

논문

국내 우주환경 자료 보유 현황: 태양·행성간 공간

오수연^{1†}, 이진이², 한국우주과학회 태양우주환경분과³

¹전남대학교 지구과학교육과

²경희대학교 우주과학과

³한국우주과학회

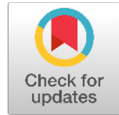
Solar and Interplanetary Observations and Models in Korea

Suyeon Oh^{1†}, Jin-Yi Lee², Division of Solar and Space Environment of KSSS³

¹Department of Earth Science Education, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

²Department of Astronomy and Space Science, Kyunghee University, Yongin 17104, Korea

³The Korean Space Science Society, Daejeon 34055, Korea



Received: July 15, 2021

Revised: August 2, 2021

Accepted: August 2, 2021

†Corresponding author :

Suyeon Oh

Tel : +82-62-530-2517

E-mail : suyeonoh@chonnam.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

Suyeon Oh

<https://orcid.org/0000-0002-6786-620X>

Jin-Yi Lee

<https://orcid.org/0000-0001-6412-5556>

요약

한국우주과학회 태양우주환경분과에서 국내 연구소와 대학에서 운영 중인 태양 및 행성간의 자료를 지상 관측기, 위성 및 모델에 대한 보유 및 활용에 대한 조사를 실시하였다. 조사 결과를 바탕으로 각 자료에 대한 이해와 활용도를 높이고, 분야 간 융합 연구 기회를 모색하고자 본 논문에서 태양 및 행성간 분야의 관측 자료와 모델을 소개하고자 한다. 투자가 많이 필요한 지상 관측기 및 위성 분야는 주로 연구소(국가기상 위성센터, 극지연구소, 우주전파센터, 한국천문연구원 및 KAIST 인공위성연구소)에서 자료를 보유하고 있었으며, 모델 개발은 경희대학교에서 압도적으로 수행하였다. 태양 및 행성간 분야에서 고속태양분광기 (Fast Imaging Solar Spectrograph, FISS), 우주선 중성자 관측기 및 이온화 비평형 상태 Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly(SDO/AIA)와 Hinode/X-Ray Telescope(XRT) 온도 대응 함수 모델을 대표로 소개한다. 태양 및 행성간 분야의 자료에 대한 조사 내용은 한국우주과학회 홈페이지에서 다운로드할 수 있다(<http://ksss.or.kr/>). 이 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 높이는 데 기여하기를 희망한다.

Abstract

The Solar and Space Environment Division of the Korean Space Science Society investigated the use and possession of ground and satellite observations and models of solar and planetary data operated by domestic research institutes and universities. Based on the findings, we would like to introduce observational instruments, data, and models in solar and interplanetary fields in this paper to improve understanding and use of each data and explore opportunities for interdisciplinary research. The ground and satellite observations, which require a lot of investment, were mainly held by research institutes (National Meteorological Satellite Center, Polar Research Institute, Korean Space Weather, Korea Astronomy and Space Science Institute and KAIST Satellite Research Institute), and model development was overwhelmingly carried out at Kyung Hee University. In solar and interplanetary fields, we introduce Fast Imaging Solar Spectrograph (FISS), neutron monitors, and the analysis models [for the Solar Dynamics Observatory/Atmospheric Imaging Assembly (SDO/AIA) and Hinode/X-Ray Telescope (XRT) obser-

vations] in nonequilibrium ionization state as representatives. Survey on solar and interplanetary fields can be downloaded from the website of the Korean Space Science Society (<http://ksss.or.kr/>). The paper makes know the importance of long-term and continuous management of space science-related materials, and hopes to contribute to enhancing the status of domestic space science data by utilizing locally produced data by various personnel participating in space science research.

핵심어 : 한국우주과학회, 우주기상, 태양, 행성간

Keywords : The Korean Space Science Society (KSSSS), space weather, sun, interplanetary

1. 서론

2000년대 초반에 본격적으로 국내에서 진행된 우주 환경(space environment)을 포함한 우주과학 관련 연구는 그동안 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 유관 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 진행되어져 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 자료 서비스를 제공하고 있다. 무엇보다도 태양, 자기권, 전리권, 고층대기 모든 분야의 전문가들로 구성되어 있다. 극지연구소는 한국극지데이터센터(Korea Polar Data Center: <https://kpdc.kopri.re.kr/>)를 운영하고 있으며, 극지에서의 우주환경 관측 자료를 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 자료 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 우주 환경에 대한 연구의 발전과 함께 세분화된 연구 분

야를 우주과학 내 분야간 융합 연구 기회를 모색할 수 있는 기회를 제공하고, 신진 연구자들을 위한 연구 자료 및 방법에 대한 실질적 도움과 안내가 될 수 있을 것으로 기대한다.

2. 태양 및 행성간 자료 보유 및 활용 현황

우주 환경 관련 자료(지상관측기, 위성 및 모델)에 대한 보유 및 활용에 대한 조사는 한국우주과학회 태양우주환경분과의 소속 회원을 대상으로 2020년에 진행되었으며, 참여 기관은 우주 환경 관련 유관 기관인 경희대학교, 국가기상위성센터, 우주전파센터, 전남대학교, 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, 우주 환경의 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 형태로(부록 Table A1-A3) 제공하였다. 특히, 해당 자료를 활용하여 출판한 논문을 소개하여 자료 구성을 더 쉽게 이해하고, 자료에 대한 신뢰도를 높이고자 하였다. 본 논문에서는 우주 환경의 영역 중 태양·행성간 자료에 대한 보유 및 활용에 대해서 설명하고자 한다.

Fig. 1은 태양·행성간 영역 관련 유관 기관이 보유하고 있는 자료의 범주별 현황을 나타낸 것이다. 기초 비용이 많이 필요한 지상 관측기와 인공위성의 자료는 주로 연구원이 보유하고 있었으며, 대학은 연구원의 자료를 주로 활용하고 있었다. 한편, 태양·행성간 영역 모델 개발은 경희대학교에서 압도적으로 수행되었다. 태양·행성간 영역 연구 그룹이 잘 형성되어 있으며, 태양·행성간 영역에 AI 기법 중의 하나인 딥 러닝을 기반으로 하는 우주환경 예보 모델, 고전적인 magnetohydrodynamic(MHD) 모델을 포함한 분석, 수치 및 경험 모델들이 개발

