J. Space Technol. Appl. 1(2), 178-198 (2021)
https://doi.org/10.52912/jsta.2021.1.2.178

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

논문

국내 우주환경 자료 보유 현황: 자기권

박경선[1†], 민경국[2], 한국우주과학회 태양우주환경분과[3]

[1]충북대학교 천문우주학과/기초과학연구소
[2]충남대학교 천문우주과학과
[3]한국우주과학회

Terrestrial Magnetospheric Observations and Models in Korea

Kyung Sun Park[1†], Kyungguk Min[2], Division of Solar and Space Environment of KSSS[3]

[1]Department of Astronomy and Space Science/Basic Science Research Institute, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea
[2]Department of Astronomy and Space Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea
[3]The Korean Space Science Society, Daejeon 34055, Korea

Received: July 28, 2021
Revised: July 30, 2021
Accepted: August 2, 2021

†Corresponding author :
Kyung Sun Park
Tel : +82-43-249-1750
E-mail : kspark@chungbuk.ac.kr

Copyright © 2021 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
Kyung Sun Park
https://orcid.org/0000-0002-3377-0111
Kyungguk Min
https://orcid.org/0000-0002-2095-8529

요 약

국내 태양우주환경 분야에서 널리 이용되는 자료와 모델의 이해와 활용도를 높이고, 세부 분야 간 공동연구의 기회의 장을 마련하고자, 최근 한국우주과학회 태양우주환경분과에서 국내 연구소와 대학을 중심으로 사용되는 태양우주환경 자료와 모델의 보유 및 활용에 대한 조사를 실시했다. 조사 결과를 크게 태양 및 행성간 공간, 자기권, 전리권의 세 분야로 나눠 정리하였고, 본 논문에서는 자기권 분야의 관련 자료와 모델을 소개한다. 자기권 연구의 특성 상 우주공간에서 지점관측을 위한 위성 개발과 운용에 투자가 많이 필요하여 국내 보유 자료는 다른 분야에 비해 상대적으로 적은 편으로 조사됐지만, 국내 지자기관측소를 통한 자기장 변화를 실시간으로 제공하고 있으며, 자기권 모델을 통해 꾸준한 연구를 수행 중이다. 본 논문에서는 자기권 분야 중 국내 위성자료를 이용한 연구들과 제 1원리 물리법칙에 바탕이 된 모델을 대표로 소개한다. 이번 조사 결과와 이를 정리한 논문이 우주과학 관련 자료에 대한 장기적이고 연속적인 관리에 대한 중요성을 인식하며, 우주과학 연구에 참여하는 다양한 인력들이 참조하여 국내에서 생산되고 있는 자료를 활용하여 국내 우주과학 자료의 위상을 높이는데 기여하기를 희망한다. 자료에 대한 조사 내용은 한국우주과학회 홈페이지에서 다운로드할 수 있다(http://ksss.or.kr/).

Abstract

The Solar Space Environment Division of the Korean Society of Space Science (KSSS) has recently conducted a survey among the domestic researchers affiliated with academia, national research institutes, and for-profit institutes of how the data and models in their professional research field are produced, maintained, and utilized. The primary purpose of this survey is to increase the awareness and utilization of the space environment data and models as well as to promote constructive collaborations among the domestic and international researchers. The models and data surveyed are categorized into three sub-fields: the solar and interplanetary space, the (terrestrial) magnetosphere, and the ionosphere and upper atmosphere. The present paper reports the survey results in the "Magnetosphere" category. The survey shows that the domestically produced data in this category are far less than the data produced in other

categories. This can be understood in part as follows: Magnetospheric research relies heavily on the *in-situ* observations but the development and operation of space-hardened satellites require a significant investment. Nevertheless, the recent publications show an increasing trend of research using the data from the ground stations and the recently launched domestic space missions. In the modeling front, there are first-principles physics models covering from the magnetospheric scale to the sub-ion scale and the models geared towards the space weather prediction. The detailed survey results can be accessed from the KSSS website (http://ksss.or.kr/).

핵심어 : 한국우주과학회 태양우주환경분과, 우주환경, 자기권, 관측, 위성, 모델
Keywords : Korean Society of Space Science (KSSS), space weather, magnetosphere, instruments, spacecraft, models

1. 서론

2000년대 초반에 본격적으로 국내에서 진행된 우주 환경(space environment)을 포함한 우주과학 관련 연구는 그 동안 미국을 중심으로 하는 해외 관측 자료 및 모델에 의존하여 진행해 왔다. 잘 설계된 지상 관측기의 네트워크 및 인공위성 자료는 국내에서 생산하고 활용하기가 매우 어려운 시기였다. 20년이 흘러 국내에서 우주 환경 연구가 활성화되어 관련 기관이 크게 증가하고, 연구 분야도 세분화되어 연구에 활용되는 관측 자료 및 모델 등이 다양해졌다. 그 동안 국내에서도 우주 환경 관련 지상 관측기 및 인공위성의 구축뿐만 아니라 모델 연구가 꾸준히 진행되어 왔다. 따라서 그 동안의 우주 환경 관련 자료의 현황과 그 활용 등에 대한 실정을 점검하고, 미래의 우주 환경 관련 자료에 대한 연속적인 관리에 대한 방안을 고려해 보고자 한다.

현재 국내에서 우주환경 자료를 서비스하는 기관은 한국천문연구원, 극지연구소, 국립전파연구원, 기상청이다. 한국천문연구원(Korea Space Weather Research Center, http://kswrc.kasi.re.kr/)은 2007년 우주환경 예보 센터 구축 사업을 시작으로 우주환경 연구를 본격적으로 시작하였으며, 연구목적의 우주환경 관측기를 개발하여 운영하고, 데이터 서비스를 제공하고 있다. 또한 태양, 자기권, 전리권/고층대기 분야의 전문가들로 구성되어 연구하고 있다. 극지연구소는 한국극지데이터센터(Korea Polar Data Center, https://kpdc.kopri.re.kr/)를 운영하고 있으며 극지에서의 우주환경 관측 데이터를 서비스하고 있다. 국립전파연구원은 2011년에 우주전파센터(Korean Space Weather Center, https://spaceweather.rra.go.kr/)를 개소하여 공식적인 우주전파환경 예·경보 서비스를 시작하였으며, 기상청 국가기상위성센터(National Meteorological Satellite Center, https://nmsc.kma.go.kr)는 2012년부터 우주기상예특보 업무를 시행하였다. 이 두 기관은 우주환경 예·경보를 목적으로 관측기 운영과 데이터 서비스를 제공하고 있다.

그러나, 국내에서 생산되어 보유하고 있는 우주 환경 관련 자료에 대한 정보 및 신뢰도의 부족으로 여전히 국외 자료를 활용한 연구를 진행되고 있는 실정이다. 이 논문의 결과가 우주과학 관련 자료에 대한 장기적이고 연속적인 관리에 대한 중요성을 인식하게 하며, 우주과학 연구에 참여하는 다양한 인력들이 참조하여 국내에서 생산되고 있는 자료를 활용하여 국내 우주과학 자료의 위상을 높이는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 또, 국내 우주 환경 관련

자료에 대한 소개를 통해 우주환경 연구의 발전과 함께 우주과학 내 세부 분야 간 융합 연구 기회 모색할 수 있는 기회를 제공하고, 신진 연구자들을 위한 연구 자료 및 방법에 대한 실질적 도움과 안내가 될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 자기권 자료 보유 및 활용 현황

우주 환경 관련 자료(지상관측기, 위성 및 모델)의 보유와 활용에 대한 조사는 한국우주과학회 태양우주환경분과의 소속 회원을 대상으로 2020년에 진행됐으며, 참여 기관은 우주 환경 관련 기관인 경희대학교, 국가기상위성센터, 극지연구소, 우주전파센터, 전남대학교, 충남대학교, 충북대학교, 한국천문연구원 및 KAIST 인공위성연구소 내 우주 환경 관련 자료에 대한 보유 및 활용을 조사하였다. 우주 환경 자료는 크게 지상 관측기, 인공위성, 모델의 범주로 분류하였고, 우주환경의 영역은 태양, 고층대기, 전리권, 자기권, 행성간, 우주탐사, 우주감시, 우주기술로 구분하였다. 자료에 따라 필요한 특성과 정보를 각각 달리하여 자료를 기술할 수 있도록 자료 구성 및 설명을 표의 형태(Table 1-3)로 제공하였다. 특히, 해당 자료를 활용하여 출판한 논문을 소개하여 자료 구성을 더 쉽게 이해하고, 자료에 대한 신뢰도를 높이고자 하였다. 본 논문에서는 우주 환경의 영역 중 자기권 자료에 대한 보유 및 활용에 대해서 설명하고자 한다.

