권 변화: 한국천문연구원 준 실시간 전리권 감시 시스템 관측 결과를 중심으로

이우경[1,2†], 길효섭[3], 최병규[1], 홍준석[1], 정세헌[1], 김수진[1], 김정헌[1], 손동효[1], 노경민[1], 유성문[1], 양태용[1], 박재흥[1,2], 정종균[1], 곽영실[1,2]

[1]한국천문연구원
[2]과학기술연합대학원대학교 천문우주과학과
[3]존스홉킨스대학교 응용물리연구소

Received: July 4, 2024
Revised: August 21, 2024
Accepted: August 22, 2024

†Corresponding author :
Woo Kyoung Lee
Tel : +82-42-865-2145
E-mail : wklee@kasi.re.kr

Copyright © 2024 The Korean Space Science Society. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Woo Kyoung Lee
https://orcid.org/0000-0001-5020-8684
Hyosub Kil
https://orcid.org/0000-0001-8288-6236
Byung-Kyu Choi
https://orcid.org/0000-0003-2560-6714
Junseok Hong
https://orcid.org/0000-0002-2347-7907
Se-Heon Jeong
https://orcid.org/0000-0001-6555-2955
Sujin Kim
https://orcid.org/0000-0002-5004-7734
Jeong-Heon Kim
https://orcid.org/0000-0003-4953-5228
Dong-Hyo Sohn
https://orcid.org/0000-0001-9719-702X
Kyoung-Min Roh
https://orcid.org/0000-0001-5208-9041

Ionospheric Responses to the May 2024 G5 Geomagnetic Storm Over Korea, Captured by the Korea Astronomy and Space Science Institute (KASI) Near Real-Time Ionospheric Monitoring System

Woo Kyoung Lee[1,2†], Hyosub Kil[3], Byung-Kyu Choi[1], Junseok Hong[1], Se-Heon Jeong[1], Sujin Kim[1], Jeong-Heon Kim[1], Dong-Hyo Sohn[1], Kyoung-Min Roh[1], Sung-Moon Yoo[1], Tae-Yong Yang[1], Jaeheung Park[1,2], Jong-Kyun Chung[1], Young-Sil Kwak[1,2]

[1]Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea
[2]Department of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology, Daejeon, 34113, Korea
[3]Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, MD 20723, USA

요 약

이 논문에서는 2024 년 5 월에 일어난 지자기 폭풍 동안 한반도 주변에 나타난 다양한 전리권과 고층대기 교란을 살펴본다. 대규모 태양 폭발로 일어난 이번 지자기 폭풍은 21년 만에 발생한 G5 등급으로, 우리나라에서도 오로라가 보일만큼 전 지구적으로 극심한 우주 환경 변화를 가져왔다. 한국천문연구원은 국내에서 수집한 GNSS(Global Navigation Satellite System) 자료로부터 전리권 총 전자량(total electron content, TEC)을 산출해 대한민국 상공의 전리권 변화를 감시하고, 전리권에 의한 위성항법 신호 교란을 직접 확인할 수 있는 GNSS 신틸레이션 관측소를 국내 · 외 5 곳에 설치해 운영 중이다. 이번 지자기 폭풍 동안 대한민국 상공의 TEC 는 큰 변화를 겪었다. 밤에는 TEC 증가와 강한 신틸레이션이 일어났고, 다음 날 낮에는 TEC가 평소보다 70% 이상 감소하였는데, 이는 11년 태양 활동 주기 중 한두 번 꼴로 나타나는 드문 현상이다. 낮에 일어난 TEC 감소는 열권 구성 성분 변화와 관련이 있지만, 밤에 일어난 TEC 증가와 신틸레이션의 원인은 아직 명확하지 않아 추가 분석이 필요하다.

Abstract

This study investigates various ionospheric and thermospheric disturbances around the Korean Peninsula during the G5 geomagnetic storm occurred on May 10, 2024. This level of storm was the first of its

Sung-Moon Yoo
https://orcid.org/0000-0001-6280-8222
Tae-Yong Yang
https://orcid.org/0000-0002-5725-9828
Jaeheung Park
https://orcid.org/0000-0002-1272-508X
Jong-Kyun Chung
https://orcid.org/0000-0003-4493-8378
Young-Sil Kwak
https://orcid.org/0000-0003-3375-8574

magnitude in 21 years, resulting in auroras visible even in South Korea and severe space weather worldwide. The Korea Astronomy and Space Science Institute has been providing ionospheric information over Korea through total electron content (TEC) measurements from the Global Navigation Satellite System (GNSS) and monitoring the impact of ionospheric disturbances on GNSS signals by operating five GNSS scintillation stations in Korea and other countries. During this storm period, large amplitudes of TEC variations were observed over South Korea, along with anomalous TEC enhancements accompanied by strong scintillations at night and persistent TEC depletion on the dayside during the storm's recovery phase. Such daytime TEC depletion disturbances are quite rare, typically occurring only a few times throughout the 11-year solar cycle. While the association of persistent TEC depletion during the daytime with neutral composition disturbances was identified through observations, the causes of TEC enhancement and strong scintillation at night remain unclear. We speculate that the uplift of the ionosphere by storm-induced electric fields is responsible for the TEC enhancement and scintillation, but this hypothesis requires validation based on additional observational data.