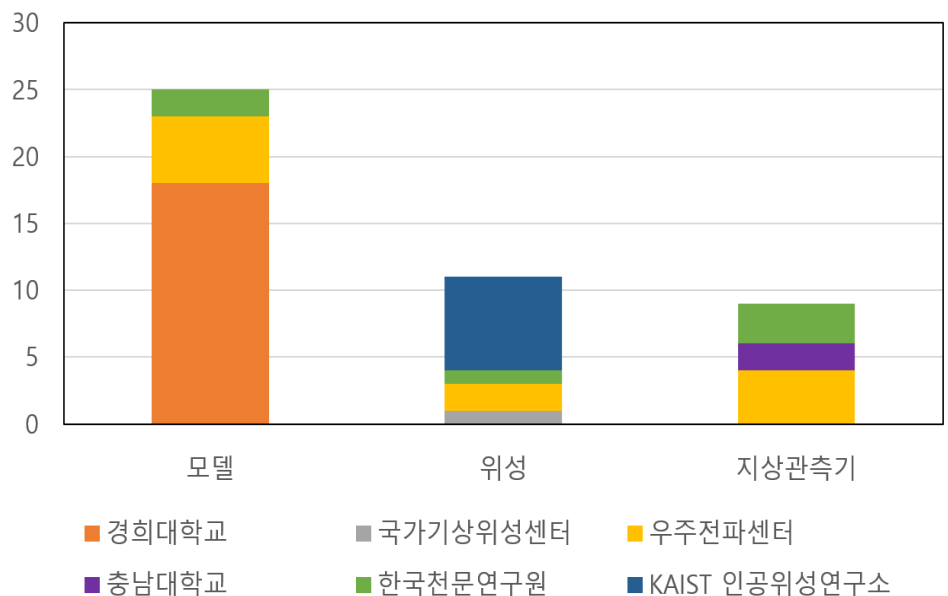


Fig. 1. Current status of solar and interplanetary data by related institutions.

되어 다양한 태양 활동을 이해하고 예측하는데 적극적으로 잘 활용되고 있다. 또, 우주전파센터는 우주전파환경 예·경보 서비스를 수행하는 현업 기관으로서 정확한 예·경보 서비스를 위해 필요한 태양 표면에서부터 행성간 공간으로 전파되는 경로에서 태양활동 감시 모델을 개발하여 활용하고 있다. Table 1은 유관 기관이 보유하고 있는 모델을 정리한 것이다.

Table 1. Current status of modellings for solar and interplanetary field

Model	Institute	Classification	Condition
딥러닝 기반 태양 자기장 자료 초해상화 모델	경희대학교	AI	보유
딥러닝 기반의 SDO/HMI magnetogram 노이즈 제거 모델	경희대학교	AI	보유
딥러닝 기반의 태양 플레어 예보 모델	경희대학교	AI	보유
딥러닝 기반의 태양 UV 영상 생성 모델	경희대학교	AI	보유
딥러닝 기반 태양 플레어 profile 예보 모델	경희대학교	AI	보유
딥러닝 기반 24시간 뒤 global TEC map 예측 모델	경희대학교	AI	보유
딥러닝 기반 태양 후면 자기장 자료 생성 모델	경희대학교	AI	보유
단기, 중기, 장기적 활동성 영역 특성을 활용한 강한 플레어의 양상을 예보 모델	경희대학교	경험 모델	보유
태양 고에너지 입자 발생 확률 및 최대 플럭스 예보 모델	경희대학교	경험 모델	보유
이온화 비평형 상태 SDO/AIA와 Hinode/XRT 온도 대응 함수	경희대학교	분석모델	보유
광구조건에서 자기유체파의 공명 흡수	경희대학교	수치모델	보유
비압축 실린더 플라스마에서 음에너지 자기유체파의 불안정성	경희대학교	수치모델	보유
태양 코로나지역 3차원 자기장정보 구현을 위한 비선형무력자기장 모델	경희대학교	수치모델	보유
코로나 루프 진동의 여기와 공명 흡수	경희대학교	수치모델	보유
Exact solution of nonlinear MHD propagation	경희대학교	수치모델	보유
Flux emergence simulation	경희대학교	수치모델	보유
Magnetohydrodynamic (MHD) code	경희대학교	수치모델	보유
Nonlinear force-free field (NLFFF) code	경희대학교	수치모델	보유
REPPU (REProduce Plasma Universe) model	경희대학교	수치모델	활용

Table 1. Continued

Model	Institute	Classification	Condition
경험적 태양입자유입 예측 모델	우주전파센터	분석모델/경험모델	보유
딥러닝 기반 태양 양성자 예측 모델	우주전파센터	분석모델/경험모델	보유
태양활동 자동분석 모델(ASSA 모델)	우주전파센터	분석모델/경험모델	보유
태양흑점 폭발유형 자동검출 모델	우주전파센터	분석모델	보유
CME 자동 분석 모델	우주전파센터	분석모델/경험모델	보유
태양풍 분포 양상 감시 모델(IPS Tomography)	우주전파센터	수치모델	활용
태양풍 이동경로 분석 모델(IPS Tomography)	우주전파센터	수치모델	활용
태양풍 ENLIL 모델	우주전파센터	수치모델	활용
GAK(George Mason University-Applied Physics Lab (Jonhs Hopkins University)-KASI)	한국천문연구원	경험모델	보유(개발 중)
태양풍 시뮬레이션	한국천문연구원	수치모델	보유

Table 2는 유관 기관이 보유하고 있는 태양·행성간 영역에 대한 위성 자료 현황을 정리한 것이다. 한국천문연구원은 태양 및 우주 환경과 관련된 기초 연구, 응용 기술, 서비스 개발 업무를 통합적으로 수행하는 우주환경연구센터를 운영하고 있다. 특히 NASA와의 협력으로 한국 Solar Dynamics Observatory(SDO) 데이터센터를 구축하여 운영하고 있다. 우주전파센터

Table 2. Current status of satellites for solar and interplanetary field

Satellite	Institute	Condition
천리안위성 2A호(GK2A)	국가기상위성센터	보유
ACE/DSCOVR 위성수신기	우주전파센터	보유
STEREO 위성수신기	우주전파센터	보유
Solar Dynamics Observatory(SDO)	한국천문연구원	보유
과학기술위성 1호	KAIST 인공위성연구소	보유
나로과학위성	KAIST 인공위성연구소	보유
다목적 실용위성 1호	KAIST 인공위성연구소	보유
우리별 1호	KAIST 인공위성연구소	보유
우리별 2호	KAIST 인공위성연구소	보유
우리별 3호	KAIST 인공위성연구소	보유
차세대 소형위성 1호	KAIST 인공위성연구소	보유

는 L1 지점의 궤도에 위치하여 태양풍을 관측하고 있는 Advanced Composition Explorer (ACE)/Deep Space Climate Observatory(DSCOVR) 위성 수신 안테나를 보유하여 관측된 자료(raw data)를 수신하여 미국 우주기상예측센터(SWPC)에 보내 자료를 처리하고 분석된 자료는 태양 활동에 의한 각종 통신장애 및 항공, 항법, 전력 등 산업 분야 피해를 예방하기 위해 활용하고 있다. 이와 함께 3차원으로 태양 활동을 관측하는 Solar TErrestrial RElations Observatory(STEREO) 위성 수신 안테나도 보유하여 태양 자전에 따른 사전 예·경보에 활용하고 있다. 한편, 국가기상위성센터는 천리안 2A를 운영하여 기상 및 해양 관측 자료뿐만 아니라 위성의 정지 궤도에서 측정된 고에너지 전자 및 양성자 플럭스의 우주 환경 관련 관측 자료도 생산하여 제공하고 있다. KAIST 인공위성연구소는 인공위성 개발 및 운영을 담당하고 있는 기관으로 1992년부터 우주 기상 관련 관측 자료를 생산해 오고 있다. 2018년에 발사한 차세대 소형 위성 1호는 전자 및 이온 입자 측정기, 플라스마 측정기를 탑재하여 우주 환경 관측 자료의 국내화를 주도하고 있다[1].