Fig. 1은 각 대학과 기관에서 보유한 자기권 모델과 인공위성 및 지상 관측기 현황이다. 자기권 모델은 주로 대학에서 보유하고 있으며, 인공위성의 자료와 지상 관측기 자료는 주로 연구원이 보유하고 있다. 자기권 연구분야의 특성상 *in-situ* 관측자료가 주로 이용되므로, 개발과 운용에 비용이 많이 드는 인공위성 자료는 대부분 국외 자료에 의존하고 있다. 자기권 관련 국내 위성 자료는 기상청에서 제공하는 천리안2호와 KAIST 인공위성센터의 NEXTSat-1이 있다. 지상관측기로는 지자기 관측기가 주를 이루며, 국가기상위성센터, 우주전파센터, 한국천문연구원에서 국내 곳곳에 지자기 관측기를 운용하고, 극지연구소에서 남극에 관측기를

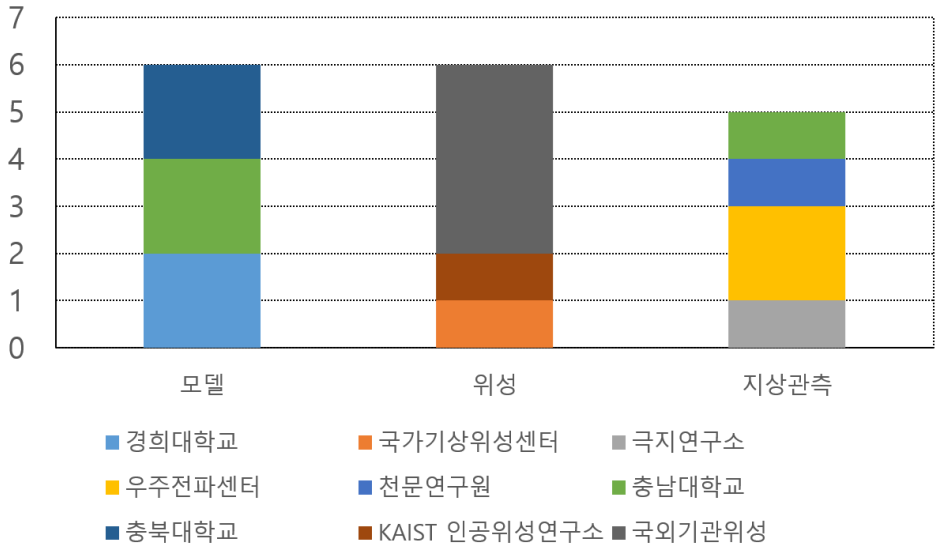


Fig. 1. Current status of magnetosphere models and *in-situ* observation by universities and institutions.

설치 운용하고 있다. 대학은 위성 또는 지상 관측기 개발에 주도 또는 참여하거나, 주로 이들의 자료를 활용하여 연구를 수행한다. 한편, 모델로는 큰 규모의 태양풍-자기권-전리권 상호작용을 연구하는 3D 글로벌 MHD(magnetohydrodynamic) 모델, 자기권 내 저주파, 큰 규모의 플라스마 파동을 모사하는 MHD 파동 모델, 그보다 작은 규모의 Kinetic Physics을 연구할 수 있는 Hybrid PIC(Particle-in-Cell) 모델, 그리고 방사선대 고에너지 전자와 플라스마 파동의 예측에 사용되는 방사선대 예측 모델로 정리할 수 있다. 이들은 Table 1-3에 정리되어 있다.

Table 1은 우주환경 관련 기관이 보유한 모델을 보여준다. 하이브리드, PIC 시뮬레이션을 활용한 자기권 수치 모델은 경희대학교와 충남대학교에서 수행 중이며, 여러 연구들 중 EMIC(Electromagnetic ion cyclotron) 파동의 발생 메커니즘, 주변 이온 분포에 주는 영향 등을 관측 자료와 비교 분석하여 MHD 이론에서 얻을 수 없는 Kinetic Physics를 수행하는 연구도 포함된다. 또한, 경희대학교는 자체 개발한 3D MHD 파동 모델을 이용하여 ULF 파동으로 불리는 자기권 규모의 파동을 연구하기도 한다. 특히 자기권 ULF 파동의 전기장, 자기장 데이터와 파동의 편광, 시간에 따른 변화와 공간으로의 전파, 파동 에너지의 흐름 등을 계산하고 있다. EMIC 파동과 ULF 파동은 방사선대 내 전자 플럭스에 큰 영향을 미치는 파동들로 알려져 있어 글로벌 MHD 모델, 방사선대 모델을 포함한 공동연구에서 큰 성과를 가져올 수 있을 것으로 기대한다.

한국천문연구원은 자기권과 전리권 고층대기를 아우르는 수치모델 KREAM(Korean Radiation Exposure Assessment model)을 보유하여 고도 0-100 km 상공의 위도, 경도, 고도 약 1° × 1° × 100 m 단위 셀당 우주방사선 유효선량, 등가 선량, 그리고 흡수선량을 제공하고 있다(Fig. 2). 최근 KREAM 모델을 활용한 관련 연구가 수행되고 있으며[1], 활용방법은 담당자에게 문의하여 제공받을 수 있다.

3차원 글로벌 MHD 시뮬레이션을 활용하여 태양풍-자기권-전리권 상호작용 연구는 충북대학교에서 유일하게 수행 중이며, 태양활동에 따른 자기권과 더불어 전리권 반응까지 아우른 현상을 확인하고 있다. 더욱이 매우 복잡한 형태의 자기권 즉 자기축 기울기가 포함된 시뮬레이션 연구는 국외에서도 그 예가 적다. 시뮬레이션 입력 요소는 태양활동 감시 위성에서 관측한 실시간 태양풍과 자기장 요소로 사용하거나, 상황에 따라 정상상태 태양풍과 자기장을 사

Table 1. Current status of magnetosphere models in Korea

Model	Institute	Classification	Condition
Hybrid Simulation Code	경희대학교/충남대학교	수치 모델	보유
3D MHD(magnetohydrodynamic) Wave Model	경희대학교	수치 모델	보유
KREAM(Korean Radiation Exposure Assessment Model)	천문연구원	수치 모델	보유
PIC Simulation Code	충남대학교	수치 모델	보유
3D Global MHD Simulation Code	충북대학교	수치 모델	보유
Particle and Wave Prediction Model in Radiation Belt	충북대학교	수치 모델	보유

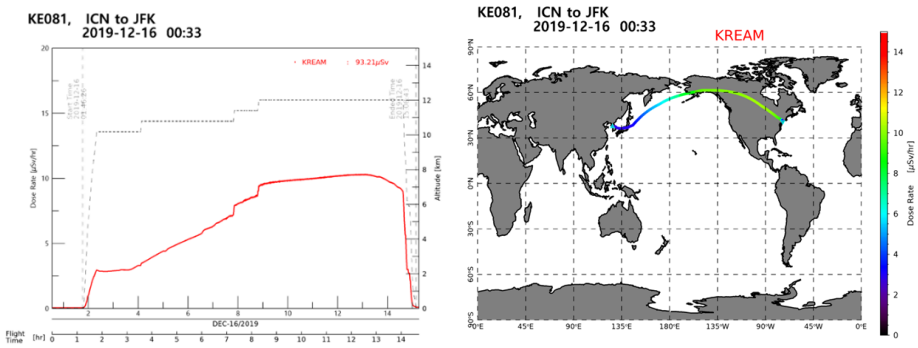


Fig. 2. KREAM usage example. Provided by Hwang, J. in KASI with permission. KREAM, Korean Radiation Exposure Assessment Model.

용한다. 이러한 시뮬레이션은 지구 자기권뿐만 아닌 행성 자기권(수성 및 목성, 토성, 천왕성, 해왕성)의 연구로 확장되어 수행 중이다.

또한 충북대학교 연구팀은 입자와 파동의 환경 변화 예측 모델을 개발하여 내부 자기권 영역까지 확장된 연구[2]를 수행 중이며, 지구 자기권 내 파동 분포 예측 모델(Fig. 3)뿐만 아니라, 거대 행성인 목성과 토성 주변 파동 입자 상호작용에 의한 방사선대 내 입자 분포 예측 모델도 개발하여 정확한 우주날씨 예보에 기여를 할 것으로 기대된다. 방사선대 입자 분포 예측 모델과 자기권 내 파동 분포 예측 모델은 국내에서 유일한 연구분야로, 태양풍의 물리량을 방사선대 입자 분포 예측 모델의 입력 요소로 사용하여 지자기 지수, 방사선대 내 플럭스 및 플라스마 파동의 세기와 특성을 나타내는 변수들로 데이터가 구성된 행성(지구, 목성, 토성)에 대해

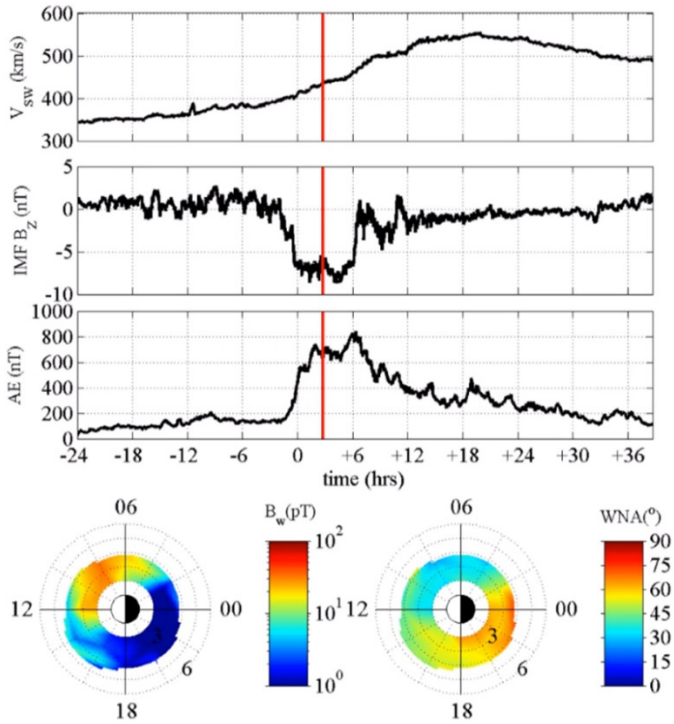


Fig. 3. Example of wave distribution prediction model in Earth's magnetosphere. Provided by Kim, K. C. in Chungbuk National University with permission.

