https://www.jstna.org

ARTICLES

149 Analysis of Reentry Prediction of CZ-5B Rocket Body Jaedong Seong, Okchul Jung, Youeyun Jung, Daewon Chung

160 Solar and Interplanetary Observations and Models in Korea Suyeon Oh, Jin-Yi Lee, Division of Solar and Space Environment of KSSS

178 Terrestrial Magnetospheric Observations and Models in Korea
Kyung Sun Park, Kyungguk Min, Division of Solar and Space Environment of KSSS

199 Ionospheric and Upper Atmospheric Observations in Korea Changsup Lee, Woo Kyoung Lee, Division of Solar and Space Environment of KSSS

217 Basic Lunar Topography and Geology for Space Scientists Yong Ha Kim, Sung Hi Choi, Yongjae Yu, Kyeong Ja Kim

241 Proposals for Korean Space Observation Data Strategies

Ji-Hye Baek, Seonghwan Choi, Jongyeob Park, Sujin Kim, Chae Kyung Sim, Tae-Yong Yang, Minsup Jeong, Young-Soo Jo,
Young-Jun Choi

256 New Space Response and Industrialization Strategy for Micro & Small Satellites Inho Seo, Hyun-Jae Jeong

TECHNICAL REVIEW

268 Technology Trend in Synthetic Aperture Radar (SAR) Imagery Analysis Tools Kangjin Lee, Seong-Gyeong Jeon, Seok-Yong Seong, Ki-mook Kang



우주기술과응용

Journal of Space Technology and Applications

Vol. 1 No. 2 August 2021





우주기술과 응용

우주기술과 응용(Journal of Space Technology and Applications; J. Space Technol. Appl. 이하 JSTA)은 한국의 우주과학 및 우주 응용 분야에서 가장 권위 있는 학술단체인 한국우주과학회에서 Journal of Astronomy and Space Sciences와 더불어 발행되고 있는 공식적인 정기 간행물이다. JSTA 는 2021년 5월 창간호를 시작으로 연 4회 분기별로 발간되고 있으며, JSTA 의 논문과 기고문은 한국어 또는 영어로 게재 가능하며, 각 논문과 기고문에는 고유의 DOI가 부여된다. JSTA 에 게재되는 모든 논문과 기고문은 Open Access 정책에 따라 JSTA 홈페이지(https://www.istna.org)를 통해 누구나 전문을 무료로 열람할 수 있다.

JSTA 의 분야

JSTA 는 우주 이용의 확대에 기여하는 창의적인 연구 논문과 첨단 우주 기술 및 정책에 대한 기고문을 게재하여 발간하며, 다음과 같은 주제를 비롯하여 우주 응용 및 활용과 관련된 모든 분야의 논문과 기고문을 출판한다.

- 우주 임무 해석/설계(space mission analysis/design)
- 우주시스템 엔지니어링(space system engineering)
- 우주 관측기기(space instrumentation)
- 궤도역학(orbital mechanics)/우주동역학(astrodynamics)
- 우주환경(space environment)
- 우주상황인식(space situational awareness)
- 우주데이터(space data)
- 우주정책(space policy)

우주기술과 응용

편집위원회 (2021.01.01 - 2021.12.31)

편집위원장 오수연 전남대학교

편집고문 민경욱 KAIST

심은섭 (주)솔탑

이 유 충남대학교

편집위원 김병진 (주)쎄트렉아이

김은혁 한국항공우주연구원

김해동 한국항공우주연구원

박상영 연세대학교

박설현 조선대학교

박은서 한국천문연구원

송영주 한국항공우주연구원

이성희 (주)컨텍

이호진 (주)솔탑

임조령 한국항공우주연구원

장태성 KAIST 인공위성연구소

진 호 경희대학교

최은정 한국천문연구원

황정아 한국천문연구원

편집국장 김숙경 한국우주과학회

Copyright © The Korean Space Science Society

This is an Open Access journal 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.

Published on August 31, 2021

Published by The Korean Space Science Society

776, Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34055, Korea

Tel: +82-42-865-3391, Fax: +82-42-865-3392, Homepage: http://ksss.or.kr, E-mail: ksss@ksss.or.kr, E-mail: ksss.or.kr, E-mail: kss

Design & Printing Guhmok Publishing Co. / Guhmok Info Inc.

우주기술과 응용 Vol. 1 No. 2 August 2021

논문

- 149 창정 5B호 발사체의 재진입 시점 예측 분석 성재동, 정옥철, 정유연, 정대원
- 160 국내 우주환경 자료 보유 현황: 태양·행성간 공간 오수연, 이진이, 한국우주과학회 태양우주환경분과
- 178 국내 우주환경 자료 보유 현황: 자기권 박경선, 민경국, 한국우주과학회 태양우주환경분과
- 199 국내 우주환경 자료 보유 현황: 전리권/고층대기 이창섭, 이우경, 한국우주과학회 태양우주환경분과
- 217 우주과학자에게 필요한 달의 지형과 지질 김용하, 최성희, 유용재, 김경자
- **241** 한국 우주관측 자료 전략 수립 제안 백지혜, 최성환, 박종엽, 김수진, 심채경, 양태용, 정민섭, 조영수, 최영준
- 256 (초)소형위성의 New Space 대응 및 산업화 전략 서인호, 정현재

기술동향

268 SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상 분석도구 개발기술 동향 이강진, 전성경, 성석용, 강기묵

논문



성재동[†], 정옥철, 정유연, 정대원

한국항공우주연구원

Analysis of Reentry Prediction of CZ-5B Rocket Body

Jaedong Seong[†], Okchul Jung, Youeyun Jung, Daewon Chung

Korea Aerospace Research Institute (KARI), Daejeon 34133, Korea

요 약

본 논문은 2021년 5월에 수행된 국제우주쓰레기조정위원회(IADC, Inter-Agency Space Debris Coordination Committee Reentry) 재진입 테스트 캠페인의 분석 대상인 중국 창정 5B호 발사체의 재진입 시점 예측 분석 내용을 포함하고 있다. 우주물체의 재진입 예측은 물체의 크기나 무게, 자세에 대한 정확한 정보의 부 재, 대기밀도의 불확실성 등으로 정확한 예측이 어렵다. 때문에 IADC에서는 재진입 캠페인을 매년 수행하 여 기관별 분석기법에 대한 검증을 수행하고 있고, 한국항공우주연구원에서도 2015년부터 이에 참여하고 있다. 본 연구에서는 우주물체가 재진입하는 시점을 예측하기 위해 탄도계수 최적화 기법을 제안하였고, 이를 활용하여 분석 대상의 재진입 시점을 예측한 결과, 실제 재진입 시점과 약 73초의 차이를 보여주어 제안한 기법의 정확도를 확인하였다.

Abstract

This paper represents a reentry time prediction analysis of CZ-5B rocket-body in China, subject to analysis of the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee Reentry (IADC) reentry test campaign conducted in May 2021. Predicting the reentry of space objects is difficult to accurately predict due to the lack of accurate physical information about target, and uncertainty in atmospheric density. Therefore, IADC conducts annual re-entry campaigns to verify analysis techniques by each agency, and the Korea Aerospace Research Institute has also participated in them since 2015. Ballistic coefficient estimation method proposed to predict target reentry time and the result confirmed the difference of 73 seconds, which confirms the accuracy of the proposed method.

핵심어: 우주파편, 우주상황인식, 재진입 분석, 탄도계수, 국제우주쓰레기조정위원회 Keywords: space debris, space situational awareness, reentry prediction analysis, ballistic coefficient, Inter-Agency Space Debris Coordination Committee Reentry (IADC)

Received: July 30, 2021 Revised: August 13, 2021 Accepted: August 14, 2021

[†]Corresponding author:

Jaedong Seong Tel: +82-42-870-3933 E-mail: acestars@kari.re.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

Jaedong Seong https://orcid.org/0000-0003-2042-2422 Okchul Jung https://orcid.org/0000-0002-1310-1148 Youeyun Jung https://orcid.org/0000-0002-5268-7217 Daewon Chung https://orcid.org/0000-0002-1214-8526

1. 서론

Celestak의 SATCAT(SATellite CATalog)에 따르면 현재까지 궤도상에 발사된 이후 지구 대기로 재진입하거나 무덤궤도 등으로 천이된 물체의 수는 25,500여 개이며, 이 중 대부분은 지구 대기로 재진입하는 저궤도 물체이다[1]. 크기가 작은 물체들은 대기로 재진입하면서 분

해되거나 소각되지만 2,000 kg 이상의 대형물체의 경우 10%-40%가 생존하여 지상으로 낙하 하고 있다[2]. 현재까지 대부분의 재진입 물체는 해상에 낙하하여 피해를 야기하지 않고 있으 나, 코스모스 954(1978), 스카이랩(1979), 델타2 발사체(1993), 델타2 발사체 연료탱크(1996), 스페이스셔틀(2003) 등 실제 지상에 낙하한 사례도 분명히 존재한다[3-11]. 통계적으로 제어 되지 않은 2,000 kg 이상의 물체는 1주일에 1개씩 재진입하고 있다.

이와 같은 상황에서 국제우주쓰레기조정위원회(IADC, Inter-Agency Space Debris Coordination Committee)는 1997년 우주물체 재진입 관측데이터 및 분석데이터 공유 방안을 채 택하였고, 1998년부터 유럽우주국 주관으로 재진입 시점 예측 캠페인을 매년 1-2회 수행하 고 있다. 해당 캠페인은 IADC 회원기관들이 잠재적 위험 물체를 선정하고, 재진입 시점 예측 을 위한 분석 툴이나 절차를 시험하는 것이 주요 목적이며, 한국항공우주연구원은 IADC의 회원기관으로 2015년부터 본 캠페인에 참여하고 있다.

재진입 예측은 궤도의 불확실성, 대기밀도의 불확실성, 재진입 대상의 자세 및 단면적, 무 게 등 정확한 정보의 부재 등으로 정밀한 분석이 어렵다. 이를 보완하기 위한 연구들이 지금 까지 활발하게 진행되고 있다. Anilkumar는 다수의 TLE(Two Line Element) 데이터를 이용 하여 궤도정보를 산출하고, 칼만필터를 적용하여 재진입 예측을 수행하였다[12]. Pardini는 재진입 분석에 다양한 대기밀도 모델을 적용하여 대기밀도 모델의 민감도를 분석하였고, 다 수 IADC 캠페인에서 가장 잘 맞는 대기밀도 모델을 도출하는 연구를 수행하였다[13,14]. Yurasov는 대기밀도 계수의 조정을 통해 재진입 분석 정확도를 높이는 연구를 수행하였고, 100개 이상의 많은 TLE 데이터를 이용하여 대기밀도 계수를 조정한 후 궤도결정 및 예측을 수행하였고, 기존 대비 성능 향상을 확인하였다[15]. 그 외에 Dodin[16]은 이론적 탄도계수의 한계점 연구, Reyhanoglu[17]는 재진입 물체의 분열 시 파편의 낙하 분포, Pardini[18]는 USA-193는 재진입 예측 연구 등을 각각 수행한 바 있다.

위와 같이 비제어 재진입 물체의 재진입 예측을 위해 다양한 연구들이 수행되었고, 지속적 으로 예측 정밀도를 향상시키기 위한 연구들이 수행되고 있으나 초기궤도 및 대기밀도의 불 확실성, 재진입 물체의 정확한 자세 및 단면적, 무게 정보의 부재 등의 원인으로 여전히 정확 한 재진입 시점을 예측하는 것은 매우 도전적인 분야이다. 이에 본 연구에서는 IADC 재진입 캠페인의 분석 정확도 향상을 위해 다수의 TLE 데이터를 이용한 탄도계수 최적화 기법을 제 안하였다. 탄도계수를 최적화하는 방법은 종전에 제안되지 않았던 방식으로 물체의 물리제원 이나 자세정보 등의 불확실 요소가 존재하는 상황에서 다수의 TLE 데이터를 활용한 장반경 변화를 가장 잘 추종하는 탄도계수를 탐색하는 방법으로 재진입 예측 정밀도 향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 제안한 기법을 2021년도 2차 IADC 재진입 캠페인의 대상인 창정 5B 발사체에 적용하여 재진입 시점을 예측하고, 실제 재진입 시점과 차이와 캠페인 참여 기 관들의 평균오차와 비교 분석하였다.

2. 방법론

재진입 캠페인의 타깃은 저궤도 영역에서도 낮은 고도의 물체이며, 지상에 피해를 줄 수 있 는 큰 규모의 물체들이 선정된다. 따라서 대기저항이 물체의 궤도에 미치는 영향이 상대적으 로 높아짐을 의미하고, 정밀하게 모델링된 지구 비대칭 중력장에 비해 불확실성이 높은 대기 저항의 영향을 잘 예측하는 것이 재진입 시점 예측의 핵심이라고 할 수 있다.

구체적인 결과는 타깃이 고도 80 km에 도달하는 시간을 의미하는 재진입 시점(re-entry time)이며, 지상표면의 낙하지점이나 충돌시간을 의미하는 것은 아니다. 일반적으로 고도 80 km 인근에서 재진입 물체의 분열이 이루어져 내부 부품들이 흩뿌려지게 되고, 고도 80 km 도달 지점으로부터 진행방향으로 수천 km의 분포범위를 가지기 때문에 정확한 위치나 시간 을 정의하기 어렵기 때문이다.

이에 본 연구에서는 최적화 알고리즘을 적용하여 탄도계수를 추정하고 이를 이용하여 재진 입 시점예측을 수행하는 전략을 적용하였다. 해당 전략은 크게 기준 장반경 프로파일 생성, 탄도계수 최적화, 정밀궤도전파의 3가지 단계로 나눌 수 있다.

첫 번째, 기준 장반경 프로파일 생성에서는 현재까지 획득한 재진입 물체의 모든 TLE 데이 터에서 각각의 기산일에 해당하는 위치를 추출하고, 이를 접촉궤도(osculating orbit) 형태로 바꾸어 장반경 정보를 획득한다. 결과적으로 TLE 데이터의 숫자만큼 장반경 프로파일을 구 성하는 장반경 정보가 생성된다.

Fig. 1은 장정 5B호 발사체의 장반경 프로파일을 나타낸다. TLE 데이터가 갱신됨에 따라 장반경이 점차 낮아지며, 재진입 시점에 가까워질수록 급격하게 고도가 낮아짐을 확인할 수 있다.

다음 단계는 생성된 장반경 프로파일과 가장 잘 맞는 탄도계수를 찾는 것이다. 통상적으로 탄도계수(BC, Ballistic Coefficient)는 항력계수(C_d), 질량(M), 단면적(A)의 함수로 구성된다.

$$BC = \frac{M}{C_d A} \tag{1}$$

알려진 제원 정보를 이용하여 탄도계수를 계산할 수 있으나, 재진입 시점 예측 당시의 실제 물체의 상태(i.e., 연료의 양, 물체의 자세 등)를 알 수 없기 때문에 본 분석에서는 최적화 알 고리즘을 적용하여 앞서 생성한 장반경 프로파일과 가장 잘 맞는 탄도계수를 탐색하였다. Fig. 2를 통해 최적의 탄도계수가 재진입 시점 예측에 미치는 영향을 확인할 수 있다. 여기서 일반

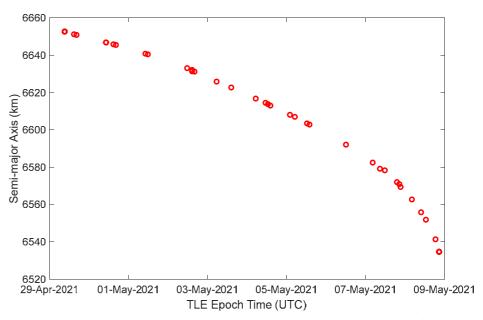


Fig. 1. Semi-major axis profile of CZ-5B rocket body using TLE(Two Line Element) data.

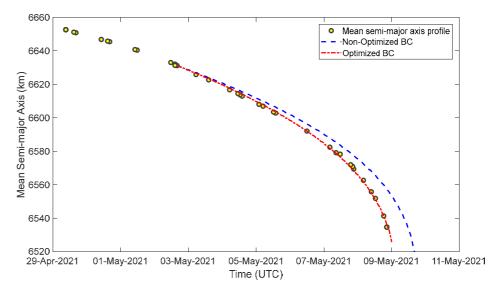


Fig. 2. Semi-major axis using non-optimized and optimized BC(Ballistic Coefficient) values (Prediction time = 2 May 2021 16:00:02.344; Actual Re-entry time = 9 May 2021 02:14:00).

탄도계수(Non-Optimized BC)는 공유된 발사 전 물체의 상태를 기반으로 계산한 것이다.

본 최적화 과정에서는 패턴서치 알고리즘(Pattern Searching Method)을 이용하였다[19]. 패턴서치 알고리즘은 휴리스틱 알고리즘(Heuristic Algorithm)의 한 종류로서 주어진 환경에 서 경험에 기반하여 최선의 해를 제공하는 방법이다. 그리드(grid)로 표현되는 탐색시점을 이 동시키고 넓히거나 좁혀서 최적의 해를 탐색하는 방법으로 진화기반의 휴리스틱 알고리즘에 비해 비교적 탐색공간이 작은 문제에서 효과적으로 해를 탐색할 수 있으며, 본 연구에서는 단 일 변수인 탄도계수만을 탐색하기 때문에 해당 알고리즘이 적합하다고 판단하였다. 해당 알 고리즘 적용을 위해 MATLAB의 Global Optimization Toolbox를 사용하였다.

Table 1과 2는 궤도예측을 위한 섭동모델과 패턴서치 알고리즘의 설정치를 각각 나타낸다.

Table 1. Orbit perturbation model

Perturbation	Option	Value
Central body gravity	Gravity model	EGM2008
	Max. degree	100
	Max. order	100
	Tides	Solid full tide, Ocean tide
Drag	Model	NRLMSISE 2000
	Flux/Ap File	SpaceWeather-All-v1.2.txt
	Geomagnetic update	Every 3 hours with interpolation
Solar radiation pressure	Model	Spherical
	Shadow model	Dual cone
Third-body gravity	Sun & Moon	JPL DE421

Properties	Value	Properties	Value
Polling method	GPS Positive Basis 2N	Grid contraction factor	0.5
Complete poll	False	Grid expansion factor	2
Max. iterations	100	Grid size tolerance	1.0E-06
Initial grid size	1	Solution tolerance	1.0E-06

Table 2. PSM(Pattern Searching Method) properties

패턴서치 알고리즘이 임의의 탄도계수를 생성하면 TLE 데이터들 가운데 가장 오래된 TLE 데이터에서 궤도데이터를 생성하고, 이를 접촉궤도로 변환한다. 변환된 궤도와 생성된 탄도 계수를 이용하여 가장 최신 TLE 데이터의 기산일까지 궤도예측을 수행하며, 궤도예측 결과 로 나오는 시간에 대한 장반경을 앞서 생성한 기준 장반경과 비교한다.

식 (2)는 최적화를 위한 적합도 함수를 나타내며, 궤도예측 후 장반경 결과 (a_{n_i}) 와 기준 장 반경 (a_{r_i}) 의 평균 오차를 최소화하도록 문제를 정의하였다. 해당 식에서 도출하고자 하는 제 어변수는 탄도계수이다.

$$F_{\min} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^{N} |a_{r_i} - a_{p_i}|$$
 (2)

N은 장반경 프로파일을 만들 때 사용된 TLE 데이터의 수를 의미한다. 장반경 프로파일 생 성에 많은 수의 TLE 데이터를 적용하면 오관측된 TLE 데이터의 영향을 줄일 수 있으나. 재 진입 물체의 특성상 고도가 낮아질수록 급격히 고도 하강률이 커지기 때문에 이와 같은 특성 을 고려하는 데 불리한 부분이 있다. 따라서 재진입 대상물체의 특성에 따라 적절한 TLE 데 이터 수를 고려하는 것이 필요하다.

최적화가 끝나면 최적화 과정에서 얻어낸 최종 탄도계수를 적용하여 물체의 고도가 80 km 에 도달할 때까지 궤도예측을 수행하여 재진입 시점을 예측한다. 이 과정에서도 Table 2의 섭동모델을 동일하게 적용한다.

이후 시간이 흘러 새로운 TLE 데이터들이 배포되면 이상의 절차를 동일하게 반복하되, 장 반경 프로파일 정의와 재진입 시점까지 궤도예측을 위한 TLE 데이터를 최신순으로 추출하여 적용한다. 장반경 프로파일 생성을 위해 10-20개의 TLE 데이터를 사용하는데, 이는 재진입 대상에 대한 세밀한 물성치 정보, TLE 데이터의 배포주기, 물체의 궤도 등을 고려하여 결정해 야 한다. 장반경 프로파일 생성을 위해 많은 TLE 데이터를 적용할 경우, 오관측된 TLE 데이 터의 영향을 줄일 수 있는 한편 재진입 시점이 가까워질 때 나타나는 급격한 고도 변화 등을 고려하기 어려운 단점이 존재한다. 하루에 배포되는 TLE의 수는 보통 2개 내외임을 고려하 면 10-20개 TLE 데이터를 사용하는 것은 5-10일에 대한 데이터를 활용하는 것을 의미하며, 그 동안 재진입 캠페인을 수행하면서 얻은 경험적 수치이다.

Fig. 3은 이상의 과정을 플로우차트로 형태로 표현한 것이다.

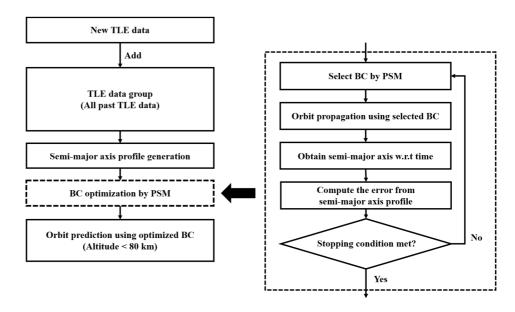


Fig. 3. Flowchart for re-entry time prediction.

3. 창정 5B호 발사체의 재진입 시점 예측 분석

2021년도 2차 IADC 재진입 분석 타깃인 창정 5B호 발사체는 2021년 4월 29일 중국 하이 난섬의 원창 발사장에서 톈허 우주정거장 모듈을 위해 발사되었다. 중국 발사체 기술 아카데 미가 개발한 창정 5호 발사체의 변형으로 발사 후 고도 170 km × 370 km 궤도에 남겨졌다. Fig. 4는 창정 5B 발사체의 형상을 보여주며, 제원에 대한 대략적인 정보는 너비 5 m, 높이 33.2 m, 질량은 18톤에 이르는 실린더 형태의 대형물체로서 1990년대 이후 가장 큰 규모의 비제어 재진입 사례이다.



Fig. 4. CZ-5B Rocket Body [20].

Table 3은 재진입 분석에 대한 종합적인 정보를 나타낸다. 발사 직후부터 재진입까지 총 42개의 TLE 데이터가 배포되었고, 알려진 질량이나 크기, 형상 제원을 참고로 탄도계수 제한 조건 및 초기조건을 정의하였다.

미국 연합우주작전센터(CSpOC, Combined Space Operations Center)에서 배포하는 TLE 데이터[21]를 이용하여 5월 5일부터 약 12시간 간격으로 5월 8일 21시까지 총 6회의 재진입 분석을 수행하였고, 각 분석 시 사용한 TLE 데이터, 분석 결과 도출된 재진입 시점, 잔여시간 대비 오차(상대오차)는 Table 4와 같다. 각 분석에서 달라지는 점은 장반경 프로파일 생성 및 최종 궤도예측에 사용되는 초기궤도 정보를 위한 TLE 데이터가 최신의 데이터로 교체되는 것이다. 분석결과에 대한 상대오차는 식 (3)과 같이 계산할 수 있다. t_{ref} 는 실제 재진입한 시 점, t는 재진입 예측 결과, t_p 는 예측을 수행한 시점을 각각 의미한다.

$$\varepsilon_r = \frac{\left| t_{ref} - t \right|}{t_{ref} - t_n} \times 100 \tag{3}$$

분석은 약 12시간 간격으로 수행되었으며, 재진입 대상의 이심률이 0.015로 다소 큰 점과 높은 단면적으로 인한 대기저항의 불확실성을 고려하여 장반경 프로파일 생성에 최신의 TLE 데이터 10개만을 이용하여 각 분석을 수행하였다.

총 6회의 분석 결과, 탄도계수는 100.5102 kg/m²에서 106.5602 kg/m²까지 나타났고, 재 진입 시점이 다가옴에 따라 장반경 프로파일과 최적 탄도계수를 적용한 궤도전파의 오차가 점차 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 대기저항의 불확실성 영향으로 설정한 궤도예측 모델 과 실제 관측 데이터인 TLE 데이터와의 차이가 점차 증가하는 것으로 해석할 수 있다. 예측

Table 3. Properties for re-entry time prediction

	Value
Prediction period (UTC)	05 May 2021 13:48:22 - 08 May 2021 23:39:59
Actual re-entry time (UTC)	09 May 2021 02:14:00
BC constraint (kg/m²)	49.2881 < <i>BC</i> < 416.9079
Initial BC (kg/m²)	102.2727
Number of TLE data	42

Table 4. Properties for re-entry time prediction(Actual re-entry time: 09 May 2021 02:14:00 UTC)

	TLE epoch time (UTC)	BC (kg/m²)	Fitness value	Re-entry time (UTC)	Relative error (%)
1	05 May 2021 13:48:22	106.3385	0.0406	08 May 2021 19:48:14	7.62
2	06 May 2021 11:59:10	106.5602	0.0540	08 May 2021 22:32:48	5.92
3	07 May 2021 08:37:57	105.5856	0.0610	09 May 2021 00:26:57	4.29
4	07 May 2021 18:55:50	101.5300	0.0687	09 May 2021 02:30:51	0.90
5	08 May 2021 04:00:47	100.5102	0.1218	09 May 2021 02:41:47	2.08
6	08 May 2021 20:34:12	102.9402	0.1328	09 May 2021 02:15:13	0.36

구간 대비 정확도를 의미하는 상대오차의 경우 최소 분석 시 7.62%에서 점차 감소하여 마지 막 분석에서는 0.36%로 나타났고, 절대오차의 경우 1.2분의 차이를 보여주어 재진입 예측 캠 페인에 참여한 9개 기관의 평균 오차인 80분 대비 정확한 결과를 도출하였음을 확인하였다.

재진입 물체의 물성치나 초기궤도, 배포되는 TLE 데이터의 빈도, 주기에 따라 나타나는 재 진입 시점예측의 오차는 달라질 수 있기에 절대적 기준의 오차를 정의하여 결과의 우수성을 평가하기보다 타 기관의 결과와 상대적 비교를 통해 제안한 분석기법의 성능을 가늠하는 것 이 적절하다고 판단되며, 이러한 측면에서 본 연구에서 제안한 기법은 9개 기관 중 가장 정확 한 결과이며, 평균 오차를 고려했을 때에도 우수한 결과를 보여주었다.

Fig. 5는 재진입 캠페인에 참여한 9개 기관의 재진입 분석 결과를 분석시간에 따라 나타낸 것이다. 캠페인 시작시점인 5월 5일 인근에서는 결과들의 분포가 상대적으로 넓게 나타나다 가 일부 기관을 제외한 대부분의 기관의 경우 재진입 시점이 임박해감에 따라 점차 수렴되어

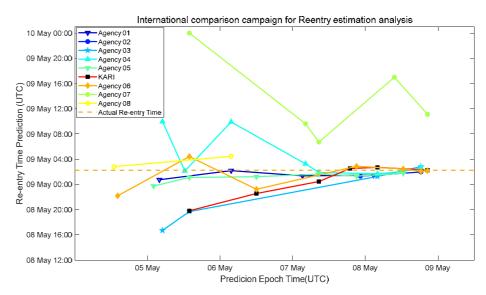


Fig. 5. International comparison campaign for re-entry time prediction.

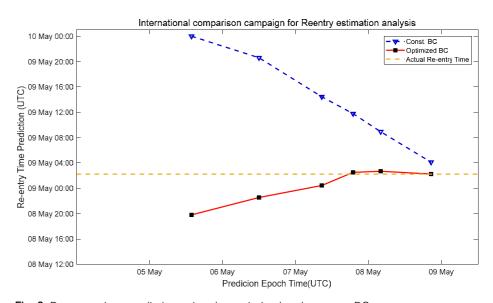


Fig. 6. Re-entry time prediction using the optimized and constant BC.

가는 모습을 볼 수 있다. 기관별 분석방법이나 사용하는 데이터에 따른 차이로 인한 결과의 차이는 예측을 수행하는 기간이 줄어듦에 따라 함께 감소하는 경향을 보여준다.