연구소에서 주로 개발된 위성 관측 자료는 대학(충남대학교, 충북대학교)을 중심으로 활용되고 있으며[2], 여전히 미국 NASA 중심으로 개발된 위성 관측 자료를 활용하고 있는 것으로 조사되었다. 분과 내 회원들이 태양·행성간 영역에서 활용하고 있는 위성은 주로 태양풍을 관측하는 ACE, WIND, ULYSSES, Interplanetary Monitoring Platform-8(IMP-8) 등이며, 고에너지 입자 플럭스를 관측하는 Geostationary Operational Environmental Satellite(GOES), Polar Operational Environmental Satellites(POES), Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms(THEMIS) 등을 활용하고, 태양 상수로 표현되는 태양 복사 에너지 변화 연구에는 Solar and Heliospheric Observatory(SOHO)/Variability of Solar Irradiance and Gravity Oscillations (VIRGO) 관측자료를 활용하고 있다. 또, 태양에서 지구까지의 행성간 공간뿐만 아니라, 태양풍이 지배하는 태양권 연구에도 VOYAGER 자료가 활용되고 있다. Table 3은 유관 기관이 보유하고 있는 태양·행성간 영역에 대한 지상 관측기 자료 현황을 정리한 것이다. 한국천문연구원과 우주전파센터가 태양 활동을 모니터링할 수 있는 지상 망원경, 전파 관측기, 지상 태양풍 관측기 등을 운영하고 있다. 특히 한국천문연구원은 1979년부터 굴절망원경(구경 20 cm, 초점거리 3 m)을 설치하여 일일 흑점수를 산출하고 있다. 보현산 천문대에 설치한 태양 플레어 망원경은 국내 최초의 연구용 태양 관측 시설로써 1997년부터 태양표면현상을 관측해 왔으나, 현재 국립중앙과학관으로 이전되었다. 우주전파센터는 주로 태양 활동에 의한 전파 변화를 관측하는 지상 관측기를 운영하고 있다. 한편, 충남대학교와 전남대학교가 이끄는 우주선 연구 그룹은 태양 활동에 따라 크게 변화하는 고에너지 입자인 우주선 세기를 관측하기 위해서 지상 우주선 관측기인 중성자 모니터(neutron monitor)를 대전 표준연구원에 설치하고, 극지연구소의 협조를 받아 남극 장보고(Jang Bogo) 과학 기지에 설치하여 운영 중에 있다. 국외 태양 표면 관련 관측 자료인 흑점수와 자기장 자료는 Wilcox Solar Observatory, Royal Observatory of Belgium에서 운영하고 있는 흑점 자료 센터(Sunspot Index and Long-term Solar Observations, SILSO)를 활용하고 있는 것으로 조사되었다. 태양 및 행성간 분야의 자료에 대한 조사 내용은 한국우주과학회 홈페이지에서 다운로드할 수 있다(<http://ksss.or.kr/>). 다음에서 국내 유관 기관에서 보유하고 있는 태양·행성간 영역에 대한 지상관측기, 위성 및 모델의 대표적인 자료를 소개한다.

Table 3. Current status of ground instruments for solar and interplanetary field

Instrument	Institute	Condition
장보고 중성자 관측기	극지연구소/전남대학교	보유
Fast Imaging Solar Spectrograph(FISS)	서울대학교/한국천문연구원	보유
광대역 태양 전파 노이즈 관측기	우주전파센터(제주)	보유
태양 2.8GHz 관측기	우주전파센터(이천)	보유
태양풍 지상 관측기	우주전파센터(제주)	보유
태양 전파 관측기	우주전파센터(이천)	보유
대전 중성자 관측기	충남대학교/전남대학교	보유
노베야마 태양전파간섭계(NoRH)	한국천문연구원	활용(종료)
태양플레이어망원경(SoFT)	한국천문연구원	보유(종료)
e-Calisto	한국천문연구원	보유
Korea Solar Radio Burst Locator(KSRBL)	한국천문연구원	보유

2.1 고속태양분광기

고속영상태양분광기(Fast Imaging Solar Spectrograph, FISS)는 채층 현상에서 플라즈마의 미세한 구조와 역학 관계를 연구하기 위해 고안된 관측기[3]이다. 서울대 태양 연구 그룹과 한국천문연구원이 공동으로 개발하여 2010년 5월 14일 미국 빅베어태양천문대(Big Bear Solar Observatory)의 1.6 m 구드태양망원경(Goode Solar Telescope)의 쿠데랩(Coude lab) 수직 테이블(vertical table)에 설치하였다. FISS는 리니어모터를 이용해 에셀분광기의 입사슬릿면에 맺히는 영상을 빠른 속도로 이동시켜 고해상도 분광 영상자료를 획득한다. 보통 2개의 CCD 카메라를 사용하여 $H\alpha(6,563 \text{ \AA})$ 와 $Ca II(8,542 \text{ \AA})$ 를 관측하거나 $Na D2(5,890 \text{ \AA})$ 와 $Fe I(5434 \text{ \AA})$ 선을 동시에 기록하게 되는데, 영상(x, y)과 분광 방향(λ) 3차원 자료를 관측 시간에 대하여 저장하여 총 4차원 자료(x, y, λ , t)를 획득한다. Fig. 2는 2014년 6월 6일에 FISS로 관측한 흑점과 빛다리 구조를 나타낸 자료이다. FISS에 대한 자세한 설명과 관측 자료 다운로드 및 분석 방법은 서울대학교 태양 연구팀 홈페이지(<http://fiss.snu.ac.kr/>)에서 찾아볼 수 있다. 구드태양망원경은 보통 여름 시즌에 좋은 자료가 생산되는데, 한국 연구자들은 연간 21일을 할당 받아 관측에 활용할 수 있다. FISS 관측 자료를 활용하여 얻은 다양한 연구 결과는 2013년 Solar Physics 288권[3, 4 외 다수]에 게재되었다.