핵심어 : 지자기 폭풍, 전리권 교란, 신틸레이션
Keywords : geomagnetic storm, ionospheric disturbance, scintillation

1. 서론

2024년 5월 12일, 강원도 화천에서 오로라를 찍었다는 소식이 있었다. 오로라가 자주 나타나는 지역인 오로라 타원체(aurora oval)에서 멀리 떨어진 우리나라에서 오로라를 보기는 매우 드문 일로 2003년 10월 보현산 천문대에서 붉은 오로라를 관측한 이후로 21년 만의 일이다[1].

오로라는 지구 밖에서 오는 고에너지 입자가 지구 대기와 부딪혀 에너지를 전달하고, 지구 대기가 다시 이를 방출하는 과정에서 나오는 빛이다. 오로라는 지자기 남북극을 중심으로 고리 모양으로 일어난다. 태양 폭발로 고에너지 입자가 많이 들어오면 이 고리가 넓어져 평소 오로라를 보기 힘든 지역에서도 볼 수 있으나, 우리나라는 고리 중심에서 멀리 있어 보기 어렵다. 그러나 21년 만에 일어난 강력한 태양 폭발과 지자기 폭풍 덕분에, 우리나라에서도 오로라를 볼 수 있었다.

태양 폭발로 나온 플라스마는 자기장을 가지고 있어 지구 자기장과 결합할 경우, 고에너지 입자가 지구로 들어와 우주 환경을 크게 바꾼다. 특히 전자가 밀집한 지구 전리권을 교란시켜 무선 통신, 위성항법시스템에 영향을 주고 인공위성이 다니는 수백 킬로미터 상공의 대기 밀도를 높여 위성의 고도를 떨어뜨릴 수 있다. 2022년 2월 스타링크 위성 38대가 추락한 것도 이 때문으로 알려졌다[2-5]. 이번에 일어난 태양 폭발은 지구에 최고 등급(G5) 지자기 폭풍을 일으켰고, 대한민국을 포함한 전 지구 우주환경을 크게 변화시켰다.

따라서 이 논문에서는 한국천문연구원이 개발한 준 실시간 전리권 감시 시스템에서 관측한 자료를 중심으로 이번 G5 지자기 폭풍 때 우리나라 상공의 전리권이 어떤 변화를 겪었는지 살펴보고, 그런 변화를 일으킨 원인이 무엇인지 짚어본다.

2. 2024년 5월 9일 태양 폭발과 지자기 교란

이번 G5 지자기 폭풍을 일으킨 태양 폭발은 Fig. 1(a)에 보이는 태양 남서쪽의 AR13664 활동 영역에서 일어났다. 지구의 15배 정도 크기를 가진 대형 흑점군에서 5월 9일 08시 45분(UT)경 X2.3급 태양 플레어가 발생했고, X선량은 09시 13분경 최고점을 기록했다, 이와 동반해 코로나 물질 방출(coronal mass ejection, CME)이 일어나 자기장을 가진 플라스마 덩어리가 평균 속도 1,250 km/s(최고 속도 1,893 km/s)로 지구로 향했다[6]. Fig. 1(b)는 SOHO(Solar and Heliospheric Observatory) 위성에 실린 LASCO(Large Angle and Spectrometric Coronagraph)에서 관측한 시간에 따른 CME의 분출 모습을 보여준다[6]. 이번 플레어와 CME는 특별히 강하지 않았지만, 앞서 오던 다른 CME들과 상호작용으로 복잡한 자기 구조가 형성되어 G5급 지자기 폭풍이 발생한 것으로 보인다.

이 CME는 5월 10일 16:36 UT경 지구에 도착해 지구 자기장을 교란시켰다. Fig. 2(a)는 태양풍 밀도와 속도, 행성 간 자기장, 지자기 폭풍의 세기를 나타내는 Dst와 Kp 지수의 시간에 따른 변화이다. 태양풍 밀도와 속도가 증가하면 태양풍 입자들이 지구 자기장으로 들어와 환전류(ring current)의 세기를 강화한다. 환전류는 지구 북반구를 위에서 내려봤을 때 시계 방향인 서쪽으로 흐르고, Dst는 이 전류가 만드는 자기장의 세기를 나타낸다. 환전류가 만드는 자기장은 지구 자기장과 반대 방향이므로 지자기 폭풍이 일어나면 Dst가 0보다 작아진다. 이번 지자기 폭풍에서 Dst는 −412 nT까지 떨어졌는데, 이 값은 2003년 10월에 일어난 대규모