Fig. 6은 고정된 탄도계수(102.2727 kg/m²)를 적용했을 때와 매 분석 시 최적화된 탄도계 수를 적용했을 때 재진입 시점 예측 정확도의 차이를 나타낸다. 고정된 탄도계수 사용 시 시 간에 따라 실제 재진입 시점과의 차이가 점차 줄어드는 모습을 보여주지만, 최적 탄도계수 사 용 결과 대비 큰 오차를 유지하고 있고, 최종 분석 결과는 5월 9일 4시 7분으로 나타나 113 분의 오차를 보여주었다. 이를 통해 최적화된 탄도계수가 재진입 예측 정확도를 향상시킬 수 있음을 다시 한번 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 2021년 5월에 수행된 국제우주쓰레기조정위원회 재진입 테스트 캠페인의 분석 대상인 중국 창정 5B호 발사체의 재진입 시점 예측을 위해 탄도계수 최적화 기법을 제 안하였다. 재진입 물체의 정확한 물리적 정보의 부재, 높은 이심률의 궤도와 TLE 데이터의 불확실성, 대기모델 등 섭동모델의 오차 등을 보상하기 위해 다수의 TLE 데이터를 이용하여 재진입 물체의 장반경 프로파일을 생성하고, 이를 잘 추종할 수 있는 탄도계수를 최적화 알고 리즘으로 획득하여 재진입 예측에 적용하였다. 실제 중국 창정 5B 발사체 재진입에 제안한 기법을 적용하여 분석한 결과, 실제 재진입 시점과 불과 1.2분의 차이를 보여주었고, 이는 타 기관의 오차 평균인 80분 대비 정밀한 결과임을 확인하였다. 또한, 기존 알려진 불확실한 물 리적 제원을 적용한 결과 대비해서도 우수한 결과를 확인하였다.

향후 오관측된 TLE 데이터가 분석결과에 미치는 영향과 이를 최소화하기 위한 연구나 기 존 고려한 탄도계수뿐 아니라, 초기 궤도정보의 불확실성을 고려하는 방안, 다양한 불확실성 요소를 고려한 몬테칼로 시뮬레이션, 시간에 따른 탄도계수 변화 등을 고려한 후속 연구를 수 행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 한국항공우주연구원의 위성임무관제사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- 1. Celestrak, SATCAT Boxscore (2021) [Internet], viewed 2021 Aug 8, available from: https:// celestrak.com/satcat/boxscore.php
- 2. Sgobba T, Space debris re-entries and aviation safety, in International Association for the Advancement of Space Safety 2013 Conference, Montreal, QU, 21-23 May 2013.
- 3. Portree DSF, Loftus JP Jr., Orbital debris: A chronology, NASA Technical Report, NASA/TP-1999-208856, NAS 1.60:208856, S-843 (1999).
- 4. Patera RP, Ailor WH, The realities of reentry disposal, Proceedings of the AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, Monterey, CA, 9-11 Feb 1998.

- 5. Rochelle WC, Kinsey RE, Reid EA, Reynolds RC, Johnson NL, Spacecraft orbital debris reentry: aerothermal analysis, in 8th Annual Thermal and Fluids Analysis Workshop: Spacecraft Analysis and Design, Houston, TX, 8-11 Sep 1997.
- 6. Refling O, Stern R, Potz C, Review of orbital reentry risk predictions, Aerospace Report, ATR-92(2835)-1 (1992).
- 7. Hanafee JE, Analysis of beryllium parts for Cosmos 954, Lawrence Livermore Laboratory Report, UCRL-52597 (1978).
- 8. Nguyen H, Estimation of the Cosmos 954 break-up altitudes, The Aerospace Corporation Report, A85-5752.6-44 (1985).
- 9. Szewczyk NJ, Mancinelli RL, McLamb W, Reed D, Blumberg BS, et al., Caenorhabditis elegans survives atmospheric breakup of STS-107, Space Shuttle Columbia. Astrobiology. 5, 690-705. (2005). https://doi.org/10.1089/ast.2005.5.690
- 10. Klinkrad H, Fritsche B, Lips T. Koppenwallner G, Re-entry prediction and on-ground risk estimation, Space Debris - Models and Risk Analysis, ed. Klinkrad H (Springer Praxis, Chichester, 2006), 241-288.
- 11. Pardini C, Anselmo L, Re-entry predictions for uncontrolled satellites: results and challenges, Proceedings of the 6th IAASS Conference-Safety is Not an Option, Montréal, QU, 21-23 May 2013.
- 12. Anilkumar AK, Ananthasayanam MR, Subba Rao PV, A constant gain Kalman filter approach for the prediction of re-entry of risk objects, Acta. Astronaut. 61, 831-839 (2007). https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2007.01.063
- 13. Pardini C, Anselmo L, On the accuracy of satellite reentry predictions, Adv. Space Res. 34, 1038-1043 (2004). https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.01.010
- 14. Pardini C, Anselmo L, Impact of the time span selected to calibrate the ballistic parameter on spacecraft re-entry predictions, Adv. Space Res. 41, 1100-1114 (2008). https://doi.org/ 10.1016/j.asr.2007.11.013
- 15. Yurasov VS, Nazarenko AI, Alfriend KT, Cefola PJ, Reentry time prediction using atmospheric density corrections, J. Guid. Control Dyn. 31, 282-289 (2008). https://doi.org/10. 2514/1.26593
- 16. Dodin P, Minvielle P, Le Cadre JP, Estimating the ballistic coefficient of a re-entry vehicle. IET Radar Sonar Nav. 1, 173-183 (2007). https://doi.org/10.1049/iet-rsn:20060064
- 17. Reyhanoglu M, Alvarado J, Estimation of debris dispersion due to a space vehicle breakup during reentry, Acta. Astronaut. 86, 211-218 (2013). https://doi.org/10.1016/j.actaastro. 2013.01.018
- 18. Pardini C, Anselmo L, USA-193 decay predictions using public domain trajectory data and assessment of the post-intercept orbital debris cloud, Acta. Astronaut. 64, 787-795 (2009). https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2008.12.007
- 19. Audet C, Dennis JE Jr., Analysis of generalized pattern searches, SIAM J. Optim. 13, 889-903, (2002). https://doi.org/10.1137/S1052623400378742

- 20. FR24 News, Huge Chinese Long March 5B rocket drops from orbit over the Atlantic Ocean - Spaceflight Now (2021) [Internet], viewed 2021 Aug 8, available from: https://www. fr24news.com/a/2020/05/huge-chinese-long-march-5b-rocket-drops-from-orbit-overthe-atlantic-ocean-spaceflight-now.html
- 21. Space-Track, TLE data download (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://www.spa ce-track.org

Author Information

성재동 acestars@kari.re.kr



과학기술연합대학원대학교에서 2016년 박사학 위를 취득한 후, 2016년부터 한국항공우주연구 원에서 위성운영 및 우주상황인식 업무를 수행 하였으며, 현재는 국가위성정보활용지원센터에 서 우주비행역학, 우주상황인식, 국가위성 통합 운영시스템 등에 관련한 연구를 수행하고 있다.

정유연 yejung@kari.re.kr



한국과학기술원에서 2016년 박사학위를 취득 한 후, 2016년부터 한국과학기술원 박사후연 구원으로 우주물체유도 최적화에 대한 연구를 수행하였으며, 2017년부터 독일항공우주센터 에서 박사후연구원으로 동 연구를 수행하였다. 2018년 한국과학기술원에서 연구교수로서 업

무를 수행하였으며, 이후 2018년부터 현재까지 한국항공우주연구원 국가위성정보활용지원센터에서 우주비행역학, 우주상황인식 및 우 주교통관제 등에 관한 연구를 수행하고 있다.

정옥철 ocjung@kari.re.kr



전북대학교 항공우주공학과에서 2005년 석사 학위를 취득한 후 한국전자통신연구원 위성관 제기술연구팀에서 근무하였다. 2006년부터 현 재까지 한국항공우주연구원 국가위성정보활용 지원센터에서 우주상황인식 및 우주교통관제, 우주비행역학, 위성임무운영분석 등에 관한

연구를 수행하고 있다.

정대원 dwchung@kari.re.kr



1994년부터 한국항공우주연구원에서 위성개 발, 위성운영, 위성활용 및 우주상황인식 분야 업무를 수행하고 있으며, 2007년 충남대학교 에서 GPS 신호처리분야 박사학위를 취득하였 다. 2008년부터 2017년까지 국제우주운영위 원회 이사와 위원장을 담당하였다. 현재 한국

항공우주연구원 국가위성정보활용지원센터장과 과학기술연합대학 원대학교 항공우주시스템 공학과 교수이다.

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

[†]Corresponding author:

Suyeon Oh

Check for updates

Tel: +82-62-530-2517

Received: July 15, 2021

Revised: August 2, 2021 Accepted: August 2, 2021

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

요 약

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 대 한 이해와 활용도를 높이고, 분야 간 융합 연구 기회를 모색하고자 본 논문에서 태양 및 행성간 분야의 관 측 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 있 었으며, 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 대 응 함수 모델을 대표로 소개한다. 태양 및 행성간 분야의 자료에 대한 조사 내용은 한국우주과학회 홈페이 지에서 다운로드할 수 있다(http://ksss.or.kr/). 이 논문이 우주과학 관련 자료에 대한 장기적이고 연속적 인 관리에 대한 중요성을 인식하며. 우주과학 연구에 참여하는 다양한 인력들이 참조하여 국내에서 생산되 고 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) observations] 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 (KSSS), 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 진 행해 왔다. 잘 설계된 지상 관측기의 네트워크 및 인공위성 자료는 국내에서 생산하고 활용하 기가 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 연구 가 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 고 려해 보고자 한다.

현재 국내에서 우주환경 자료를 서비스하는 기관은 한국천문연구원, 극지연구소, 국립전 파연구원, 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 서비스 를 제공하고 있다. 무엇보다도 태양, 자기권, 전리권, 고층대기 모든 분야의 전문가들로 구 성되어 있다. 극지연구소는 한국극지데이터센터(Korea Polar Data Center: https://kpdc. kopri.re.kr/)를 운영하고 있으며, 극지에서의 우주환경 관측 자료를 서비스하고 있다. 국립 전파연구원은 2011년에 우주전파센터(Korean Space Weather Center, https://spacewe ather.rra.go.kr/)를 개소하여 공식적인 우주전파환경 예·경보 서비스를 시작하였으며, 기상 청 국가기상위성센터(National Meteorological Satellite Center, https://nmsc.kma.go.kr)는 2012년부터 우주기상예특보 업무를 시행하였다. 이 두 기관은 우주환경 예·경보를 목적으 로 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 우 주과학 관련 자료에 대한 장기적이고 연속적인 관리에 대한 중요성을 인식하게 하며, 우주 과학 연구에 참여하는 다양한 인력들이 참조하여 국내에서 생산되고 있는 자료를 활용하여 국내 우주과학 자료의 위상을 높이는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다. 또, 국내 우주 환 경 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 연구자 들을 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 한국우 주과학회 태양우주환경분과의 소속 회원을 대상으로 2020년에 진행되었으며, 참여 기관은 우주 환경 관련 유관 기관인 경희대학교, 국가기상위성센터, 우주전파센터, 전남대학교, 충남 대학교, 충북대학교, 한국천문연구원 및 KAIST 인공위성연구소 내 우주 환경 관련 자료에 대 한 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 높이 고자 하였다. 본 논문에서는 우주 환경의 영역 중 태양ㆍ행성간 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 개발 은 경희대학교에서 압도적으로 수행되었다. 태양·행성간 영역 연구 그룹이 잘 형성되어 있으 며, 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

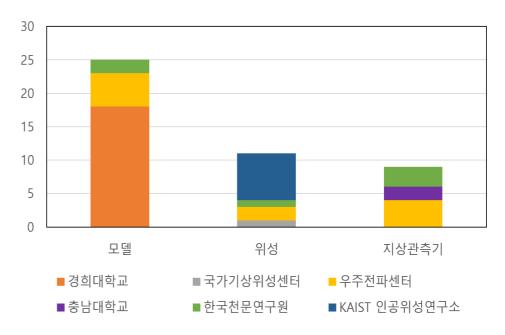


Fig. 1. Current status of solar and interplanetary data by related institutions.

되어 다양한 태양 활동을 이해하고 예측하는데 적극적으로 잘 활용되고 있다. 또, 우주전파센 터는 우주전파환경 예ㆍ경보 서비스를 수행하는 현업 기관으로서 정확한 예ㆍ경보 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	Al	보유
딥러닝 기반의 SDO/HMI magnetogram 노이즈 제거 모델	경희대학교	Al	보유
 딥러닝 기반의 태양 플레어 예보 모델	경희대학교	Al	보유
딥러닝 기반의 태양 UV 영상 생성 모델	경희대학교	Al	보유
딥러닝 기반 태양 플레어 profile 예보 모델	경희대학교	Al	보유
딥러닝 기반 24시간 뒤 global TEC map 예측 모델	경희대학교	Al	보유
	경희대학교	Al	보유
단기, 중기, 장기적 활동성 영역 특성을 활용한 강한 플레어의 앙상블 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
	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
	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)-	한국천문연구원	경험모델	보유(개발 중)
KASI)			
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 업 무를 통합적으로 수행하는 우주환경연구센터를 운영하고 있다. 특히 NASA와의 협력으로 한 국 Solar Dynamics Observatory(SDO) 데이터센터를 구축하여 운영하고 있다. 우주전파센터

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

Institute	Condition
국가기상위성센터	보유
우주전파센터	보유
우주전파센터	보유
한국천문연구원	보유
KAIST 인공위성연구소	보유
	국가기상위성센터 우주전파센터 우주전파센터 한국천문연구원 KAIST 인공위성연구소

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 TErrestial RElations Observatory(STEREO) 위성 수신 안테나도 보유하여 태양 자전에 따른 사전 예·경보에 활 용하고 있다. 한편, 국가기상위성센터는 천리안 2A를 운영하여 기상 및 해양 관측 자료뿐만 아니라 위성의 정지 궤도에서 측정한 고에너지 전자 및 양성자 플럭스의 우주 환경 관련 관 측 자료도 생산하여 제공하고 있다. KAIST 인공위성연구소는 인공위성 개발 및 운영을 담당 하고 있는 기관으로 1992년부터 우주 기상 관련 관측 자료를 생산해 오고 있다. 2018년에 발 사한 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 활용되 고 있으며[2], 여전히 미국 NASA 중심으로 개발된 위성 관측 자료를 활용하고 있는 것으로 조 사되었다. 분과 내 회원들이 태양·행성간 영역에서 활용하고 있는 위성은 주로 태양풍을 관측 하는 ACE, WIND, ULYSSES, Interplanetary Monitoring Platform-8(IMP-8) 등이며, 고에너 지 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 있 는 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. 우주전 파센터는 주로 태양 활동에 의한 전파 변화를 관측하는 지상 관측기를 운영하고 있다. 한 편, 충남대학교와 전남대학교가 이끄는 우주선 연구 그룹은 태양 활동에 따라 크게 변화하 는 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 흑점수 와 자기장 자료는 Wilcox Solar Observatory, Royal Observatory of Belgium에서 운영하고 있는 흑점 자료 센터(Sunspot Index and Long-term Solar Observations, SILSO)를 활용하 고 있는 것으로 조사되었다. 태양 및 행성간 분야의 자료에 대한 조사 내용은 한국우주과 학회 홈페이지에서 다운로드할 수 있다(http://ksss.or.kr/). 다음에서 국내 유관 기관에서 보유하고 있는 태양·행성간 영역에 대한 지상관측기, 위성 및 모델의 대표적인 자료를 소 개한다.

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)
태양플레어망원경(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 플라스마의 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 에셸분광기의 입사슬 릿면에 맺히는 영상을 빠른 속도로 이동시켜 고해상도 분광 영상자료를 획득한다. 보통 2개 의 CCD 카메라를 사용하여 Hα(6,563 Å)와 Ca II(8,542 Å)를 관측하거나 Na D2(5,890 Å)와 Fe I(5434 Å)선을 동시에 기록하게 되는데, 영상(x, y)과 분광 방향(λ) 3차원 자료를 관측 시간 에 대하여 저장하여 총 4차원 자료(x, y, \lambda, t)를 획득한다. Fig. 2는 2014년 6월 6일에 FISS로 관측한 흑점과 빛다리 구조를 나타낸 자료이다. FISS에 대한 자세한 설명과 관측 자료 다운로 드 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 결과 는 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 되었 다. 1912년 Hess에 의해 존재가 알려진 우주선(cosmic ray)은 광속에 가까운 속도로 운동하 는 고에너지 하전 입자이며, 대부분이 양성자로 구성되어 있다. 우주에서 초신성 폭발이나 활 동성 은하와 함께 태양에서도 우주선들이 방출된다. 지구자기장의 영향으로 지구 특정 위치

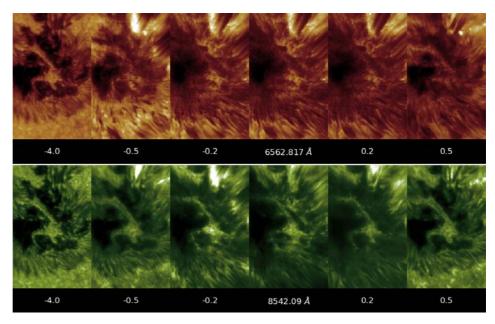


Fig. 2. Sunspot and light bridge observed by FISS on June 6 2014. Raster image at the wavelength of -4.0, -0.5, -0.2, 0, 0.2, and 0.5 Å from the center of absorption line by scanning 26" × 41" field of view (Courtesy of Juhyung Kang).

의 대기 상단에 도착하는 1차 우주선의 에너지 범위는 대략적으로 500 MeV-20 GeV 에너지 를 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 생 성된 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 우주 선 관측은 은하우주선(galactic cosmic ray) 플럭스가 태양권 내의 자기장에 의해 변화하는 것을 보여주었다. 태양 흑점수가 증가할 때 태양권 내의 자기장은 강해져서 은하우주선의 플 럭스는 지구에서 감소된다. 흑점수가 감소할 때 자기장에 의한 차폐가 약해져 많은 수의 우주 선은 지구에 도착하게 된다. 즉, 우주선의 플럭스는 태양 활동에 따라 흑점수 변화 주기로 그 플럭스가 11년 주기로 흑점수와 반대로 변화하는 역상관계를 가진다[6]. 일시적으로 변화(급 작스런 증가 또는 감소)는 태양 자기장이 태양권으로 분출되는 태양 폭발에 의해서 발생된다. 특히, 우주선 중성자 관측기에 검출되는 에너지 영역의 우주선은 태양에서 나오는 물질인 태양 풍의 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 플 럭스가 갑자기 감소하는 현상이 발생한다. 이처럼 태양권 내에서 태양 활동에 의해 지구 주위 의 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 전지 구 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 네 트워크에 등록한 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 운 영하던 것을 미국국립과학재단(NSF)의 후원으로 남극 장보고(Jang Bogo; 74.6S, 164.2E) 과

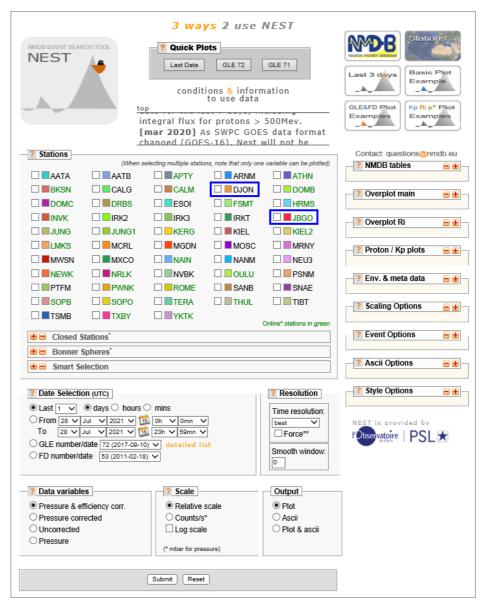


Fig. 3. Jang Bogo and Daejeon Neutron Monitors registered in NMDB.

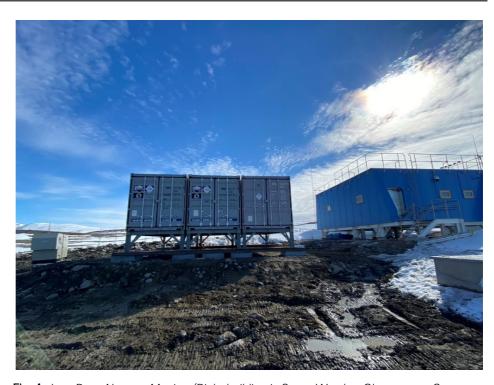


Fig. 4. Jang Bogo Neutron Monitor (Right building is Space Weather Observatory, Courtesy of Jongil Jung).

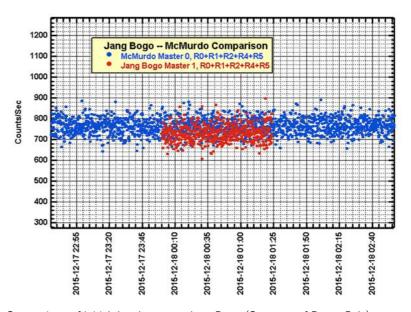


Fig. 5. Comparison of initial data between Jang Bogo (Courtesy of Roger Pyle).

학 기지로 이전했다. 두 남극 기지는 지리적으로 가까워 관측 자료의 승계도 가능하는 등 연 속성을 유지할 수 있어서 이전이 진행되었다. 이전 작업은 지난 2013년 델라웨어 대학-극지 연구소-우주선 연구 그룹(전남대와 충남대)이 중성자 관측기 이전에 관해 업무협약을 맺은 이 후, 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

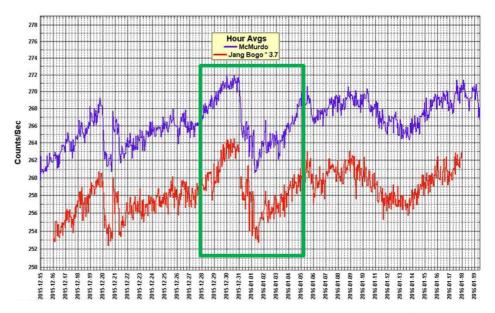


Fig. 6. Forbush decrease on December 30 2015 at Jang Bogo and McMurdo (Courtesy of Roger Pyle).

교한 결과로서 맥머도와 장보고 우주선 중성자 관측기의 초기 관측 자료가 비슷한 수준을 보 여주고 있어서 설치 후 안정화되어 있음을 알 수 있다. 또, Fig. 6은 2015년 30일에 발생한 포 부쉬 감소(Forbush decrease) 현상을 맥머도와 장보고에서 동시에 관측하여 두 우주선 중성 자 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 플라스마는 이온화 비평 형(nonequilibrium ionization) 상태(태양 폭발에 의한 온도 변화 시간 척도 ≪ 전자의 이온 화/재결합 시간 척도)에 놓이게 된다[11].

태양 코로나는 수 백 만도 이상 높은 온도의 플라스마로 구성되어 있으며, 연구자들은 자외 선, 극자외선, X-선 등의 위성 관측 자료를 이용하여 관측된 플라즈마의 물리량을 결정한다. 관측되는 빛의 세기는 플라스마를 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 일정량으 로 가정한다.

플레어와 코로나 물질 방출과 같은 태양 폭발 시 자기재결합 또는 가속된 입자 등은 코로 나 플라스마의 급격한 온도 상승을 일으킨다. 태양관측위성 SDO의 극자외선 망원경 Atmospheric Imaging Assembly(AIA)는 높은 공간 및 시간 분해능으로 태양 전면상을 관측하는 망 원경으로 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 물 리량 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 온도대응함 수를 제공한다.

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

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

식에서, f_i 는 i번째 이온의 이온량, t는 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 $\operatorname{al}(n_{\rho} \times t)$ 에 따라 결정될 수 있다.

Fig. 7은 $n_e t$ 에 따른 Fe XXI의 이온량을 보여준다. Fe XXI는 AIA 131 $^{\rm A}$ 로 관측되는 플라 즈마의 높은 온도(천만도)에 기여하는 이온이다. 온도별로 $n_{
ho}t$ 값이 커짐에 따라서 이온량이 평형 상태로 가는 것을 보여준다. 예로 순간적으로 천만도로 가열된 플라스마는 $n_o \times t$ 가 3× 10¹¹ cm⁻³ sec 이상에서 이온화 평형상태에 도달하며(하늘색선), 이는 밀도가 1 × 10⁹ cm⁻³ 이라면 이온화 평형에 이르기까지 300초가 걸린다는 것을 의미한다. 밀도가 작을 경우, 이온 화 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 적용 하여 SDO/AIA와 Hinode/XRT의 온도대응함수를 계산하였다[12]. Fig. 8은 AIA 131 Å

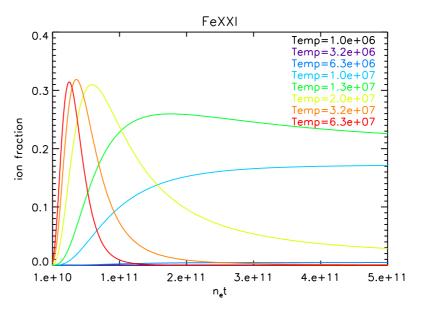


Fig. 7. $n_e t$ vs. Fe XXI ion fractions. Colored lines represent the heated temperatures. The Fe XXI ion dominates the AIA 131 Å at higher temperature.

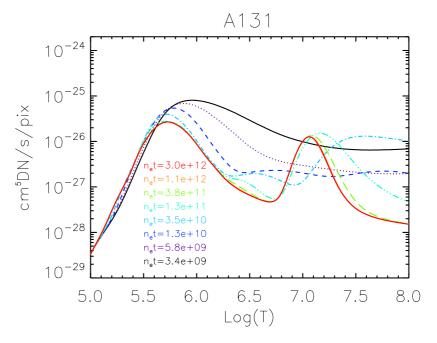


Fig. 8. Temperature response for AIA 131 Å with various $n_e t$.

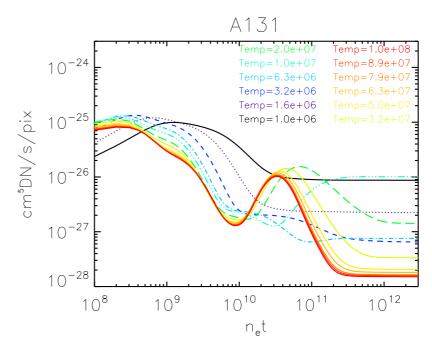


Fig. 9. $n_e t$ response for AIA 131 Å with various temperatures.

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 제 공되는 온도대응함수와 일치한다. Fig. 9는 AIA 131 Å의 온도 값에 따른 $n_e t$ 대응함수를 보여 준다. 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 있 다. 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 감 쇠(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 활 용에 대한 조사가 한국우주과학회 태양우주환경분과의 소속 회원을 대상으로 진행되었다. 조 사 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 포 함, 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 활용 하여 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 인력들 의 수요에 부응하는 의견 수렴을 통해서 진행되어야 할 필요가 있다. 그리고 그동안 국내에서 생산된 자료를 홍보하고 공유하는 과정이 필요하며, 지속적 관리 및 활용을 위해 우주과학 자 료 관리와 관련한 정책 수립이 요청된다.

과거의 자료 관리는 통합 저장과 중앙 집중형 관리 형태였지만, 최근에는 개방형 기술을 이 용한 자료의 연계와 활용으로 자료의 유통 체계와 자료 생태계를 조성하는 형태로 바뀌어 가 고 있다. 동일한 자료도 활용 방법과 적용 기술에 따라 그 가치가 다르기 때문이다. 과학 연 구를 위한 우주환경 자료의 활용을 활성화하기 위해서는 자료의 생산, 유통, 개방, 활용을 위 한 다각적인 연구가 필요하다. 이를 위해서는 전문적인 연구 인력을 보유하고 있는 한국천문 연구원과 극지연구소와 같은 연구기관의 과학 목적의 우주환경 자료 서비스와 국립전파연구 원과 기상청의 대국민 서비스를 위한 예·경보 자료 서비스를 구분한 자료 연계와 협력은 매 우 중요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국우주과학회 태양우주환경분과 소속 회원들의 공동 작업(경희대학교, 국가기 상위성센터, 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 한국연구재단 의 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/s1 1207-013-0271-2
- 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/BF006 80628
- 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 NM64type 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/10.51 40/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
월	(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/Al
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 바톨연구소, 충남 대학교에서 박사후 연수 과정 후 2014년부터 전남대학교 지구과학교육과에 재직 중이다. 태 양풍, 우주선(cosmic ray) 연구를 진행하고 있 으며, 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 하바드-스미소니안 천체물리연 구소에서 박사후 연수 과정 후 2010년 12월 부터 경희대학교 우주과학과에서 학술연구교 수로 재직 중이다. 태양 활동 및 우주 환경 연 구를 진행하고 있다.