주변 파동 환경 변화 물리량을 도출하고 있다. 글로벌 MHD 모델과 방사선대 입자 예측 모델 결과는 연구 목적이 강하여 비공개로 진행되지만, 필요에 따라 공동연구 형태로 진행될 수 있다.

Table 2는 우주환경 관련 기관이 보유하고 있는 자기권 영역에 대한 위성 자료 현황을 정리한 것이다. 위성 관측 자료를 활용한 자기권 분야 연구의 대부분은 국외 자료를 사용하여 자기권에서 발생한 EMIC 파동, Chorus 파동, ULF 파동 등 주로 플라스마 파동의 연구가 수행되고 있다. 이는 우주날씨와 직접적으로 연관된 지구 외부 방사선대의 전자 플럭스 변화의 직접적인 요인으로 광범위한 전자기파 스펙트럼에서의 플라스마 파동이 주요한 역할을 하는 것으로 알려져 있기 때문이다. 예로, Fig. 4에서 EMIC 파동과 Chorus 파동이 같은 위치에서

Table 2. Current status of satellite data in magnetosphere

Satellite	Institute	Classification	Condition
Van Allen Probes (RBSP)[1)]	경희대/충남대/충북대	위성	활용
THEMIS[1)]	경희대/충북대	위성	활용
MMS[1)]	경희대학교	위성	활용
Cluster[1)]	경희대학교	위성	활용
NEXTSat-1	충북대학교	위성	활용
천리안위성 2호(GK2A)	기상청	위성	보유 활용
NEXTSat-1	인공위성센터	위성	보유

[1)] 국내연구진이 주로 활용하고 있는 해외 위성 미션이다.

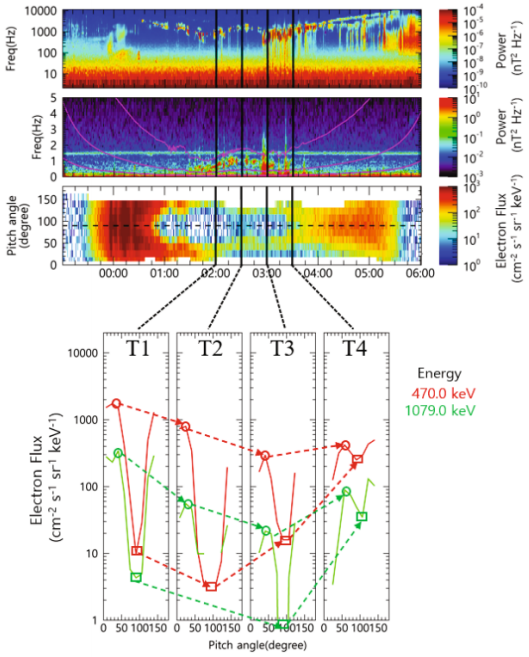


Fig. 4. RBSP-A satellite observations showing chorus wave (top), EMIC wave (second), the directional flux of 1,079 keV electrons (third), and temporal snapshots of directional fluxes of electrons at two energies (bottom). Adapted from Lee et al. [2] with permission of Journal of the Korean Physical Society.

동시에 존재할 경우 전자 플럭스가 크게 감소한다는 최신 연구 결과[3]로, Van Allen Probes (VAP) 위성과 THEMIS 위성의 전자와 이온 플럭스, 자기장과 플라스마 밀도 등의 데이터를 이용하여 Chorus와 EMIC 파동의 발생을 확인하여 분석하였다.

또한 경희대학교는 자기권 관측 위성 MMS와 Van Allen Probes(RBSP)을 활용한 연구를 수행 중이다. MMS(Magnetospheric Multiscale) 위성은 자기권에서 발생한 자기재결합과 같은 작은 영역의 물리를 이해하기 위해 4개의 위성이 10-400 km 거리를 유지하며 편대비행하면서, 근지점과 원지점이 약 0.4 Re, 25 Re로 변하며, 플라스마 물리량을 측정한다[4,5]. 전자와 이온의 밀도, 온도, 속도의 성분과 크기, 에너지 플럭스, 자기장 성분과 크기, 위성의 자세 정보 등을 확인할 수 있다(Fig. 5). 이온은 30 ms, 전자는 150 ms, 전기장과 자기장은 1 ms의 해상도로 제공한다. Quiklook plot 및 사용 가능한 데이터 상태나 데이터 다운로드, 데이터 처리 관련 소프트웨어 등에 대한 정보는 MMS Science Data Center(https://lasp.colorado.edu/mms/sdc/public/)[6]에서 얻을 수 있다.

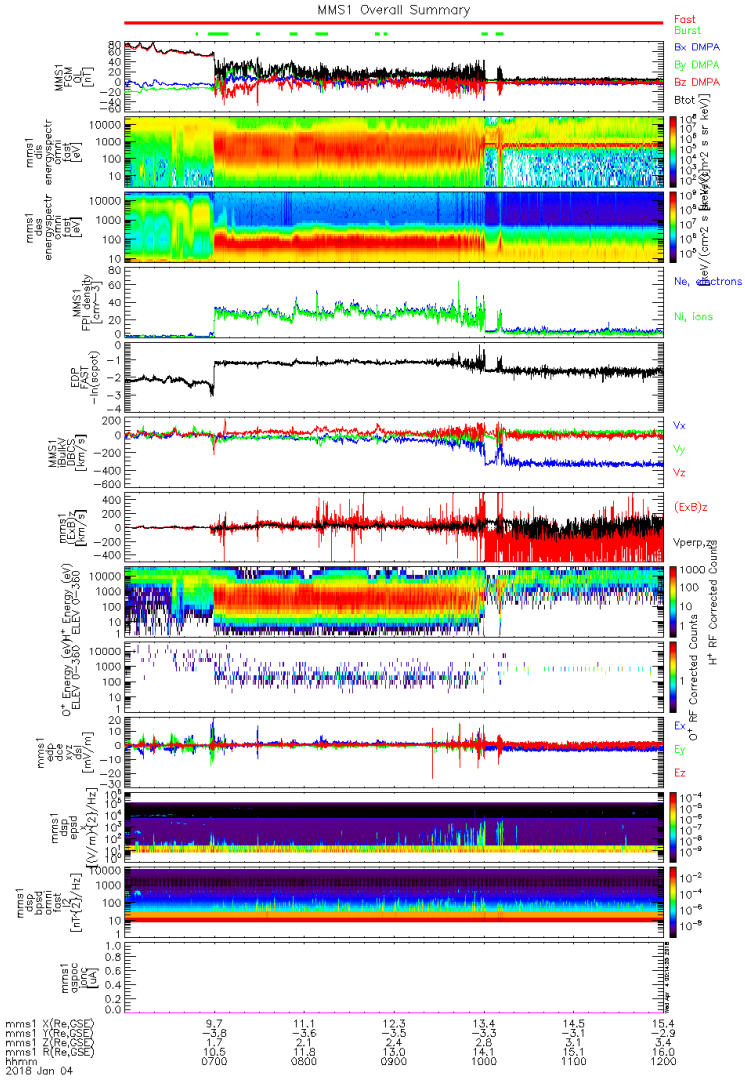


Fig. 5. MMS satellite observation data. Provided by Kim, H. E. in KyungHee University with permission.

2019년 종료된 Van Allen Probe(RBSP) 위성은 NASA에서 서비스하는 CDAWeb(https://cdaweb.gsfc.nasa.gov) 또는 science gate way(https://rbspgway.jhuapl.edu)를 통해 7년여(20212.10-2019.07)의 위성 데이터를 사용할 수 있으며, 정지궤도 안쪽 플라스마권과 자기권의 자기 적도면에 가까운 타원궤도를 선회하면서 환전류와 방사선대에 초점을 두어 관측을 수행했다[7]. 방대한 에너지 대에서 측정한 전자와 이온 플럭스, 넓은 주파수 대에서 측정한 전기장, 자기장 자료를 제공한다[8,9]. Fig. 6은 2015년 4월 29일~5월 1일 동안 RBPS-B위성이 관측한 양성자 분포이다.

국내에서 운영하는 자기권 관측 위성으로 기상청 국가기상위성센터가 보유한 정지궤도위성인 천리안 2A호(GK2A)가 있는데, 위성의 주 목적은 상시 기상관측이다. 자기권 관측 데이터로 자기장과 전류 밀도를 2019년 7월 25일부터 공개하고 있다. Fig. 7은 GK2A 위성이 제공한 자기장과 전류밀도 데이터를 보여준다. GK2A 위성이 기상위성인 점을 감안하면 자기권 연구에 한계가 발생할 수 있지만, 다른 위성 자료와 비교 연구 등에 활용 가능하다. 한 예로,

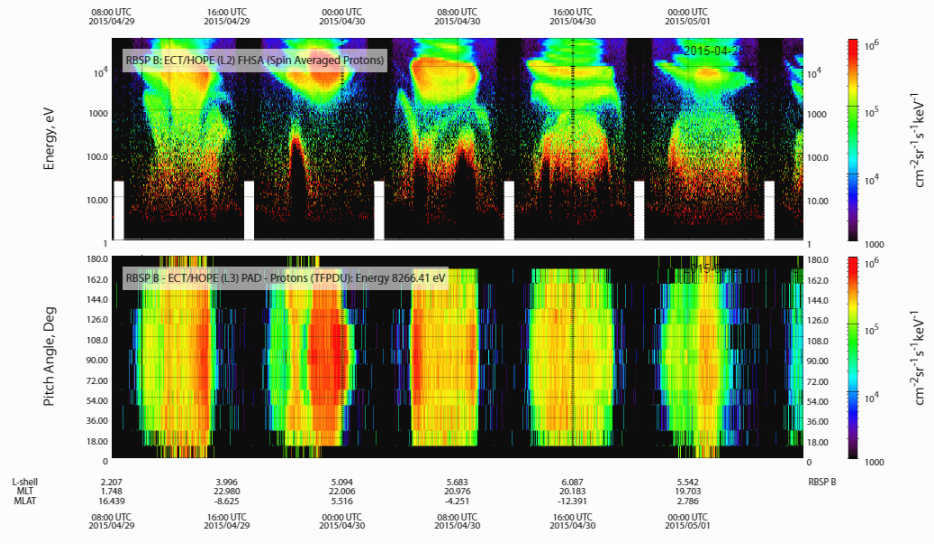


Fig. 6. RBSP-B satellite proton data from L2 (up) and L3 PAD (pitch angle distribution) (bottom). Provided by Lee, J. H. in KyungHee University with permission.