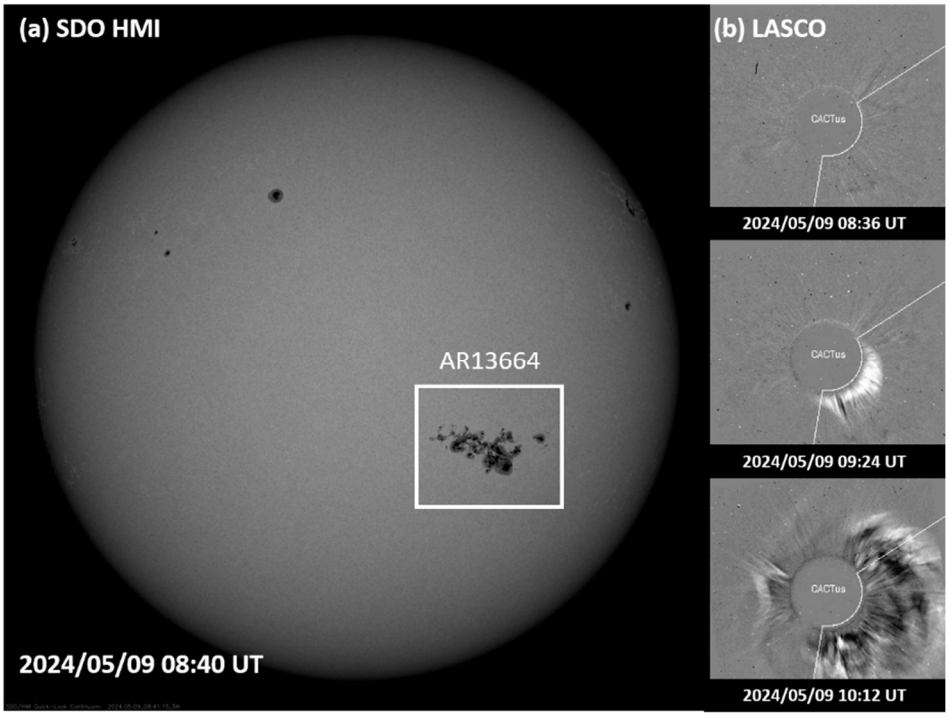


Fig. 1. Sunspots and CME associated with the May 2024 geomagnetic storm. (a) Giant sunspot group (AR13664) observed by the SDO HMI. (b) Sequence of CME images from SOHO LASCO, associated with the G5 geomagnetic storm. CME, coronal mass ejection; SDO, solar dynamic observatory; HMI, helioseismic and magnetic imager; SOHO, Solar and Heliospheric Observatory; LASCO, Large Angle and Spectrometric Coronagraph.

지자기 폭풍인 할로윈 스톰(Halloween Storm) 때보다 더 떨어진 수치이다. Kp는 자기장 교란 정도를 보여주는 지수로 G5급임을 나타내는 9까지 올라가는 경우는 드물다. 행성 간 자기장(interplanetary magnetic field, IMF)은 태양풍에 실려 나오는 태양의 자기장으로, 남북방향 성분인 IMF Bz는 지자기 폭풍의 시작 시점과 밀접한 관련이 있다. 태양 자기장과 지구 자기장이 반대 방향일 때(IMF Bz 〈 0) 두 자기장이 결합하기 쉬워지고, 결합한 자기력선을 따라 태양풍에 실린 고에너지 입자들이 지구로 들어오면서 지자기 폭풍이 시작되기 때문이다. 고에너지 입자가 들어오는 신호가 오로라이므로 Fig. 2(b)에서 보듯이 지자기 폭풍이 시작되면 오로라가 더 밝아지고 적도 방향으로 확장한다.

3. G5 지자기 폭풍과 대한민국 상공의 전리권 변화

한국천문연구원은 동아시아 전리권 변화를 감시하기 위해 국내 GNSS(Global Navigation Satellite System) 자료를 실시간으로 수집하고 TEC(total electron content)와 ROTI(rate of TEC index)를 산출하는 시스템을 개발해 시험 운영 중이다. ROTI는 시간에 따른 TEC의 변화량으로 전리권 교란 정도를 나타낸다. TEC와 ROTI는 위도 25.5-41도, 경도 120-