논문

국내 우주환경 자료 보유 현황: 자기권

박경선^{1†}, 민경국², 한국우주과학회 태양우주환경분과³

1충북대학교 천문우주학과/기초과학연구소

²충남대학교 천문우주과학과

³한국우주과학회

Terrestrial Magnetospheric Observations and Models in Korea

Kyung Sun Park^{1†}, Kyungguk Min², Division of Solar and Space Environment of KSSS³

¹Department of Astronomy and Space Science/Basic Science Research Institute, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

²Department of Astronomy and Space Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

³The 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 공동연구 의 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 모 델을 소개한다. 자기권 연구의 특성 상 우주공간에서 지점관측을 위한 위성 개발과 운용에 투자가 많이 필 요하여 국내 보유 자료는 다른 분야에 비해 상대적으로 적은 편으로 조사됐지만, 국내 지자기관측소를 통 한 자기장 변화를 실시간으로 제공하고 있으며, 자기권 모델을 통해 꾸준한 연구를 수행 중이다. 본 논문에 서는 자기권 분야 중 국내 위성자료를 이용한 연구들과 제 1원리 물리법칙에 바탕이 된 모델을 대표로 소 개한다. 이번 조사 결과와 이를 정리한 논문이 우주과학 관련 자료에 대한 장기적이고 연속적인 관리에 대 한 중요성을 인식하며, 우주과학 연구에 참여하는 다양한 인력들이 참조하여 국내에서 생산되고 있는 자료 를 활용하여 국내 우주과학 자료의 위상을 높이는데 기여하기를 희망한다. 자료에 대한 조사 내용은 한국 우주과학회 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 subfields: 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 진 행해 왔다. 잘 설계된 지상 관측기의 네트워크 및 인공위성 자료는 국내에서 생산하고 활용하 기가 매우 어려운 시기였다. 20년이 흘러 국내에서 우주 환경 연구가 활성화되어 관련 기관 이 크게 증가하고, 연구 분야도 세분화되어 연구에 활용되는 관측 자료 및 모델 등이 다양해 졌다. 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 고 려해 보고자 한다.

현재 국내에서 우주환경 자료를 서비스하는 기관은 한국천문연구원, 극지연구소, 국립전파 연구원, 기상청이다. 한국천문연구원(Korea Space Weather Research Center, http://kswrc. kasi.re.kr/)은 2007년 우주환경 예보 센터 구축 사업을 시작으로 우주환경 연구를 본격적으 로 시작하였으며, 연구목적의 우주환경 관측기를 개발하여 운영하고, 데이터 서비스를 제공 하고 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 국가기상위성 센터(National Meteorological Satellite Center, https://nmsc.kma.go.kr)는 2012년부터 우 주기상예특보 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 우주 과학 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 실질 적 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 한국우주과 학회 태양우주환경분과의 소속 회원을 대상으로 2020년에 진행됐으며, 참여 기관은 우주 환 경 관련 기관인 경희대학교, 국가기상위성센터, 극지연구소, 우주전파센터, 전남대학교, 충남 대학교, 충북대학교, 한국천문연구원 및 KAIST 인공위성연구소 내 우주 환경 관련 자료에 대 한 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 활용하 여 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 설명 하고자 한다.

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

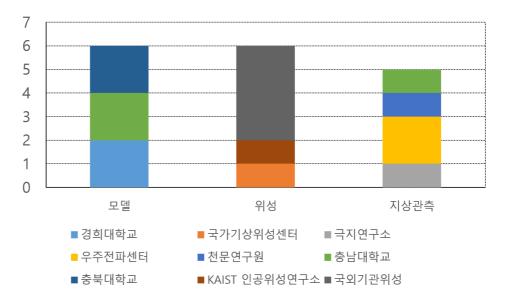


Fig. 1. Current status of magnetosphere models and in-situ observation by universities and institutions.

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

Table 1은 우주환경 관련 기관이 보유한 모델을 보여준다. 하이브리드, PIC 시뮬레이션 을 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 파동 으로 불리는 자기권 규모의 파동을 연구하기도 한다. 특히 자기권 ULF 파동의 전기장, 자기 장 데이터와 파동의 편광, 시간에 따른 변화와 공간으로의 전파, 파동 에너지의 흐름 등을 계 산하고 있다. EMIC 파동과 ULF 파동은 방사선대 내 전자 플릭스에 큰 영향을 미치는 파동들 로 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 제공하 고 있다(Fig. 2). 최근 KREAM 모델을 활용한 관련 연구가 수행되고 있으며[1], 활용방법은 담 당자에게 문의하여 제공받을 수 있다.

3차원 글로벌 MHD 시뮬레이션을 활용하여 태양풍-자기권-전리권 상호작용 연구는 충북대 학교에서 유일하게 수행 중이며, 태양활동에 따른 자기권과 더불어 전리권 반응까지 아우른 현상을 확인하고 있다. 더욱이 매우 복잡한 형태의 자기권 즉 자기축 기울기가 포함된 시뮬레 이션 연구는 국외에서도 그 예가 적다. 시뮬레이션 입력 요소는 태양활동 감시 위성에서 관측 한 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)	경희대학교	수치 모델	보유	
Wave Model	오러네컴파	구시 エョ	±π	
KREAM(Korean Radiation Exposure	천문연구원	수치 모델	보유	
Assessment Model)	CEUTE	구시 エョ	工 T	
PIC Simulation Code	충남대학교	수치 모델	보유	
3D Global MHD Simulation Code	충북대학교	수치 모델	보유	
Particle and Wave Prediction Model	충북대학교	수치 모델	보유	
in Radiation Belt	승수네락뽀	구시 エ리	- π	

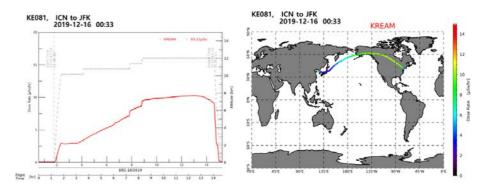


Fig. 2. KREAM usage example. Provided by Hwang, J. in KASI with permission. KREAM, Korean Radiation Exposure Assessment Model.

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 영역 까지 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 모델 과 자기권 내 파동 분포 예측 모델은 국내에서 유일한 연구분야로, 태양풍의 물리량을 방사선 대 입자 분포 예측 모델의 입력 요소로 사용하여 지자기 지수, 방사선대 내 플릭스 및 플라스 마 파동의 세기와 특성을 나타내는 변수들로 데이터가 구성된 행성(지구, 목성, 토성)에 대해

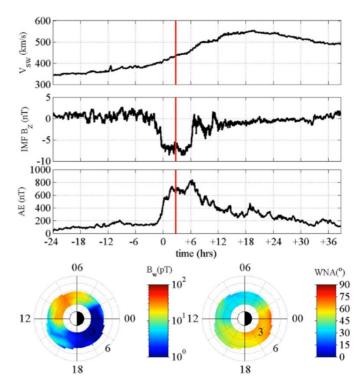


Fig. 3. Example of wave distribution prediction model in Earth's magnetosphere. Provided by Kim, K. C. in Chungbuk National University with permission.

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 정 리한 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 수 행되고 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.

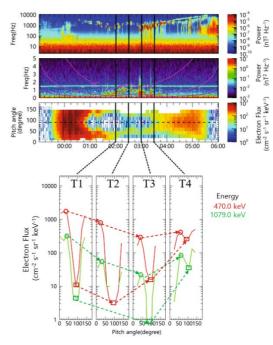


Fig. 4. RBSP-A satellite observations showing chorus wave (top), EMIC wave (second), the directional flux of 1,079 keV electrons (third), and temporal snapshots of directional fluxes of electrons at two energies (bottom). Adapted from Lee et al. [2] with permission of Journal of the Korean Physical Society.

동시에 존재할 경우 전자 플릭스가 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 같 은 작은 영역의 물리를 이해하기 위해 4개의 위성이 10-400 km 거리를 유지하며 편대비행 하면서, 근지점과 원지점이 약 0.4 Re, 25 Re로 변하며, 플라스마 물리량을 측정한다[4,5]. 전 자와 이온의 밀도, 온도, 속도의 성분과 크기, 에너지 플럭스, 자기장 성분과 크기, 위성의 자 세 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, 데 이터 처리 관련 소프트웨어 등에 대한 정보는 MMS Science Data Center(https://lasp.col orado.edu/mms/sdc/public/)[6]에서 얻을 수 있다.

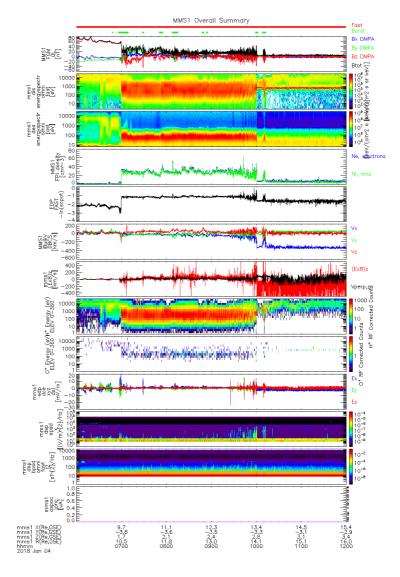


Fig. 5. MMS satellite observation data. Provided by Kim, H. E. in KyungHee University with permission.

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 자기 권의 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-B위성 이 관측한 양성자 분포이다.

국내에서 운영하는 자기권 관측 위성으로 기상청 국가기상위성센터가 보유한 정지궤도위 성인 천리안 2A호(GK2A)가 있는데, 위성의 주 목적은 상시 기상관측이다. 자기권 관측 데이 터로 자기장과 전류 밀도를 2019년 7월 25일부터 공개하고 있다. Fig. 7은 GK2A 위성이 제 공한 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,

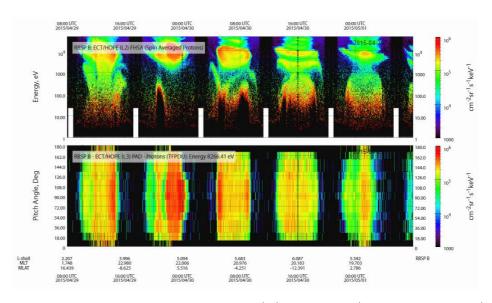


Fig. 6. RBSP-B satellite proton data from L2 (up) and L3 PAD (pitch angle distribution) (bottom). Provided by Lee, J. H. in KyungHee University with permission.

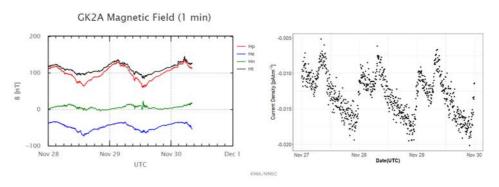


Fig. 7. Magnetic field and current density by Cheolloan 2A satellite from National Meteorological Statellite Center of Korea Meteorological Administration.

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 기 상청 국가기상위성센터에서 제공[10]하는 자료 검색 방법과 자료 수신 및 활용 현황, 생산물 산 출 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 위 성으로 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 상대 론적 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 지 구 자기장 3성분(H, D, Z)을 측정할 수 있는 지자기 관측기를 보유하고 있는데, 우주전파센터 는 이천, 제주와 강릉에, 한국천문연구원은 보현산, 국가기상위성센터는 청양, 극지연구소는 남극에 설치되어 데이터를 생산하고 있다. 특히 지자기 성분 변화 감시로 Kp 지수를 산출하 는 등 우주환경 예보에 활용 중이다.

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

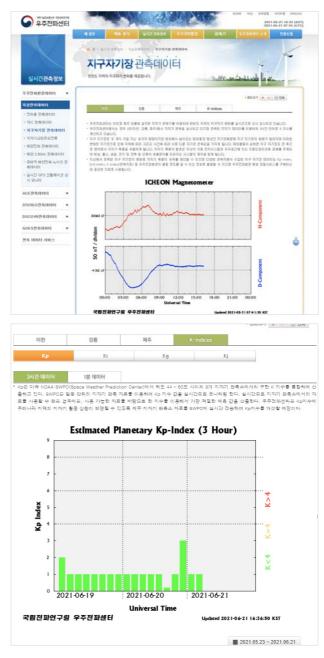


Fig. 9. Real-time data of geomagnetic field (at Icheon, Gangneung, Jeju) and Kp index change by Korean Space Weather Center of the National Radio Research Agency.

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

한국천문연구원은 보현산 지자기 관측 데이터[12]를 1분 간격의 ASCII 형태로 제공하고 있 다(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 파동 에 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 소 개한다.

2.1 국내 위성 관측 결과

국내 차세대 소형위성(NEXTSat-1)의 관측자료를 활용하여 자기부폭풍이 진행되는 동안 관 측된 입자 플럭스 증가 데이터를 분석한 연구 결과가 최근 발표됐다[14]. 이 연구에서 자기부 폭풍 동안 수십 keV 에너지를 가진 입자들의 유입으로 인한 입자 플럭스 증가를 확인하였으 며, 넓은 대역의 전자 에너지 범위(수십 keV에서 수 MeV)에 대한 전자 분포의 특성을 보고 하였다. Fig. 12는 2020년 8월 2일 MEPD 관측 결과로 위에서부터 각각 입사된 전자(a), MEPD-A에서 검출된 양성자 플릭스(b), MEPD-B에서 검출된 포획된 전자 플릭스(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 대역에 서 보여 이러한 양상이 자기부폭풍때 입자가 투입된 것으로, GOES-17 위성에서도 관측됐다.

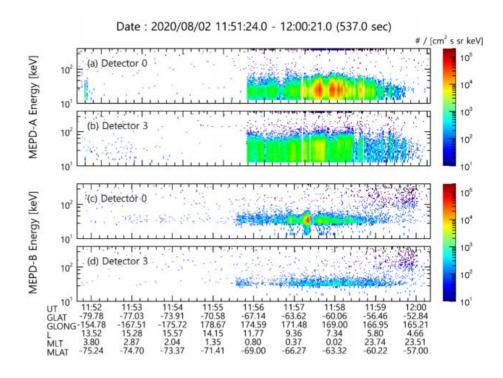


Fig. 12. MEPD observations from 11:51 to 12:01 on August 2, 2020. (a) Precipitating electron and (b) proton fluxes from the MEPD A telescope. (c) Trapped electron and (d) proton fluxes from the MEPD B telescope. MEPD, Medium-Energy Particle Detector, Adapted from Yoo et al. [14] with CC-BY-NC.

특히, Fig. 13에는 외방사선대의 안쪽 위치를 확인하기 위해 2019년 7월부터 2020년 11월 까지 관측한 Dst, Kp 지수(Fig. 13a), NEXTSat-1에서 관측한 1,420 keV와 505 keV 전자 에 너지 플릭스(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 플럭 스 증가와 매우 유사함을 확인했다. 이번 연구 결과로 국내 자기권 관측 위성 NEXTSat-1 데 이터는 국내 연구진의 연구에 큰 기여를 할 것으로 기대한다.

2.2 국내 보유 모델

시뮬레이션을 통해 우주 플라스마 운동을 조사할 경우, 블라소프 방정식과 플라스마 입자 의 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

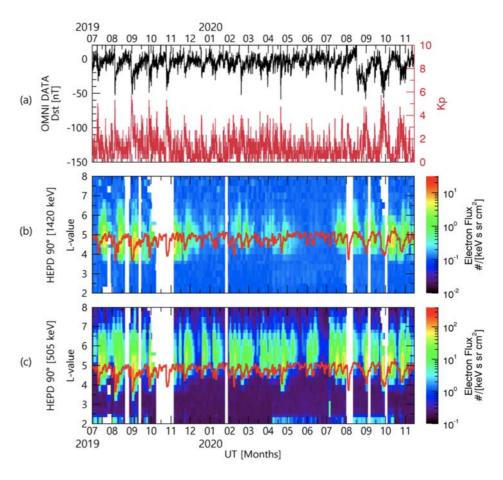


Fig. 13. Observations from July 2019 to November 2020. (a) Dst (black) and Kp (red) indices. (b)-(c) Electron fluxes at 1,420 keV and 505 keV from the HEPD. The red lines in (b) and (c) indicate the plasmapause L values, $L_{\rho\rho}$, determined by the model, Adapted from Yoo et al. [14] with CC-BY-NC.

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, 최 근에는 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 우주 환경 감시 위성인 ACE나 WIND 위성에서 관측한 태양풍의 밀도, 속도, 동압력, 그리고 행성 간자기장(interplanetary magnetic field, IMF) 성분의 1분 데이터를 사용하여 자기폭풍과 자기부폭풍 같은 이벤트 연구를 수행하거나, 정상상태 태양풍과 IMF의 평균적인 값을 사용 하여 자기권의 물리 현상을 연구하고 있다. Fig. 14는 글로벌 MHD 모델에 사용되는 지구 dipole자기장 형태의 초기 설정으로 태양풍과 IMF(X축 앞)가 지구 자기권과 충돌하며 흘러가 도록 한다.

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

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

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

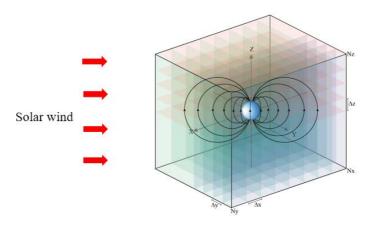


Fig. 14. Dipole magnetic field used by MHD simulation.

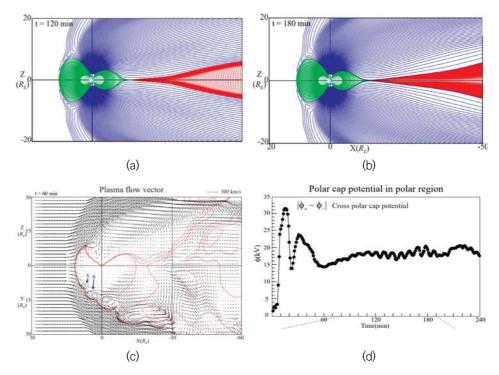


Fig. 15. Simulation results for the interaction between the Earth's magnetosphere and weak solar wind during the southward IMF. Adapted from Park et al. [17] with CC-BY-NC.

다. 또한 이러한 자기권계면의 소용돌이가 8-10분의 주기로 발생(Fig. 15c) 하여 자기권꼬리 지역으로 이동하는데, 이는 낮지역 자기권에서 지속적으로 발생한 자기재결합이 그 원인이었 다(Fig. 15a, b). 더불어 자기권의 이러한 현상이 전리권의 극횡단 전위 변화 양상에 크게 기 여하여, 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 구 조의 자기권 충돌 연구를 수행할 수 있는 것이다. 특히 자기축 기울기가 포함된 복잡한 구조 의 자기권 시뮬레이션은 그 예가 많지 않다. Fig. 16은 자기축 기울기에 따라 낮지역 자기권에 서 발생하는 자기재결합의 위치 변화이다. 자기축 기울기가 0°에서 45°까지 변하면 자기재결 합 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 비 교할 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 3 차원 자기력선 구조이며(왼쪽)와 이때 전리층에서 대류(검은색 화살표), 에너지 플럭스(색), 포 텐셜의 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

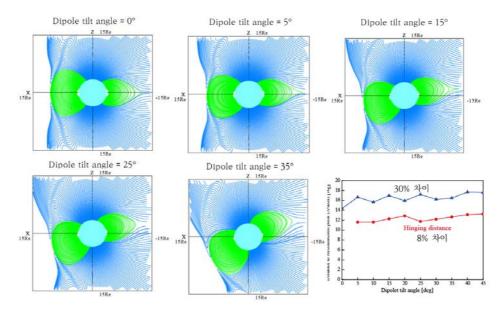
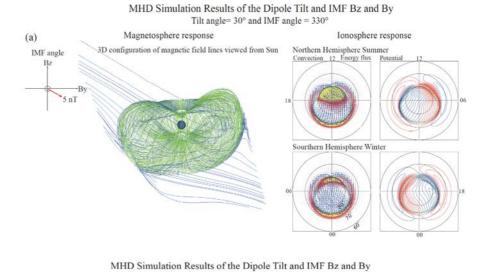


Fig. 16. Global MHD simulation results of the reconnection region by the dipole tilt effects.



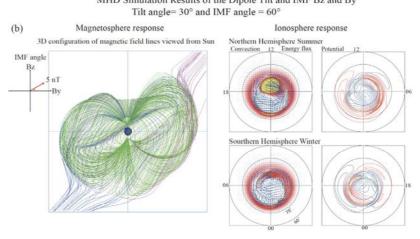


Fig. 17. Simulation results of the magnetosphere and the ionosphere by dipole tilt effect and IMF angles.

에 있다. Fig. 17a, b(왼쪽)에 3차원 자기력선들은 태양방향에서 본 구조로, By성분이 포함된 IMF와 충돌하여 태양직하점이 아닌 고위도 영역에서 낮지역 자기재결합이 활발하게 발생하 고 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 북 쪽 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 전리 층의 비대칭을 만든다(Fig. 17a, b 왼쪽). 이러한 시뮬레이션 결과들은 자기권에서 자기축 기 울기와 IMF 각도에 따른 자기재결합 발생 위치의 영향을 잘 반영한다.

Fig. 18은 지구의 자기축 기울기가 30도 기울어진 상태에서 남쪽+서쪽 성분 IMF(각도 330 도)와 충돌 후 자기권에서 플라스마 압력 분포를 2차원으로 확인 시뮬레이션 결과이다. 자기 축 기울기로 인하여 충격파면과 자기권계면이 위치가 남북 비대칭을 보이며(Fig. 18 왼쪽), 자 기권 꼬리의 자기재결합은 Sun-Earth line이 아닌 북반구(+Z)쪽으로 치우쳐 있으며, $X = -15R_E$ 에서의 플라즈마판(Fig. 18 오른쪽)이 중심에서 z축으로 약 3.8 R_{\star} 에 위치하며 곡선 형태를 갖 는다.

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 지점 관측 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 코 드나 입자(PIC) 코드를 이용하여 수행된다. 더욱이 최근 눈부시게 발전된 컴퓨터 성능과 다양 한 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 전파 도 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 포함 한 계산 결과도 등장할 것으로 기대한다.

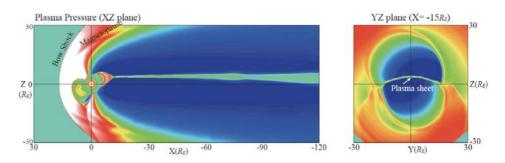


Fig. 18. Simulation results of the magnetosphere by dipole tilt effect and IMF angles.

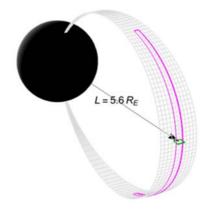


Fig. 19. Schematic illustration of a drift-shell (constant L-shell) surface and the simulation domain.

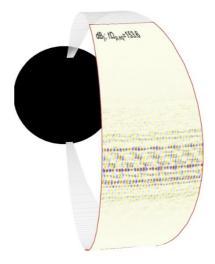


Fig. 20. An example of three-dimensional rendering of the generated magnetic field (compressional component) projected on the drift-shell surface.

3. 제언

자기권 영역의 우주 환경 자료(지상관측기, 위성 및 모델)에 대한 보유 및 활용에 대한 조사 가 한국우주과학회 태양우주환경분과의 소속 회원을 대상으로 진행되었다. 조사 결과, 자기 권 영역에서 지상 관측기 및 위성 분야는 주로 연구소(국가기상위성센터, 극지연구소, 우주전 파센터, 한국천문연구원 및 KASIT 인공위성연구소)에서 자료를 보유하고 있었으며, 모델 개 발은 대학(충북대, 경희대, 충남대)에서 수행하고 있다. 조사 내용은 한국우주과학회 페이지에 서 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 활용 하여 유의미한 연구 성과를 창출하여 우주 환경 분야에서 우리나라의 국제적 위상을 높였다. 자기권 관측 위성의 경우, 국외 위성 관측자료의 활용도가 높지만, 최근 신뢰도가 향상된 국 내 위성관측 결과로 분석한 연구성과가 나오고 있다. 하지만 국내에서 생산되는 자료의 활용 도와 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 우주 환경 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 국 립전파연구원과 기상청의 대국민 서비스를 위한 예경보 데이터 서비스를 구분한 데이터 연계 와 협력은 매우 중요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국우주과학회 태양우주환경분과 소속 회원들의 공동 작업(경희대학교, 국가기 상위성센터, 극지연구소, 서울대학교, 우주전파센터, 인공위성연구소, 전남대학교, 충남대학교, 충북대학교, 한국천문연구원)으로 진행되었고, 태양우주환경분과 운영위원(민경국, 박경선, 오 수연, 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://rbspg way.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 particlein-cell simulations of magnetosonic waves in the dipole magnetic field: on a constant Lshell. J. Geophys. Res. Space Phys. 125, e2020JA028414 (2020). https://doi.org/10.1029/ 2020JA028414

Author Information

박경선 kspark@chungbuk.ac.kr



일본 Nagoya University에서 2006년 소립자 우주물리학 박사학위를 받았다. 2004년-2006 년까지 나고야대학 태양우주환경연구소의 협 력연구원으로 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 초빙교수 로 재직 중이다.

민경국 kmin@cnu.ac.kr



미국의 New Jersey Institute Technology에서 2013년 우주공간물리 박사학위를 받았다. 2018 년 까지 박사후연구원으로 근무한 후, 2019년부 터 충남대학교 천문우주과학과에서 조교수로 재직 중이다. 주 연구 분야는 지구 자기권 내 부에서 플라즈마 파동의 생성과 진화와 이들

이 주변 플라즈마에 미치는 영향이다.

논문

국내 우주환경 자료 보유 현황: 전리권/고층대기

이창섭1, 이우경2+, 한국우주과학회 태양우주환경분과3

- 1극지연구소
- ²하국처문연구원
- ³한국우주과학회

Ionospheric and Upper Atmospheric Observations in Korea

Changsup Lee¹, Woo Kyoung Lee^{2†}, Division of Solar and Space Environment of KSSS³

¹Korea Polar Research Institute, Incheon 21990, Korea

²Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

³The Korean Space Science Society, Daejeon 34055, Korea

[†]Corresponding author:

Received: August 6, 2021

Revised: August 12, 2021 Accepted: August 12, 2021

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

Changsup Lee https://orcid.org/0000-0003-4046-7089 Woo Kyoung Lee https://orcid.org/0000-0001-5020-8684

요 약

한국우주과학회 태양우주환경분과에서는 국내 우주환경 관측 자료 활용도를 높이고, 분야 간 융합 연구 기 회를 모색하기 위해 국내 연구소와 대학에서 활용 중인 태양, 자기권, 전리권/고층대기 자료 현황을 조사 하였다. 자료는 관측 방식에 따라 지상과 위성 자료로 분류하였고, 개발 또는 활용 중인 모델 정보도 포함 한다. 이 논문에서는 조사 결과를 바탕으로 극지연구소와 한국천문연구원에서 운영하는 전리권/고층대기 관측기 현황과 자료 설명 및 활용 방법 등을 소개한다. 극지연구소에서는 남극 장보고과학기지와 세종과학 기지, 그리고 북극 다산과학기지에 전천 카메라, 페브리-페로 간섭계, 이오노존데 등을 설치해 운영 중이 다. 한국천문연구원은 보현산천문대 전천카메라와 충남 계룡대 VHF(Very High Frequency)/유성 레이더 를 운영하고 있으며, 국내 40여 개 GNSS(Global Navigation Satellite System) 관측소에서 수집한 자료를 사용해 전리권 전자밀도 정보(total electron content)를 산출하고 있다. 또한 보현산천문대와 탐라 KVN천 문대에 GNSS 신틸레이션 수신기를 설치해 전리권 교란을 관측하고 있다. 현재 관측 자료들은 웹 페이지. 나 FTP, 또는 요청을 통해 이용할 수 있다. 이 밖에 논문에 담지 않은 기타 전리권/고층대기 분야 자료 현 황은 한국우주과학회 홈페이지에서 다운로드할 수 있다(http://ksss.or.kr/). 이 논문을 통해 우주과학 연 구자들이 우주과학 자료에 대한 장기적이고 연속적인 관리의 중요성을 인식하고, 국내에서 생산 중인 자료 의 활용도와 신뢰도를 높이는 데 이바지할 수 있길 기대한다. 더불어 국내 관측 자료의 활용을 극대화하기 위한 새로운 데이터 공유 체계에 관한 논의를 시작하는 계기가 되길 바란다.

Abstract

In 2020, the solar and space environment division at the Korea Space Science Society surveyed the status of data archives in solar physics, magnetosphere, and ionosphere/upper atmosphere in Korea to promote broader utilization of the data and research collaboration. The survey includes ground- and satellite-based instruments and developing models by research institutes and universities in Korea. Based on the survey results, this study reports the status of the ground-based instruments, data products in the ionosphere and upper atmosphere, and documentation of them. The ground-based instruments operated by the Korea Polar Research Institute and Korea Astronomy and Space Science Institute include ionosonde, Fabry-Perot interferometer in Arctic Dasan stations, Antarctic King Sejong/Jang Bogo stations, and an allsky camera, VHF radar in Korea. We also provide information on total electron content and scintillation observations derived from the Global Navigation Satellite System (GNSS) station networks in Korea. All data are available via the webpage, FTP, or by request. Information on ionospheric data and models is available at http://ksss.or.kr. We hope that this report will increase data accessibility and encourage the research community to engage in the establishment of a new Space Science Data Ecosystem, which supports archiving, searching, analyzing, and sharing the data with diverse communities, including educators, industries, and the public as wells as the research scientist.