2.2 우주선 중성자 관측기(중성자 모니터)

20세기 초 양성자, 이온, 전자와 같은 하전 입자들이 지구에 입사된다는 사실을 알게 되었다. 1912년 Hess에 의해 존재가 알려진 우주선(cosmic ray)은 광속에 가까운 속도로 운동하는 고에너지 하전 입자이며, 대부분이 양성자로 구성되어 있다. 우주에서 초신성 폭발이나 활동성 은하와 함께 태양에서도 우주선들이 방출된다. 지구자기장의 영향으로 지구 특정 위치

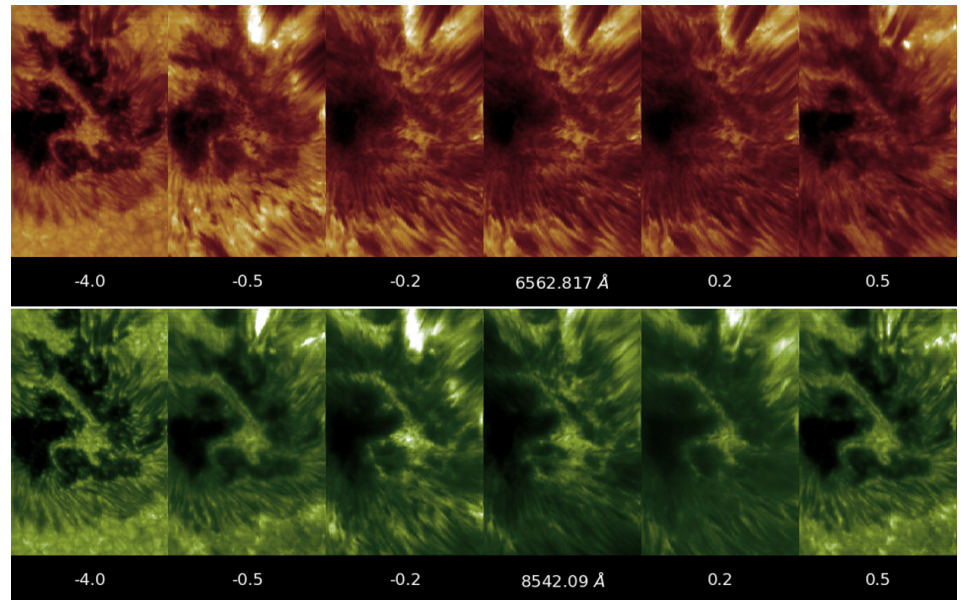


Fig. 2. Sunspot and light bridge observed by FISS on June 6 2014. Raster image at the wavelength of -4.0 , -0.5 , -0.2 , 0 , 0.2 , and 0.5 Å from the center of absorption line by scanning $26'' \times 41''$ field of view (Courtesy of Juhjung Kang).

의 대기 상단에 도착하는 1차 우주선의 에너지 범위는 대략적으로 500 MeV–20 GeV 에너지를 갖게 되어 자기 위도가 낮아질수록 차단 강성률(cutoff rigidity, 단위는 GV)가 증가하여 큰 에너지를 갖는 우주선이 도착하게 된다.

또, 대기 꼭대기에 도착한 1차 우주선은 대기를 통과하면서 대기입자들과 충돌로 인해 생성된 2차 우주선인 중성자(neutron), 뮤온(muon) 및 전자(electron)가 지상에서 검출된다[5]. 2차 우주선인 중성자는 지상의 우주선 중성자 관측기(neutron monitor)에 의해 관측이 되며, 중성자를 관측하여 1차 우주선의 플럭스 변화를 간접적으로 추정하는 자료로 사용한다. 국제 지구물리해인 1957년 표준화된 우주선 중성자 관측기(12IGY, 18NM64)가 설치된 이후 50년 이상의 장기간의 관측 자료를 많은 수의 우주선 중성자 관측기에서 생산해오고 있다.

우주선은 지구를 통과하는 행성간 물질의 요란 모니터링에 이용된다. 장기간에 걸친 우주선 관측은 은하우주선(galactic cosmic ray) 플럭스가 태양권 내의 자기장에 의해 변화하는 것을 보여주었다. 태양 흑점수가 증가할 때 태양권 내의 자기장은 강해져서 은하우주선의 플럭스는 지구에서 감소된다. 흑점수가 감소할 때 자기장에 의한 차폐가 약해져 많은 수의 우주선은 지구에 도착하게 된다. 즉, 우주선의 플럭스는 태양 활동에 따라 흑점수 변화 주기로 그 플럭스가 11년 주기로 흑점수와 반대로 변화하는 역상관계를 가진다[6]. 일시적으로 변화(급작스런 증가 또는 감소)는 태양 자기장이 태양권으로 분출되는 태양 폭발에 의해서 발생된다. 특히, 우주선 중성자 관측기에 검출되는 에너지 영역의 우주선은 태양에서 나오는 물질인 태양풍의 영향을 크게 받는다. 태양풍의 요란에 의해 지상 중성자 증가(ground level enhancement) 현상[7]과 같이 플럭스가 갑자기 증가하거나, 포부쉬 감소(Forbush decrease) 현상[8]처럼 플럭스가 갑자기 감소하는 현상이 발생한다. 이처럼 태양권 내에서 태양 활동에 의해 지구 주위의 우주선 플럭스가 변화하기 때문에 태양 활동의 영향을 연구하는 자료가 되어 태양 활동에

의한 우주환경 변화에 대한 좋은 척도가 된다.

한편, 2011년 10월 10일 관측을 시작한 대전 우주선 중성자 관측 자료[9]와 2015년 12월 15일에 관측을 시작한 남극 장보고 과학 기지에 설치된 우주선 중성자 관측 자료[10]를 전지구 우주선 중성자 관측 자료의 네트워크인 Neutron Monitor Database (NMDB, <https://www.nmdb.eu/nest/>)에 등록하였다. 관측 자료 데이터베이스에 각각의 관측기 코드가 JBGO (장보고)와 DJON(대전)으로 등록되어 있다. 이는 국내에서 최초로 국제 우주선 관측 자료 네트워크에 등록된 결과이다. 남극 장보고 과학 기지 및 대전 우주선 중성자 관측소의 정보는 NMDB 홈페이지(<https://www.nmdb.eu/station/jbgo/>, <https://www.nmdb.eu/station/djon/>)에 소개되어 있다(Fig. 3). 기본적인 위치 정보와 차단 강성률이 제시되어 있다.

장보고 중성자 관측기(Fig. 4)는 1960년부터 맥머도(McMurdo; 77.9S, 166.6E) 기지에서 운영하던 것을 미국국립과학재단(NSF)의 후원으로 남극 장보고(Jang Bogo; 74.6S, 164.2E) 과