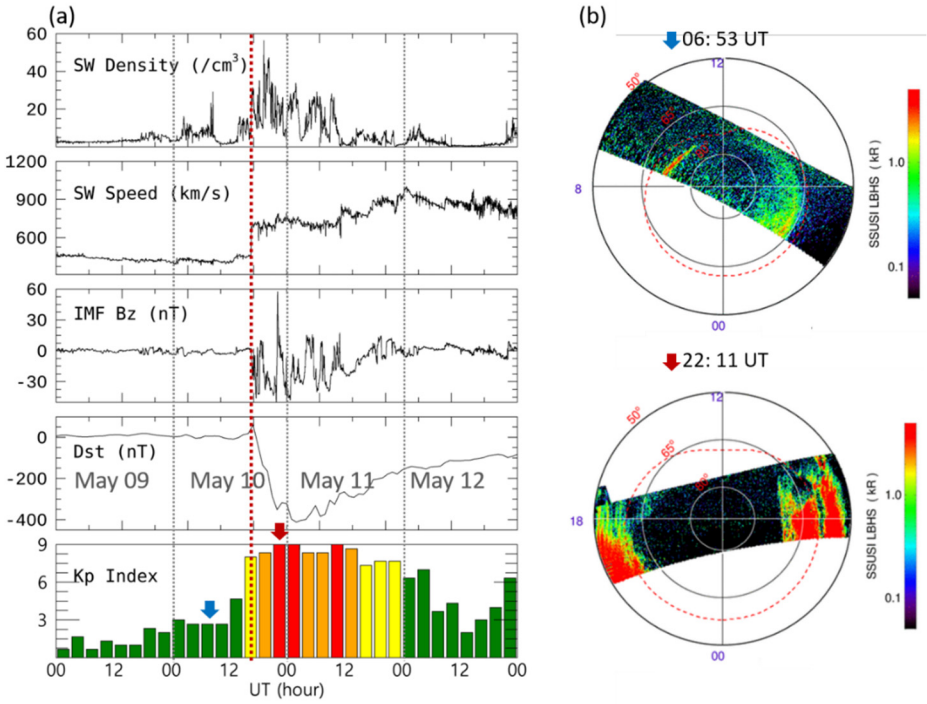


Fig. 2. Solar wind and magnetic parameters, along with auroral images. (a) Solar wind density, solar wind speed, IMF Bz, Dst, and Kp index presented from top to bottom. Kp indices corresponding to G5, G4, G3, below G3 level geomagnetic storms are marked in red, orange, yellow, and green, respectively. (b) DMSP/SSUSI aurora observations on May 10 in the northern hemisphere: (top) before and (bottom) during the storm. The times of these auroral images are indicated by arrows on the Kp index plot. IMF, interplanetary magnetic field; DMSP, Defense Meteorological Satellite Program; SSUSI, Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager.

135.5도 범위로 0.5도 간격의 맵 형태로 제공하며 15분마다 정보를 갱신한다. 또한, GNSS 신호 교란을 확인할 수 있는 신틸레이션 관측소를 보현산, 제주, 마이크로네시아, 그리고 남극 세종기지와 장보고 기지에 설치해 운영 중이다. 이 시스템에서 수집한 자료에 따르면 G5 지자기 폭풍 기간 동안 TEC는 평소보다 70%나 감소했으며, 24시간 이상 지속하였다. 또한, 보현산과 제주 관측소에서 평소에 나타나지 않는 강한 신틸레이션을 관측하였다.

Fig. 3(a)는 지구 자기장 교란이 전리권에 미치는 영향을 시간 순서대로 보여준다. TEC는 일본의 정지궤도 항법위성(Quasi-Zenith Satellite System, QZSS) 자료로부터 추정하였다. 지자기 폭풍 전인 5월 9일(초록색 점선)과 비교했을 때, 5월 11일 10 UT(19 LT)부터 TEC가 빠르게 감소하였고, 12 UT(21 LT) 부근에서 증가하기 시작해 18 UT(03 LT) 경에는 낮과 비슷한 수준인 40 TECU(TEC Unit, 1 TECU = 10^{16} electrons/m^2) 정도에 도달하였다. 5월 12은 TEC 변화가 거의 없이 20 TECU 미만을 유지하다가, 다음 날 00 UT 이후 정상으로 돌아왔다. Fig. 3(b)는 한국천문연구원 준 실시간 전리권 감시 시스템에서 제공하는 TEC 지도로, 지자기 폭풍에 의한 TEC 감소를 보여준다. 지자기 폭풍 전에는 35–40 TECU였으나, 지자기 폭풍 후에는 10–20 TECU 정도로 줄었다. 이러한 TEC 감소는 한반도 주변 대부분 지역에서 일어났다. Fig. 3(c)은 5월 11일 보현산과 제주 관측소에서 관측한 강한 신틸레이션을 보여준다. 우리나라에서 이렇게 강한 신틸레이션이 나타나는 것은 드문 현상으로, 지자기 폭풍이 전 지구 전리권에 영향을 미쳤음을 의미한다. 강한 신틸레이션이 발생한 시간은 Fig. 3(a)에 빨간 상자로 표시하였으며, 밤에 나타난 급격한 TEC 증가와 관련 있는 것으로 보인다.