핵심어: 전리권, 고층대기, 우주환경, 지상 관측, 데이터 생태계

Keywords: ionosphere, upper atmosphere, space weather, ground observations, data ecosystem

1. 서론

전리권은 태양복사선에 의해 대기가 이온화한 영역으로 고도 약 50 km에서 1,000 km 사 이, 중간권과 열권 하부에서부터 외기권에 이르는 넓은 영역에 분포하고 있다. 지구 전리권 은 지구 대기의 가장 바깥에 위치해 외부와의 플라스마 교환이 끊임없이 일어나고 있으며, 전기적으로 중성인 대기 입자와 공존하며, 지속해서 상호작용이 발생하는 영역이다. 이 때문 에 전리권의 상태는 끊임없이 변화하며, 인류 생활에 없어서는 안 될 전파 통신과 GPS(Global Positioning System)와 같은 위성 항법시스템의 성능에 큰 영향을 미친다.

국내 전리권 관측은 1967년 국립전파연구원에서 설치한 이오노존데로 시작했으나, 전리권 연구는 2000년대 들어서야 본격적으로 시작했다[1-7]. 극지연구소에서는 남극과 북극에 설치 한 지상 관측 인프라를 중심으로 전리권 관측과 활용 연구를 수행하고 있다. 2007년과 2008 년 남극 세종과학기지에 설치한 유성레이더와 전천카메라를 시작으로[8-15] 남극과 북극 4개 관측소(남극 세종/장보고과학기지, 북극 다산과학기지, 스웨덴 키루나 Esrange)에 페브리-페 로 간섭계를 설치해 중간권과 열권의 중성 대기 바람과 온도, 그리고 대기 중량파를 관측해왔 다[16-18]. 또한 2014년 다산과학기지와 세종과학기지에 GPS 신틸레이션 수신기를 설치해 전리권 관측을 시작했으며, 2015년에는 이오노존데를 장보고과학기지에 설치해 남반구 고위 도에서 수집하기 어려운 전리권 전자밀도와 이동 속도 등을 산출해 제공하고 있다[19,20]. 세 종과학기지와 달리 장보고과학기지는 오로라가 자주 일어나는 지역에 위치해 오로라 전천카 메라를 설치해서 운영 중이며, 2021년부터 장보고과학기지와 지자기 남극 사이에 오로라 관 측망을 구성해 남반구에서 일어나는 오로라에 대한 연구를 진행할 예정이다.

한국천문연구원에서는 2007년부터 대한민국을 중심으로 한 중위도 전리권/고층대기 변화 를 연구하기 위한 다양한 관측기를 운영 중이다. 2008년 전리권/고층대기 교란 및 파동 현상 을 연구하기 위해 보현산 천문대에 전천카메라를 설치하였고, 2009년에는 대한민국 공군과 협력해 충남 계룡에 Very High Frequency (VHF) 전리권 레이더를 설치해 전리권 E층과 F층 의 전자밀도 불균일 현상을 실시간으로 관측 중이다[21-23]. 2017년에는 열권의 중성 대기 바람 속도 및 온도를 관측하기 위해 VHF 전리권 레이더 부지에 유성레이더를 추가 설치하였 다. 또한 2020년부터 국내 GNSS(Global Navigation Satellite System) 관측망을 사용한 전리

권 전자밀도 정보를 준 실시간으로 산출하는 시스템을 개발하여 2022년부터 사용자에게 제 공할 예정이며, 2020년과 2021년 보현산천문대와 제주 탐라 KVN천문대에 GNSS 신틸레이 션 수신기를 설치해 전리권 교란에 의한 GNSS 신호 영향을 감시하고 있다. 국내뿐만 아니라, 남극 장보고과학기지에 GNSS 신틸레이션 수신기를 비롯한 미국 존스홉킨스대학교 응용물리 연구소(Johns Hopkins Uni-versity Applied Physics Laboratory)에서 개발한 대기광 관측 전 천카메라를 설치해 운영 중이다[24]. 이 밖에도 2015년 극지연구소와 천문연구원은 전자 밀도 와 온도 등 고도에 따른 고위도 전리권/고층대기의 다양한 물리량을 관측할 수 있는 유럽연합레 이더(European Incoherent Scatter SCienctific Association, EISCAT) 회원으로 가입해 관측 시간과 자료를 확보하고 있다[25-27]. 지상 관측기 외에도 한국천문연구원은 2015년부터 우 리나라를 중심으로 한 지역 전리권 예측 수치 모델을 개발 중이며, 2022년에는 4기의 나노위 성으로 구성한 저궤도 우주환경 관측 위성을 발사할 예정이다.

이처럼 국내·외에서 다양한 전리권/고층대기 관측기를 운영함에도, 그동안 정보를 공유할 기회가 많지 않아 기관별로 독립적인 연구를 진행해왔다. 현재 일부 관측 자료는 한국우주환 경연구센터(http://kswrc.kasi.re.kr)와 한국극지데이터센터(http://kpdc.kopri.re.kr), 그리고 우주전파센터(http://spaceweather.rra.go.kr) 등 관측기 운영 기관이 제공하는 웹 페이지에 서 다운로드할 수 있지만 대부분은 요청해야 사용할 수 있기 때문에 접근성이 떨어지고 활용 도가 낮다. 따라서 국내에서 생산하는 우주환경 관측 자료에 대한 접근성과 활용도를 높이기 위해 한국우주과학회 태양우주환경분과에서 국내 연구소와 대학에서 보유하고 있는 우주환 경 자료 정보를 수집하였고, 한국우주과학회 2021년 봄 학술대회에서 '국내 태양 우주환경 관측 자료 활용 현황'이라는 제목으로 특별 세션을 마련해 자료 현황을 공유하였다. 이 논문 에서는 수집한 정보 중 극지연구소와 한국천문연구원이 운영하는 전리권/고층대기 관측기를 중심으로 운영 현황과 관측 자료에 관해 자세히 소개하고자 한다.

2. 전리권/고층대기 자료 보유 및 활용 현황

국내 기관에서 운영하는 전리권/고층대기 지상 관측기 현황을 Table 1에 정리하였다. 이 중 극지연구소에서 운영하는 이오노존데와 페브리-페로 간섭계, 그리고 한국천문연구원에서 운 영하는 전천카메라와 VHF/유성 레이더, 그리고 GNSS 관측 자료를 중심으로 설명한다.

2.1 이오노존데(Jang Bogo Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar Dynasonde, JVD)

이오노존데는 전리권 관측을 위해 가장 널리 사용하고 있는 지상 관측기 중 하나로 HF(High Frequency, 1-30 MHz) 주파수 대역의 전파를 사용하는 레이더의 일종이다. 송신안테나에서 방출한 전파는 전리권 플라스마 밀도 변화로 인해 지속적인 굴절이 일어나고 전파의 주파수 가 전리권 플라스마 주파수와 일치하는 고도에 이르면 반사되어 지상으로 되돌아온다. 이렇 게 전리권에서 반사된 전파를 전리권 에코(ionospheric echoes)라고 하며, 수신안테나로 받 아 전자밀도와 같은 전리권 주요 물리량을 얻을 수 있다. 극지연구소에서는 2015년 남극 장 보고과학기지에 이오노존데를 설치하여 기기 안정화 단계를 거쳐 2017년부터 고위도 전리권 전자밀도, 이온 속도, 전자밀도 수평 기울기 등의 관측 자료를 제공하고 있다[20]. 장보고과학

Table 1. The list of ground-based observations of the ionosphere and upper atmosphere managed by Korean institutes and universities

Instrument	Institute	Location	Data Period
이오노존데		안양	1973.04 – 2009.07
	국립전파연구원	이천	2010.06 - 현재
		제주	2009.01 - 현재
이오노존데(JVD)	극지연구소	남극 장보고과학기지	2017.01 - 현재
페브리-페로 간섭계		남극 장보고과학기지	2014.03 - 현재
	극지연구소	남극 세종과학기지	2017.02 - 현재
	うべきか	북극 다산과학기지	2015.10 - 현재
		스웨덴 키루나	2016.10 - 현재
전천카메라 (오로라)	극지연구소	남극 장보고과학기지	2018.03 - 현재
	극지연구소	남극 세종과학기지	2008.06 - 현재
전천카메라 (대기과)	한국천문연구원	남극 장보고과학기지	2016.12 - 현재
(대기광)	인독신군인구현	보현산천문대	2008.04 - 현재
유성레이더	극지연구소	남극 세종과학기지	2007.03 - 현재
	한국천문연구원	충남 계룡대	2017.10 - 현재
VHF 레이더	한국천문연구원	충남 계룡대	2009.12 - 현재
_	극지연구소	북극 다산과학기지	2015.08 - 현재
	국시인구소	남극 세종과학기지	2015.03 - 현재
	한국천문연구원	남극 장보고과학기지	2015.12 - 현재
GNSS		보현산천문대	2020.11 - 현재
신틸레이션 수신기 -		탐라KVN천문대	2021.07 - 현재
	국립전파연구원	강릉, 광주	2013.09 - 현재
		대전	2013.08 - 현재
		이천, 제주	2011.11 - 현재
자력계(써치코일) -	극지연구소[28]	남극 장보고과학기지	2016.12 - 현재
	경희대학교	남극 세종과학기지	2018.01 - 현재

기지에서 운영 중인 JVD는 36m 높이의 송신 타워 4개에 지상에서 타워 상단부까지 지그재 그 형태로 케이블을 연결해 송신 안테나를 구성한다. 이와 같은 타입의 송신 안테나는 단일 송신 타워를 가진 델타 타입 안테나와 비교해 주파수에 따라 균일하지 못한 전파를 송출하는 문제를 해소해 넓은 영역의 전리권 관측이 가능하다. 수신안테나는 8개의 다이폴 안테나로 '+' 형태의 배열을 구성해, 전리권 에코가 가진 위상 정보를 바탕으로 에코의 위치와 운동 속 도를 추정한다[19,20].

장보고과학기지 상공 전리권 물리량은 Fig. 1처럼 이오노그램으로 표출한다. 이오노그램은 2분마다 생성되며, 에코별 물리적 특성(거리, 신호 세기, 시선 속도, 위치, 위상 오차 등)을 계 산하고, 특성이 유사한 에코 그룹을 trace로 구분해 분석한다. 각 에코의 플라스마 주파수가 전리권 전자밀도에 비례하는 관계를 이용해 고도에 따른 전리권 전자밀도를 계산하고, 에코 단위로 분석해 전리권 전자밀도 수평 경사도를 동-서, 남-북 방향에 대해 고도별로 추정할 수 있으며, 에코의 위상 정보를 사용해 공간적 위치와 시선 방향 속도를 계산할 수 있다. 대 부분의 이오노존데가 위치한 중·저위도 지역과 비교해 장보고과학기지가 있는 극관(polar cap)과 오로라 타원체(aurora oval) 경계 지역은 열린 자기장으로 들어오는 플라스마에 의해 발생하는 복잡한 전자기 특성이 전리권 변화를 일으킨다. 따라서 JVD 관측 자료는 이오노존 데 자료 분석 기법을 검증할 수 있는 좋은 기회를 제공하며, 관측이 많지 않은 남반구 고위도

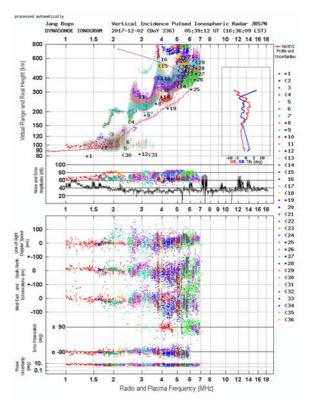


Fig. 1. An example of the lonogram derived from the Dynasonde analysis procedure. (Top) Recognized echoes marked with color and number, electron density profile presented by red solid line, and ionospheric tilt (red: zonal, blue: meridional) inside inner box. (Bottom) Echo's line-of-sight velocity and horizontal location.

전리권 자료를 제공하는 점에서 매우 중요하다. 현재 극지연구소에서는 이오노존데에서 관측 한 전자밀도와 이온 속도를 GNSS, SuperDARN 레이더, 그리고 페브리-페로 간섭계 관측 자 료와 비교해 교차 검증 중이다.

Fig. 2는 JVD 관측 자료를 사용해 분석한 그림으로, 전리권 전자밀도, 이온 속도, 그리고 전 리권 전자밀도 수평 기울기의 일 변화를 2018년 3월 한 달 평균한 값을 나타낸다. Fig. 2(a)는 80 km에서 280 km 사이 전자밀도의 하루 변화를 보여주며, Fig. 2(b)는 플라스마의 이동 속 도 변화를 동서와 남북 방향으로 나누어 그린 그림이다. 자정과 정오에 강한 남북 방향 성분 과 오전과 오후에 각각 나타나는 서쪽과 동쪽으로 흐르는 플라스마의 패턴은 전형적인 극관 주위 플라스마 운동을 보여준다. Fig. 2(c)-2(d)는 전자밀도의 수평 기울기 변화를 각각 동서와 남북방향으로 나눈 그림으로, 고위도 지역으로 유입하는 플라스마와 극 지역 플라스마 흐름 에 의한 전자 밀도의 변화 정보를 제공한다. 따라서 JVD 관측은 장보고기지 상공 전리권의 전반적인 물리적 상태를 상시 감시하는 역할을 하며 지자기 폭풍, 오로라 활동 등 우주환경 변화에 대한 고위도 전리권의 반응에 관한 연구에 활용할 수 있다.

2.2 페브리-페로 간섭계(Fabry-Perot Interferometer, FPI)

고층대기 입자들은 태양 복사와 우주선(cosmic rays) 등으로부터 에너지를 받아 높은 에너 지 상태로 올라갔다 안정한 상태로 내려오며 대기광(airglow)을 방출하므로, 대기광 관측은 고층대기 입자의 운동 속도 또는 온도를 추정할 수 있는 자료를 제공한다. FPI는 약 1 nm 정 도의 협대역 광학 필터를 사용해 단일 파장의 대기광을 선택적으로 수용해 에탈론에서 생기 는 간섭무늬를 이미지 형태로 기록하는 장비로, 원래는 천문 관측을 위해 개발했으나, 고층대

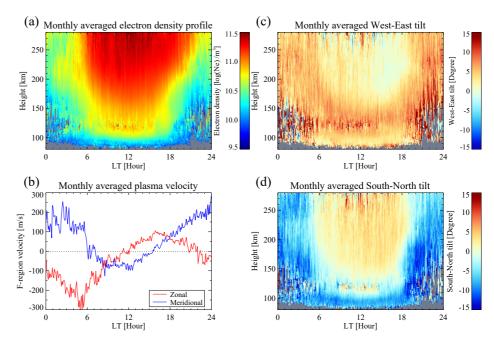


Fig. 2. Local time variations of monthly averaged ionospheric parameters in March 2018. (a) electron density profile, (b) F-region horizontal plasma velocity, (c) west-east and (d) southnorth tilt angles of the ionospheric layers.

기 관측에서 주로 사용 중이다. FPI는 광학 필터 종류에 따라 중간권 상부, 열권 하부, 그리고 열권 중·상부 대기광 관측이 가능하며, 수동(passive) 광학 장비로는 유일하게 고층대기 바람 과 온도를 동시에 측정할 수 있다. 현재 극지연구소에서는 2대의 FPI를 북극 다산과학기지와 스웨덴 키루나 관측소에서 운영하고 있으며, 약 250 km 상공의 중성 대기와 300-400 km 상 공의 산소 이온 바람과 온도를 관측하고 있다. 남극 세종과학기지에서는 중간권 상부와 열권 을 관측하기 위해 3개의 광학 필터를 탑재한 FPI를, 장보고과학기지에서는 JVD와 동시 관측 을 통한 중성 대기와 플라스마 상호작용 연구를 위해 산소 원자 대기광을 관측하는 630.0 nm 필터만 사용한 FPI를 운영 중이다.

Fig. 3(a)은 FPI 관측을 도식화한 그림이다. FPI는 상단에 달린 sky-scanner를 통해 천정 방 향(zenith)과 동–서-남-북을 45도 고도로 차례로 관측해 각각의 대기광 간섭 이미지를 수집 한다. Fig. 3(b)는 630.0 nm 대기광 관측 이미지 표본을, Fig. 3(c)는 광학기기 보정을 위한 632.8 nm HeNe 레이저 이미지 표본을 보여준다. 광학 필터를 통과한 단파장 빛(monochromatic light)은 에탈론 내부에서 지속적인 반사-투과 과정을 거쳐 2차원 간섭무늬를 형 성하고 CCD에 기록된다. 이렇게 얻은 간섭 이미지 자료는 전처리를 거쳐 렌즈, 에탈론과 같 은 광학 부품에서 발생하는 오차를 보정한 후, 최종적으로 도플러 이동(Doppler shift)과 도 플러 넓어짐(Doppler broadening)을 계산해 대기광 방출원인 산소 원자의 시선 방향 속도와 온도를 결정할 수 있다.

FPI는 대기광을 방출하는 층의 고도와 두께가 시공간적으로 거의 변화가 없다고 가정해 물 리량을 산출하나, 실제 대기는 압력과 온도에 의해 계속 변화하므로 오차가 발생한다. 특히 광학 관측의 특성상 날씨의 영향을 크게 받으므로 정확한 날씨 정보를 사용해 자료를 선정해 야 한다. 최근 세종과학기지에서 운영 중인 유성 레이더와 FPI에서 관측한 중성 대기 바람 자

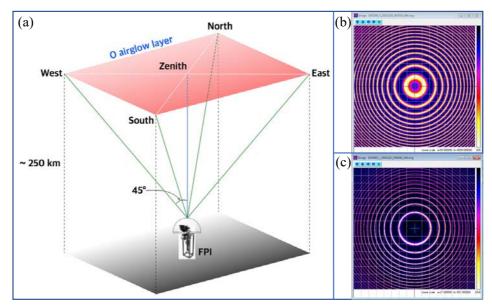


Fig. 3. A general configuration of the narrow-field FPI observation and sample fringe images from it. (a) Schematic of FPI observation geometry. The height of airglow emission layer is only for 630 nm emission. (b) 2-dimensional sky image including several fringe patterns. (c) 632.8 nm HeNe calibration laser image for providing instrument parameters. FPI, Fabry-Perot Interferometer.

료를 비교한 연구는 FPI로 관측된 바람 속도가 기상 조건에 큰 영향을 받을 수 있음을 보여 준다[18]. 따라서 정확한 날씨 정보가 필요하며, 이를 위해 기존에 사용하던 적외선 센서 대 신 소형 전천카메라를 사용해 날씨 정보를 직접 확인하는 방법으로 전환 중이다.

고위도 열권과 전리권은 열린 자기장 구조로 인해 중위도 열권과는 다른 특성이 있으며, 관 측 자료 부족으로 고위도 열권과 전리권의 상호작용에 대한 이해가 매우 낮다. 이는 현재 사 용하는 수치 모델이 지자기 폭풍이 일어날 때 고위도 열권의 원도 변화를 제대로 모사하지 못하는 주요 이유이기도 하다[17]. 장보고과학기지에서는 고위도 열권과 전리권 자료를 지속 해서 확보하기 위해 앞서 소개한 이오노존데 JVD와 FPI를 동시에 운영하고 있다. Fig. 4는 두 관측을 통해 얻은 이온 속도와 중성 바람을 비교한 그림을 보여주는 예시로 장기 관측을 통 한 극관 지역 전리권과 열권의 동역학적 상호작용에 대한 연구를 기대하고 있다.

2.3 전천카메라

전천카메라는 시야가 180도인 어안렌즈를 이용하여 전 하늘을 관측하는 카메라로서, 광학 부, 필터 휠, 그리고 CCD로 구성되어 있다. 특정 파장의 빛만 통과시키는 협대역 필터를 장 착한 전천카메라는 대기광 변화를 2차원 화상으로 볼 수 있어, 오로라나 대기 중량파(gravity

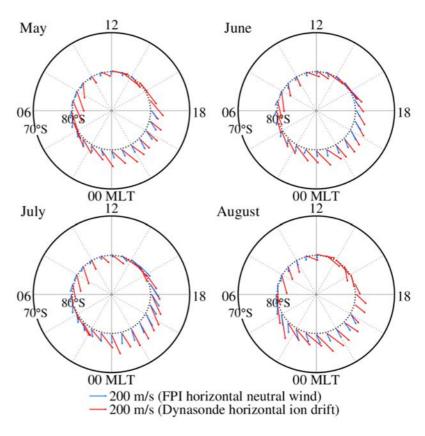


Fig. 4. Monthly averaged of hour-mean ion velocity from the JVD (red arrow) and neutral wind from the FPI (blue arrow) for four months (May-August) in 2017. Adapted from Ham et al. [20] with CC-BY-NC. FPI, Fabry-Perot Interferometer. JVD, Jang Bogo Vertical Incidence Pulsed Ionospheric Radar Dynasonde.

wave), 이동성 전리권 교란(travelling ionospheric disturbance, TID)과 같은 전리권/고층대 기의 교란 현상이나 파동 전달 현상을 연구하는 중요한 관측 자료를 제공한다. 한국천문연구 원은 대한민국 상공의 전리권/고층대기 교란 및 파동 현상을 연구하기 위해 2008년 3월부터 보현산 천문대에 전천카메라를 설치하여 관측 자료를 생산하고 있다. 또한, 미국 존스홉킨스 대학 응용물리연구소와 공동으로 개발한 전천카메라를 2016년 12월부터 남극 장보고과학기 지 우주기상관측동에 설치해 운영 중이다. 보현산천문대 전천카메라는 6-포지션 필터 휠, Princeton Pixis 1024B CCD 카메라, 그리고 2개의 협대역 필터(OI 557.7 nm and OI 630.0 nm)로 구성한 초고속(f/0.95) 3인치 전천카메라이다. 남극 장보고과학기지에 설치한 전천카 메라는 8-포지션 필터 휠, Princeton Pixis 512F CCD 카메라, 그리고 4개의 협대역 필터(OI 557.7 nm, OI 630.0 nm, OH 834.2 nm, Na 589.3 nm)로 구성한 초고속(f/0.95) 3인치 전천 카메라이다. Fig. 5는 보현산천문대 고층대기 관측 컨테이너에 설치한 전천카메라 모습이고, Fig. 6은 OI 557.7 nm과 OI 630.0 nm 관측 영상이다.



Fig. 5. All sky camera in Bohyunsan Observatory.

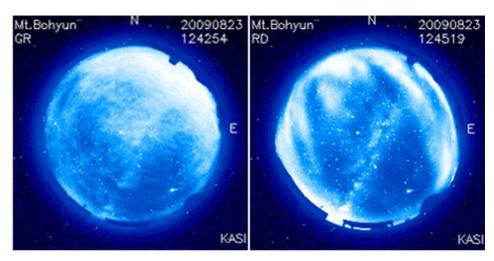


Fig. 6. Examples of all-sky camera observations in Bohyunsan Observatory. (left) OI 557.7 nm (right) OI 630.0 nm.

2.4 VHF 전리권 레이더 / 유성 레이더

VHF 전리권 레이더는 전리권 E층과 F층에서 발생하는 전자밀도 불균일 영역으로부터 되 돌아오는 신호를 수신하는 관측 장비이다. 전리권 교란으로 발생하는 도플러 후방 산란을 관측 해 고도, 후방 산란의 세기, 도플러 속도 등의 물리량을 산출하고, 이로부터 고도 60-570 km의 E층과 F층에 존재하는 전자밀도가 균일하지 않은 공간의 분포, 교란 발생 시간 및 시간에 따 른 위치 변화 등을 추정할 수 있다. 한국천문연구원은 대한민국공군과 협력해 2009년부터 계 룡대 공군기상단(북위 36.18°, 동경 127.14°)에 VHF 전리권 레이더를 설치하여 전리권 전자 밀도 불균일 현상을 실시간으로 관측 중이다. 레이더 안테나는 5개의 소자로 만든 야기 안테나 로서 한 열에 12개씩, 총 2열 24개로 구성되어 있다. 사용 주파수 대역은 40.8 MHz이며, 최대 출력은 24 kW이다. 레이더 빔은 지자기력선에 수직이 되는 천정거리 48°를 지향하고 있으며, E층과 F층을 1분씩 번갈아 관측한다. Fig. 7에 VHF 전리권 레이더 관측소 전경과 관측 영역 을 나타내었다. Fig. 8은 레이더 관측에서 얻은 전리권 E층 및 F층의 전자밀도 불균일 현상에

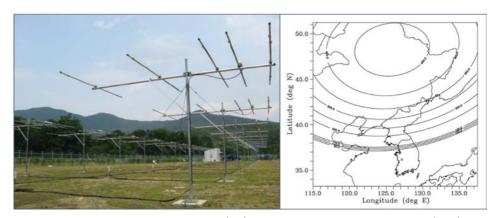


Fig. 7. Daejeon VHF ionospheric radar (left) Yagi antenna array of VHF radar (right) The geometry of the observation. Horizontal curves represent the loci where the ray path is perpendicular to the geomagnetic field at E- and F-region altitudes. A small solid circle indicates the location of the VHF radar. Adapted from Kwak et al. [21] with CC-BY-NC. VHF, Very High Frequency.

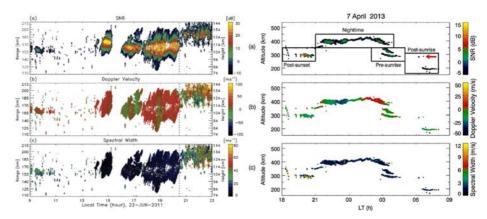


Fig. 8. Range-time variation of (a) signal-to-noise (SNR), (b) Doppler velocity, and (c) spectral width of the E- and F-region irregularities observed by the Daejeon VHF ionospheric radar. Adapted from Yang et al. [22,23] with CC-BY-NC.

대한 신호 대 잡음 비, 도플러 속도, 그리고 스펙트럼 폭 예시이다.

2017년 10월에는 기존의 VHF 전리권 레이더 부지에 유성레이더 안테나 배열(1기의 송신 안테나와 5기의 수신안테나)을 추가로 설치하여, E층과 F층, 그리고 유성흔 관측 운영 모드를 1분씩 번갈아 가며 수행하고 있다. 유성레이더(Enhanced Meteor Detection Radar, EMDR) 안테나 배열은 기존의 VHF 전리권 레이더의 Transmitter와 Transceiver 등의 주요 부품을 공유하며, 지구 고층대기에 진입하여 타 없어지는 유성흔을 관측할 수 있는 장비이다. 유성흔 관측은 전리권 전자밀도 불균일 현상의 발생 원인을 분석하는 데 필요한 고층대기 바람과 온 도를 산출할 수 있는 중요한 정보를 제공하므로 기존의 VHF 전리권 레이더 관측 자료와 비 교할 수 있다. 한편, 유성흔은 고밀도 전자를 함유하고, 중성 대기 바람에 의해 움직이며, 온 도에 따라 일정한 속도로 확산 과정을 거친다. 수평 바람 속도는 복수의 레이더 수신기로부 터 개별 에코의 위상 정보를 사용해 계산한 시선 속도와 에코의 위치 정보로부터 산출한다. 온도 정보는 레이더 신호의 감쇄율을 이용해 추정한다. Fig. 9는 유성 레이더 관측소 전경과 안테나 배열을 보여준다. Fig. 10 상단은 유성 레이더로 하루 동안 탐지한 한반도 상공의 유



Fig. 9. Daejeon VHF meteor radar (left) antenna array (right) location of receiving antenna. VHF, Very High Frequency.

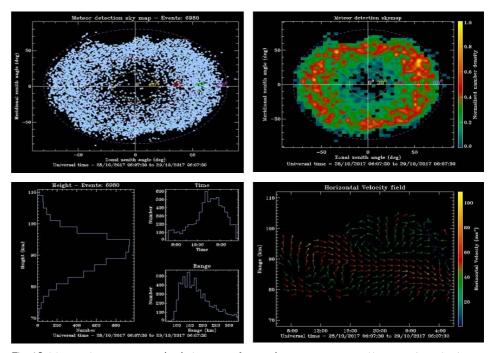


Fig. 10. Meteor detection report (top) sky maps, (bottom) meteor counts and horizontal wind velocity.

성의 Sky map 예시이다. Fig. 10 하단 왼쪽은 고도, 시간, 레이더 빔 거리에 따른 유성 수를 나타내며, 오른쪽은 유성 레이더 관측으로부터 도출한 고도에 따른 1시간 평균 수평 방향의 바람이다.