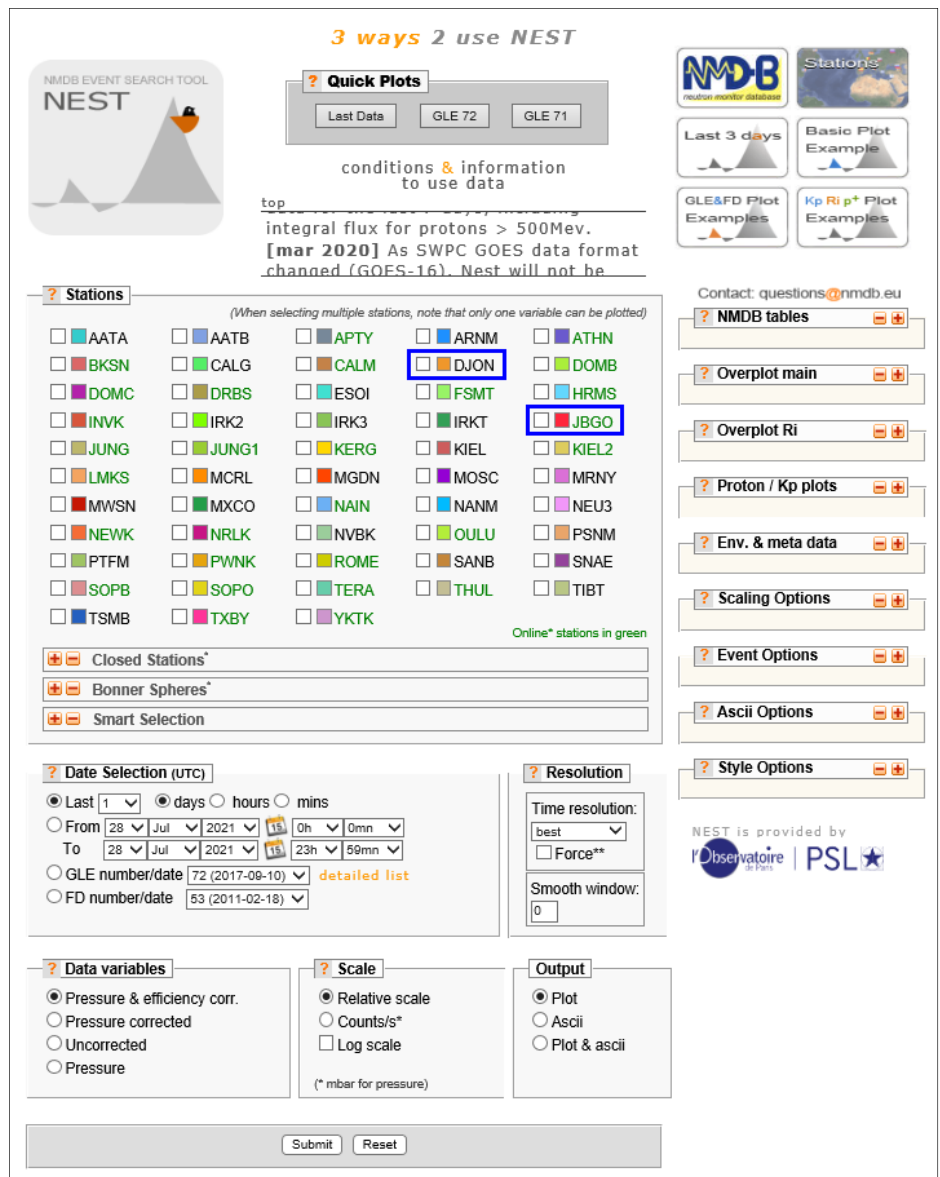


Fig. 3. Jang Bogo and Daejeon Neutron Monitors registered in NMDB.



Fig. 4. Jang Bogo Neutron Monitor (Right building is Space Weather Observatory, Courtesy of Jongil Jung).

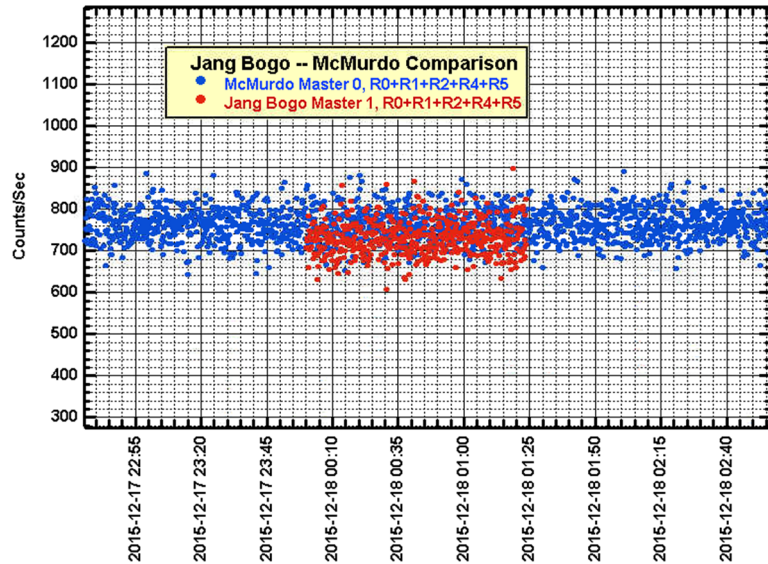


Fig. 5. Comparison of initial data between Jang Bogo (Courtesy of Roger Pyle).

학 기지로 이전했다. 두 남극 기지는 지리적으로 가까워 관측 자료의 승계도 가능하는 등 연속성을 유지할 수 있어서 이전이 진행되었다. 이전 작업은 지난 2013년 텔라웨어 대학-극지연구소-우주선 연구 그룹(전남대와 충남대)이 중성자 관측기 이전에 관해 업무협약을 맺은 이후, 2015년 12월 1 Unit(6 tubes)부터 이전 작업에 나선 지 5년여 만인 2020년 1월에 설치를 완료했다.

Fig. 5는 장보고 과학 기지에 가까이 있는 맥머도 기지의 우주선 중성자 관측기 자료와 비

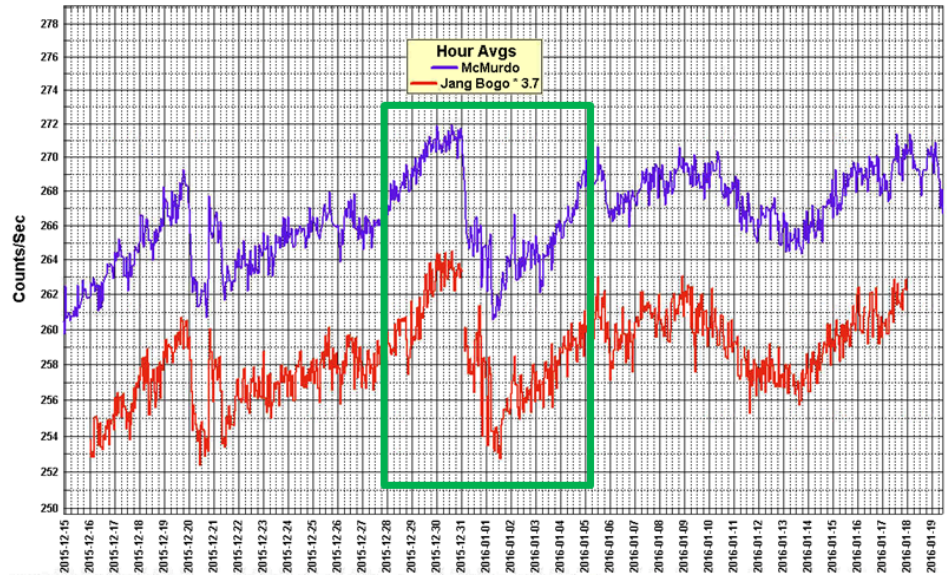


Fig. 6. Forbush decrease on December 30 2015 at Jang Bogo and McMurdo (Courtesy of Roger Pyle).