지자기 폭풍 기간 TEC 감소는 보통 열권 구성 성분 또는 전리권의 고도 변화와 관련이 있다[7,8]. 이번에 나타난 낮 동안 TEC 감소는 열권 구성 성분의 변화와 좀 더 관련이 있는 것으로 보인다. 그림 3(d)는 NASA TIMED(Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics and Dynamics) 위성의 GUVI(Global UltraViolet Imager)에서 관측한 산소원자(O)와 질소분자(N_2)의 비율(O/N_2)이다. O/N_2는 낮 동안 산소원자와 질소분자에서 나오는 방출선의 세기로 추정하기 때문에 낮에만 자료를 얻을 수 있다. 또한, TIMED 위성의 궤도 경사각은 74°로, 지자기 폭풍 기간 중 적도 부근 지방시(local time)가 오전 8시 30분이므로 여름인 북반구에서만 관측자료가 있다. 지자기 폭풍이 일어나면 가열에 인한 대기 팽창으로 열권의 O와 N_2의 비율이 변하는데, 그림에서 보듯 북반구 중 · 고위도 지역에서는 O/N_2가 감소하였다(짙은 파란색). 저위도에서는 O/N_2가 증가(붉은색)하는 것처럼 보이나, 이는 O/N_2 산출 시 전자밀도 증가에 의한 영향을 제거하지 못한 결과로 보인다[9,10]. 한반도 부근에서는 O/N_2 감소 영역이 보다 남쪽으로 확장했고 이 현상은 5월 12일까지 계속되었다. 다음 장에서 설명하겠지만, O/N_2 분포는 지자기 폭풍 중에 우리나라에 나타난 TEC 감소를 이해하기 위한 단서를 제공한다.

4. 토의와 결론

한국천문연구원은 전리권 변화를 감시하고 원인을 연구하기 위해 국내 · 외 전리권 관측 시스템을 구축해 왔고[11], 이를 통해 2024년 5월에 있었던 G5 지자기 폭풍동안 중요한 관측 자료를 얻을 수 있었다. 이 장에서는 수집한 자료의 의미를 분석하고, 앞으로 필요한 관측에 대해 알아본다.

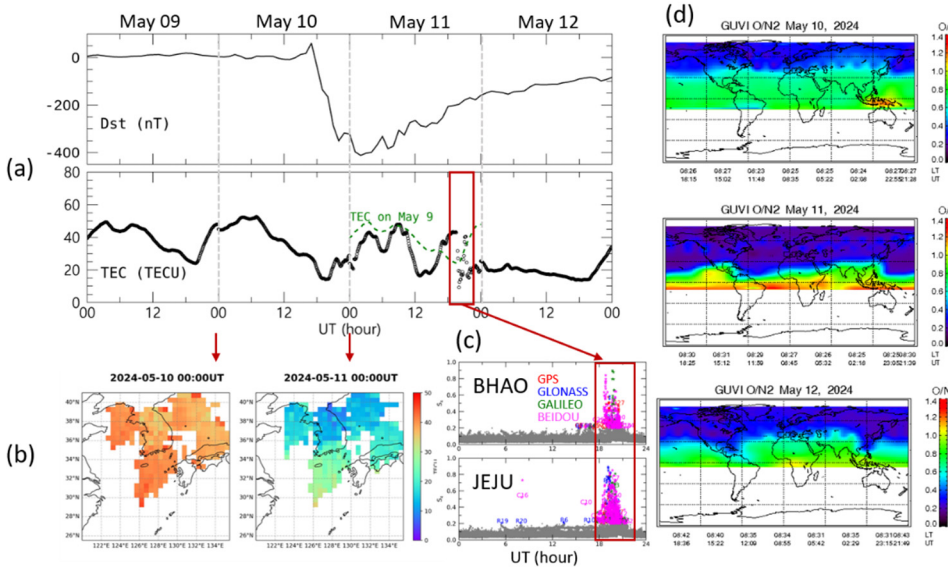


Fig. 3. Ionospheric and thermospheric disturbances during the storm. (a) QZSS TEC at Daejeon GNSS station, along with the Dst index. The green dashed line represents the TEC level on May 9 for comparison. (b) Comparison of TEC maps before and after the storm. (c) GNSS scintillations (S4 index) observed at Bohyun (BHAO) and Jeju (JEJU) stations. Different GNSS satellites are represented by distinct colors. (d) DMSP/SSUSI O/N_2 maps over three consecutive days. These maps are synthesized from observations at successive orbits each day. As the satellite moves westward, the observation times (UT) shift with longitude. QZSS, Quasi-Zenith Satellite System; TEC, total electron content; GNSS, Global Navigation Satellite System; DMSP, Defense Meteorological Satellite Program; SSUSI, Special Sensor Ultraviolet Spectrographic Imager.