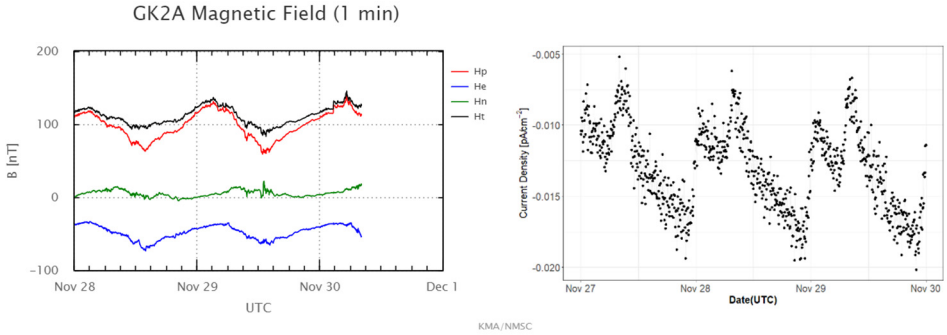


Fig. 7. Magnetic field and current density by Cheolloan 2A satellite from National Meteorological Statellite Center of Korea Meteorological Administration.

다른 위치의 정지궤도 위성 자료들과 함께 태양활동에 따른 정지궤도에서 자기장 변화를 낮-밤, 동-서 지역에서 동시에 관측하여 그 2차원적인 현상 연구를 생각해 볼 수 있다. Fig. 8은 기상청 국가기상위성센터에서 제공[10]하는 자료 검색 방법과 자료 수신 및 활용 현황, 생산물 산출 정의 등이 포함된 URL이다(http://datasvc.nmsc.kma.go.kr/datasvc/html/main/main.do).

또한 인공위성센터(SaTReC)에서 개발된 차세대 소형위성(NEXTSat-1)은 약 100 kg급 위성으로 2018년 12월 4일 발사되었다. 우주과학 분야의 과학적 임무로 우주폭풍연구를 위한 탑재체가 포함되어 있는데, Medium-Energy Particle Detector(MEPD)와 High-Energy Particle Detector(HPED)에서 검출한 에너지 스펙트럼을 분석하여 주로 외방사선대의 상대론적 전자와 양성자 이벤트를 모니터링하고 있다. 차세대 소형위성의 데이터는 회원 공개가 원칙이며, 직접 관측 데이터를 활용한 최신 연구 동향은 2.1에 다시 소개한다.

Table 3은 우주환경 관련 기관이 보유하고 있는 자기권 영역에 대한 지상 관측기 자료 현

Fig. 8. GK2A data by the Korea Meteorological Administration. Adapted from National Meteorological Statellite Center of Korea Meteorological Administration.

Table 3. Current status of holding data from ground based observe in the magnetosphere

Instrument	Institute	Classification	Condition
지자기 관측기	국가기상위성센터	관측	보유(청양)
지자기 관측기	우주전파센터	관측	보유(이천, 제주, 강릉)
유도전류 관측기	우주전파센터	관측	보유(가평)
지자기 관측기	한국천문연구원	관측	보유(보현산)
지자기 관측기	극지연구소	관측	보유(남극)
지자기 관측기(보현산)	충남대학교	관측	활용

황을 정리한 것이다. 우주전파센터, 천문연구원, 국가기상위성센터, 그리고 극지연구소는 지구 자기장 3성분(H, D, Z)을 측정할 수 있는 지자기 관측기를 보유하고 있는데, 우주전파센터는 이천, 제주와 강릉에, 한국천문연구원은 보현산, 국가기상위성센터는 청양, 극지연구소는 남극에 설치되어 데이터를 생산하고 있다. 특히 지자기 성분 변화 감시로 Kp 지수를 산출하는 등 우주환경 예보에 활용 중이다.

우주전파센터에서 제공하는 실시간 지구 자기장 관측 데이터[11]는 다음 URL에서 확인 가능하며(https://spaceweather.rra.go.kr/observation/ground/magnetism/icheon), 데이터 형태는 ASCII와 그림파일에서 동시에 확인 가능하여 사용자가 쉽게 접근할 수 있다(Fig. 9).

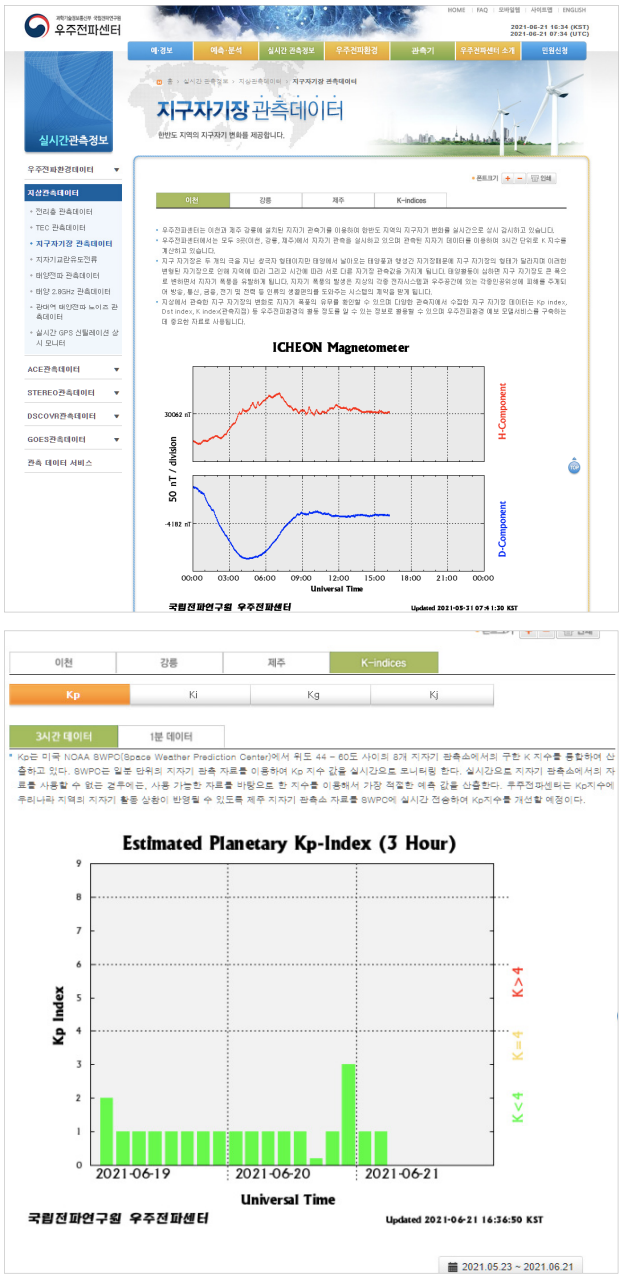


Fig. 9. Real-time data of geomagnetic field (at Icheon, Gangneung, Jeju) and Kp index change by Korean Space Weather Center of the National Radio Research Agency.

또한 지자기 교란에 의해 발생하는 유도전류 또한 사용자 요청 시 ASCII 형태 파일로 제공하고 있다(Fig. 10).

한국천문연구원은 보현산 지자기 관측 데이터[12]를 1분 간격의 ASCII 형태로 제공하고 있다(Fig. 11). 특히 플럭스게이트는 2008년 12월부터, 양성자는 2009년 12월부터, 자기장은

Fig. 10. Geomagnetically Induced Current Measuring System by Korean Space Weather Center of the National Radio Research Agency.

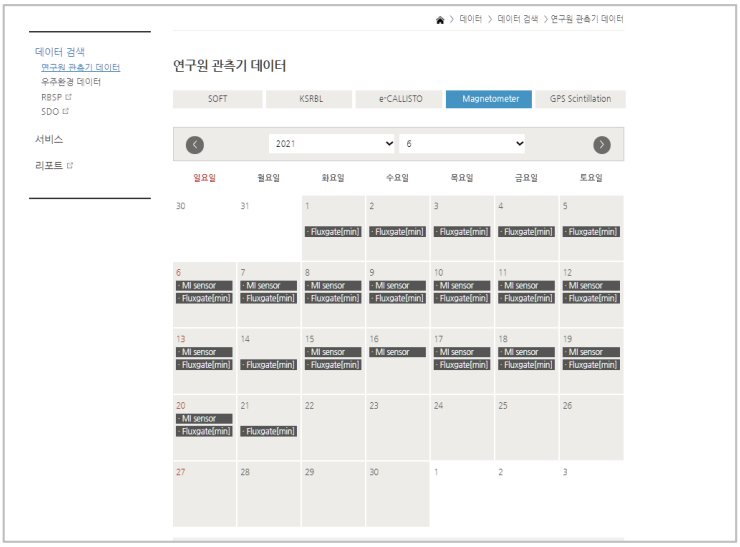


Fig. 11. Magnetic field data (Mt. Bohyeon) provided by Korea space Weather Research Center in KASI.