2.5 GNSS 관측

GNSS는 여러 대의 항법 위성에서 송신하는 신호를 받아 사용자의 위치와 시각을 정밀하게 결정하는 시스템으로 미국의 GPS, 러시아의 GLONASS, 유럽연합의 Galileo, 중국의 Beidou 등이 있다. GNSS 신호는 L 대역(GPS 경우 L1: 1,575.43 MHz와 L2: 1,227.60 MHz를 사용) 반송파에 실어 항법 메시지를 전송하는데, GNSS 수신기는 이 신호를 받아 사용자와 위성 사 이의 거리를 계산하고, 이를 바탕으로 사용자의 위치를 추정한다. GNSS와 사용자 간 거리를 정확하게 계산하기 위해서는 여러 오차를 제거해야 한다. 먼저 GNSS 위성의 정밀한 원자시 계와 수신기의 시계가 완벽하게 동기화되지 않기 때문에 발생하는 오차가 있고, GNSS 신호 가 전리권, 대류권과 같은 지구 대기를 투과하면서 생기는 굴절에 의한 신호 지연, 또한 수신 기 주변의 환경, 예를 들어 도심의 빌딩 숲에 여기저기 반사되어 들어올 때 발생하는 다중 경 로 오차 등이 있다. 이 중 가장 큰 오차를 발생시키는 것은 지구 전리권으로 이를 보정하기 위해 GNSS 신호에 실리는 항법 메시지에 전리권 보정 정보를 포함하지만, 오차 제거율은 50% 미만이다. 따라서 추가적인 보정 정보가 없다면 단일 주파수 수신기를 사용할 경우 위치 오차 는 전리권의 상태에 따라 십 수 미터에서 수십 미터에 달하기도 한다.

이렇듯 전리권은 GNSS 자료처리에서 가장 큰 오차 요인이지만 반대로 신호의 지연 값을 사용해 전리권 전자밀도(total electron content, TEC) 추정이 가능하다. TEC는 반송파에 실 린 코드 또는 반송파 관측 자체로 계산할 수 있는데. 코드를 사용할 경우 계산은 비교적 가단 하나 관측 잡음이 크고 정밀도가 떨어지는 반면, 반송파를 사용할 경우 계산 과정은 복잡하나 TEC 정밀도가 높아 전리권 교란 탐지를 위한 효과적인 관측 정보를 제공하다. 식 (1)은 반송 파를 사용해 시선 방향의 TEC를 계산하는 기본 방정식이다.

$$STEC = \frac{1}{40.3} \left(\frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \times \left[(L_1 - L_2) - (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) + b_r + b^s \right]$$
 (1)

 f_1 과 f_2 는 신호의 주파수(GPS의 경우 L_1 과 L_2 주파수에 해당), L_1 과 L_2 는 반송파 관측, λ_1 과 λ_2 는 각 주파수의 파장, N_1 과 N_2 는 반송파의 위상수인 모호 정수(integer ambiguity)이며, b_r 과 b_s 는 수신기와 항법 위성의 하드웨어 바이어스(Differential Code Biases, DCBs)다. 이 중 모호 정수와 수신기 DCB 추정 결과는 TEC 정밀도에 크게 영향을 주기 때문에 자료 처리 전략과 경험이 무엇보다 중요하다.

한국천문연구원에서는 1989년 국내 최초로 GNSS 수신기를 도입한 이래 국내·외 11개 GNSS 상시관측망을 운영하고 있다. 2006년 세계 네 번째이자 아시아 최초로 International GNSS Service 글로벌 데이터 센터를 유치해 운영 중이며, 2013년에 발사한 다목적실용위성 5호에 우주용 이중주파수 GPS수신기를 탑재해 GPS 신호엄폐(radio occultation)자료를 제공하고 있다[29,30]. 또한 GPS 자료를 사용한 2차원 TEC 맵 생성과 토모그래피 기법을 사용한 3차 원 전자밀도 정보 산출, 그리고 정밀 TEC 계산을 위한 DCB 추정 기술을 개발해 왔다 [31-36].

이러한 GNSS 관측망 운영 노하우와 전리권 정보 산출 기술을 바탕으로 2020년부터 동아시 아 지역을 중심으로 한 전리권 정보를 빠르고 정확하게 전달하기 위해 국토지리정보원, 국립 해양측위정보원을 포함한 국내 40여 개 GNSS 관측소 자료를 실시간으로 수집하여 전리권 정보(TEC, Rate Of TEC Index)를 생성하고 있으며, 2022년부터 웹 페이지를 통해 사용자에 게 제공할 예정이다. Fig. 11은 GPS와 GLONASS 자료를 사용해 산출한 TEC 변화 정보 예시 이다.

또한 한국천문연구원은 2020년 11월 경북 영천의 보현산천문대, 그리고 2021년 7월 제주 탐라 KVN천문대에 GNSS 신틸레이션 수신기를 설치해 운영 중이다. 이 수신기는 전리권의 급격한 변화나 GNSS 위성 문제로 발생하는 GNSS 신호 교란을 관측하며, 30초나 1초 간격 으로 관측하는 일반 GNSS 수신기와 달리 50-100 Hz로 GNSS 신호를 수신해 위상과 진폭의 고해상도 변화 정보를 제공한다. 보현산천문대 고층대기 관측용 컨테이너 옆에 설치한 안테 나 모습과 관측 자료 예시를 Fig. 12에 나타내었다.

3. 맺음말

한국우주과학회 태양우주환경분과에서는 우주환경 관측 자료에 대한 이해도를 높이고, 연구 교류를 활성화하기 위해 국내 연구소와 대학에서 보유 중인 지상과 위성 관측 자료와 모델 현 황을 조사하였다. 이 논문에서는 전리권/고층대기 관측기를 가장 많이 보유한 극지연구소와 한 국천문연구원에서 운영하는 지상 관측기를 중심으로 관측 방법과 자료 현황에 대해 소개했다.

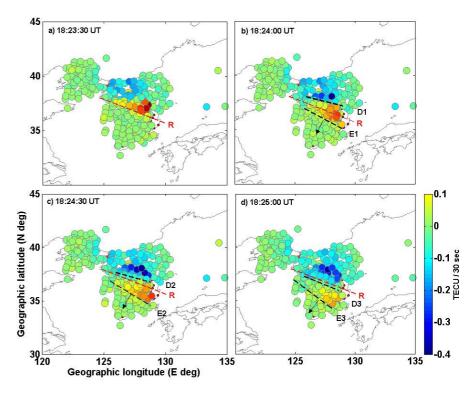


Fig. 11. Two-dimensional maps of the rate of TEC derived from GPS/GLONASS observations in Korea. Courtesy of Byung-Kyu Choi. TEC, Total Electron Content. GPS, Global Positioning System.

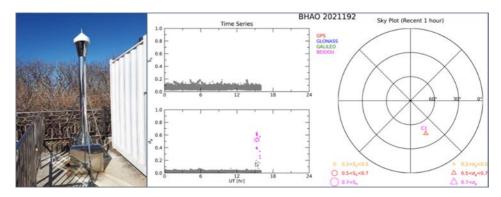


Fig. 12. Bohyunsan GNSS scintillation station (left) GNSS antenna tower. (right) GNSS scintillation observation on 11 July, 2021. Courtesy of Junseok Hong. GNSS, Global Navigation Satellite System.

논문에 담지 못한 기타 관측 자료에 관한 정보는 한국우주과학회 홈페이지(http://ksss.or.kr)에 서 확인할 수 있다.

우주환경연구를 본격적으로 시작한 지 어느덧 20년 가까이 되었고, 국내 연구자들의 활발 한 연구 활동에 힘입어 우주환경 분야에서 우리나라의 위상은 높아졌으나, 관측 자료는 여전 히 상당 부분 국외에 의존하고 있다. 국내 기관에서 생산한 관측 자료는 정보 공유가 제대로 이루어지지 않고 전통적인 웹 베이스 저장, 배포 방식만을 사용해 왔기 때문에 활용도가 낮다. 국내 생산 자료의 활용도와 신뢰도를 높이고, 우주과학 전 분야를 아우르는 빅 사이언스를 위 해서는 다양한 정보 공유의 창구를 마련함과 동시에 우주과학 분야 데이터 생태계를 혁신하 려는 노력이 필요하다. 과거의 데이터 센터는 통합 저장과 중앙 집중형 관리 시스템이었으나, 최근에는 오픈 API, 오픈 소스 프로젝트 등 개방형 기술을 사용해 데이터의 접근성을 높이고, 다양한 분야와 연계해 데이터를 재가공함으로써 활용도를 극대화하고 있다. 미국 나사에서도 행성 탐사 임무에서 수집한 자료를 누구나 쉽게 접근해 원하는 방식으로 분석하며 공유하는 것을 지원하는 새로운 데이터 공유 체계인 Planetary Data Ecosystem을 만들어 나갈 예정이 다. 우리나라에서도 우주환경뿐만 아니라, 우주과학 전 분야 발전을 위해 이른 시일 내에 우 주과학 데이터 생태계를 개선하기 위한 커뮤니티 차원의 논의를 시작하길 바란다.

감사의 글

이 연구는 한국우주과학회 태양우주환경분과 소속 회원들의 공동 작업(극지연구소, 한국천 문연구원, 국립전파연구원, 인공위성연구소, 전남대학교, 충남대학교, 충북대학교)으로 진행하 였고, 태양우주환경분과 운영위원(민경국, 박경선, 오수연, 이우경, 이진이, 이창섭)이 대표로 논문을 작성했습니다. 태양우주환경분과 회원들의 적극적인 협조에 감사드립니다. 특히 논문 작성과 검토에 많은 도움을 주신 곽영실, 권혁진, 지건화 회원께 감사드립니다.

References

1. Park YK, Kwak YS, Ahn BH, Park YD, Cho HH, Ionospheric F2-layer semi-annual variation

- in middle latitude by solar activity, J. Astron. Space Sci. 27, 319-327 (2010). https://doi.org/ 10.5140/JASS.2010.27.4.319
- 2. Kim E, Chung JK, Kim YH, Jee G, Hong SH, et al., A climatology 494 study on ionospheric F2 peak over Anyang, Korea. Earth, Planets Space, 63, 335-349 (2011). https://doi.org/ 10.5047/eps.2011.03.011
- 3. Yun J, Kim YH, Kim E, Kwak YS, Hong SH, Unusual enhancements of NmF2 in Anyang ionosonde data, J. Astron. Space Sci. 30, 223-230 (2013). https://doi.org/10.5140/JASS. 2013.30.4.223
- 4. Park YK, Kwak YS, Ahn BH, Seasonal and latitudinal variations of the F2-Layer during magnetic storms, J. Astron. Space Sci. 30, 123-131 (2013). https://doi.org/10.5140/JASS. 2013.30.4.231
- 5. Jung SH, Kim YH, Kim KN, Manual scaling of ionograms measured at Jeju (33.4°N, 126.3°E) Throughout 2012, J. Astron. Space Sci. 35, 143-149 (2018). https://doi.org/10.5140/JASS. 2018.35.3.143
- 6. Jo E, Kim YH, Moon S, Kwak YS, Seasonal and local time variations of sporadic E layer over South Korea. J. Astron. Space Sci. 36, 61-68 (2019). https://doi.org/10.5140/JASS.2019. 36.2.61
- 7. Lee S, Kim YH, Jung SH, Kwak YS, Yun J, Manually scaling ionograms measured by Icheon and Jeju ionosondes over a 2-year period (2017–2018), J. Korean Phys. Soc. 78, 1249-1265 (2021). https://doi.org/10.1007/s40042-021-00174-3
- 8. Kim IH, Kim YH, Lee CS, lee G, Seasonal variation of meteor decay times observed at King Sejong Station (62.22°S, 58.78°W), Antarctica, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 72, 883-889 (2010). https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.05.003
- 9. Kim JH, Kim YH, Jee G, Lee CS, Mesospheric temperature estimation from meteor decay times of weak and strong meteor trails, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 89, 18-26 (2012). https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.07.003
- 10. Song IS, Lee C, Kim JH, Jee G, Choi HJ, et al., Meteor radar observations of vertically propagating low-frequency inertia-gravity waves near the southern polar mesopause region, J. Geophys. Res. Space Phys. 122, 4777-4800 (2017). https://doi.org/10.1002/2016JA022978
- 11. Lee C, Jee G, Kim JH, Song IS, Meteor echo ceiling effect and mesospheric temperature estimation from meteor radar observations, Ann. Geophys. 36, 1267-1274 (2018). https:// doi.org/10.5194/angeo-36-1267-2018
- 12. Choi JM, Kwak YS, Kim YH, Lee C, Kim JH, et al., Anisotropic diffusion of meteor trails due to the geomagnetic field over King Sejong Station (62.2°S, 58.8°W), Antarctica, Astrophys Space Sci, 363,111 (2018). https://doi.org/10.1007/s10509-018-3333-y
- 13. Kam H, Kim YH, Mitchell NJ, Kim JH, Lee C, Evaluation of estimated mesospheric temperatures from 11-year meteor radar datasets of King Sejong Station (62°S, 59°W) and Esrange (68°N, 21°E), J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 196, 105148 (2019). https://doi.org/10. 1016/j.jastp.2019.105148

- 14. Lee W, Song IS, Kim JH, Kim YH, Jeong SH, et al., The observation and SD-WACCM simulation of planetary wave activity in the middle atmosphere during the 2019 southern hemispheric sudden stratospheric warming, J. Geophys. Res. Space Phys. 126, e2020 JA029094 (2021). https://doi.org/10.1029/2020JA029094
- 15. Song BG, Song IS, Chun HY, Lee C, Kam H, et al., Activities of small-scale gravity waves in the upper mesosphere observed from meteor radar at King Sejong station, Antarctica (62.22°S, 58.78°W) and their potential sources, J. Geophys. Res. Atmos. 126, e2021 JD034528 (2021). https://doi.org/10.1029/2021JD034528
- 16. Wu Q, Jee G, Lee C, Kim JH, Kim YH, et al., First simultaneous multi-station observations of the polar cap thermospheric winds, J. Geophys. Res. Space Phys. 122, 907-915 (2017). https://doi.org/10.1002/2016JA023560
- 17. Lee C, Jee G, Wu Q, Shim JS, Murphy D, et al., Polar thermospheric winds and temperature observed by Fabry-Perot interferometer at Jang Bogo Station, Antarctica, J. Geophys. Res. Space Phys. 122, 9685-9695 (2017). https://doi.org/10.1002/2017JA024408
- 18. Lee C, Jee G, Kam H, Wu Q, Ham YB, et al., A comparison of Fabry-Perot interferometer and meteor radar wind measurements near the polar mesopause region, J. Geophys. Res. Space Phys. 126, e2020JA028802 (2021). https://doi.org/10.1029/2020JA028802
- 19. Kwon HJ, Lee C, Jee G, Ham YB, Kim JH, et al., Ground-based observations of the polar region space environment at the Jang Bogo Station, Antarctica, J. Astron. Space Sci. 35, 185-193 (2018). https://doi.org/10.5140/JASS.2018.35.3.185
- 20. Ham YB, Jee G, Lee C, Kwon HJ, Kim JH, et al., Observations of the polar Ionosphere by the vertical incidence pulsed ionospheric radar at Jang Bogo Station, Antarctica, J. Astron. Space Sci. 37, 143-156 (2020). https://doi.org/10.5140/JASS.2020.37.2.143
- 21. Kwak YS, Yang TY, Kil H, Phanikumar DV, Heo BH, et al., Characteristics of the E- and F-region field-aligned irregularities in middle latitudes: initial results obtained from the Daejeon 40.8 MHz VHF radar in South Korea, J. Astron. Space Sci. 31, 15-23 (2014). https://doi.org/10.5140/JASS.2014.31.1.15
- 22. Yang TY, Kwak YS, Kil H, Lee YS, Lee WK, et al., Occurrence climatology of F region fieldaligned irregularities in middle latitudes as observed by a 40.8 MHz coherent scatter radar in Daejeon, South Korea, J. Geophys. Res. Space Phys. 120, 10107-10115 (2015). https:// doi.org/10.1002/2015JA021885
- 23. Yang TY, Kwak YS, Lee J, Park J, Choi S, The first report on the afternoon e-region plasma density irregularities in middle latitude, J. Astron. Space Sci. 38, 135-143 (2021). https:// doi.org/10.5140/JASS.2021.38.2.135
- 24. Hong J, Chung JK, Kim YH, Park J, Kwon HJ, et al., Characteristics of ionospheric irregularities using GNSS scintillation indices measured at Jang Bogo Station, Antarctica (74.62°S, 164.22°E). Space Weather, 18, e2020SW002536 (2020). https://doi.org/10. 1029/2020SW002536
- 25. Lee YS, Kim YH, Kim KC, Kwak YS, Sergienko T, et al., EISCAT observation of wave-like

- fluctuations in vertical velocity of polar mesospheric summer echoes associated with a geomagnetic disturbance, J. Geophys. Res. Space Phys. 123, 5182-5194 (2018). https://doi. org/10.1029/2018JA025399
- 26. Wu Q, Knipp D, Liu J, Wang W, Häggström I, et al., What do the new 2018 HIWIND thermospheric wind observations tell us about high-latitude ion-neutral coupling during daytime? J. Geophys. Res. Space Phys. 124, 6173-6181. https://doi.org/10.1029/2019J A026776
- 27. Kim E, Jee G, Ji EY, Kim YH, Lee C, et al., Climatology of polar ionospheric density profile in comparison with mid-latitude ionosphere from long-term observations of incoherent scatter radars: a review, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 211, 105449 (2020). https://doi.org/ 10.1016/j.jastp.2020.105449
- 28. Kwon HJ, Kim KH, Jee G, Jin H, Kim H, Characteristics of Pc5 activity at high latitudes stations in Antarctica, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 193, 105087 (2019). https://doi.org/10.10 16/j.jastp.2019.105087
- 29. Lee WK, Chung JK, Cho S, Park JU, Cho JH, et al., Retrieval of electron density profile for KOMPSAT-5 GPS radio occultation data processing system, J. Astron. Space Sci. 24, 297-308 (2007). https://doi.org/10.5140/JASS.2007.24.4.297
- 30. Choi MS, Lee WK, Cho S, Park JU, Operation of the radio occultation in KOMPSAT-5, J. Astron. Space Sci. 27, 345-352 (2010). https://doi.org/10.5140/JASS.2010.27.4.345
- 31. Choi BK, Kil H, Large ionospheric TEC depletion induced by the 2016 North Korea rocket, Adv. Space Res. 59, 532-541 (2017). https://doi.org/10.1016/j.asr.2016.09.012
- 32. Choi BK, Yoon HS, Lee SJ, Combined GPS/GLONASS relative receiver DCB estimation using the LSQ method and ionospheric TEC changes over South Korea, J. Position. Navig. Timing. 7, 175-181 (2018). https://doi.org/10.11003/JPNT.2018.7.3.175
- 33. Sessanga N, Kim YH, Choi BK, Chung JK, The 4D-var Estimation of North Korean rocket exhaust emissions into the ionosphere, J. Geophys. Res. Space Phys. 123, 2315-2326 (2018). https://doi.org/10.1002/2017JA024596
- 34. Choi BK, Hong J, Observation of the fast-traveling ionospheric disturbances induced by the 2017 North Korean missile, Adv. Space Res. 63, 2598-2608 (2019). https://doi. org/10.1016/j.asr.2018.12.033
- 35. Choi, BK, Sohn DH, Lee SJ, Correlation between Ionospheric TEC and the DCB Stability of GNSS Receivers from 2014 to 2016, Remote Sens. 11, 2657 (2019). https://doi.org/ 10.3390/rs11222657
- 36. Choi BK, Lee WK, Sohn DH, Yoo SM, Roh KM et al., Ionospheric TEC monitoring over Jeju island using the Chinese Beidou satellite navigation system, J. Position. Navig. Timing. 9, 1-6 (2020). https://doi.org/10.11003/JPNT.2020.9.1.1

Author Information

이창섭 cslee@kopri.re.kr



충남대학교 천문우주과학과에서 2014년 박사 학위를 취득하고, 2015년부터 해양과학기술원 부설 극지연구소에서 선임연구원으로 재직 중 이다. 남북극 고층대기/전리권 제반 현상에 대 한 연구를 수행하고 있다.

이우경 wklee@kasi.re.kr



과학기술연합대학원대학교(UST)에서 박사학위 를 받은 후 2014년부터 한국천문연구원에서 일하고 있다. GNSS(위성항법)와 위성 관측 자 료를 사용해 전리권과 고층대기를 연구하고 있으며, 특히 전리권을 감시하고 교란의 원인 을 찾아내는 데 관심이 많다.

논문



김용하^{1†}, 최성희¹, 유용재¹, 김경자²

¹충남대학교 대학원 우주지질학과

²한국지질자원연구원

Basic Lunar Topography and Geology for Space Scientists

Yong Ha Kim^{1†}, Sung Hi Choi¹, Yongjae Yu¹, Kyeong Ja Kim²

¹Department of Astronomy, Space Science, Geology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM), Daejeon 34132, Korea

요 약

본 논문은 다가오는 달 유인 탐사시대를 대비하여 달의 지형 및 지질학적 기초 지식을 우주과학자들에게 소개한다. 달 지형 용어에 대한 학술적 기원을 간단히 정리하였으며, 현재 통용되는 한글 용어를 확장하여 새로운 지형 용어들을 제안하였다. 특히, 일반인도 꼭 알아야 할 대표적인 달의 지형으로 1 대양(폭풍의 대 양), 10대 바다(비의 바다, 평온의 바다, 고요의 바다, 감로주의 바다, 풍요의 바다, 위난의 바다. 증기의 바 다. 인식의 바다, 습기의 바다, 구름의 바다), 6대 충돌구(티코, 코페르니쿠스, 케플러, 아리스타쿠스, 스테 비누스, 랑그레누스)를 제안한다. 달의 지형으로 고원(highland), 바다(maria), 산맥(mountains), 충돌구 (crater), 함몰 용암굴/열구(rille, rima), 지구대(graben), 돔(dome), 용암동굴(lava tube), 주름 능선 (wrinkle ridge), 참호(trench), 절벽(rupes), 그리고 달의 표면 흙을 표토(regolith)로 사용할 것을 제안한 다. 또한, 달의 내부 구조 표준 모델과 대표적 암석을 소개하였다. 지구의 지질 시대구분은 발견 화석과 방 사성 동위원소를 이용한 절대연령 측정을 기준으로 하는 반면, 표준적인 달의 지질 시대 구분은 대표적인 충돌구 형성을 기준으로 선-넥타리스 기(Pre-Nectarian), 넥타리스 기(Nectarian), 임브리움 기(Imbrian), 에라토스네스 기(Erathostenesian), 코페르니쿠스 기(Copernican)로 나뉜다. 마지막으로 인간의 달 활용 에 획기적인 계기가 되는 최근의 달 표면 물 발견에 대한 내용을 정리하였으며, 향후 한국지질자원연구원 에서 개발될 물 채취 장치의 개념도 소개하였다.

Abstract

Upon the human exploration era of the Moon, this paper introduces lunar topography and geologic fundamentals to space scientists. The origin of scientific terminology for the lunar topography was briefly summarized, and the extension of the current Korean terminology is suggested. Specifically, we suggest the most representative lunar topography that are useful to laymen as 1 ocean (Oceanus Procellarum), 10 maria (Mare Imbrium, Mare Serenitatis, Mare Tranuillitatis, Mare Nectaris, Mare Fecundatis, Mare Crisium, Mare Vaporium, Mare Cognitum, Mare Humorum, Mare Nubium), 6 great craters (Tyco, Copernicus, Kepler, Aristachus, Stebinus, Langrenus). We also suggest Korean terms for highland, maria, mountains, crater, rille, rima, graben, dome, lava tube, wrinkle ridge, trench, rupes, and regolith. In addition, we introduce the standard model for the lunar interior and typical rocks. According to the standard model on the basis of historical impact events, the lunar geological eras are classified as Pre-Nectarian, Nectarian,



Received: July 19, 2021 Revised: August 13, 2021 Accepted: August 16, 2021

[†]Corresponding author:

Yong Ha Kim Tel: +82-42-821-5467 E-mail: yhkim@cnu.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

Yong Ha Kim https://orcid.org/0000-0003-0200-9423 Sung Hi Choi https://orcid.org/0000-0001-8942-0359 Yongjae Yu https://orcid.org/0000-0002-2005-2778

Kyeong Ja Kim

https://orcid.org/0000-0001-6220-8411

Imbrian, Erathostenesian, and Copernican in chronologic order. Finally, we summarize the latest discovery records on the water on the Moon, and introduce the concept of water extraction from the lunar soil, which is to be developed by the Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM).

핵심어 : 달, 지형, 지질, 달 바다, 충돌구, 월면 수분

Keywords: moon, topography, geology, lunar maria, impact crater, lunar water

1. 서론

고래로부터 달은 인류 문명에 신화적, 문학적, 과학적으로 지대한 영향을 미쳐왔다. 인류가 달 표면에 착륙한 지 반세기가 지난 지금, 달은 과학적 탐구의 대상을 넘어 인류가 실제로 활 용할 대상으로 부각되고 있다. 2017년도에 시작된 미국의 Artemis 유인 우주선 프로그램은 금년(2021년) 말 첫 시험 우주선을 발사를 시작하여 당분간 세계 대중의 시선을 집중시킬 것 이다. 이 탐사 프로그램에 우리나라도 참여하기 때문에 국내에서도 언론의 관심을 받을 것이 다. 이런 대중의 달 관심에 대응하여 천문우주 관련 전문가들도 달에 대한 기본 지식을 정리 해 볼 시기이다. 그러나 달 표면 지형에 대한 지식은 지질학적 배경이 필요하므로. 자칫 천문 우주과학 전공자에게 부족할 수도 있다. 더욱이 지형에 대한 학술 용어들이 한글로 정착되지 못해, 진행되는 달 탐사 내용을 국민들에게 신속 정확하게 설명하는 데 혼선이 있을 수 있다. 따라서 저자들은 본 논문을 통해 천문우주전공자에게 달의 지형 지질에 대한 기본 지식 전달 과 한글 용어의 정착에 기여하고자 한다.

달은 태양과 함께 인류에게 가장 친숙한 천체이다. 거의 모든 문명과 민족 문화에서 달에 관한 신화나 설화가 전해지고, 우리에게 신비스러운 의미와 고유한 재미를 선사한다. 우리 문 화에도 달에 관한 여러가지 설화가 전해지고 있지만, 그 중에서 달 표면 모습을 "토끼와 방아" 로 묘사한 설화가 유명하다. Fig. 1은 우리 조상들이 육안으로 본 달 표면에서 토끼가 방아를 찧 는 모습을 보여주는 예시로, 그 윤곽이 결국 달의 바다(Maria)들의 분포라는 것을 알 수 있다.

달의 표면 지형에 대한 과학적 연구는 망원경의 발명과 함께 17세기에 유럽에서 여러 지형 도들이 출간되면서 시작되었다. 규모가 큰 지형에 대한 이름이 카톨릭 성자와 그리스 로마 문



Fig. 1. Moon by naked eyes with "Rabbit and barrel"

명의 전통에 따라 명명되기 시작하였다. 그러나 현재 달 표면 지형의 표준 명칭은 카톨릭 신 부인 이탈리아 Giambattista Riccioli가 1651년에 출간한 Almagestum novum이라는 책에 서 기원한다[1,2]. 이 책의 그림들은 카톨릭 예수회(Jesuit) 교단의 동료 교육자가 8구역으로 구분하여 그렸는데, 지형명칭들이 조직적으로 표현되었다. 여기서 라틴어 terra(육지)와 maria (바다), 그리고 충돌구의 이름이 정해졌다. Riccioli는 특히 바다의 명칭에 역사적 상황과 기후에 관련된 단어를 많이 사용하였는데, 비의 바다(Mare Imbrium), 평온의 바다(Mare Serenitatis), 고 요의 바다(Mare Tranquillitatis), 감로주의 바다(Mare Nectaris), 풍요의 바다(Mare Fercunditatis), 위난의 바다(Mare Crisium), 인식의 바다(Mare Cognitum), 습기의 바다(Mare Humorum), 구름의 바다(Mare Nubium) 등이다. 그 외에 12개의 작은 바다들이 비슷한 방 식으로 명명되었다. 달의 서쪽(관측자 하늘기준 동쪽)에 이런 바다보다 더 큰 검은 지대가 있 는데, 이를 폭풍의 대양(Oceanus Procellarum)이라고 명명했다. 또한 바다보다 작은 지형은 호수(Lacus), 만(Sinus), 늪(Palus)이라는 용어로 구분하여 이름을 부여하였다. 라틴어 바다명 은 여러 가지로 번역될 수 있으나, 한글로 고유명사화하여 통일할 필요가 있다. 저자들은 이 미 과천과학관의 바다 명칭과 그 외의 지형에 대한 명칭들이 한글 위키피디아 명칭이 널리 사용되고 있으므로, 이를 따라 교재나 언론 및 인터넷에서도 통일하여 사용할 것을 제안한다. Fig. 2는 대표적인 바다와 충돌구의 위치를 보여준다. 여기에 포함되지 않은 바다와 다른 지

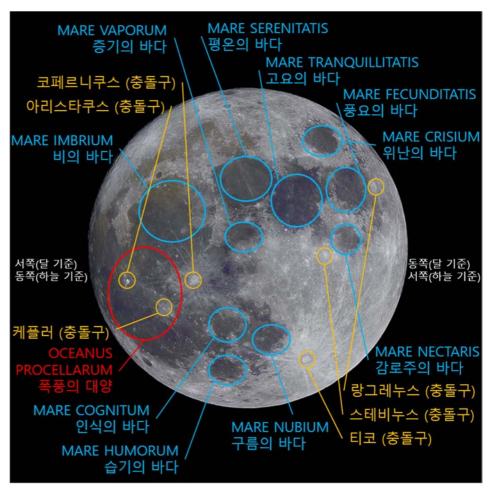


Fig. 2. Korean terms for 1 ocean, 10 maria, and 6 great craters.