이번 지자기 폭풍 동안 우리나라에 나타난 주목할 만한 현상 두 가지는 (1) 밤 동안 TEC 증가와 (2) 저위도 전리권 교란인 플라스마 버블과 비슷한 수준의 강한 신틸레이션이다. 일반적으로 지자기 폭풍 기간에 나타나는 TEC 또는 전자 밀도 변화는 전기장, 열권 구성 성분, 그리고 바람 변화와 연결해서 이해한다. 전리권 전자 밀도는 고도와 대기 구성 성분에 민감하게 반응하는데, 열권의 중성 대기 구성 성분이 고도에 따라 변하기 때문이다. 전리권 전자밀도는 대기 중 모든 이온의 총량과 같다. 이온의 대부분을 차지하는 산소 이온은 질소나 산소분자와 반응해 소멸하는데, 높은 고도에서는 질소와 산소 분자 밀도가 낮아서 산소 이온이 오래 살아남을 수 있고, 낮은 고도에서는 이들의 밀도가 높아 산소 이온이 빠르게 소멸한다. 지자기 폭풍이 일어나면 극지방으로 많은 에너지가 들어와 대기를 가열해 팽창시킨다. 이 때문에 높은 고도에서 평소보다 질소와 산소 분자가 늘어나 산소 이온이 빠르게 사라지므로 전리권 전자밀도가 감소한다. 대기의 가열은 주로 오로라 지역에서 일어나고 팽창한 대기는 들어오는 에너지양, 즉 오로라의 세기에 비례해 저위도로 확장한다. 따라서 오로라가 우리나라에서 보일 정도로 강하게 일어났던 이번 지자기 폭풍에서, 5월 11과 12일에 나타난 낮은 TEC는 이와 관련이 있으며 TIMED/GUVI가 관측한 O/N_2 분포를 통해 확인할 수 있다.

그러나 밤에 TEC가 증가하고 강한 신틸레이션이 발생한 이유는 명확하지 않다. 지자기 폭풍이 전리권의 높이를 변화시켜 전자밀도를 바꿀 수 있다. 하지만 Fig. 3(a)에서 보듯 TEC가 감소하다가 밤에 다시 증가하는 현상은 단순히 전리권 고도 변화만으로는 설명하기 어렵다. 지자기 폭풍 기간 중 EIA(equatorial ionization anomaly, 지자기 적도 플라스마가 자기력선을 따라 높은 위도로 이동해 적도에서는 감소하고 위도 ±10°–15°에서 증가하는 현상)가 중위도까지 확장해 TEC 증가를 불러올 수 있지만[12–14], 이는 확인이 필요하다. 5월 11일 18시에서 21시 사이에 나타난 신틸레이션은 보현산과 제주관측소 기준 남쪽에서 나타났으므로 우리나라 북쪽에서 보인 오로라와는 관련이 없는 것으로 보인다. 열권 바람에 의한 전리권 고도 상승과 이에 따른 플라스마 불안정성이 결합해 신틸레이션이 발생할 수 있으나, 다른 관측자료와 함께 분석하는 것이 필요하다.

전리권과 고층대기는 전 지구가 연결된 시스템으로 대한민국 상공에서 일어나는 현상을 지역 관측 자료만으로는 이해하기 어렵다. 극지방으로 들어오는 에너지와 대기 순환, 구성 성분의 변화 등에 대한 전 지구 관측 정보가 필요하다. 이를 위해 한국천문연구원은 국외 관측소를 설치하고 위성 프로그램을 개발 중이다. 2025년 발사 예정인 차세대중형위성3호 탑재체 ROKITS(Republic of Korea Imaging Test System)도 그 중 하나로, 오로라를 포함한 전 지구 전리권-고층대기 관측 자료를 제공할 것이다. 또한, 올해 말 고층대기 바람을 관측하는 페브리-페로 간섭계(Fabry-Perot Interferometer, FPI)를 보현산 천문대에 설치해 대기 순환을 비롯한 열권 변화 정보를 수집할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 한국천문연구원 주요사업 'GNSS 자료를 사용한 준 실시간 동아시아 전리권 변화 감시(2024-1-9-0201)'와 과학기술정보통신부 '우주용 광시야 대기광 관측 카메라 개발(2021 M1A3A4A06099441)', 한국연구재단(NRF-2018R1C1B6006700, NRF-2022R1C1C2 0095 91), 미국 National Science Foundation(NSF-AGS2029840)의 지원을 받았습니다.

References

1. Chung JK, Wu Q, Kim YH, Won YI, Solomon S, et al., Enhancement of OI 630.0 nm emission at mid-latitudes during an intense magnetic storm, J. Atmos. Sol. Terres. Phys. 69, 697-706 (2007). https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.01.010
2. Dang T, Li X, Luo B, Li R, Zhang B, et al., Unveiling the space weather during the Starlink satellites destruction event on 4 February 2022, Space Weather. 20, e2022SW003152 (2022). https://doi.org/10.1029/2022SW003152
3. Fang TW, Kubaryk A, Goldstein D, Li Z, Fuller-Rowell T, et al., Space weather environment during the SpaceX Starlink satellite loss in February 2022, Space Weather. 20, e2022SW003193 (2022). https://doi.org/10.1029/2022SW003193
4. Lin D, Wang W, Garcia-Sage K, Yue J, Merkin V, et al., Thermospheric neutral density variation during the "SpaceX" storm: implications from physics-based whole geospace

modeling, Space Weather. 20, e2022SW003254 (2022). https://doi.org/10.1029/2022SW003254