2009년 12월부터 관측을 시작하여 지금까지 제공하고 있다. 관련 데이터는 다음 URL(http://kswrc.kasi.re.kr/ko/data/browser)에서 직접확인이 가능하다. 최근 자기권의 EMIC 파동에 기인한 Pc1 pulsation을 보현산 지자기 자료를 이용해 통계적으로 연구한 결과도 보고된 적이 있다[13].

다음에서 국내 우주환경 관련 기관에서 보유하고 있는 자기권 위성관측 결과와 모델을 소개한다.

2.1 국내 위성 관측 결과

국내 차세대 소형위성(NEXTSat-1)의 관측자료를 활용하여 자기부폭풍이 진행되는 동안 관측된 입자 플럭스 증가 데이터를 분석한 연구 결과가 최근 발표됐다[14]. 이 연구에서 자기부폭풍 동안 수십 keV 에너지를 가진 입자들의 유입으로 인한 입자 플럭스 증가를 확인하였으며, 넓은 대역의 전자 에너지 범위(수십 keV에서 수 MeV)에 대한 전자 분포의 특성을 보고하였다. Fig. 12는 2020년 8월 2일 MEPD 관측 결과로 위에서부터 각각 입사된 전자(a), MEPD-A에서 검출된 양성자 플럭스(b), MEPD-B에서 검출된 포획된 전자 플럭스(c)와 이온 플럭스이며, 이때 NEXTSat-1 위성은 오로라 영역에 해당하는 밤지역 L > 6인 곳에 위치해 있었다. 포획된 입자들이 MEPD-B에서 보이지만 플럭스의 증가는 매우 좁은 에너지 대역에서 보여 이러한 양상이 자기부폭풍때 입자가 투입된 것으로, GOES-17 위성에서도 관측됐다.

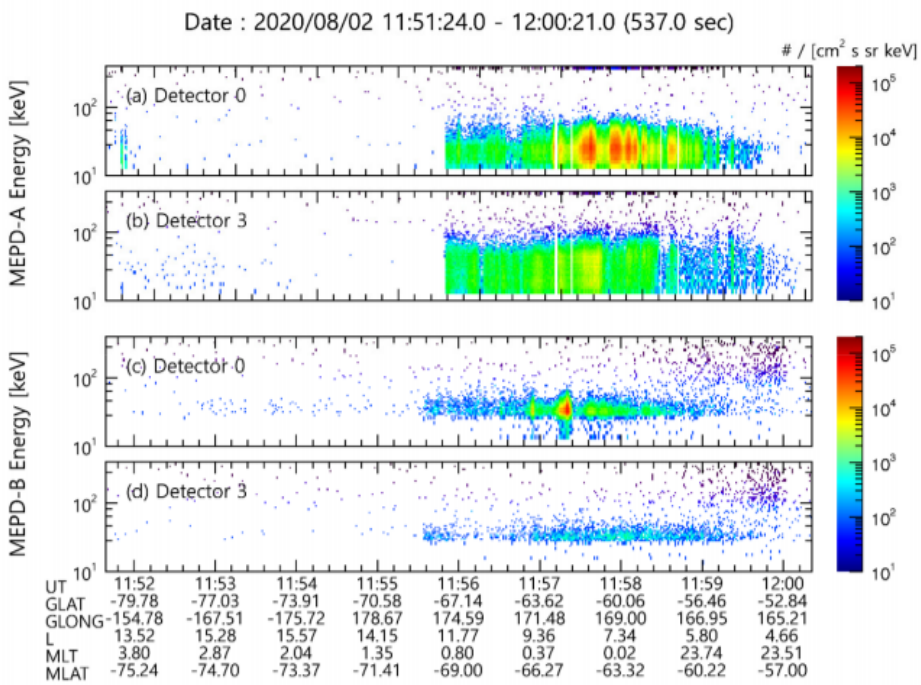


Fig. 12. MEPD observations from 11:51 to 12:01 on August 2, 2020. (a) Precipitating electron and (b) proton fluxes from the MEPD A telescope. (c) Trapped electron and (d) proton fluxes from the MEPD B telescope. MEPD, Medium-Energy Particle Detector, Adapted from Yoo et al. [14] with CC-BY-NC.

특히, Fig. 13에는 외방사선대의 안쪽 위치를 확인하기 위해 2019년 7월부터 2020년 11월까지 관측한 Dst, Kp 지수(Fig. 13a), NEXTSat-1에서 관측한 1,420 keV와 505 keV 전자 에너지 플럭스(Fig. 13b, c) 그리고 플라스마권계면 위치의 자기구각변수 (L) 값(Fig. 13b, c 붉은 선)의 변화를 확인했다. Dst와 Kp지수로 확인된 자기권 교란 상태에서는 플라스마권계면의 내부 경계(L)가 지구 쪽에 더 가까운 낮은 쪽에 위치하며, 이러한 양상은 두 밴드의 전자 플럭스 증가와 매우 유사함을 확인했다. 이번 연구 결과로 국내 자기권 관측 위성 NEXTSat-1 데이터는 국내 연구진의 연구에 큰 기여를 할 것으로 기대한다.

2.2 국내 보유 모델

시뮬레이션을 통해 우주 플라스마 운동을 조사할 경우, 블라소프 방정식과 플라스마 입자의 운동을 풀어서 수행할 필요가 있지만, 지구 자기권과 같은 큰 영역에서는 자기유체역학(MHD) 근사가 잘 성립하여, 태양풍-자기권 상호작용에 주로 글로벌 MHD 모델을 사용한다. 글로벌 MHD 모델이 1984년 처음 개발된 후 미국과 일본 등의 연구기관과 대학교에서 앞다

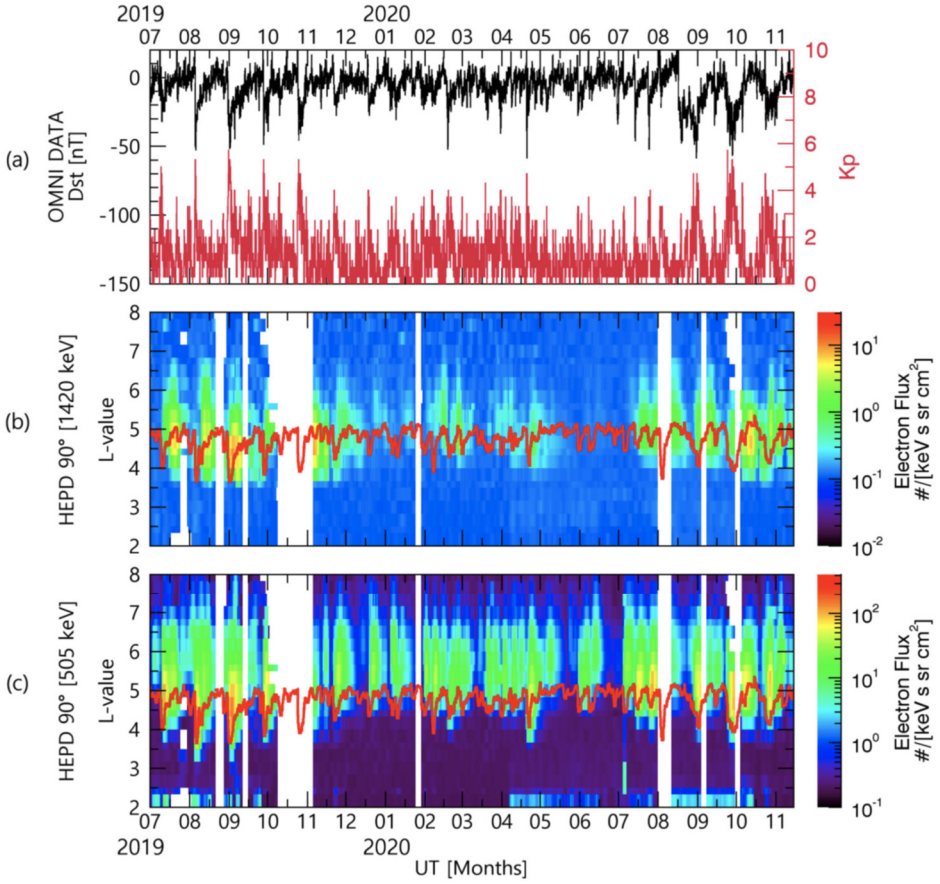


Fig. 13. Observations from July 2019 to November 2020. (a) Dst (black) and Kp (red) indices. (b)–(c) Electron fluxes at 1,420 keV and 505 keV from the HEPD. The red lines in (b) and (c) indicate the plasmapause L values, L_{pp}, determined by the model, Adapted from Yoo et al. [14] with CC-BY-NC.

투어 개발과 연구가 수행됐는데, 이는 우주환경 연구 분야의 위성과 지상 관측 기술의 향상과 더불어 꾸준히 모델 개발의 필요성이 요구되어 있기 때문이다. 특히 근지구 우주환경 현상을 물리적 과정의 기반을 두고, 태양-지구 환경을 모사할 수 있는 모델 개발이 그 목적이며, 최근에는 태양활동 모델로부터 태양풍, 자기권, 전리층 그리고 열권에 해당하는 각각의 모델을 결합하여 그 물리적 과정들이 상호 연결되도록 시도하고 있다.