형의 명칭도 Tables 1-4와 같이 한글 위키피디아에 제안되어 있다. 참고로 달의 위도와 경도 는 지구쪽을 향한 달의 앞면의 중심(대략 중앙의 만, Sinus Medii)을 기준으로 달의 남북 방향 과 동서 방향으로 결정되어 있다.

Riccioli는 또한 딜 전면을 피자 조각처럼 8구역(서북쪽 조각을 I 구역으로 시계방향)으로 나누어 대형 충돌구들에 유명인사의 이름을 부쳤다. I, II, III 구역에는 고대 그리스 유명인(플 라톤, 아틀라스, 알키메데스 등)을, 중앙의 IV, V, VI 구역에는 고대 로마 황제들(Caesar, Tacitus, Taruntius 등)을, 남쪽 구역에는 중세 유럽의 철학자들을, 바깥의 V, VI, VII, VIII 구 역에는 당대의 유럽 인사들의 명칭을 부여하였다. 이런 명칭 부여에서는 당시의 세계관으로 그런대로 형평성을 유지하려 한 노력이 보인다. 특히 VIII 구역에 있는 대형 충돌구에 코페르 니쿠스, 케플러, 갈릴레오의 이름을 부여한 것이 인상적이다. 이후에 달의 지형에 대해 추가적 인 명칭들이 부여되었는데, 1791년 독일의 Johann Schröter가 발간한 Selenotopografisches

Table 1. Korean Terms for Oceanus and Maria (https://ko.wikipedia.org/wiki/)

이름	라틴어 이름	위도	경도	지름(km)
폭풍의 대양	Oceanus Procellarum	18.4°N	57.4°W	2,568
추위의 바다	Mare Frigoris	56.0°N	1.4°E	1,596
비의 바다	Mare Imbrium	32.8°N	15.6°W	1,123
풍요의 바다	Mare Fecunditatis	7.8°S	51.3°E	909
고요의 바다	Mare Tranquillitatis	8.5°N	31.4°E	873
구름의 바다	Mare Nubium	21.3°S	16.6°W	715
평온의 바다	Mare Serenitatis	28.0°N	17.5°E	707
남쪽의 바다	Mare Australe	38.9°S	93.0°E	603
섬의 바다	Mare Insularum	7.5°N	30.9°W	513
연변의 바다	Mare Marginis	13.3°N	86.1°E	420
위난의 바다	Mare Crisium	17.0°N	59.1°E	418
습기의 바다	Mare Humorum	24.4°S	38.6°W	389
인식의 바다	Mare Cognitum	10.0°S	23.1°W	376
스미스의 바다	Mare Smythii	1.3°N	87.5°E	373
감로주의 바다	Mare Nectaris	15.2°S	35.5°E	333
동쪽의 바다	Mare Orientale	19.4°S	92.8°W	327
지혜의 바다	Mare Ingenii	33.7°S	163.5°E	318
모스크바의 바다	Mare Moscoviense	27.3°N	147.9°E	277
훔볼트의 바다	Mare Humboldtianum	56.8°N	81.5°E	273
증기의 바다	Mare Vaporum	13.3°N	3.6°E	245
파도의 바다	Mare Undarum	6.8°N	68.4°E	243
뱀의 바다	Mare Anguis	22.6°N	67.7°E	150
거품의 바다	Mare Spumans	1.1°N	65.1°E	139

Table 2. Korean Terms for Lacus (https://ko.wikipedia.org/wiki/)

이름	라틴어 이름	위도	경도	지름(km)
희망의 호수	Lacus Spei	43.0°N	65.0°E	80
혐오의 호수	Lacus Odii	19.0°N	7.0°E	70
행복의 호수	Lacus Felicitatis	19.0°N	5.0°E	90
탁월의 호수	Lacus Excellentiae	35.4°S	44.0°W	184
친절의 호수	Lacus Lenitatis	14.0°N	12.0°E	80
죽음의 호수	Lacus Mortis	45.0°N	27.2°E	151
인내의 호수	Lacus Perseverantiae	8.0°N	62.0°E	70
여름의 호수	Lacus Aestatis	15.0°S	69.0°W	90
시간의 호수	Lacus Temporis	45.9°N	58.4°E	117
슬픔의 호수	Lacus Doloris	17.1°N	9.0°E	110
선량의 호수	Lacus Bonitatis	23.2°N	43.7°E	92
사치의 호수	Lacus Luxuriae	19.0°N	176.0°E	50
봄의 호수	Lacus Veris	16.5°S	86.1°W	396
망각의 호수	Lacus Oblivionis	21.0°S	168.0°W	50
두려움의 호수	Lacus Timoris	38.8°S	27.3°W	117
꿈의 호수	Lacus Somniorum	38.0°N	29.2°E	384
기쁨의 호수	Lacus Gaudii	16.2°N	12.6°E	113
고독의 호수	Lacus Solitudinis	27.8°S	104.3°E	139
겨울의 호수	Lacus Hiemalis	15.0°N	14.0°E	50
가을의 호수	Lacus Autumni	9.9°S	83.9°W	183

Table 3. Korean Terms for Sinus (https://ko.wikipedia.org/wiki/)

이름	라틴어 이름	위도	경도	지름(km)
거침의 만	Sinus Asperitatis	3.8°S	27.4°E	206
루니크의 만	Sinus Lunicus	31.8°N	1.4°W	126
무지개의 만	Sinus Iridum	44.1°N	31.5°W	236
믿음의 만	Sinus Fidei	18.0°N	2.0°E	70
사랑의 만	Sinus Amoris	18.1°N	39.1°E	130
성공의 만	Sinus Successus	0.9°N	59.0°E	132
소용돌이의 만	Sinus Aestuum	10.9°N	8.8°W	290
이슬의 만	Sinus Roris	54.0°N	56.6°W	202
조화의 만	Sinus Concordiae	10.8°N	43.2°E	142
존경의 만	Sinus Honoris	11.7°N	18.1°E	109
중앙의 만	Sinus Medii	2.4°N	1.7°E	335

Table 4. Korean Terms for Palus (https://ko.wikipedia.org/wiki/)

이름	라틴어 이름	위도	경도	지름(km)
쇠퇴의 늪	Palus Putredinis	26.5°N	0.4°E	161
수면의 늪	Palus Somni	14.1°N	45.0°E	143
전염병의 늪	Palus Epidemiarum	32.0°S	28.2°W	286

Fragmenten이 대표적이다. 이 책이 Riccioli의 명칭들을 그대로 사용함으로써, 국제 표준으 로 자리잡게 되었고, 1935년 국제천문연맹(International Astronomical Union)이 600여 개 의 Riccioli의 명칭들을 채택하여 공식화되었다. 국제천문연맹은 1960년대에 소련 우주선에 의해 달 뒷면의 지형이 처음으로 관측되면서, 주로 고인이 된 소련의 과학자와 엔지니어의 이 름을 지형 명칭에 부여하였다. 현재도 추가로 발견되는 달의 지형에 대해 국제천문연맹은 고 인이 된 우주탐사 공헌자의 이름을 부여하고 있다.

우리의 입장에서 달의 지형이름이 모두, 특히 대형 충돌구의 이름이 모두 유럽인이라는 거 부감이 들 수 있지만, 사람이름을 번역할 수는 없으니 그대로 사용할 수밖에 없는 실정이다. 우주과학자라 할지라도 달의 자세한 지형이름을 모두 알 필요는 없으나, 적어도 대규모 지 형에 대한 이름은 기억하여 일반인들에게 설명할 수 있어야 한다고 본다. 본 논문은 이런 필요를 위해 대표적인 달의 지형과 기초적인 지질학 지식을 정리하고자 한다. 우선 저자들은 "지구에 5대양 6대주가 있듯이, 달에는 1 대양 10대 바다, 6대구가 있다"라고 달의 대표적 지 형을 일반인들에게 친숙하게 전달할 것을 제안한다. 여기서 1 대양은 폭풍의 대양(Oceanus Procellarum), 10대 바다는, 비, 평온, 고요, 감로주, 풍요, 위난, 증기, 인식, 습기, 구름의 바 다이고, 6대구는 티코, 코페르니쿠스, 케플러, 아리스타쿠스, 스테비누스, 랑그레누스이다. 여 기서 제안한 1 대양 10대 바다는 Table 1에서 보듯이 크기가 크면서 가장자리에 있지 않아 식별이 쉬운 지형이다. 참고로 "섬의 바다"는 중앙 근처에 있고 크기가 크지만, 코페르니쿠스 충돌구에 겹쳐져서 그 윤곽을 식별하기 어려워 10대 바다로 선정하지 않았다. 이 지형들은 휴대폰의 사진으로도 구분이 될 수 있는 대규모 지형이므로, 우리가 초등학교에서 세계지도 를 배울 때의 오대양 육대주만큼 달 지도의 상식이다. 육안 관측의 "토끼와 방아"가 1 대양 10대 바다로 구분될 수 있음도 유익하다.

2. 달 표면의 지형 유형

육안 관측으로 검게 보이는 부분을 바다(maria)로 부르면서, 그에 대비되는 밝은 표면을 처 음에는 육지(terra)로 구분하였으나, 지금은 고원(high lands) 이라고 구분한다. 다음으로 망 원경에서 뚜렷하게 보이는 표면 구덩이는 한때 분화구라고 단순 번역되어 사용되었다. 최근의 행성과학에서는 내부 분출에 의해 형성된 화산분화구(volcanic crater)와 외부 충돌에 의해 형 성된 충돌분화구(impact crater, 이하 편의상 충돌구)를 구분한다. 그 외에 산맥(mountains), 함몰용암굴/열구(rilles, rima), 돔(dome), 주름 능선(wrinkle ridge), 지구대(graben), 절벽 (rupes) 등의 작은 지형들은 소형 지상 망원경으로도 식별된다.

고원은 달 표면에서 밝고 높은 지대로서 어두운 바다와 대비된다. 고원이라는 표현은 케플러

(Kepler)에 의해 처음 명명되었다고 한다. 회장질(anorthositic) 암석이 주성분이며, 검은 현 무암질(basaltic) 바다 표면과 뚜렷이 구분된다. 아폴로(Apollo) 16이 채취한 고원의 회장질 암석은 98% 이상을 상회하는 사장석(Plagioclase feldspar)과 2% 내외의 휘석(Pyroxene)으 로 구성된다[3]. 사장석은 평균 성분이 95%-97%의 회장석(Anorthosite, CaAlSi₂O₈)과 3%-5% 의 조장석(Albite, NaAlSi₂O₈)으로 이루어져 회장암으로 구분된다[3]. 반면 아폴로 12가 채취 한 바다의 현무암은 사장석, 감람석(Olivine), 휘석, 티탄철석(Ilmenite)을 포함한다[4]. 또한 단위면적당 충돌구 개수밀도(impact crater number density)가 높은 고원이 바다보다 상대적 으로 우주공간에 오랜 기간 노출되어 있음을 시사한다. 고원처럼 밝게 보이지만 남극에 있는 에이트킨 분지(South Pole Aitken basin)는 실제 고도가 낮은 특별한 저고도 지대이다. 달의 진화 초기에 형성된 충돌구를 바다 물질(현무암질)이 피복한 구조를 이루고 있다.

달 표면의 암석 중에 가장 오래된 동위원소 측정 연대는 대략 45억 년(4.51 ± 0.01 Ga)이다 [5]. 고원은 달 전체 표면적의 83%를 차지하며, 대략 44억 년 이전에 형성되었다[6]. 바다는 달의 앞면(지구에서 보이는 면)의 1/3을 차지하며, 초기의 거대 충돌 분지에 선-넥타리스 기 와 넥타리스 기에 해당하는 38-42억 년 전에 용암이 흘러 들어와 평원으로 형성된 곳이다. 충돌구 개수 밀도 분포로 추정한 나이로 가장 젊은 곳은 폭풍의 대양으로 약 10억 년 전으로 추산된다[7]. 그러나 폭풍의 대양은 충돌 분지에 해당하지 않고 젊은 용암지대로 본다. 바다 표면의 용암은 화산 분출에 기인하는데, 거대 분지를 만든 충돌과 화산 분출에는 약 5억 년의 시간 차이가 있어, 거대 충돌이 화산활동을 촉발했을 가능성은 없다. 화산 분출이 지각 두께 가 얇은 달 앞면에 집중되어 바다도 앞면에만 분포하는 것으로 이해된다. 폭풍의 대양 지각이 남극 에이트킨 분지 다음으로 얇아서 가장 최근까지 화산 분출물이 채워진 것으로 추정된다. 일부 화산은 분출이 격렬하여 유리질 화산쇄설물(pyroclatics)을 생성할 수 있었으며, 유리질 의 티타늄 농도에 따라 다양한 색이 구현된다. 또한 현무암에서 관찰되는 기공(vesicle)은 용 암이 급격하게 표면에 냉각되었음을 시사한다.

망원경으로 보았을 때 가장 눈에 띄는 달 지형은 충돌구이다. 1960년대 전에는 지구의 화산 분화구와 유사하다고 해서 분화구로 번역되기도 하였으나, 우주공간에서 떨어진 운석 체의 충돌에 의한 지형으로 확고히 인식됨에 따라 충돌구로 정정되었다. Gene Shoemaker 가 1970년대에 충돌구 지형에 중첩의 원리(superposition)를 적용하여 나이를 추정하기 시 작하며 달 표면 연구가 천문학자에서 지질학자의 연구분야로 이관되었다. 충돌구는 아주 작 은 구덩이에부터 남극 에이트킨 분지(직경 2,500 km, 깊이 13 km)까지 다양하다. 충돌구의 평균 크기는 과거에서 현재로 올수록 감소하는 추세로서, 현재의 바다 분지인 대형 충돌구는 달 형성 초기에 생성되었다.

고체 표면을 갖는 행성체의 단위면적 당 충돌구의 수(N)와 충돌체의 크기(r)는 멱법칙(power law)의 상관관계(ln N = ln a - m ln r)를 지니며, 각각의 행성체는 고유한 계수(a)와 차수(m)로 표현된다[8]. 동위원소 분석법이 적용된 지질학적 절대 연령 측정이 불가한 행성체의 표면 나이(t)와 N의 상관관계(lnt = lnb + nlnN) 역시 멱법칙으로 표현되며, 각각의 행성체는 고유한 계수(b)와 차수(n)로 표현된다[7]. N과 t는 비례관계를 이루므로, 단위면적 당 충돌구 의 수가 커지면 해당 표면의 지각 형성 연대가 오래됨을 지시한다.

그동안의 다양한 실험과 분석연구에 따르면 운석체가 달 표면에 ~17 km/s로 충돌하면, 먼 저 압축 충격파(compression shock wave)가 충돌 지점으로부터 방사형으로 퍼져 나가고, 뒤 에 희박 충격파(rarefaction shock wave)가 충돌 지점의 물질을 축출하여 구덩이를 만든다. 대형 충돌구의 축출물(ejecta)은 덩어리 형태로 주변에 2차 충돌구를 만들 수 있다. 이 2차 충돌구는 방사형으로 분포하며 같은 크기의 충돌구보다 깊이가 얕아서 구분이 가능하다. 또 한 축출물 덩어리가 선형 계곡을 만들기도 하는데, 이는 충돌체가 입사시에 부서져서 만드는 충돌구 체인과는 모양이 다르다. 미국 NASA Ames 연구소의 실험에 의하면 입사각이 5도 이 하로 아주 비스듬한 충돌이 아니면 충돌구는 모두 원형으로 생성된다[9]. 원형 충돌구에서 중 봉(central peak)이 중앙에서 벗어난 경우는 비스듬한 충돌을 시사한다. 대형 충돌은 표면으로 부터 1 km 깊이까지 녹였을 것으로 추정하는데, 대표적인 예가 동방의 바다(Mare Orientale) 분지이다[10]. Fig. 3은 충돌구의 구조를 도식적으로 정리하고 있는데, 단순 충돌구(simple crater)에서는 바닥에 화산각력암(volcanic breccia)과 충돌 용용(impact melt)으로 생성된 유리질과 기반암의 균열 등이 보이고, 림(rim)과 바깥 부분에 축출물 피복(ejecta blanket)이 분포한다. 복합 충돌구(complex crater)는 얕은 바닥에 중봉이 존재한다.

충돌구의 분류체계는 학술적으로 여러가지가 있으나, 본 논문에서는 편의상 크기에 따라 소형, 중형, 복합, 대형 충돌구로 나누어 설명하겠다. Fig. 4는 몰트케 충돌구(Moltke crater) 로 소형 충돌구의 전형적 예로서 직경이 7 km에 사발 모양을(깊이가 직경의 ~20%) 하고 있 다. 주변에 밝고 작은 오름들은 축출물이다. 축출물에 의한 2차 충돌구는 생기지 않은 모습이 다. 중형 충돌구(Fig. 5; Bessel crater, 직경 16 km)는 출렁이는 얕은 바닥이 특징이며, 복합 충 돌구(Fig. 6; Euler crater, 직경 28 km)는 얕은 바닥 중앙에 우뚝 솟은 중봉(central peak), 림

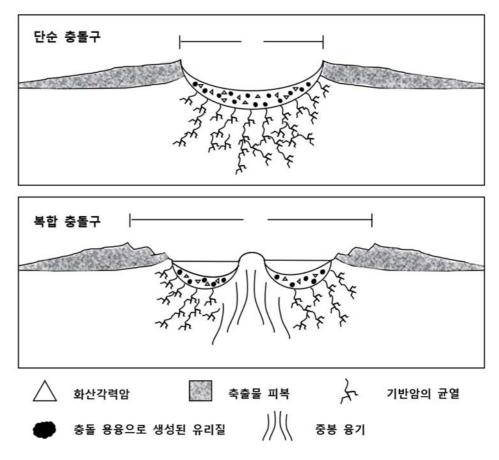


Fig. 3. Schematics of a simple crater and a complex crater.



Fig. 4. Moltke crater (Apollo 10, NASA). A typical small bowl-shaped crater surrounded by a bright halo of higher-albedo ejecta material (https://www.hq.nasa.gov/office/pao/History/ alsj/a410/AS10-29-4324.jpg).



Fig. 5. Bessel crater (Apollo 15, NASA). A bowl-shaped with a shallow slumping floor (https://history.nasa.gov/SP-362/ch5.4.htm).



Fig. 6. Euler crater (Apollo 17, NASA). A complex crater with a central peak on the shallow slumped floor, and surrounded by rough ejecta materials (https://history.nasa.gov/SP-362/ch5.4.htm).

(rim) 밖으로 넘친 흔적 그리고 거친 암석 축출물의 방사형 분포가 인상적이다. 대형 충돌구 는 여러 개의 큰 중봉들과 림 안에 테라스와 슬럼프(slumping blocks), 심지어 내부 환을 가 진다(Fig. 7; King crater, 직경 77 km, Fig. 8; Schrödinger crater, 직경 320 km). 젊은 충돌 구는 날카로운 림과 밝은 축출물 광조(ejecta rays)를 가지고 있다. 시간이 갈수록 우주풍화 (space weathering)에 의해 광조는 검게 변하고, 미소 운석 충돌로 지형이 부드럽고 둥글어 진다.

충돌구 외에 망원경으로 볼 수 있는 흥미로운 소형 지형으로 함몰용암굴 또는 열구(rille, 규모가 큰 것은 라틴어 rima)가 있다. 이 지형은 좁고 기다란 저지대를 통칭하는데, 대부분 용암채널(lava channel)이 동굴을 형성한 후에 천장이 무너져서 도랑 모양의 지형이 된다. 지 구상의 사행천처럼 굴곡이 많은 채널로 화산 분출구와 연결된 것도 있다. Fig. 9와 Fig. 10은 대표적으로 아리스타쿠스(Aristarchus) 충돌구 지대의 쉬뢰터 계곡(Vallie Schröteri)과 비의 바다에서의 해들리(Hadley) 거대 열구(Rima Hadley)를 보여주는데, 이 지형들은 교육용 망원 경으로도 잘 보인다. 그러나 사행하지 않고 두 개의 정단층(normal fault) 사이에 낮은 지대가 곧게 뻗어 있는 지형도 있는데, 달의 정 중앙에 위치하는 아리아다우스 지구대(Rima Ariadaeus) 가 대표적이다(Fig. 11). 또한 비의 바다와 증기의 바다 사이의 아페닌(Apennine) 산맥을 가 로지르는 매우 날카로운 아페닌 참호(Apennine trench)도 망원경으로 보면 인상적이다. 아 마추어 천문가에게 좋은 관측대상으로는 구름의 바다에 그어진 직선 지형인 직선 절벽 (Rupes Recta, 영어로 Straight Wall)을 들 수 있다(Fig. 12). 점성이 높은 용암이 충돌 분지에



Fig. 7. King crater (Apollo 16, NASA). A large crater with multiple central peaks with terraced rim and slumping blocks (http://lroc.sese.asu.edu/posts/32).

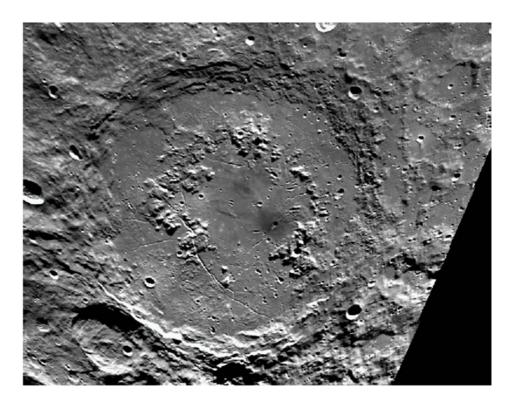


Fig. 8. Schrödinger crater (Clementine, NASA). A large young-fresh crater with an internal ring. (https://www.lpi.usra.edu/science/kiefer/Education/SSRG2-Craters/schrodinger.gif).

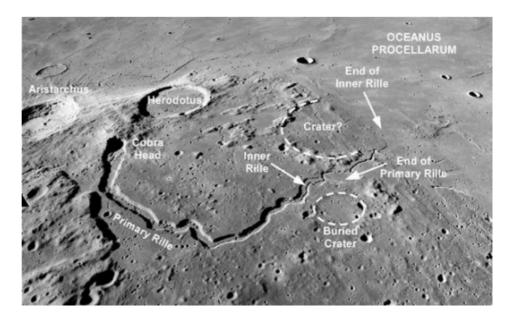


Fig. 9. Schröter's rille (Apollo 15, NASA/JSC/U of Arizona). A typical meandering rille (https:// moonmark.space/intuitive-machines/).

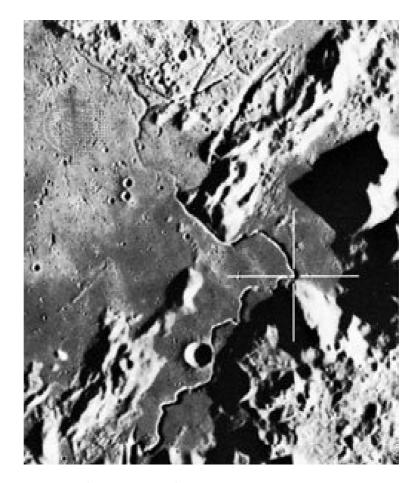


Fig. 10. Hadley rima (Apollo 15, NASA). The Apollo 15 landing site is marked with a cross (https://www.britannica.com/place/Hadley-Rille).

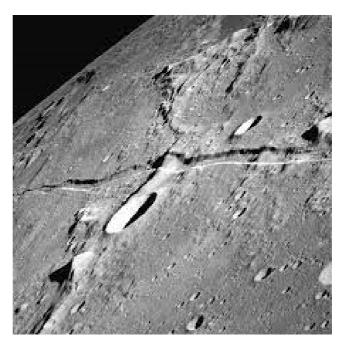


Fig. 11. Rima Ariadaeus (Apollo 10, NASA). A graben: feature sunk down between two parallel fault lines (https://history.nasa.gov/afj/ap10fj/photos/31-r/as10-31-4646.jpg).

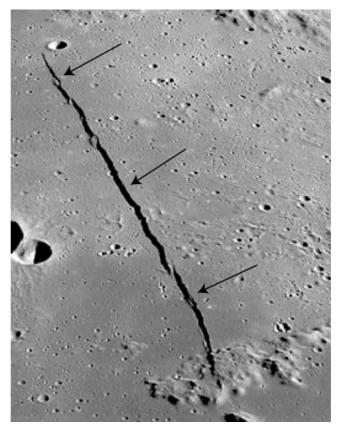


Fig. 12. Rupes Recta (LRO). The arrows indicate the direction of sunlight on the 8th lunar day (http://zooniverse-resources.s3.amazonaws.com/blogs.zooniverse.org/4/files/2010/07/ Screen-shot-2010-07-24-at-15.00.49.png).

흘러 들어 굳어지면서 직선의 용암 절벽이 형성된 것으로 추정된다. 이 지형은 실제로는 그렇 게 수직이지 않지만 월령 8일 경에 하늘의 서쪽에서 태양빛을 비추면 매우 선명한 그림자로 나타나기 때문에 인상적이다. 바다 지역 표면이 수축하면서 주름이 생길 수 있는데, 이런 지 형을 주름 능선(wrinkle ridge)이라 한다. 대표적인 주름 능선은 구름의 바다에서 보이는데, 이 곳에는 주름 능선 외에 거대 열구(rima)도 보인다(Fig. 13).

망원경으로 보기에는 작지만 흥미로운 지형으로 돔(dome)과 용암동굴(lava tube)을 들 수 있다. 돔은 점성이 높은 용암이 좁은 분출구위에서 냉각되며 형성되는 원형의 고도 증가형 화 산지형이다. 정상까지는 수백 미터이고, 직경은 8-12 km로 경사가 완만하며, 정상에 작은 구 덩이가 있는 경우도 있다. 이 지형이야말로 진정한 의미의 분화구이다. 용암동굴은 최근 우주 선에 의한 고해상도 화상 관측에서 발견되었다. Fig. 14는 Reconnaissance Orbiter가 발견

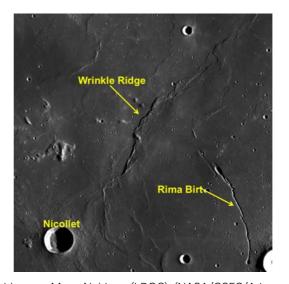


Fig. 13. Wrinkle ridge on Mare Nubium (LROC) (NASA/GSFC/Arizona State University) (http://lroc.sese.asu.edu/posts/799).

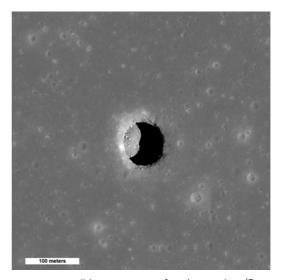


Fig. 14. A pit crater as a possible entrance of a lava tube (Reconnaissance Orbiter) (http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA13518).

한 원형 구덩이(pit crater)이다. 달의 표면에 노출된 원형 구덩이의 연속적인 배열 양상을 토 대로 용암동굴 존재를 확인하게 된다. 원형 구덩이는 달표면에서의 운석 충돌이나 유해한 고 에너지 태양 자외선과 태양풍 입자로부터 보호해주고, 극심한 온도 변화도 완화해 줄 수 있는 환경이기 때문에 미래의 달 유인 기지 후보지로서 실용적 가치가 인정된다.

3. 달의 지질학적 기본 특성

달 지질학의 본격적인 연구는 미국의 아폴로 유인 우주선과 소련의 무인 우주선 루나(Luna) 가 각각 380.05 kg과 326 g의 월석을 가지고 지구로 귀환하면서 시작되었다. 가장 최근에는 2020년 11월 23일 발사된 중국의 창어 5호가 2020년 12월 1일에 시추한 1.731 kg의 월석 시료를 2020년 12월 16일에 가지고 귀환하였다. 아폴로 월석의 연구 결과, 감람석(olivine), 휘석(pyroxene), 사장석(plagioclase) 등의 광물이 확인되었다. 지구에 없는 새로운 광물도 발견되어 달 표면 최초 우주인 Armstrong의 이름을 따서 armalcolite라 명명되기도 했다. 바다는 철(Fe)이 풍부한 현무암질(basaltic)이고, 고원은 철이 부족한 회장암질(anorthositic) 로 Ca이 풍부한 사장석이 주성분이다. 바다는 또한 Mg 계열의 암석인 Troctolite(감람석 + 사장석), Norite(자소휘석 반려암), KREEP(K, Rare Earth Elements, Phosphorus) 현무암을 포함하고 있다. 충돌구 바닥에서 흔히 보이는 각력암(breccia)은 사장석이 우세한 복성화산각 력암(feldspathic polymict volcanic breccia) 이고, Mg와 Fe가 풍부한 고철질(mafic) 화산각 력암도 발견된다. 바다의 현무암은 고원보다 감람석과 휘석이 더 많고, 사장석은 더 적다. 지 구의 현무암보다 철이 풍부하고 점성이 낮으며, 자성이 없는 상자성 광물인 티탄철석(ilmenite, ferro-titanic oxide)을 포함하고 있다. 아폴로의 최초 관찰 표본에서 고농도 티탄함량이 관찰 되기도 하였지만, 이후의 후속 연구에서 저농도 티탄함량의 현무암도 보고되었다. 크레멘타 인(Clementine) 탐사선은 바다 현무암의 티탄 함량이 지역적으로 변화함을 확인하였다[11].