교한 결과로서 맥머도와 장보고 우주선 중성자 관측기의 초기 관측 자료가 비슷한 수준을 보여주고 있어서 설치 후 안정화되어 있음을 알 수 있다. 또, Fig. 6은 2015년 30일에 발생한 포부쉬 감소(Forbush decrease) 현상을 맥머도와 장보고에서 동시에 관측하여 두 우주선 중성자 관측기의 동일성을 확인할 수 있다.

2.3 이온화 비평형 상태 SDO/AIA와 Hinode/XRT 온도 대응 함수

태양·행성간 우주 환경은 태양 활동에 크게 영향을 받는다. 태양의 가장 큰 활동인 플레어 또는 코로나 물질 방출과 같은 태양 폭발 현상 발생 시 태양 코로나 플라즈마는 이온화 비평형(nonequilibrium ionization) 상태(태양 폭발에 의한 온도 변화 시간 척도 \ll 전자의 이온화/재결합 시간 척도)에 놓이게 된다[11].

태양 코로나는 수 백 만도 이상 높은 온도의 플라즈마로 구성되어 있으며, 연구자들은 자외선, 극자외선, X-선 등의 위성 관측 자료를 이용하여 관측된 플라즈마의 물리량을 결정한다. 관측되는 빛의 세기는 플라즈마를 구성하고 있는 원소의 양(elemental abundance)과 이온량(ion fraction), 밀도, 온도에 따라 결정이 된다. 일반적으로 연구자들은 관측된 빛의 세기를 이용하여 밀도와 온도 결정을 위해 코로나를 구성하고 있는 원소의 양과 이온량을 일정량으로 가정한다.

플레어와 코로나 물질 방출과 같은 태양 폭발 시 자기재결합 또는 가속된 입자 등은 코로나 플라즈마의 급격한 온도 상승을 일으킨다. 태양관측위성 SDO의 극자외선 망원경 Atmospheric Imaging Assembly(AIA)는 높은 공간 및 시간 분해능으로 태양 전면상을 관측하는 망원경으로 태양 코로나 연구에 많이 이용된다. Hinode의 X-선 망원경(X-Ray Telescope, XRT)는 매우 높은 온도의 코로나 관측 자료를 제공한다. 두 영상 관측 자료 분석에 의한 물리량 결정은 원소의 양과 이온량, 그리고 관측기기의 특성을 적용하여 계산된 온도대응함수

(temperature response)를 이용한다. 하지만 두 관측 기기의 자료 분석을 위하여 제공되는 프로그램들(예: SolarSoftWare, SSW)은 이온화 평형 상태에서의 이온량을 적용한 온도대응함수를 제공한다.

이에 따라 이온화 비평형 상태를 고려하기 위하여 [12]는 태양 폭발에 의한 급격한 가열 이후 이온화 비평형 상태의 이온량 변화를 계산하고, 이를 SDO/AIA와 Hinode/XRT 온도대응함수 계산을 위해 적용하였다. 이온량은 식 (1)의 시간 의존 이온화 방정식(time-dependent ionization equation)을 이용하여 계산할 수 있다[13].

$$\frac{df_i}{dt} = n_e [C_{i-1}f_{i-1} - (C_i + R_i)f_i + R_{i+1}f_{i+1}] \quad (1)$$

식에서, f_i 는 i 번째 이온의 이온량, t 는 시간, n_e 는 전자 밀도, C_i 는 이온화율(ionization rate), R_i 는 재결합율(recombination rate)이다. 위 식을 이용하여 이온량이 밀도와 시간의 곱($n_e \times t$)에 따라 결정될 수 있다.

Fig. 7은 $n_e t$ 에 따른 Fe XXI의 이온량을 보여준다. Fe XXI는 AIA 131 Å 로 관측되는 플라즈마의 높은 온도(천만도)에 기여하는 이온이다. 온도별로 $n_e t$ 값이 커짐에 따라서 이온량이 평형 상태로 가는 것을 보여준다. 예로 순간적으로 천만도로 가열된 플라즈마는 $n_e \times t$ 가 $3 \times 10^{11} \text{ cm}^3 \text{ sec}$ 이상에서 이온화 평형상태에 도달하며(하늘색선), 이는 밀도가 $1 \times 10^9 \text{ cm}^3$ 이라면 이온화 평형에 이르기까지 300초가 걸린다는 것을 의미한다. 밀도가 작을 경우, 이온화 평형에 이르기까지 더 오랜 시간이 걸린다. 이는 높은 밀도의 태양의 낮은 대기에서 보다 밀도가 작은 코로나에서 이온화 비평형 상태에 놓이기 쉬움을 의미한다.

이온화 비평형을 고려한 관측 자료 분석을 위해 위에서 계산된 $n_e t$ 에 따른 이온량을 적용하여 SDO/AIA와 Hinode/XRT의 온도대응함수를 계산하였다[12]. Fig. 8은 AIA 131 Å

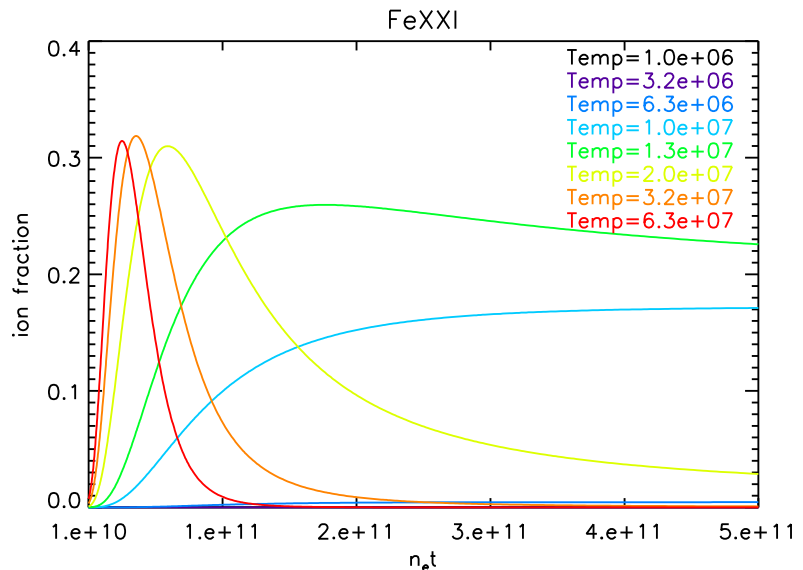


Fig. 7. $n_e t$ vs. Fe XXI ion fractions. Colored lines represent the heated temperatures. The Fe XXI ion dominates the AIA 131 Å at higher temperature.