국내에서도 3차원 글로벌 MHD 수치모델을 사용하여 태양풍 변화에 따른 지구 자기권과 전리권 반응 시뮬레이션 연구를 수행 중이다. 시뮬레이션 입력 요소는 태양-지구 주변 우주환경 감시 위성인 ACE나 WIND 위성에서 관측한 태양풍의 밀도, 속도, 동압력, 그리고 행성간자기장(interplanetary magnetic field, IMF) 성분의 1분 데이터를 사용하여 자기폭풍과 자기부폭풍 같은 이벤트 연구를 수행하거나, 정상상태 태양풍과 IMF의 평균적인 값을 사용하여 자기권의 물리 현상을 연구하고 있다. Fig. 14는 글로벌 MHD 모델에 사용되는 지구 dipole자기장 형태의 초기 설정으로 태양풍과 IMF(X축 앞)가 지구 자기권과 충돌하며 흘러가도록 한다.

우주환경 연구에 주요한 관심은 자기권 교란 현상이 왜 발생하는지 이해하는 것이다. 그래서 많은 글로벌 MHD 시뮬레이션 연구는 태양활동에 따라 발생한 자기폭풍, 자기부폭풍과 같은 자기권 교란 현상의 발생 원인을 찾는데 집중되어 있다[15,16]. 하지만 매우 조용한 상태의 태양풍이 4시간 이상 자기권을 통과하여 발생하게 될 자기권과 전리권 반응 또한 시뮬레이션으로 구현한 결과도 있다[17]. 시뮬레이션 입력 요소로 사용된 태양풍의 밀도, n_{sw} = 5 cm^{-3}, 속도, V_{sw} = 300 km/s, IMF Bz = − 2 nT이다.

Fig. 15는 조용한 태양풍과 자기권 충돌 시뮬레이션 결과로 2차원 자기력선(a, b) 구조, 자기권 플라스마 흐름(c), 전리층의 횡단극전위(d)이다. Fig. 15a, b는 낮지역과 자기권꼬리 영역에서 발생한 자기재결합(a)과 자기권계면(b)에서 발생한 소용돌이 형태의 플라스마 구조가 매우 잘 구현되었다. 자기권계면에서 발생한 소용돌이는 일반적으로 알려진 현상과 다른 양상을 보인다.

보통 IMF가 남쪽을 향하면 자기권계면에서는 자기재결합이 효과적으로 발생하고, IMF가 북쪽을 향하면 켈빈 헬름홀츠 불안정성(Kelvin-Helmholtz Instability)같은 점성작용(Viscous-like Interaction)이 발생한다고 보고된다. 하지만, 본 연구를 통해 매우 조용한 태양풍과 남쪽 성분 IMF가 자기권과 장시간 충돌할 경우에 발생한 자기권계면의 소용돌이 현상을 보였

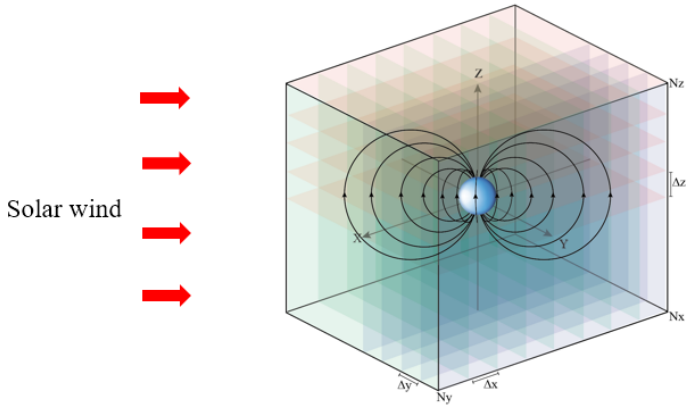


Fig. 14. Dipole magnetic field used by MHD simulation.

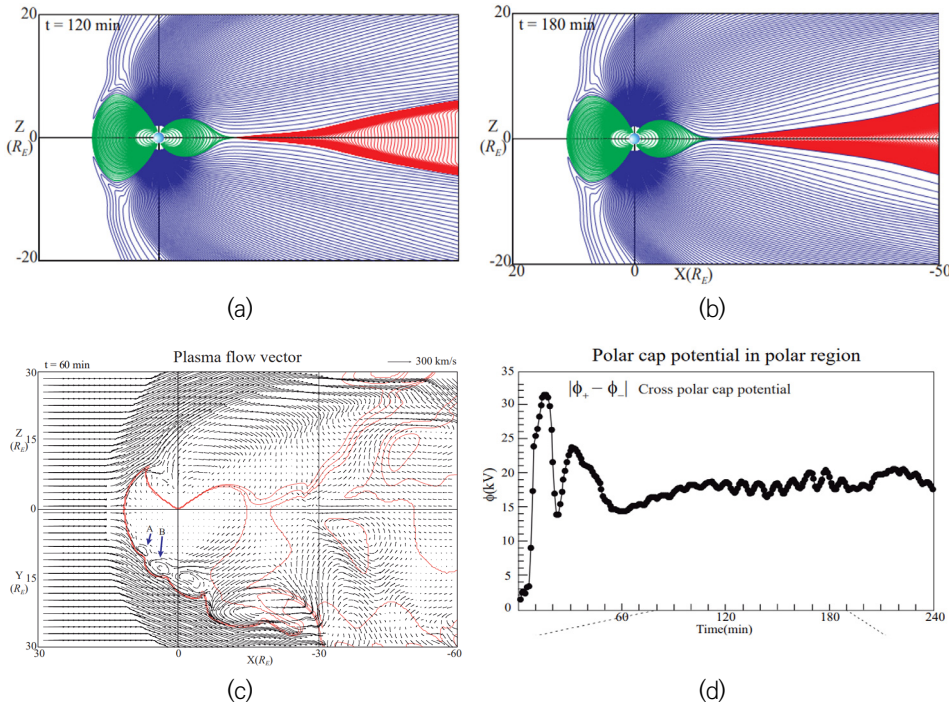


Fig. 15. Simulation results for the interaction between the Earth's magnetosphere and weak solar wind during the southward IMF. Adapted from Park et al. [17] with CC-BY-NC.

다. 또한 이러한 자기권계면의 소용돌이가 8-10분의 주기로 발생(Fig. 15c) 하여 자기권꼬리 지역으로 이동하는데, 이는 낮지역 자기권에서 지속적으로 발생한 자기재결합이 그 원인이었다(Fig. 15a, b). 더불어 자기권의 이러한 현상이 전리권의 극횡단 전위 변화 양상에 크게 기여하여, 극횡단전위의 8-10분의 주기의 증가와 감소를 보였다(Fig. 15d). 그러나 시뮬레이션 격자 크기 변화에 따른 구조적 현상도 확인할 필요가 있다.

또한 3차원 글로벌 MHD 시뮬레이션의 주요한 이점은 다양한 형태의 태양풍과 복잡한 구조의 자기권 충돌 연구를 수행할 수 있는 것이다. 특히 자기축 기울기가 포함된 복잡한 구조의 자기권 시뮬레이션은 그 예가 많지 않다. Fig. 16은 자기축 기울기에 따라 낮지역 자기권에서 발생하는 자기재결합의 위치 변화이다. 자기축 기울기가 0°에서 45°까지 변하면 자기재결합 위치는 30% 차이로 자기권꼬리영역의 hinging distance 변화는 약 8% 차이를 보였다(Fig. 16 오른쪽 아래).

더불어 자기축 기울기와 IMF의 효과를 동시에 고려한 3차원 글로벌 MHD 시뮬레이션은 복잡한 구조를 풀어야하며 장시간의 연산과 대용량 스토리지가 요구된다. 그럼에도 불구하고 이러한 태양풍과 복잡한 자기권 충돌 시뮬레이션 연구가 수행[16,18,19]되어 위성 관측과 비교할 수 있는 결과들를 도출했다. 다음 Fig. 17 지구의 자기축이 30도 기울어져 있으며, Bz+By 성분을 동시에 갖는 IMF가 자기권과 충돌 후 자기권과 전리권 반응 시뮬레이션 결과들이다. Fig. 17a는 IMF의 각도가 330도로 남쪽+서쪽성분을 가지며 지구 자기장과 상호작용한 후 3차원 자기력선 구조이며(왼쪽)와 이때 전리층에서 대류(검은색 화살표), 에너지 플럭스(색), 포텐셜의 반응(오른쪽)이다. 또한 IMF가 60도로 북쪽을 향하며 By성분을 동시에 갖는 경우에 지구 자기권과 충돌한 후 3차원 자기력선 구조와 전리층의 반응의 시뮬레이션 결과는 Fig. 17b

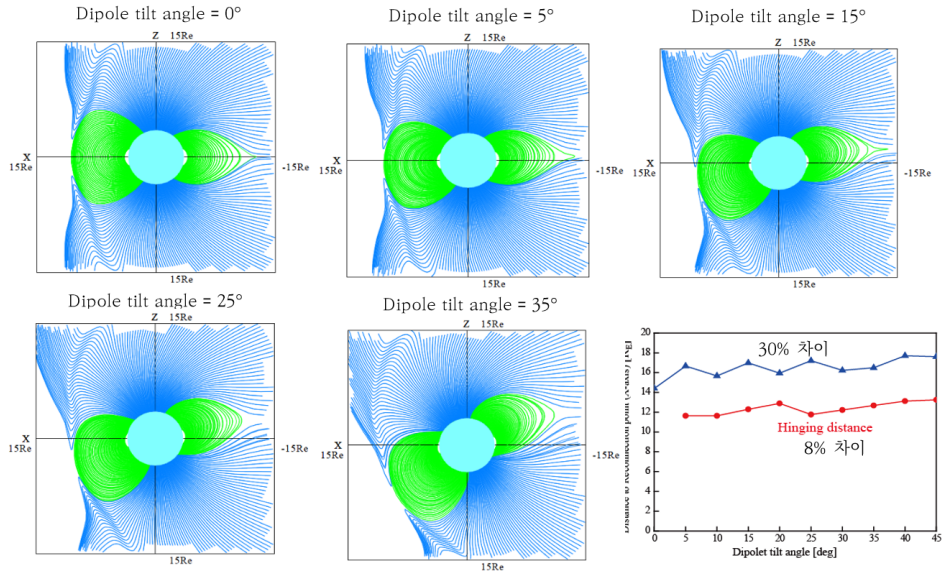


Fig. 16. Global MHD simulation results of the reconnection region by the dipole tilt effects.