지구의 표토(regolith)는 풍화 암석의 부슬부슬한 토양을 의미하는 풍화모채층에서 온 말로 서 토양층 전체를 뜻하기도 한다. 달 표토(regolith)는 수십억 년의 작은 미소 운석 충돌(micro meteorite impacts)에 의해 잘게 빻아져서, 매우 고운 알갱이로 이루어진 표토층을 의미한다. 표토층의 두께는 젊은 바다에서는 2 m, 고원에서는 20 m 정도로 추정된다[12]. 표토는 돌, 기반암으로부터 온 광물 조각, 충돌로 생긴 유리입자 등을 포함하고 있다. 고원의 표토는 알 루미늄(Al)과 실리카(SiO₂)가 많은 반면, 바다의 표토는 Fe와 Mg가 풍부한 고철질(mafic) 성 분이며, 상대적으로 실리카가 부족하다. 표토는 태양풍 입자(He, Ne, C, N)도 포함하고 있어, 이들의 동위원소 분석으로 태양의 과거 활동 변화를 추정하게도 한다. 최근에는 태양풍 입자 중에서 가장 많은 양성자(수소원자핵, H)가 표면 암석의 산소와 결합하여 물분자(H,O)를 지속 적으로 만들어 냈을 가능성이 제시되었다. 또한 태양풍 원소 중 ³He, C, N은 미래에 달 기지 에서 사용될 연료로서의 가능성도 제기되었다.

달의 내부 구조 탐사를 위해 아폴로 11, 12, 14, 15, 16 탐사 당시, 착륙지 부근에 지진계를 1969년부터 순차적으로 설치하였다. 이 지진계들은 배터리가 완전히 방전되는 1977년까지 작동하였으며, 9년간 총 59회의 지진계 작동이 감지되었다[13]. 총 59회의 계기 감지 가운데 27회는 유성체 충돌로 판명되었다. 진앙이 200 km 이내인 천발월진(Lunar Shallow Quakes) 이 8회 관측되었고, 진앙이 835-1,200 km인 심발월진(Lunar Deep Quakes)이 24회 관측되

었다[13]. 관측된 지진자료와 각종 궤도선의 중력장 측정 자료를 종합 분석하여 표준 달 심부 모델이 개발되었다[14]. 달 전체 밀도는 3,346 kg/m³로서 철/금속 함량이 지구에 비해 현저 히 작다. 전체 질량과 관성 모멘트 그리고 칭동 변화에 의하면 달의 중심에 달 반경의 약 1/4 에 해당하는 380 ± 40 km 크기와 5,200 ± 1,000 kg m³의 밀도를 지니는 핵이 존재한다[14]. 2013년 이전까지는 달의 지각은 평균 50-65 km 두께로 추정되었다. 그러나 미항공우주국 (NASA)의 GRAIL(Gravity Recovery and Interior Laboratory) 탐사위성 분석 결과, 달의 평균 지각 두께는 34-43 km로 수정되었다[15]. 지구나 수성과 달리 달은 현재 심부 기원의 내부자 기장이 존재하지 않는다. 일부 달의 지표 암석은 안정적인 잔류자화(remnant magnetization) 를 보유하므로, 진화 초기의 달은 심부 기원의 내부자기장을 보유하였다고 해석된다[16]. 그 러나 잔류자화를 유도한 달의 과거 표면자화강도 결정값이 급감하는 25억 년을 전후하여 달 의 다이나모가 약화되기 시작하여 19억-8억 년 사이에 소멸되었다고 여겨진다[17]. 달의 다 이나모 소멸 시점에 대한 오차가 11억 년이나 되는 이유는 해당 시기의 월석이 매우 희귀하 여 절대연령 측정 자료가 부족하기 때문이다. 현재 달은 심부 기원 내부 자기장을 보유하지 않지만, 표면 일부 지역에서 1,000 nT를 상회하는 강력한 자기이상(magnetic anomalies)이 측정된다. 이런 국지 자기이상은 충돌구 주변에 생성된 플라즈마에 의해 유도된 자기장이 강 자성 광물에 잔류 자화의 형태로 보존되었기 때문이다.

달 생성 시초에 전체 표면이 용암의 바다였다는 가설(magma ocean hypothesis)이 널리 받아 드려지고 있는데, 이 가설은 현재 발견된 달 표면 광물질을 설명할 수 있다. 즉, 달이 상 당 부분 녹아 있는 용암 바다였고, 이로부터 광물들이 다음과 같이 분별 정출했다는 가설이다. 1) 초기에 500 km 두께의 용암 바다가 결정화되는 과정에서, 정출 온도가 가장 높은 감람석 (olivine)과 휘석(pyroxene)이 우선적으로 정출되고, 이들은 마그마보다 무겁기 때문에 용암 바다의 하부로 가라앉게 된다. 2) 용암 바다의 약 3/4 정도가 정출된 시점에서 정출 온도가 낮은 사장석(plagioclase feldspar)의 정출되고, 낮은 밀도로 인해 위로 떠서 50 km 두께의 지각을 1억 년 내에 형성하였다. 3) 액체 상태를 선호하는(불호정) 원소들이 농축되어 KREEP 이 풍부한 용암을 지각과 맨틀 사이에 생성하였다. Fig. 15는 이런 가설을 도식화하여 보여준다. 대표적인 KREEP 풍부지역은 폭풍의 대양과 비의 바다 부지로서 이를 통틀어 Procellarum KREEP 지대라 부른다.

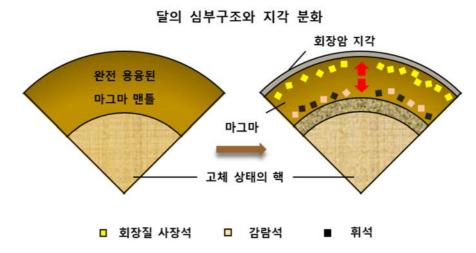


Fig. 15. Schematics of moon's interior and its creation concept.

4. 달 지질 시대 구분

Fig. 16은 달 지질 역사를 5개의 시대로 구분하여 보여준다. 지구의 지질 시대 구분은 주로 화석종 출현을 기준으로 하나. 달의 시대 경계는 대형 충돌 사건을 기준으로 한다[6]. 이는 표 면 사진 판독에서 충돌구의 개수 빈도와 크기가 현저하게 달라지는 것이 대형 충돌 사건과 연관되기 때문이다. 절대 나이는 달에서 가져온 표본 암석의 동위원소 측정 나이로 결정된다. 그러나 초기 시대 구분은 달 표면 표본이 약 41-39억 년 전 기간 동안에 일어난 후기 중폭격 (late heavy bombardment)의 영향을 받았을 가능성으로 인해 불확실하다. 특히 고원지대는 넥타리스 기(Nectarian)와 선-넥타리스 기(Pre-Nectarian) 구분이 어려워서 선-임브라움 기 (Pre-Imbrian)라고 통칭하기도 한다.

선-넥타리스 기는 달 지각 형성부터 감로주의 바다 분지를 만든 Nectaris 충돌 사건까지로 서 45-39.2억 년 전 시기이다. 감로주의 바다 분지는 다중 충돌 환을 가지고 있고, 축출물 피 복(eiecta blanket)들이 층리 구조를 알려준다. 이 시기에 30개의 충돌 분지가 생성되었다고 추정되며, 그 중에서 가장 오래된 것은 남극 에이트킨 분지이다.

넥타리스 기(Nectarian)는 Nectaris 충돌과 Imbrium 충돌 사건 사이를 지칭하며, 39.2-38.5억 년의 짧은 기간이다. 이 기간에 해당하는 12개의 다중 환 충돌 분지가 알려졌는데. 대 표적으로 평온의 바다(Serenitatis)와 위난의 바다(Mare Crisium) 분지를 들 수 있다. 아폴로 16호가 감로주의 바다 분지 물질을 채취하여 동위원소 나이를 결정하였다.

임브리움 기(Imbrian)는 Imbrium 충돌 사건과 특정 크기의 충돌구의 침식 유실 시점 사이 를 지칭하며, 38.5-32억 년 전의 기간이다. 이 시대는 또한 Imbrium 충돌과 Oriental 충돌 까지의 기간을 전기로, 그 이후를 후기로 나누기도 한다. 전기에는 임브리움(Imbrium) 분지 외에 쉬뢰딩거(Schrödinger) 분지가 유일한 다중환 분지이고, 이후에는 다중환 충돌 분지가 생기지 않았다. 후기의 기준인 Oriental 충돌은 동위원소 나이 측정이 아직 안되었고, 충돌구 개수 분포에 기초하여 나이가 38.4-37.2억 년 전으로 추정된다. 현재 보이는 바다의 2/3가 후기에 형성되어, 그전에 있었던 충돌구들을 모두 지워버렸다.

에라토스테네스 기(Eratosthenian)의 끝은 밝은 광조(rays)들이 우주 풍화(space weathering) 로 검게 변해 구분하지 못하는 시점으로 정의되는데, 약 11억 년 전이다. 이 시대의 시작과 끝의 절대 나이는 암석에 의해 정확히 측정되지 못했음에 유의해야 한다. 즉, 충돌구의 침식 유실 시점이나 밝은 광조가 검게 변하는 시점은 다소 임의적일 수 있다. 특히 광조의 화학 성 분에 따라 우주 풍화가 더디게 일어날 수도 있다. 예를 들어 고원지대의 충돌 축출물이 바다 에 뿌려진 광조(예: 티코 충돌구에서 나온 일부의 밝은 광조들)는 상당히 오랫동안 밝게 남아 있을 수 있다. 폭풍의 바다는 이 시대에 생성된 것으로 충돌구 개수 분포로 추정하고 있다.

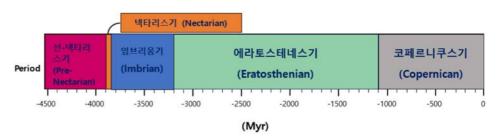


Fig. 16. A standard lunar stratigraphy [18].

최근 중국의 창어 5호 우주선이 폭풍의 바다에서 표본 시료를 채취 귀환함으로써, 이 지대의 절대 나이가 결정될 것으로 기대되고 있다[19,20]. 현재 충돌개수 분포와 절대 나이를 연결하 는 자료로는 1970년대에 아폴로 우주선과 루나 우주선이 가져온 달 암석의 동위원소 나이를 사용하고 있는데, 이 암석들의 나이가 30-40억 년 범위에 속해 있어, 그보다 젊은 지역의 충 돌개수 나이 추정은 불확실성이 높다. 창어 5호가 가져온 폭풍의 바다 암석들이 이 젊은 지역 의 나이를 특정하는 데 큰 역할을 할 것으로 기대된다.

코페르니쿠스 기(Copernican)의 시작점은 밝은 광조들의 주변에 있는 충돌구 개수 분포 나이로 추정되었다. 현재 가장 오래된 밝은 광조의 나이는 약 11억 년으로 다수가 인정하기 때문에, 이 시점을 기준으로 한다. 따라서 이 시작점과 약 8억 년으로 추정되는 코페르니쿠스 충돌구의 나이가 같지 않음에 유의해야 한다.

이와 같이 달의 지질 시대는 특정 충돌 사건을 기준으로 정의되었기 때문에 다른 행성체의 연대 구분과 직접적 대비가 무의미하다. 참고로 현재 지구에서 발견된 가장 오래된 암체는 캐 나다의 아카스타 편마암으로 절대연령 4,031 ± 3 Ma이며[21], 가장 오래된 광물은 호주 서부 잭슨힐스 역암에서 관찰되는 저콘으로 절대연령 4,404 ± 8 Ma[22]이다. 이는 모두 지구의 지 질시대 중에서 태고대(Hadean)에 해당한다.

5. 달 표면의 물 발견

주지하다시피, 달에는 대기가 없어 표면 온도가 극심하게 변할 뿐만 아니라, 휘발성(volatile) 물질은 바로 절대 진공과 유사한 우주공간으로 유실되므로 심지어 고체상태로도 유지되기 어 렵다. 그럼에도 달의 극 지방의 영구 음영지역(Permanently Shadowed Region, PSR)에는 얼 음이 존재할 수 있다는 주장이 1960년대에 처음으로 나왔다[23]. 이론적으로 혜성 충돌에 의 해 들어온 물 얼음은 태양빛이 들어오지 않는 극지방의 PSR에 오랫동안 증발하지 않고 유지 될 수 있다고 예측되었다. 그러나 1970년대에 미량의 수증기가 아폴로 달 착륙선 14호의 질 량분석기에서 발견되었고, 소련의 루나 24호가 가져온 달 암석에서도 상당량의 물분자가 측 정되었음에도, 달 표면의 물 존재는 여전히 의문시되었다.

달에 대한 무관심 시기를 지나. 1994년 미국 국방성의 클레멘타인 우주선이 달 표면을 레 이다로 관찰하며 남극 지역의 영구 음영지역(PSR)의 매끄러운 표면이 얼음일 수 있다는 관측 적 증거가 제시되면서 달에 대한 관심이 재점화됐다[24]. 1998년 발사된 미국의 루나 프로스 펙터(Lunar Prospector) 궤도선은 중성자 분석기(neutron spectrometer)를 이용하여 우주선 (cosmic ray)이 달 표면 광물에 충돌하면 분출되는 준 열적 중성자(epithermal)를 측정하였 다. 놀랍게도 이 준 열적 중성자의 양이 다른 지역과 달리 극지역에서 매우 적게 측정되었는 데, 이는 표면에 있는 물 분자(H,O)가 중성자를 흡수하기 때문이라고 해석되므로, 상당한 얼 음이 극지방에 있음을 시사하였다[25]. 이후 미국, 일본, 중국, 인도의 우주선들이 달 표면 물 에 대한 직접적인 증거를 측정하기 위한 경주가 시작되었다. 결국, 2009년 9월 25일 인도의 챤드라얀 1호(Chandrayaan-1) 우주선이 달 남극 색클튼(Shackleton) 충돌구에 탐사선을 충 돌시켜 표면에서 솟아오르는 분출물에서 물분자를 측정하였다. 바로 연이어 2009년 10월 9 일 미국의 LRO 우주선에서도 Atlas V 로켓의 상단로켓을 달 남극 색클튼 충돌구 옆에 있는 카베우스(Cabeus) 충돌구에 강력하게 충돌시켜 표면에서 분출되는 화염을 LCROSS가 뒤따 라가며 정밀 측정하였다. 여러 측정 장비가 충돌 화염에서 물분자를 분명히 측정하였을 뿐만

아니라, 물의 함량이 질량비로 5.6 ± 2.9% 임을 특정하였다[26]. LRO에 탑재된 레이저 고도계 (laser altimeter)는 색클튼 충돌구의 표면이 22%까지 얼음으로 덮여 있을 수 있다고 제안했 다[27]. 또한 LRO에 탑재된 중성자 측정기(LEND)로 측정한 남극 지역의 물 함량 지역이 영 구 음영지역과 상관없으며(Fig. 17), 영구적인 저온이 표토에 의한 물 포획에 필요 조건이 아 님이 주장되었다[28]. 또한 챤드라얀 1호 우주선에 탑재된 NASA의 적외선 분광기(ISRO)는 달 표면 여러 곳에서 3 µm 등의 적외선 파장 영역에 강한 물(H2O) 또는 수산기(OH)의 흡수 대가 있음을 확인하였다. 이렇게 측정된 ISRO의 적외선 스팩트럼 스캔 자료는 달 광물 맵퍼 자료(Moon Mineralogy Mapper, M3)로 Fig. 18에 나타냈다. 이 그림에서 남북극 지역의 푸 른색은 물/수산기(H₂O/OH)가 많이 분포함을 뜻한다.

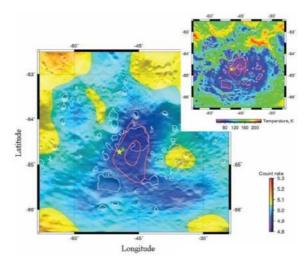


Fig. 17. Hydrogen contents measured by LEND onboard LRO and temperature distribution [28]. The star indicates the impact site of LCROSS.

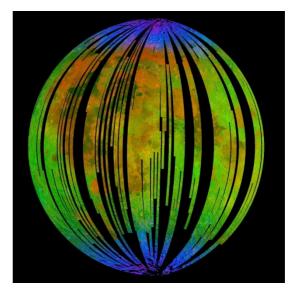


Fig. 18. A combined image of Moon Mineralogy Mapper (M3) measured by ISRO onboard Chandryaan-1 (ISRO/NASA). The blue color indicates the enhancement of H₂O/OH (https:// commons.wikimedia.org/wiki/File:Water Detected at High Latitudes on the Moon.jpg).

또한 달의 극지역이 아닌 지역에서도 물의 발견이 최근 속속 보고되고 있다. 아폴로 17호 가 가져온 달 암석의 유체 포유물(melt inclusion) 중에 615-1,410 ppm의 물분자가 존재한 다는 사실이 최근에 보고되었다[29]. 이는 이 암석이 37억 년 전에 화산 분출로 생성되었을 시 에 그 마그마 속에 물이 포함되어 있었음을 시사한다[30]. 이는 달 표면에 산재하는 화산 쇄설 물(pyroclastic deposits)에서 물을 채취할 가능성이 있음을 의미한다. 가장 최근인 2020년 10월에 몇몇 지상 관측천문학자들이 독립적으로 달의 표면에서 물분자를 발견했다고 보고했 다. 특히, 성층권 고도를 비행하는 점보 제트기에 탑재된 적외선 관측소(Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy, SOFIA)는 100-400 ppm까지의 물 분자를 극지역이 아닌 태 양빛이 입사되는 지역에서도 측정했다고 보도하였다[31,32]. 이렇게 달의 광범위한 지역에서 도 물 분자가 발견되려면, 혜성 충돌에 의한 물 입력 이외에 다른 기작이 필요하다. 최근 이 론에 따르면 태양풍이 입사하여 달 표면 광물질의 산소원자와 반응하여 물 분자 또는 수산기 를 생성하여 광물질내에 축적시킬 수 있다고 한다[33].

이와 같이 달 표면에서 물의 존재는 더 이상 논란없이 확고히 받아들여지고 있다. 다음 단 계는 달에서 인간 활동에 필수불가결한 물을 채취하는 연구일 것이다. 2021년부터 발사예정 인 미국의 아르테미스 유인 우주선 시리즈가 달 표면에서 물 채취 실험을 할 것으로 기대하 고 있다. 2022년 NASA는 달 현지자원활용(ISRU)과 관련된 첫 실험은 달 극지에서 얼음이 섞 인 토양을 드릴링해서 물을 채취하는 PRIME-1 미션이 수행될 예정이다. 국내에서도 한국지 질자원연구원을 중심으로 출연(연)-산업체 융합 형태의 달 표면 물 채취 장치 개발을 준비 중 에 있다. 우리나라는 10번째로 아르테미스 협정을 체결한 국가이다. 달에서 물이나 산소 등 을 추출하는 내용으로 아르테미스 연구협력에 참여한다면, NASA와 중복되지 않는 추출 방법 으로 달 자원 추출 협력이 이루어지기를 희망하고 있다. Fig. 19는 달 극지와 저위도 지역에서 의 물 추출에 대한 개념도이다. 우선 극지 표토를 대략 300℃의 저온환경에서 가열하여 기체 를 뽑아내고, 이로부터 물과 다른 유용한 기체들을 분리하는 장치가 필요하다. 저위도 표토에 서는 저온 가열로 활성기체를 추출하고, 대략 1,000℃의 고온가열로 물과 건축자재를 생산하

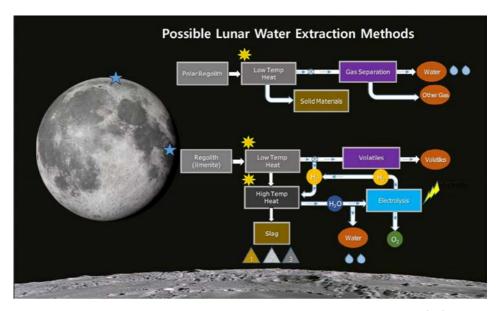


Fig. 19. A concept of extraction of water and other resources from lunar regolith [36].

는 방식이다. 물의 전기분해를 통해 인간 활동에 필요한 산소와 연료로 사용될 수 있는 수소 로 전환할 수도 있다[34,35].

6. 요약 및 결론

본 논문은 천문우주전공자에게 달의 지형 지질학에 대한 기본 지식 전달과 한글 용어의 정 착에 기여하기 위해 작성되었다. 달 표면 지형 이름은 학술적 기원 설명과 함께 가능한 한 현 재 통용되는 한글 용어와 통일을 유지하며 새로운 용어들을 제안하였다. 특히, 일반인들에게 달 앞면을 쉽게 소개할 수 있도록, 1 대양(폭풍의 대양), 10대 바다(비, 평온, 고요, 감로주, 풍 요, 위난, 증기, 인식, 습기, 구름), 6대구(티코, 코페르니쿠스, 케플러, 아리스타쿠스, 스테비누 스, 랑그레누스)를 제안하였다. 이 지형들은 저배율 망원경으로도 구분이 가능해서, 앞으로 있을 아르테미스(Artemis) 등의 달 착륙선의 위치를 소개하는 이정표로 사용될 수 있다. 대표 적인 달 지형인 고원(highland), 바다(maria), 충돌구(impact crater), 산맥(mountains), 함몰 용암굴/열구(rille, rima), 돔(dome), 주름능선(wrinkle ridge), 지구대(graben), 절벽(rupes), 참호(trench) 등의 용어를 대표적 사진과 함께 설명하였다. 충돌구는 크기에 따라 소형, 중형, 복합, 대형으로 분류하여 대표적인 예와 특징들을 소개하였다. 또한 달의 기초적인 지질학적 표준 이론과 표준 시대 구분을 소개하였다. 마지막으로 달에서의 인간활동에 대한 획기적인 단초가 된 달 표면에서의 물의 발견과 그 활용 가능성을 정리하였다. 본 논문이 한국에서 달 과 우주 탐사에 대한 관심을 증대시키는 데 기여할 수 있기를 바란다.

감사의 글

본 연구는 한국우주과학회를 통한 한국천문연구원 학연사업(2020)의 지원을 받았음.

References

- 1. Kopal Z, Mapping of the Moon, in An Introduction to the Study of the Moon, eds. Burton WB, Shore SN (Springer, Dordrecht, 1966), 4.
- 2. Wood CA, Lunar hall of fame, Sky & Telescope (2017) [Internet], viewed 2020 Jul 27, available from: https://skyandtelescope.org
- 3. Prinz M, Dowty E, Keil K, Bunch TE, Spinel troctolite and anorthosite in Apollo 16 samples, Science. 179, 74-76 (1973). https://doi.org/10.1126/science.179.4068.74
- 4. Green DH, Ware NG, Hibberson WO, Major A, Experimental petrology of Apollo 12 basalts: part 1, sample 12009, Earth Planet. Sci. Lett. 13, 85-96 (1971). https://doi.org/10.1016/ 0012-821X(71)90109-9
- 5. Barboni M, Boehnke P, Keller B, Kohl IE, Schoene B, et al., Early formation of the Moon 4.51 billion years ago. Sci. Adv. 3, e1602365 (2017). https://doi.org/10.1126/sciadv.1602365
- 6. Hiesinger H, Head JW III, Wolf U, Jaumann R, Neukum G, Ages and stratigraphy of mare basalts in Oceanus Procellarum, Mare Nubium, Mare Cognitum, and Mare Insularum, J. Geophys. Res. 108, E7 (2003). https://doi.org/10.1029/2002JE001985

- 7. Neukum G, Ivanov BA, Hartmann WK, Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system, Space Sci. Rev. 96, 55-86 (2001). https://doi.org/10.1023/ A:1011989004263
- 8. Brown P, Spalding RE, ReVelle DO, Tagliaferri E, Worden SP, The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth, Nature. 420, 294-296 (2002). https://doi.org/10.1038/ nature01238
- 9. Gault DE, Wedekind JA, Experimental studies of oblique impact, Proceedings of the 9th Lunar and Planetary Conference, Houston, TX, 13-17 Mar 1978.
- 10. Lunar LO, Impact Basin Geology (2019) [Internet], viewed 2021 July 10, available from: https://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/orbiter/lunar_orbiter/impact_basin/
- 11. Bussey DBJ, Spudis PD, Compositional analysis of the Orientale basin using full resolution Clementine data: some preliminary results, Geophys. Res. Lett. 24, 445-448 (1997). https://doi.org/10.1029/97GL00178
- 12. Wikipedia, Geology of the Moon (2021) [Internet], viewed 2021 July 10, available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Geology_of_the_Moon
- 13. Lognonné P, Gagnepain-Beyneix J, Chenet H, A new seismic model of the Moon: implications for structure, thermal evolution and formation of the Moon, Earth Planet. Sci. Lett. 211, 27-44 (2003). https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00172-9
- 14. Garcia RF, Gagnepain-Beyneix J, Chevrot S, Lognonné P, Very preliminary reference Moon model, Phys. Earth Planet. Inter. 188, 96-113 (2011). https://doi.org/10.1016/j.pepi. 2011.06.015
- 15. Wieczorek MA, Neumann GA, Nimmo F, Kiefer WS, Taylor J, et al., The crust of the Moon as seen by GRAIL, Science. 339, 671-675 (2013). https://doi.org/10.1126/science.1231530
- 16. Green J, Draper D, Boardsen S, Dong C, When the Moon had a magnetosphere, Sci. Adv. 6, eabc0865 (2020). https://doi.org/10.1126/sciadv.abc0865
- 17. Mighani S, Wang H, Shuster DL, Borlina CS, Nichols CIO, et al., The end of the lunar dynamo, Sci. Adv. 6, eaax0883 (2020). https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0883
- 18. Wilhelms DE, Geologic history of the Moon, U.S. Geological Survey Professional Paper, 1348 (1987).
- 19. Klotz I. New Moon, Sci. Am. 325, 18 (2021). https://doi.org/10.1038/scientificamerican 0721-18b
- 20. Normile D, China set to bring back rocks from the Moon, Science. 370, 900 (2020).
- 21. Bowring SA, Williams IS, Priscoan (4.00–4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada, Contrib. Mineral. Petrol. 134, 3-16 (1999). https://doi.org/10.1007/s004100050465
- 22. Wilde SA, Valley JW, Peck WH, Graham CM, Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago, Nature. 409, 175-178 (2001). https://doi.org/10.1038/35051550
- 23. Watson K, Murray BC, Brown H, The behavior of volatiles on the lunar surface, J. Geophys. Res. 66, 3033-3045 (1961). https://doi.org/10.1029/JZ066i009p03033

- 24. Simpson RA, Tyler LG, Reanalysis of Clementine bistatic radar data from the lunar south pole, J. Geophys. Res. 104, 3845-3862 (1999). https://doi.org/10.1029/1998JE900038
- 25. Feldman WC, Maurice S, Binder AB, Barraclough BL, Elphic RC, et al., Fluxes of fast and epithermal neutrons from lunar prospector: evidence for water ice at the lunar poles, Science. 281, 1496-1500 (1998). https://doi.org/10.1126/science.281.5382.1496
- 26. Colaprete A, Schultz P, Heldmann J, Wooden D, Shirley M, et al., Detection of water in the LCROSS ejecta plume, Science. 330, 463-468 (2010). https://doi.org/10.1126/science.11 86986
- 27. Zuber MT, Head JW, Smith DE, Neumann GA, Mazarico E, et al., Constraints on the volatile distribution within Shackleton crater at the lunar south pole, Nature. 486, 378-381 (2012). https://doi.org/10.1038/nature11216
- 28. Mitrofanov IG, Sanin AB, Litvak ML, Water in the Moon's polar areas: results of LEND neutron telescope mapping, Dokl. Phys. 61, 98-101 (2016). https://doi.org/10.1134/S1028 335816020117
- 29. Hauri EH, Weinreich T, Saal AE, Rutherford MC, Van Orman JA. High pre-eruptive water contents preserved in lunar melt inclusions, Science. 333, 213-215 (2011). https://doi.org/ 10.1126/science.1204626
- 30. Benna M, Hurley DM, Stubbs TJ, Mahaffy PR, Elphic RC, Lunar soil hydration constrained by exospheric water liberated by meteoroid impacts, Nat. Geosci. 12, 333-338 (2019). https://doi.org/10.1038/s41561-019-0345-3
- 31. Chang K, There's water and ice on the Moon, and in more places than NASA thought: future astronauts seeking water on the Moon may not need to go into the most treacherous craters in its polar regions to find it, The New York Times (2020) [Internet], viewed 2021 Oct 26, available from: https://www.nytimes.com/2020/10/26/science/moon-ice-water. html
- 32. Honniball CI, Lucey PG, Li S, Shenoy S, Orlando TM, et al., Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA, Nat. Astron. 5, 121-127 (2020). https://doi.org/10.1038/s41550-020-01222-x
- 33. Teodoro LFA, Eke VR, Elphic RC, Feldman WC, Lawrence DJ, How well do we know the polar hydrogen distribution on the Moon? J. Geophys. Res. 119, 574-593 (2014). https:// doi.org/10.1002/2013JE004421
- 34. Kim KJ, Discovery of water on the moon and its significance of the distribution of water with respect to lunar in-situ resource utilization. KSCE Mag. 69, 14-23 (2021).
- 35. Kim KJ, Introduction to lunar oxygen distribution and its extraction technology. Korean J. Mineral. Petrol. 34, 83-93 (2021). https://doi.org/10.22807/KJMP.2021.34.1.83
- 36. Kim KJ, Planning study on technology development of oxygen resource extraction and utilization at lunar surface by KIGAM-National Institute Cooperation for Participation in International ISRU Program, KIGAM Report, JP2020-004-2021(1) (2021).