5. Zhang Y, Paxton LJ, Schaefer R, Swartz WH, Thermospheric conditions associated with the loss of 40 Starlink satellites, Space Weather. 20, e2022SW003168 (2022). https://doi.org/10.1029/2022SW003168
6. CACTUS, A software package for 'Computer Aided CME Tracking' (2013) [Internet], viewed 2024 July 28, available from: https://www.sidc.be/cactus
7. Buonsanto MJ, Ionospheric storms: a review, Space Sci. Rev. 88, 563-601 (1999). https://doi.org/10.1023/A:1005107532631
8. Yue X, Wang W, Lei J, Burns A, Zhang Y, et al., Long-lasting negative ionospheric storm effects in low and middle latitudes during the recovery phase of the 17 March 2013 geomagnetic storm, J. Geophys. Res. Space Phys. 121, 9234-9249 (2016). https://doi.org/10.1002/2016JA022984
9. Kil H, Paxton LJ, The origin of the nonmigrating tidal structure in the column number density ratio of atomic oxygen to molecular nitrogen, Geophys. Res. Lett. 38, L19108 (2011). https://doi.org/10.1029/2011gl049432
10. Lee WK, Kil H, Paxton LJ, Zhang Y, Shim JS, The effect of geomagnetic-storm-induced enhancements to ionospheric emissions on the interpretation of the TIMED/GUVI O/N_2 ratio, J. Geophys. Res. Space Phys. 118, 7834-7840 (2013). https://doi.org/10.1002/2013JA019132
11. Lee C, Lee W, Ionospheric and upper atmospheric observations in Korea, J. Space Technol. Appl. 1, 199-216 (2021).
12. Fagundes PR, Cardoso FA, Fejer BG, Venkatesh K, Ribeiro BAG, et al., Positive and negative GPS-TEC ionospheric storm effects during the extreme space weather event of March 2015 over the Brazilian sector, J. Geophys. Res. Space Phys. 121, 5613-5625 (2016). https:// doi.org/10.1002/2015JA022214
13. Lu G, Goncharenko L, Nicolls MJ, Maute A, Coster A, et al., Ionospheric and thermospheric variations associated with prompt penetration electric fields, J. Geophys. Res. Space Phys. 117, A08312 (2012). https://doi.org/10.1029/2012JA017769
14. Kim J, Kwak YS, Lee C, Lee J, Kam H, et al., Observational evidence of thermospheric wind and composition changes and the resulting ionospheric disturbances in the European sector during extreme geomagnetic storms, J. Space Weather Space Clim. 13, 24 (2023). https://doi.org/10.1051/swsc/2023025

Author Information

이 우 경 wklee@kasi.re.kr

과학기술연합대학원대학교(UST)에서 박사학위를 받은 후 2014년부터 한국천문연구원에서 일하고 있다. GNSS(위성항법)와 위성 관측 자료를 사용해 전리권과 고층대기를 연구하고 있으며, GNSS 자료를 사용한 준 실시간 전리권 감시 시스템과 차세대중형위성3호 탑재체 ROKITS 개발 책임을 맡고 있다.

길 효 섭 hyosub.kil@jhuapl.edu

1997년 텍사스 주립대학교에서 박사학위를 받고 코넬대학교에서 박사 후 과정을 거쳐 2000년부터 존스홉킨스대학교 응용물리연구소에서 근무하고 있다. 지구의 고층대기와 전리권의 상호작용, 전리권 전자밀도의 특성, 그리고 이들이 일으키는 우주날씨 변화를 연구하고 있다.

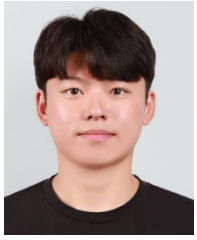
최 병 규 bkchoi@kasi.re.kr

2004년부터 한국천문연구원에 재직하고 있으며, 충남대학교 전자공학과에서 2009년 박사학위를 취득했다. 고정밀 단독측위(PPP), PPP-RTK, GNSS TEC 모델링 등을 연구를 수행하였으며, 현재는 한국형 위성항법시스템(KPS) 궤도 및 전리층 핵심기술 개발을 수행하고 있다.

홍 준 석 junseok@kasi.re.kr

2020년 충남대학교에서 우주 · 지질학과에서 우주과학 전공으로 박사학위를 취득한 후, 2017년부터 한국천문연구원에서 일하고 있다. GNSS TEC & DCB 분석 및 자료처리 기술 개발을 하고 있으며, 전리권 전자밀도 불균일 현상을 연구하고 있다.

정 세 헌 shjeong@kasi.re.kr



2022년 충남대학교에서 우주 · 지질학과에서 우주과학 전공으로 박사학위를 취득한 후, 2020년부터 한국천문연구원에서 일하고 있다. 딥러닝을 활용하여 GNSS TEC map 복원 및 예측하는 모델 개발을 하고 있으며, 중위도 지역의 전리권 현상을 연구하고 있다.