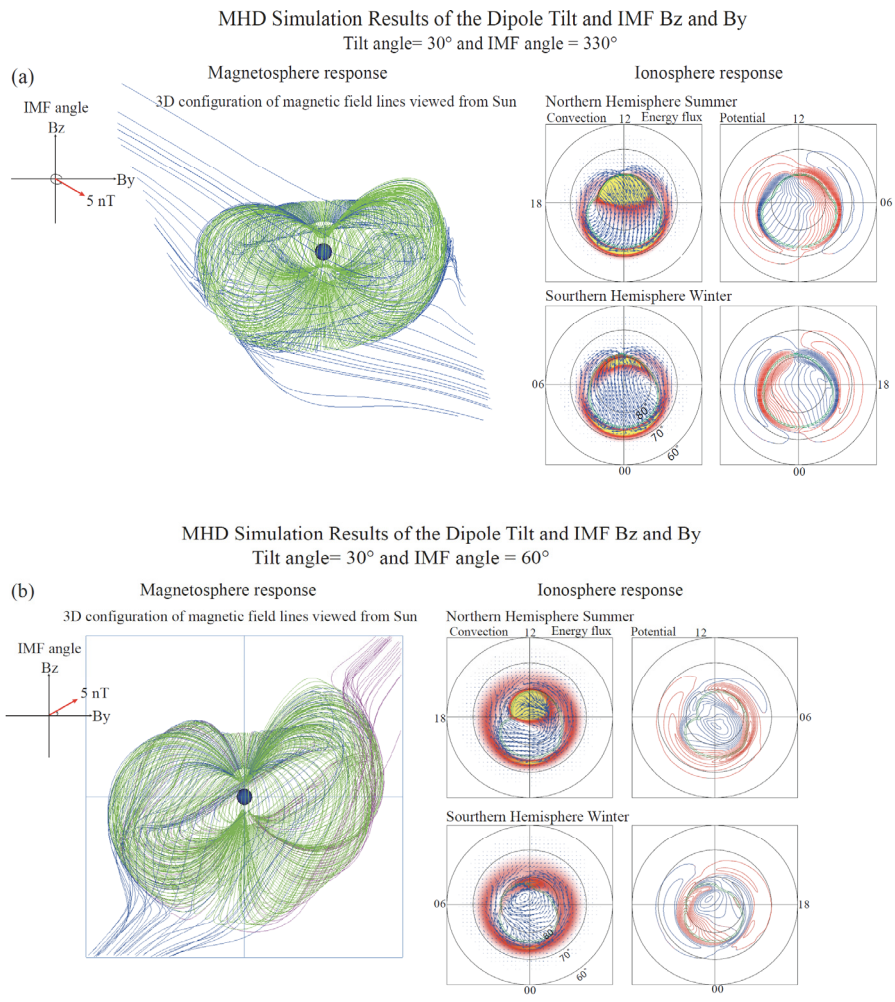


Fig. 17. Simulation results of the magnetosphere and the ionosphere by dipole tilt effect and IMF angles.

에 있다. Fig. 17a, b(왼쪽)에 3차원 자기력선들은 태양방향에서 본 구조로, By성분이 포함된 IMF와 충돌하여 태양직하점이 아닌 고위도 영역에서 낮지역 자기재결합이 활발하게 발생하고 있다. 북반구의 경우, IMF는 고위도 지구 자기장과 상호작용 후 열린 자기장(파란색선)이 된 후 12시 영역을 가로질러 새벽영역으로 이동한 후 자기권 꼬리쪽으로 움직인다. 또한 북쪽 성분의 IMF의 경우 좀더 Z축에 가까운 영역에서 자기재결합이 발생한다(Fig. 17b 오른쪽). IMF By 성분이 포함된 태양풍과 자기권 충돌 시뮬레이션 결과는 극지역의 대류와 포텐셜의 좌우 비대칭을 만드는데, 더불어 자기축 기울기가 포함되면 남반구와 북반구의 극지역 전리층의 비대칭을 만든다(Fig. 17a, b 왼쪽). 이러한 시뮬레이션 결과들은 자기권에서 자기축 기울기와 IMF 각도에 따른 자기재결합 발생 위치의 영향을 잘 반영한다.

Fig. 18은 지구의 자기축 기울기가 30도 기울어진 상태에서 남쪽+서쪽 성분 IMF(각도 330도)와 충돌 후 자기권에서 플라스마 압력 분포를 2차원으로 확인 시뮬레이션 결과이다. 자기축 기울기로 인하여 충격파면과 자기권계면이 위치가 남북 비대칭을 보이며(Fig. 18 왼쪽), 자기권 꼬리의 자기재결합은 Sun-Earth line이 아닌 북반구(+Z)쪽으로 치우쳐 있으며, X = -15R_E에서의 플라즈마판(Fig. 18 오른쪽)이 중심에서 z축으로 약 3.8R_E에 위치하며 곡선 형태를 갖는다.

이렇듯 3차원 글로벌 MHD 시뮬레이션 결과는 자기권의 3차원 자기력선 구조, 플라스마 흐름 등의 2-3차원 공간과 시간에 대한 물리량을 확인할 수 있는 매우 유용한 수단으로 지점관측 위성 관측의 한계를 극복하고, 위성과 지성관측의 공동 연구로 활용 가능하다. 하지만 내부 자기권의 작은 규모의 물리영역과 결합된 모델 구축은 여전히 숙제로 남아 있다.

작은 규모의 물리 현상만 연구하는 것은 동역학(Kinetic Physics)을 포함된 하이브리드 코드나 입자(PIC) 코드를 이용하여 수행된다. 더욱이 최근 눈부시게 발전된 컴퓨터 성능과 다양한 Open Source로써 공개된 코드로 많은 곳에서 연구를 수행 중이다. 최근 자기권 내부의 플라스마 파동 연구에서 지구 쌍극자 자기장을 이와 같은 Kinetic 모델에 포함을 시키려는 노력이 계속되어 왔다. 여러 플라스마 파동 중 적도소음으로 불리는 자기음파의 생성과 전파도 지구 쌍극자 자기장 효과(Fig. 19)를 고려한 시뮬레이션도 최근 보고됐다(Fig. 20)[20,21]. 지구 자기권은 본질적으로 자기장의 세기와 전자의 수밀도가 불균질하므로 정확한 물리현상 기술을 위해선 3차원적 효과를 포함해야 한다. 현실적으로 계산 자원에 한계가 있으므로 위 연구를 비롯하여 대부분의 연구가 2차원의 공간을 가정하는데, 조만간 3차원의 효과를 포함한 계산 결과도 등장할 것으로 기대한다.

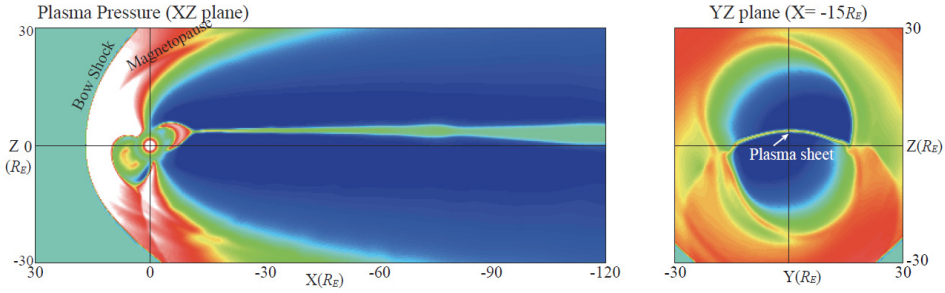


Fig. 18. Simulation results of the magnetosphere by dipole tilt effect and IMF angles.

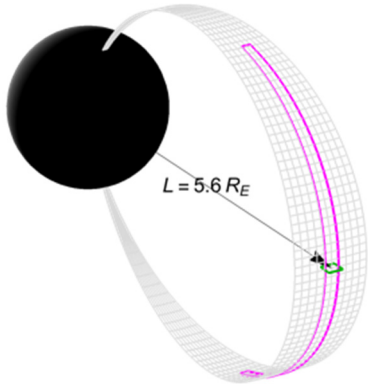


Fig. 19. Schematic illustration of a drift-shell (constant L-shell) surface and the simulation domain.

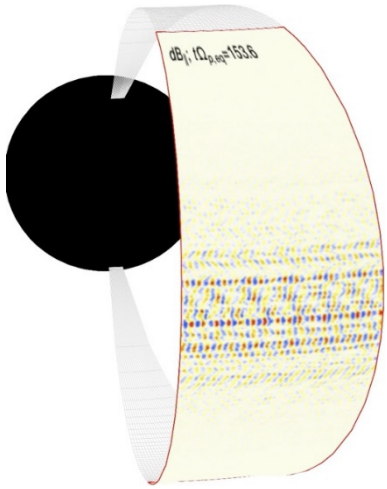


Fig. 20. An example of three-dimensional rendering of the generated magnetic field (compressional component) projected on the drift-shell surface.