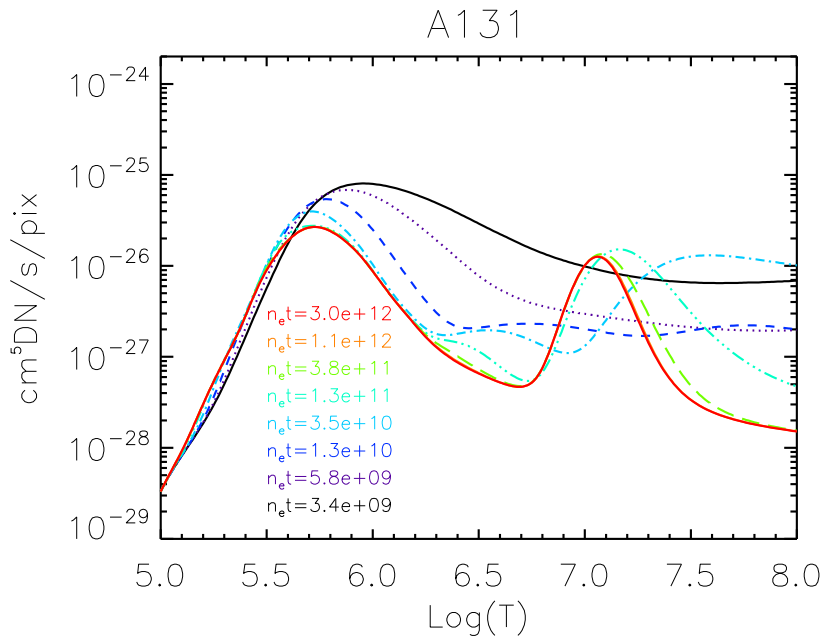


Fig. 8. Temperature response for AIA 131 Å with various $n_e t$.

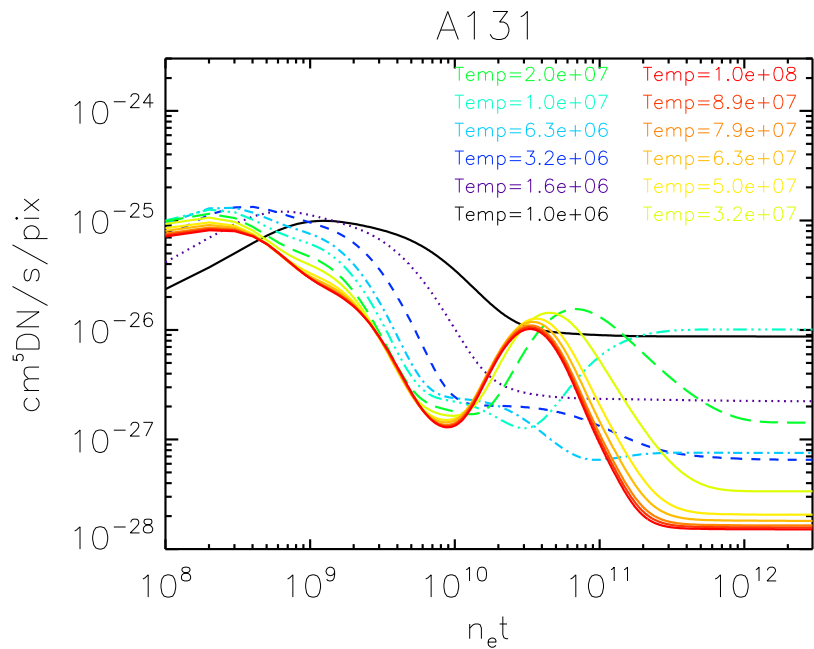


Fig. 9. $n_e t$ response for AIA 131 Å with various temperatures.

의 $n_e t$ 값에 따른 온도대응함수를 보여준다. 빨간선($n_e t = 3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ sec}$)은 이온화 평형 상태의 이온량으로 계산된 온도대응함수이다. 이는 AIA 관측 자료 분석을 위해 SSW에서 제공되는 온도대응함수와 일치한다. Fig. 9는 AIA 131 Å의 온도 값에 따른 $n_e t$ 대응함수를 보여준다. 이와 같이 계산된 SDO/AIA와 Hinode/XRT의 관측 자료 분석을 위한 대응함수들은 누구나 이용할 수 있도록 깃허브(github)에 공개되어 있다¹. 단, 공개된 대응함수들은 2012년

¹ GitHub, <https://github.com/jlee2005/NEI-Response>

1월 27일과 2010년 6월 13일 두 날짜에 해당하는 관측 기기 특성에 맞추어 계산이 되어 있다. 관측 기기는 시간이 지남에 따라 감도가 약해지는 경향이 있다. AIA의 경우, 시간에 대한 보정이 SSW의 온도대응함수를 계산하는 프로시저를 이용하여 보정 인자를 계산할 수 있다 [14]. 또한 파이썬(python)을 이용하는 AIA 분석 소프트웨어 aiapy는 이러한 시간에 따른 감쇠(degradation)를 보정하는 프로그램을 제공하고 있다². 이러한 방법들을 이용하여 원하는 날짜의 관측 자료를 이용하여 이온화 비평형 상태를 고려한 분석이 가능할 것이다.

3. 제언

태양·행성간 영역을 포함한 우주 환경 자료(지상관측기, 위성 및 모델)에 대한 보유 및 활용에 대한 조사가 한국우주과학회 태양우주환경분과의 소속 회원을 대상으로 진행되었다. 조사 결과, 태양·행성간 영역에서 지상 관측기 및 위성 분야는 주로 연구소(국가기상위성센터, 극지연구소, 우주전파센터, 한국천문연구원 및 KAIST 인공위성연구소)에서 자료를 보유하고 있었으며, 모델 개발은 대학(경희대학교)에서 압도적으로 수행하였다. 태양·행성간 영역을 포함, 우주 환경의 자료에 대한 조사 내용은 한국우주과학회 홈페이지에서 다운로드할 수 있다 (<http://ksss.or.kr/>).

우주 환경 분야의 연구가 국내에서 본격적으로 활성화된 지 어느덧 20년 가까이 되었다. 그동안 우주 환경 연구 분야 연구 인력들은 국외에서 제공하는 관측 자료 및 모델들을 활용하여 유의미한 연구 성과를 창출하여 우주 환경 분야에서 우리나라의 국제적 위상을 높였다. 연구에 필요한 자료의 국외 의존도를 낮추고 국내에서 생산되는 자료의 활용도와 신뢰도를 높이기 위해서 위성 및 지상 관측기 도입은 필요하다. 이러한 도입은 우주 환경 연구 인력들의 수요에 부응하는 의견 수렴을 통해서 진행되어야 할 필요가 있다. 그리고 그동안 국내에서 생산된 자료를 홍보하고 공유하는 과정이 필요하며, 지속적 관리 및 활용을 위해 우주과학 자료 관리와 관련한 정책 수립이 요청된다.

과거의 자료 관리는 통합 저장과 중앙 집중형 관리 형태였지만, 최근에는 개방형 기술을 이용한 자료의 연계와 활용으로 자료의 유통 체계와 자료 생태계를 조성하는 형태로 바뀌어 가고 있다. 동일한 자료도 활용 방법과 적용 기술에 따라 그 가치가 다르기 때문이다. 과학 연구를 위한 우주환경 자료의 활용을 활성화하기 위해서는 자료의 생산, 유통, 개방, 활용을 위한 다각적인 연구가 필요하다. 이를 위해서는 전문적인 연구 인력을 보유하고 있는 한국천문연구원과 극지연구소와 같은 연구기관의 과학 목적의 우주환경 자료 서비스와 국립전파연구원과 기상청의 대국민 서비스를 위한 예·경보 자료 서비스를 구분한 자료 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, 오

² aiapy, <https://aiapy.readthedocs.io/en/v0.2.0/index.html>

수연, 이우경, 이진이, 이창섭)이 대표로 논문을 작성하였습니다. 태양우주환경분과 회원들의 적극적인 협조에 감사드립니다. 이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2018R1D1A1B07046522, 2020R1I1A1A01071814).