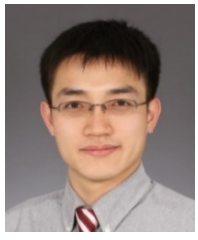
김 수 진 sjkim@kasi.re.kr

경희대학교 우주과학과에서 2009년 태양물리학으로 박사학위를 받았다. 2010년부터 2013년까지 일본국립천문대 노베야마전파관측소에서 박사후연구원으로 태양전파 연구를 수행하였으며, 현재 한국천문연구원 우주과학본부 책임연구원으로 재직 중이다. 태양 폭발, 코로나 플라스마 구조, 태양활동주기 등 태양의 다양한 활동과 태양활동으로 인한 우주환경 변화 연구를 수행하고 있다.

김 정 헌 kimjh@kasi.re.kr

충남대학교 우주지질학과에서 우주과학 박사학위를 취득하였으며, 2019년부터 한국천문연구원 태양우주환경그룹에 재직 중이다. 전리권/고층대기 플라즈마 이론모델을 활용한 다양한 연구를 수행해왔다. 현재는 차세대 우주환경 변화와 예측 연구 사업에 참여해 자기권-전리권/고층대기-중층대기 우주환경 통합모델을 개발 중이며, 자기권-전리권 커플링 연구를 수행하고 있다.

손 동 효 dhsohn@kasi.re.kr



인하대학교 공간정보공학과에서 박사학위를 취득한 후, 2019년부터 한국천문연구원에 재직하고 있다. GNSS 관측자료를 처리하여 전리권 총전자량, 대류권 대기 수증기량, 지각변동 등을 연구한다. 또한 선박기반 GNSS 자료를 이용하여 해양상공의 전리권 및 대류권 감시연구를 수행하고 있다.

Author Information

노 경 민 kmroh@kasi.re.kr

연세대학교 천문우주학과에서 2006년 박사학위를 취득했다, 독일 지구과학연구소(GFZ- German Research Center for Geosciences)에서의 박사 후 과정을 거쳐 현재 한국천문연구원에서 책임연구원으로 GNSS 데이터 처리, 정밀궤도결정과 우주 측지기술을 활용 연구를 수행 중이다. 현재는 한국형위성항법시스템(Korean Positioning System)개발에 참여하고 있다.

유 성 문 yoo@kasi.re.kr

연세대학교 천문우주학과에서 2009년 박사학위를 취득한 후, 2009년부터 한국천문연구원에 재직하고 있다. GNSS 관측자료를 활용한 지각변위와 지구기준계관련 연구를 하고 있으며, KVN (Korean VLBI Network)의 측지기준점 결정과 초정밀 광대역 VLBI 시스템을 활용한 시공간 정밀도 측정 연구에 참여하고 있다.

양 태 용 yty16@kasi.re.kr

과학기술연합대학원대학교(UST)에서 천문우주과학 박사학위를 받았으며 2019년부터 한국천문연구원에서 근무하고 있다. 초소형위성 개발과 운영에 참여하고 있으며, 위성 및 지상 관측자료를 활용하여 전리권/고층대기를 연구하고 있다.

박 재 흥 pj@kasi.re.kr

2000년대 초 인공위성연구소에서 과학기술위성 1호 고에너지 입자 검출기 개발 및 정전 분석기 지상 검교정, 과학기술위성 2호 저온 플라즈마 진단기 제작 등에 참여한 바 있고, 2014년부터 한국천문연구원에서 위성용 우주 환경 감시기 제작 및 자료 활용, 도요샛 지상국 구축 및 관제 업무 등을 수행하고 있다.

정 종 균 jkchung@kasi.re.kr

충남대학교 천문우주과학과에서 2005년 이학박사 학위 취득 후, 2006년부터 한국천문연구원에서 위성항법시스템 신호의 전리권 시간지연과 페이딩 현상을 연구하고, 남극내륙 고원 우주탐사 모듈을 개발하여 운영 중에 있다. 현재 한국형위성항법시스템 지상시스템 개발과 우주측지기술을 이용한 자연재해 연구 등을 수행하고 있다.

곽 영 실 yskwak@kasi.re.kr

경북대학교 천문대기과학과에서 이학박사 학위를 취득하였고, 미국립대기과학연구소(National Center for Atmospheric Research, NCAR)의 High Altitude Observatory(HAO)에서 박사후연구원과 방문연구원으로 근무하였다. 2007년부터 한국천문연구원에서 전리권/고층대기를 포함한 우주환경 변화 및 예측 연구를 수행해 오고 있다. 현재 태양우주환경그룹장으로서 차세대우주환경 연구팀을 이끌고 있으며, SNIPE(도요샛) 프로젝트와 차세대중형위성3호 탑재체(ROKITS) 개발 프로젝트에 project scientist로 참여하고 있다