3. 제언

자기권 영역의 우주 환경 자료(지상관측기, 위성 및 모델)에 대한 보유 및 활용에 대한 조사가 한국우주과학회 태양우주환경분과의 소속 회원을 대상으로 진행되었다. 조사 결과, 자기권 영역에서 지상 관측기 및 위성 분야는 주로 연구소(국가기상위성센터, 극지연구소, 우주전파센터, 한국천문연구원 및 KASIT 인공위성연구소)에서 자료를 보유하고 있었으며, 모델 개발은 대학(충북대, 경희대, 충남대)에서 수행하고 있다. 조사 내용은 한국우주과학회 페이지에서 다운로드할 수 있다(http://ksss.or.kr/).

우주 환경 분야의 연구가 국내에서 본격적으로 활성화된 지 어느덧 20년 가까이 되었다. 그 동안 우주 환경 연구 분야 연구 인력들은 국외에서 제공하는 관측 자료 및 모델들을 활용하여 유의미한 연구 성과를 창출하여 우주 환경 분야에서 우리나라의 국제적 위상을 높였다. 자기권 관측 위성의 경우, 국외 위성 관측자료의 활용도가 높지만, 최근 신뢰도가 향상된 국내 위성관측 결과로 분석한 연구성과가 나오고 있다. 하지만 국내에서 생산되는 자료의 활용도와 신뢰도를 더 높이기 위해 위성 및 지상 관측기 도입이 필요하며, 신뢰성 있는 데이터 생

성으로 연구에 필요한 자료의 국외 의존도를 낮추는 효과를 볼 수 있다. 이러한 도입은 우주환경 연구 인력들의 수요에 부응하는 의견 수렴을 통해서 진행되어야 할 필요가 있다. 그리고 그 동안 국내에서 생산된 자료를 홍보하고 공유하는 과정이 필요하며, 지속적 관리 및 활용을 위해 우주과학 자료 관리와 관련된 정책수립이 요청된다.

과거의 데이터 관리는 통합 저장과 중앙 집중형 관리 형태였지만, 최근에는 개방형 기술을 이용한 데이터의 연계와 활용으로 데이터의 유통 체계와 데이터 생태계를 조성하는 형태로 바뀌어가고 있다. 동일한 데이터도 활용 방법과 적용 기술에 따라 그 가치가 다르기 때문이다. 과학 연구를 위한 우주환경 데이터의 활용을 활성화하기 위해서는 데이터의 생산, 유통, 개방, 활용을 위한 다각적인 연구가 필요하다. 이를 위해서는 전문적인 연구 인력을 보유하고 있는 한국천문연구원과 극지연구소와 같은 연구기관의 과학 목적의 우주환경 데이터 서비스와 국립전파연구원과 기상청의 대국민 서비스를 위한 예경보 데이터 서비스를 구분한 데이터 연계와 협력은 매우 중요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국우주과학회 태양우주환경분과 소속 회원들의 공동 작업(경희대학교, 국가기상위성센터, 극지연구소, 서울대학교, 우주전파센터, 인공위성연구소, 전남대학교, 충남대학교, 충북대학교, 한국천문연구원)으로 진행되었고, 태양우주환경분과 운영위원(민경국, 박경선, 오수연, 이우경, 이진이, 이창섭)이 대표로 논문을 작성하였습니다. 태양우주환경분과 회원들의 적극적인 협조에 감사드립니다. 이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국천문연구원 차세대 우주환경 변화와 예측 연구사업의 지원을 받아 수행(2021-1-850-05)되었습니다. 또한 이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었습니다.

References

1. Hwang J, Kwak J, Jo G, Nam U, Validation of KREAM based on in-situ measurements of aviation radiation in commercial flights, J. Astron. Space Sci. 37, 229-236 (2020). https://doi.org/10.5140/JASS.2020.37.4.229
2. Kim KC, Shprits Y, Wang D, Quantifying the effect of plasmaspheric hiss on the electron loss from the slot region. J. Geophys. Res. Space Phys. 125, e2019JA027555 (2020). https://doi.org/10.1029/2019JA027555
3. Lee DY, Kim J, Simultaneous influence of whistler-mode chorus and EMIC waves on electron loss in the Earth's radiation belt, J. Korean Phys. Soc. 77, 707-713 (2020). https://doi.org/10.3938/jkps.77.707
4. Burch JL, Moore TE, Torbert RB, Giles BL, Magnetospheric multiscale overview and science objectives, Space Sci. Rev. 199, 5-21 (2016). https://doi.org/10.1007/s11214-015-0164-9
5. Johlander A, Schwartz SJ, Vaivads A, Yu V, Khotyaintsev I, et al., Rippled quasiperpendicular shock observed by the magnetospheric multiscale spacecraft, Phys. Rev. Lett. 117, 165101 (2016). https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.165101
6. Science Data Center [SDC], Magnetospheric Multiscale (MMS) (2018) [Internet], viewed 2021

Jan 4, available from: https://lasp.colorado.edu/mms/sdc/public/

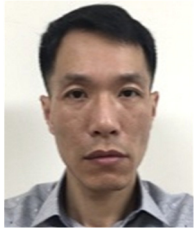
7. Funsten et al., (2013), Helium, Oxygen, Proton, and Electron (HOPE) mass spectrometer for the radiation belt strom probes mission, Space Sci. Rev. 17, 423-484
8. NASA CDAWeb (2015) [Internet], viewed 2021 Jun 25, available from: https://cdaweb.gsfc.nasa.gov
9. Science gate way (2015) [Internet], viewed 2021 Jun 25, available from: https://rbspgway.jhuapl.edu
10. National Meteorological Statellite Center [NMSC] (2021) [Internet], viewed 2021 Jun 1, available from: http://datasvc.nmsc.kma.go.kr/datasvc/html/main/main.do
11. Space Weather Center of the National Radio Research Agency (2021) [Internet], viewed 2021 Jun 1, available from:https://spaceweather.rra.go.kr/observation/ground/magnetism
12. Korea Space Weather Research Center in KASI (2021) [Internet], viewed 2021 Jun 1, available from: http://kswrc.kasi.re.kr/ko/data/browser
13. Kim J, Hwang J, Kim H, Yi Y, Statistical analysis of Pc1 pulsations observed by a BOH magnetometer, J. Astron. Space Sci. 37, 19-27 (2020). https://doi.org/10.5140/JASS.2020.37.1.19
14. Yoo JH, Lee DY, Kim E, Seo H, Ryu K, et al., A substorm injection event and the radiation belt structure observed by space radiation detectors onboard Next Generation Small Satellite-1 (NEXTSat-1), J. Astron. Space Sci. 38, 31-38 (2021). https://doi.org/10.5140/JASS. 2021.38.1.31
15. Park KS, Ogino T, A study of the storm event on October 21–22, 1999 by the MHD simulation, Earth Planets Space. 58, 633-643 (2006). https://doi.org/10.1186/BF03351961
16. Park KS, Lee DY, Ogino T, Lee DH, MHD simulations using average solar wind conditions for substorms observed under northward IMF conditions, J. Geophys. Res. Space Phys. 120, 7672-7686 (2015). https://doi.org/10.1002/2015JA021005
17. Park KS, Lee DY, Kim KH, Global MHD simulation of a prolonged steady weak southward interplanetary magnetic field condition, J. Astron. Space Sci. 37, 77-84 (2020). https://doi.org/10.5140/JASS.2020.37.2.77
18. Park KS, Ogino T, Walker RJ, On the importance of antiparallel reconnection when the dipole tilt and IMF By are nonzero, J. Geophys. Res. 111, A05202 (2006). https://doi.org/10.1029/2004JA010972
19. Park KS, Ogino T, Kim YH, Effects of the dipole tilt and northward and duskward IMF on dayside magnetic reconnection in a global MHD simulation, J. Geophys. Res. 115, A02208. (2010). https://doi.org/10.1029/2009JA014212
20. Min K, Liu K, Denton RE, Boardsen SA, Particle-in-cell simulations of the fast magnetosonic mode in a dipole magnetic field: 1-D along the radial direction, J. Geophys. Res. Space Phys. 123, 7424-7440 (2018). https://doi.org/10.1029/2018JA025666
21. Min K, Liu K, Denton RE, Němec F, Boardsen SA, et al., Two-dimensional hybrid particle-in-cell simulations of magnetosonic waves in the dipole magnetic field: on a constant L-shell. J. Geophys. Res. Space Phys. 125, e2020JA028414 (2020). https://doi.org/10.1029/2020JA028414

Author Information

박 경 선 kspark@chungbuk.ac.kr

일본 Nagoya University에서 2006년 소립자 우주물리학 박사학위를 받았다. 2004년-2006년까지 나고야대학 태양우주환경연구소의 협력연구원으로 태양-지구 생명권 상호작용계의 변동학, KH 불안정성과 자기장 가시화 구현 연구를 하였다. 이후 국내에서 3차원 글로벌 MHD 시뮬레이션으로 태양 활동에 따른 자기권과 전리권의 반응, 자기권계면의 자기재결합과 소용돌이 이론 등을 연구 중이다. 또한 지구 이외 자기장을 갖는 행성(수성, 천왕성, 해왕성 등) 자기권의 글로벌 MHD 시뮬레이션도 구현 중이다. 현재 충북대학교 초빙교수로 재직 중이다.

민 경 국 kmin@cnu.ac.kr



미국의 New Jersey Institute Technology에서 2013년 우주공간물리 박사학위를 받았다. 2018년 까지 박사후연구원으로 근무한 후, 2019년부터 충남대학교 천문우주과학과에서 조교수로 재직 중이다. 주 연구 분야는 지구 자기권 내부에서 플라즈마 파동의 생성과 진화와 이들이 주변 플라즈마에 미치는 영향이다.