References

1. Sohn J, Oh S, Yi Y, Min KW, Lee DY, et al., A design of solar proton telescope for next generation small satellite, *J. Astron. Space Sci.* 29, 343-349 (2012). <https://doi.org/10.5140/JASS.2012.29.4.343>
2. 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>
3. Chae J, Park HM, Ahn K, Yang H, Park YD, et al., Fast Imaging Solar Spectrograph of the 1.6 meter new solar telescope at Big Bear Solar Observatory, *Sol. Phys.* 288, 1-22 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0147-x>
4. Park H, Chae J, Song D, Maurya RA, Yang H, et al., Temperature of solar prominences obtained with the Fast Imaging Solar Spectrograph on the 1.6 m new solar telescope at the Big Bear Solar Observatory, *Sol. Phys.* 288, 105-116 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11207-013-0271-2>
5. Simpson JA, Fonger W, Treiman SB, Cosmic radiation intensity-time variations and their origin. I. Neutron intensity variation method and meteorological factors, *Phys. Rev.* 90, 934-950 (1953). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.90.934>
6. Storini M, Borello-Filisetti O, Mussino V, Parisi M, Sýkora J, Aspects of the long-term cosmic-ray modulation. *Sol. Phys.* 157, 375-387 (1995). <https://doi.org/10.1007/BF00680628>
7. Forbush SE, Three unusual cosmic-ray increases possibly due to charged particles from the Sun, *Phys. Rev.* 70, 771-772 (1946). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.70.771>
8. Forbush SE, On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm, *Phys. Rev.* 51, 1108-1109 (1937). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.51.1108.3>
9. Kang J, Jang DY, Kim Y, Kang BH, Kim YK, et al., Characteristics of the 18-tube NM64-type Daejeon neutron monitor in Korea, *J. Korean Phys. Soc.* 61, 720-729 (2012). <https://doi.org/10.3938/jkps.61.720>
10. Jung J, Oh S, Yi Y, Evenson P, Pyle R, et al., Installation of neutron monitor at the Jang Bogo Station in Antarctica, *J. Astron. Space Sci.* 33, 345-348 (2016). <https://doi.org/10.5140/JASS.2016.33.4.345>
11. Bradshaw SJ, Raymond J, Collisional and radiative processes in optically thin plasmas, *Space Sci. Rev.* 178, 271-306 (2013). <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9970-0>
12. Lee JY, Raymond JC, Reeves KK, Shen C, Moon YJ, et al., Nonequilibrium ionization effects

on solar EUV and X-ray imaging observations, *Astrophys. J.* 879, 111 (2019). <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab24bb>

13. Shen C, Raymond JC, Murphy NA, Lin J, A Lagrangian scheme for time-dependent ionization in simulations of astrophysical plasmas, *Astron. Comput.* 12, 1–10 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.ascom.2015.04.003>

14. Park E, Moon YJ, Lee JY, Kim RS, Lee H, et al., Generation of solar UV and EUV images from SDO/HMI magnetograms by deep learning, *Astrophys. J. Lett.* 884, L23 (2019). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab46bb>

Appendix

Table A1. 한국우주과학회 우주환경 자료보유활용 현황 조사 표: 지상관측기

관측기명	비고
현황	보유 또는 활용
기관	보유인 경우는 소속 기관 활용인 경우는 운영 또는 개발 기관
소재지	관측기 소재지
영역	태양/고층대기/전리권/자기권/행성간/우주탐사/우주감시/우주기술
데이터 형태	ascii/fits/binary/hdf/image
데이터 구성	물리량 정보(예: 태양풍 속도 등)
time resolution	sec/minute/hourly
기간	보유 기간
데이터 개요	간단한 데이터 설명
활용 방법	공개/비공개 (공개시 url 기록)
담당자	성명: 소속: 이메일: 연락처:
데이터 예시	파일 일부나 image 자료 첨부
논문	해당 관측 자료를 소개하거나 활용한 결과를 출판한 논문

Table A2. 한국우주과학회 우주환경 자료보유활용 현황 조사 표: 위성

위성명	비고
탑재체명	
현황	보유 또는 활용
기관	보유인 경우는 소속 기관 활용인 경우는 운영 또는 개발 기관
영역	태양/고층대기/전리권/자기권/행성간/우주탐사/우주감시/우주기술
궤도	L1/정지위성/극궤도/타원궤도
주기	극궤도, 타원궤도인 경우
데이터 형태	ascii/fits/binary/hdf/image
데이터 구성	물리량 정보 (예: 태양풍 속도 등)
time resolution	sec/minute/hourly
기간	보유 기간
데이터 개요	간단한 데이터 설명
활용 방법	공개/비공개 (공개시 url 기록)
담당자	성명: 소속: 이메일: 연락처:
데이터 예시	파일 일부나 image 자료 첨부
논문	해당 관측 자료를 소개하거나 활용한 결과를 출판한 논문

Table A3. 한국우주과학회 우주환경 자료보유활용 현황 조사 표: 모델링

명칭	비고
현황	자체 개발 또는 활용
기관	자체 개발인인 경우는 소속 기관 활용인 경우는 개발 기관
영역	태양/고층대기/전리권/자기권/행성간/우주탐사/우주감시/우주기술
프로그래밍 언어	예: fortran/python/c/
구분	수치모델/경험모델/AI
input	input parameter
output	output parameter
결과에 대한 개요	간단한 모델링 결과에 대한 설명
활용 방법	공개/비공개 (공개시 url 기록)
담당자	성명: 소속: 이메일: 연락처:
데이터 예시	파일 일부나 image 자료 첨부
논문	해당 관측 자료를 소개하거나 활용한 결과를 출판한 논문

Author Information

오수연 suyeonoh@jnu.ac.kr



충남대학교에서 2006년 천문학 박사 학위를 받았다. 이후 델라웨어 대학 바틀연구소, 충남대학교에서 박사후 연구 과정 후 2014년부터 전남대학교 지구과학교육과에 재직 중이다. 태양풍, 우주선(cosmic ray) 연구를 진행하고 있으며, 대전과 남극 장보고 과학 기지에 우주선

중성자 관측기(neutron monitor)를 운영 및 관리하고 있다.

이진이 jlee@khu.ac.kr



경희대학교에서 2007년 천문학 박사 학위를 받았다. 이후 하버드-스미소니안 천체물리연구소에서 박사후 연구 과정 후 2010년 12월부터 경희대학교 우주과학과에서 학술연구교수로 재직 중이다. 태양 활동 및 우주 환경 연구를 진행하고 있다.