Author Information

김용하 yhkim@cnu.ac.kr



1990년 미국 뉴욕주립대학 스토니부룩에서 우주과학으로 박사학위를 받은 후, 1994년부 터 충남대학교 천문우주과학과 교수로 재직 중이며, 행성대기/태양계 연구와 지구 고층대 기 연구를 수행해왔다. 또한 20여년간 학부 태양계 천문학을 강의하며, 태양계 연구의 국

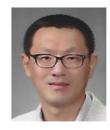
제적 동향에 관심을 가져왔다.

최성희 chois@cnu.ac.kr



1998년 서울대학교에서 암석학으로 박사학위 를 받고, 2009년부터 충남대학교 지질환경과 학과 교수로 재직 중이며, 지구 맨틀과 지각의 생성 및 진화과정 연구를 수행 중이다.

유용재 yongjaeyu@cnu.ac.kr



2002년 캐나다 토론토대학교에서 물리학(지구 물리학 전공)으로 박사학위를 받은 후, 2008년 부터 충남대학교 지질환경과학과 교수로 재직 중이며, 지자기 변동과 암석/운석의 자화특성 을 연구한다.

김경자 kjkim@kigam.re.kr



2001년 뉴질랜드 빅토리아대학에서 지질학 박사학위를 받은 후, 미국 뉴멕시코대학/운석 연구소와 아리조나대학/달행성연구소에서 근 무하였으며, 2007년부터 한국지질자원연구원 국토지질연구본부, 2010년부터 연합대학원대 학교 물리탐사공학과 교수로 재직 중이며, 행

성 지질과 달 탐사 연구를 수행 중이다.

논문



Received: July 15, 2021 Revised: August 10, 2021 Accepted: August 11, 2021

[†]Corresponding author:

Ji-Hye Baek

Tel: +82-42-865-2057 E-mail: jhbaek@kasi.re.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

Ji-Hye Baek

https://orcid.org/0000-0002-0230-4417

Seonghwan Choi

https://orcid.org/0000-0002-1946-7327

Jongyeob Park

https://orcid.org/0000-0002-1063-9129

Sujin Kim

https://orcid.org/0000-0002-5004-7734

Chae Kyung Sim

https://orcid.org/0000-0002-3737-0553

Tae-Yong Yang

https://orcid.org/0000-0002-5725-9828

Minsup Jeong

https://orcid.org/0000-0002-5434-5181

Young-Soo Jo

https://orcid.org/0000-0003-3574-1784

Young-Jun Choi

https://orcid.org/0000-0001-6060-5851

한국 우주관측 자료 전략 수립 제안

백지혜[†], 최성환, 박종엽, 김수진, 심채경, 양태용, 정민섭, 조영수, 최영준 한국천문연구원

Proposals for Korean Space Observation Data Strategies

Ji-Hye Baek[†], Seonghwan Choi, Jongyeob Park, Sujin Kim, Chae Kyung Sim, Tae-Yong Yang, Minsup Jeong, Young-Soo Jo, Young-Jun Choi

Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

요 약

우주관측 자료는 우주 임무를 통해 관측한 별, 은하, 태양, 우주 플라즈마(plasma), 달, 행성 등의 연구 자 료로 관측 자료를 가공 및 활용한 것까지 포함한다. 국내외 천문우주 관측시스템이 대형화되고, 우주 임무 의 확대 및 자료 용량 증가(빅 데이터)로 인해 우주관측 자료의 체계적이고 효율적인 관리에 대한 필요성이 증대되고 있다. 이에 우리나라도 우주관측 자료의 전략을 세우고, 이를 바탕으로 우주관측 자료 정책을 수 립해야 한다. 이를 위한 준비 단계로 우주관측 자료에 대한 광범위한 이해와 다년간의 경험으로부터 발전 된 미 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)의 자료 전략을 분석하였다. NASA의 자료 전략 분석 결과를 바탕으로 우리나라의 우주관측 자료 전략 방향과 앞으로 우주관측 자료 정책을 수립하는 데 기반이 될 우주관측 자료 전략 권고 사항 10가지를 제안한다.

Abstract

Space observation data includes research data such as stars, galaxies, Sun, space plasma, planets, and minor bodies observed through space missions, including processing and utilizing the observation data. Astronomy and space science observation systems are getting larger, and space mission opportunities and data size are increasing. Accordingly, the need for systematic and efficient management of space observation data is growing. Therefore, in Korea, a strategy and policy for space observation data should be established. As a stage of preparation, National Aeronautics and Space Administration (NASA)'s data strategy, which developed from extensive understanding and long-term experience for space observation data, was analyzed. Based on the analysis results, we propose a strategic direction and 10 recommendations for Korean space observation data strategies that will be the basis for establishing space observation data policies in the future.

핵심어: 우주관측, 우주임무, 자료, 자료 전략, 자료 정책

Keywords: space observation, space mission, data, data strategy, data policy

1. 서론

천문우주 분야에서 관측 대상은 태양, 행성, 별, 은하 등 지구 밖의 모든 천체와 지구의 전 리권과 자기권 등 플라즈마(plasma) 영역까지 포함한다. 이러한 대상들을 다양한 방법으로 관측하여 얻은 자료와 이를 처리하고 분석한 모든 결과를 자료라 한다. 자료는 과학 연구에 있어 가장 기본적이고 중요한 수단이기 때문에 자료를 얻기 위한 다양한 프로젝트(project)가 국내외에서 진행되고 있다.

일반적으로 우주 관측소를 구축하고 위성을 개발하는 프로젝트에는 막대한 예산이 필요하 다. 이러한 프로젝트로부터 얻은 성과를 일회성으로 사용하는 데 그치지 않고, 그 효과를 보 다 지속적으로 활용하고 성과를 극대화하기 위해서는 프로젝트 예산에 관측 시스템을 구축하 는 비용과 함께 자료를 처리하고 저장하는 데 필요한 하드웨어(hardware) 및 소프트웨어 (software)의 비용도 포함되어야 한다. 미국이나 유럽 같은 선진국에서는 자료에 대한 예산 을 프로젝트 계획 초기부터 고려하고, 자료 처리 방법이나 소프트웨어 개발도 관측 시스템 구축과 함께 준비한다. 특히 자료 수명 주기(data lifecycle)에 대한 관리 정책을 수립하여 막대한 예산이 투입되어 얻어진 자료가 유실되거나 왜곡되지 않고 최대한 많은 사용자들 이 자료를 활용할 수 있도록 한다.

2014-2040 우주개발 중장기 계획(제2차 우주개발진흥 기본계획 수정)[1]에 따르면 우리나 라에서도 2040년까지 달 및 행성탐사, 우주과학, 태양 및 근지구 우주환경 감시, 미래 우주탐 사, 우주환경감시 및 우주위험 대응 분야 등 약 20여 개의 우주 임무를 계획하고 있으며, 우 주관측을 위한 다양한 국제협력 우주 임무도 진행하고 있다. 또한 기술 발전으로 인한 빅 데 이터(big data)화는 자료의 효율적인 관리와 활용을 위한 천문우주 자료 관리 정책 수립에 대 한 필요성을 더욱 증가시켰다¹. Fig. 1은 우리나라의 행성탐사 및 우주과학 계획(안)으로 우주 개발 중장기 계획에 포함된 다양한 우주 임무를 보여주고 있다.

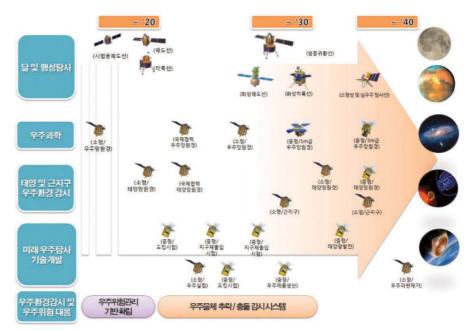


Fig. 1. Planetary exploration and space science proposals in 2014-2040 mid- to long-term space development plan for space exploration. Adapted from Government of Korea [1] with CC-BY.

¹ 빅 데이터는 자료의 크기(volume), 다양성(variety), 속도(velocity), 가치(value) 등 4가지의 특성 을 갖는 자료를 말함.

우주 임무의 목표를 달성하는 데 있어 핵심 단계는 고품질의 자료를 생성하고 분석하는 것 이다[2]. 또한, 이렇게 얻은 중요한 자료를 효율적으로 관리하고 활용할 수 있는 자료 관리 정 책이 필수적이지만, 우리나라의 경우, 자료 관리 정책은 물론 자료의 중요성에 대한 인식조차 부족하다[3]. 이는 천문우주 분야의 관측 시스템 개발 관련 정책이 관측 시스템 자체를 구축 하는 것에 초점이 맞추어져 있었기 때문으로 보인다. 이제는 우리가 생산한 자료에 눈을 돌릴 때이다. 막대한 예산과 인력, 시간을 투입해 개발하는 관측 시스템의 자료 활용을 확대하기 위한 방안이 반드시 필요하다. 국가 R&D 사업으로 구축된 관측 시스템에서 생산된 자료는 공공재적 성격을 가지며, 연구자 개인이 아닌 관측 시스템을 운영하는 기관이나 국가에서 자 료에 대한 체계적인 관리를 해야 한다. 이를 위해서는 국가 차원의 자료 전략을 세우고, 이 전 략을 바탕으로 자료 관련 기관에서는 자료 정책을 수립해야 할 것이다. 이 논문에서는 우리나 라의 우주관측 자료 전략 수립을 위해 천문우주 분야의 선진 기관인 미 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)의 자료 전략을 분석하였다. 이를 바탕으로 우리나라의 실정에 맞는 우주관측 자료 전략과 권고 사항을 제안한다.

논문의 2장에서는 우주관측 자료 전략에 대해 언급하기 전에 기본적인 배경인 우주관측 자 료의 정의, 우주관측 자료 전략 및 정책에 대한 일반적인 사항을 정리하였다. 3장에서는 NASA 과학임무부서(science mission directorate, SMD)의 자료 전략을 요약하고, 이를 심도 있게 분석하였다. 4장에서는 우리나라의 우주관측 자료 전략 수립을 위한 전략 및 권고 사항을 제 안하여 앞으로 한국의 우주관측 자료 정책을 수립하는 데 기여하고자 한다.

2. 배경

2.1 우주관측 자료 정의

위성 자료는 인공위성을 이용하여 획득한 모든 자료를 포함하며, 우주개발진흥법[4]에서는 위성정보라고 표현하고 있다. 위성 자료는 관측 대상에 따라 다시 지구관측 자료(earth observation data)와 우주관측 자료(space observation data)로 구분할 수 있다. 지구관측 자료 는 우주 임무를 통해 얻어진 모든 형태의 지구를 관측한 자료(지질, 지형, 해양, 대기 등)이다. 우주관측 자료는 우주 임무를 통해 천문우주 분야 대상(별, 은하, 태양, 우주 플라즈마, 달, 행 성 등)을 관측한 자료다. 두 자료 모두 관측 자료를 가공 및 활용한 것까지 포함한다. Table 1은 지구관측 자료와 우주관측 자료 정의를 정리한 것이다. Fig. 2와 Fig. 3은 각각 지구관측 자료와 우주관측 자료의 예를 보여준다. 이 논문에서는 우주관측 자료에 대한 내용을 다룬다.

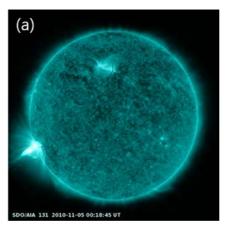
Table 1. Definitions of earth observation data and space science data

Scope	Definition	
Earth observation data	Data for Earth observation in all forms acquired from space	
	missions	
Space observation data	Data such as stars, galaxies, sun, space plasma, moon, and	
	planets observed by space missions	
	(including processing and utilizing of observation data)	





Fig. 2. Examples of earth observation data. Adapted from NASA with public domain. (a) https://science.nasa.gov/earth-science/earth-data (b) https://earthobservatory.nasa.gov/ images/52059/sediment-spews-from-connecticut-river



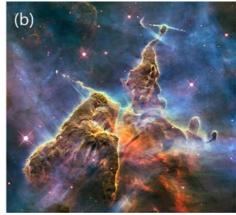


Fig. 3. Examples of space observation data (solar dynamics observatory data (a) and hubble space telescope data (b)). (a) Adapted from Korea Data Center (KDC) for SDO with public domain. (a) Adapted from Korea Data Center (KDC) for SDO with public domain. http:// swc4.kasi.re.kr/jpg_512/aia/131/2010/20101105/20101105_001021_SDO_AIA_131_512.jp g (b) Adapted from European Space Agency(ESA) with public domain. https://www.esa. int/About_Us/ESA_history/Starryeyed_Hubble_celebrates_20_years_of_awe_and_discovery

2.2 우주관측 자료 전략과 정책

우주관측 자료 전략은 우주관측 자료를 효율적으로 생산 및 관리하고 활용을 극대화하기 위한 포괄적인 방침과 계획으로, 우주관측 데이터 전략의 대상에는 천문우주 전 분야(천체물 리, 태양물리, 행성과학 등)의 자료가 모두 포함된다. 천문우주 분야의 과학 자료 아카이브 (archive) 자원은 관측 자료뿐만 아니라, 모델(model) 자료, 자료 관련 툴(tool), 소프트웨어², 메타데이터(metadata), 문서 등 범위도 넓고 분야별로 종류도 다양하다[2]. 이러한 자료를 하 나의 엄격한 관리 체계를 정하고, 이를 절대적으로 따르도록 하는 것은 비효율적이며, 실제로 도 적용하기 힘들다. 그렇기 때문에 NASA에서는 전 분야의 자료를 아우를 수 있는 상위의 계 획(NASA Plan for Increasing Access to the Results of Scientific Research)을 수립하여 전체

² 소프트웨어는 컴퓨터 시스템을 관리(시스템 소프트웨어)하고, 특정 문제를 해결(응용 소프트웨어) 하기 위해 개발된 프로그램을 총칭하며, 컴퓨터 시스템, 프로그램, 자료에 의해 처리되는 모든 정 보까지 포함하기도 함.

적인 개요, 요점, 필수 사항을 정의한다. 그리고 이를 바탕으로 NASA의 SMD에서는 하부 조 직인 천체물리 본부(Astrophysics Division), 지구과학 본부(Earth Science Division), 태양권 물리 본부(Heliophysics Division), 행성과학 본부(Planetary Science Division)를 위한 보다 구체적인 자료 관리 및 컴퓨팅(computing) 전략을 수립하였다. 이 또한 전체적인 개요와 필 수 사항, 권고 사항만을 제시하였고, 각 부서에서는 그대로 따르거나 이를 바탕으로 본부 수 준의 자료 정책을 수립하기도 한다.

우주관측 자료 정책 또는 자료 관리 정책은 자료 전 주기 동안의 자료에 대한 생산, 사용, 저장 및 접근방법에 관한 지침을 제시해야 한다[2]. 자료를 생성하고 분석하는 일은 관측기를 개발하거나 연구를 수행하는 팀에 국한된 일이 아니다. 연구 목표에 도달하기 위해서는 관측 기나 시스템 정보, 관측 자료, 기타 자료, 툴과 소프트웨어 등이 필요하며, 자료의 생산, 처리, 배포 및 보관의 모든 단계는 연구자들과 기술개발자들 간의 긴밀한 협력으로 이루어져야 한 다. 이러한 과정을 일관되고 효율적으로 진행하기 위해 자료 정책이 필요하다. 우주관측 자료 정책에는 보다 구체적인 아카이브 운영 및 계획, 자료 모델, 자료 서비스에 관한 내용이 포함 되며, 자료 전략을 기준으로 하여 각 분야의 특성에 맞는 자료 정책을 수립해야 한다.

3. NASA 자료 전략 분석

이 장에서는 NASA의 자료 전략에 대해 내용을 요약하고 이를 분석하였다. NASA 이외에도 유럽우주국(European Space Agency, ESA)과 일본국립천문대(National Astronomical Observatory of Japan, NAOJ) 등 국외 기관과 국내 연구기관의 자료 전략과 정책을 조사하였지만, NASA를 제외한 다른 기관에는 우주관측 자료를 위한 명문화된 자료 전략이나 자료 관리 정책 자료를 찾을 수 없었다. ESA의 경우, 유럽 연합(European Union)에서 제시하는 유럽 데이터 전략(European Data Strategy)을 따르겠지만, 이는 분야를 특정하지 않는 모든 자료에 대한 내 용이다. 우리나라의 경우, 국가 과학자료센터 구축을 위한 다양한 연구[3,5,6]를 수행하였으나, 이 또한 전 분야의 과학자료를 고려하는 것이며, 여기에도 자료 전략이나 정책에 대한 내용은 없었다. 이러한 이유로 비교적 상세하게 정리되어 있는 NASA의 자료 전략만을 분석하였다.

3.1 NASA 자료 전략

NASA는 획기적인 과학 발견을 위해서는 과학 자료 및 컴퓨팅 시스템이 매우 중요함을 인 식하고, 이를 위한 새로운 전략을 세우고자 하였다. 이를 위한 첫 단계로 NASA 자문위원회 (NASA Advisory Council, NAC)는 빅 데이터의 모범 사례를 연구하고 식별하기 위한 빅 데이 터 태스크포스(Big Data Task Force, BDTF)를 구성하였다. BDTF는 2015년부터 2017년까지 활동하였으며, 'Data Science: Statistical and Computational Methodologies for NASA's Big Data in Science', 'Making NASA Science Data More Usable', 'Modeling Workflows', 'Server-side Analytics' 등 총 4종의 최종 보고서를 제출하였고, 이는 NASA의 자료 정책과 전략을 세우기 위한 기초 자료가 되었다. 이를 바탕으로 NASA SMD에서는 정보 기술의 발 전을 활용하여 과학 컴퓨팅과 자료 아카이브를 개선하고, 향후 5년 동안 더 큰 과학적 발견 을 가능하게 하는 새로운 전략을 개발하기 위해 각 부서의 대표, 민간 기업의 IT 전문가와 함께 전략 자료 관리 워킹 그룹(Strategic Data Management Working Group, SDMWG)을

조직하였다. SDMWG는 2018년 10월에 자료 관리 전략 워크숍을 개최하고, 빅 데이터(big data), 클라우드 컴퓨팅(cloud computing), 오픈 사이언스(open science), 학제간 연구(interdisciplinary research) 등 네 가지 주요 주제를 중점적으로 토론하였다. 또한 SDMWG는 2018년에 "SMD의 2019년부터 2024년까지의 자료 관리와 컴퓨팅 전략 보고서[7]"를 작성하 였고, SMD는 이를 승인하여 4개의 과학 부서(천체물리 본부, 태양권물리 본부, 행성과학 본 부, 지구과학 본부)를 통해 구현해 나가고 있다.

SMD는 전략적인 자료 관리 및 컴퓨팅을 위한 비전, 사명, 세 가지 목표 및 11개의 관련 전 략으로 구성된 전략을 수립하였으며, 이러한 전략을 구현하는 데 필요한 지침과 현재 상황 분 석, 조사 결과와 권고 사항을 제시하고 있다.

또한 SMD는 자료 관리 전략 목표를 오픈 사이언스, 지속적인 자료 및 컴퓨팅 시스템 개선, 전략적 협업관계로 세우고, 다양한 권고 사항을 제시하였다. 이러한 권고 사항을 개발할 때에 는 아래와 같이 세 가지 주요 운영 원칙[7]을 지정하였다.

- · 수집한 자료를 손상해서는 안됨.
- ·새로운 임무를 활용하여 발전시켜야 함.
- ·대체 불가능한 자료의 무결성을 보호하면서 과학적 가치가 높은 과거 자료 세트를 현대 화해야 함.

Table 2는 SMD의 자료 관리 및 컴퓨팅 전략을 요약한 내용이다.

SDMWG는 전략 문서를 작성하는 시점의 요구 사항과 모범 사례가 5년 동안 동일하게 유지 되지 않을 것으로 예측하였다. 따라서 SMD의 자료 및 컴퓨팅 요구 사항에 대한 주기적인 재평 가가 필요하며, 각 과학 부서에서 이를 검토하여 역량을 꾸준히 발전시키도록 권장하고 있다.

Table 2. Summary of NASA SMD data management and computing strategy

Vision: To enable transformational open science through continuous evolution of science data and computing systems for NASA's Science Mission Directorate.

Mission: Lead an innovative and sustainable program supporting NASA's unique science missions with academic, international and commercial partners to enable groundbreaking discoveries with open science data. Continually evolve systems to ensure they are usable and support the latest analysis techniques while protecting scientific integrity.

Goal 1: Develop and Implement	Goal 2: Continuous Evolution	Goal 3: Harness the Commu-
Capabilities to Enable Open	of Data and Computing Sys-	nity and Strategic Partnerships
Science	tems	for Innovation
Strategy 1.1:	Strategy 2.1:	Strategy 3.1:
Develop and implement a	Establish standardized	Develop common metadata
consistent open data and soft-	approaches for all new	standards for all NASA
ware policy.	missions and sponsored	science data.
	research that encourage the	
	adoption of advanced	
	techniques.	

Table 2. Continued

Strategy 1.2:	Strategy 2.2:	Strategy 3.2:
Upgrade capabilities at	Integrate investment	Utilize the full capacity of
existing archives to support	decisions in High-End	advances in High End
machine readable data	Computing with the strategic	Computing to achieve
access using open formats	needs of the research	SMD's research goal.
and data services.	communities using this	
	capability.	
Strategy 1.3:	Strategy 2.3:	Strategy 3.3:
Develop and implement a	Invest in capabilities to use	Promote opportunities for
SMD data catalog to support	commercial cloud	continuous learning as the
discovery and access to	environments for open	field evolves through
complex scientific data	science to make data	collaboration.
across Divisions.	accessible by diverse set of	
	academic and commercial	
	users.	
Strategy 1.4:	Strategy 2.4:	
Increase transparency into	Provide tools and training to	
how science data are being	scientists to be better able to	
used through a free and	collaborate with all types of	
open unified journal server.	computational and computer	
	scientists, including Artificial	
	Intelligence and Machine	
	Learning (AI/ML).	

NASA, National Aeronautics and Space Administration; SMD, science mission directorate.

3.2 NASA 자료 전략 목표 분석

NASA는 자료 정책을 위한 SMD의 자료 전략을 세우고 연구 커뮤니티(community), 학계, 민간기업, 국제 협력 기관 등으로부터 들어오는 의견이나 모델을 기반으로 연구 환경을 발전 시키고 있다. 우리나라도 우주관측 자료에 대한 기술 협력과 지속적인 투자를 통해 시스템, 자료 활용, 기술 확대 방안을 마련해야 한다. 이 장에서는 NASA의 자료 전략 목표를 분석하 여 이를 바탕으로 우리나라의 우주관측 자료 전략을 수립하는 데 도움이 되고자 한다. 아래는 NASA 자료 관리 및 컴퓨팅 전략 목표 3가지[7]이다.

- · 오픈 사이언스
- ·지속적인 자료 및 컴퓨팅 시스템 개선
- · 전략적 협업관계

첫 번째 오픈 사이언스는 최근 천문학 및 우주과학 분야의 경향이다. NASA는 과학 자료, 소프트웨어 및 정보를 검색하고, 접근이 가능하게 하면 협업과 혁신이 촉진되고, 투명성이 높 아진다고 강조하였다[7]. ESA의 전 사무총장인 Jan Wörner도 "ESA의 이미지, 정보 및 지식에 대한 접근을 개방하는 것은 Space 4.0 환경에서 정보를 제공하고, 혁신하고, 상호 작용하고, 영감을 주는 우리 목표의 중요한 요소(This evolution in opening access to ESA's images, information and knowledge is an important element of our goal to inform, innovate, interact and inspire in the Space 4.0 landscape)"라고 했다[8]. 이러한 관점에서 우리나라는 개방형 과학 자료 생태계를 구축하여야 한다. 개방형 과학 자료 생태계는 자료의 접근성을 높 이는 것과 함께 다양한 인터페이스 표준을 지원하는 개방형 소프트웨어 프레임워크(framework)를 중심으로 구성될 수 있다. 개방형 소프트웨어+ 프레임워크는 자료 수집, 검색, 접근 및 분석을 위한 클래스(class), 라이브러리(library), 응용프로그램 인터페이스(application programming interface, API), 응용프로그램, 서비스 시스템 구성 등을 제공하며, 각 프로젝트 또는 부서 간에 재사용 가능한 환경을 구축하여 지속적으로 개선하고 활용될 수 있도록 한다. 또한 개방형 소프트웨어 프레임워크의 라이브러리와 과학 자료를 공개하여 타 분야 연구자와 일반인들도 이를 사용할 수 있도록 하고, 다양한 분야에서 활용되고 관련 기술이 확대될 수 있는 환경을 제공해야 할 것이다.

두 번째 전략 목표인 지속적인 자료 및 컴퓨팅 시스템 개선은 자료와 소프트웨어의 관점에 서 중요한 전략 목표이다. 일단 관측시스템 운영이 시작되면 시스템의 고장으로 운영이 중단 되기 전까지 수년에서 수십년의 기간 동안 자료를 수집하게 된다. 과학 임무가 진행되는 동안 시간이 지남에 따라 자료 및 소프트웨어, 하드웨어에 대한 새로운 기술이 등장할 수 있고 기 존의 방법 대신 새로운 자료 처리 방법이나 혁신적인 컴퓨팅 기능을 적용할 수도 있게 될 것 이다. 이에 따라 자료의 가치가 크게 달라질 수 있기 때문에 기존 자료에 새로운 기술을 적용 하는 것을 장려해야 한다. 이를 위해서는 임무 주기 전반에 걸쳐서 자료 및 컴퓨팅 시스템에 대한 지속적인 평가가 필요하고, 새로운 기술을 사용하고 효율적으로 적용하기 위한 방안을 마련해야 한다. 또한 자료, 소프트웨어 및 하드웨어와 관련된 기술 개발, 선정, 투자를 지원할 수 있는 방향으로 자료 정책을 수립해야 한다. 자료 관리 및 컴퓨팅 시스템 개선을 지원하기 위한 자료 시스템, 컴퓨팅 접근 방식 및 기술을 활용하는 인력에 대한 투자가 필요하며, 이러 한 과정을 효과적으로 진행하기 위해 자료 과학자와 협력하는 것은 필수적이다[7].

세 번째 목표인 전략적 파트너십은 국내외 커뮤니티뿐만 아니라. 기관 간 또는 기관내의 부 서 간의 적극적인 협업을 포함한다. 또한 타 분야와의 협업, 예를 들면 컴퓨터 공학이나 자료 과학 분야와의 융합 연구를 통해 관련 도구, 타 분야 혁신 기술 등을 인식하고 활용할 수 있 는 기회를 마련할 수 있다. 효율적인 협업을 위한 협력 시기나 구체적인 방법은 각 기관별로 자료 정책을 통해 결정할 수 있으며, 각 기관의 특성에 맞게 시스템을 관리할 수 있는 임무와 책임, 유연성도 함께 주어야 할 것이다.

4. 한국 우주관측 자료 전략 수립을 위한 권고 사항

세계적으로 천문우주 분야의 다양한 연구와 기술 개발, 대형 사업이 진행되고 있으며, 이를 바탕으로 각 기관에서는 과학기술정책을 수립하거나 전문인력을 양성하는 등 학계뿐만 아니 라, 국가적으로도 연구, 기술, 개발(research, technology, development, RTD) 성과를 확산 하고 있다. 이러한 맥락에서 과학 자료도 RTD 성과 중 하나로 다뤄져야 하며, 우주관측 자료 전체를 연구 커뮤니티, 민간기업, 학계, 일반인들에게 개방하는 것도 중요하다.

우리나라도 큰 틀에서의 자료 계획을 세우는 것이 필요하다. 특히 우주관측 자료는 규모나 양이 기하급수적으로 증가하고 있고, 그에 따라 자료 센터(아카이브)는 자료 관리, 큐레이션 (curation), 접근, 분석, 컴퓨팅 등에 대한 중요한 역할을 해야 한다. 이를 통해 양질의 자료를 쉽고 빠르게 획득하여 최대한 많이 활용될 수 있도록 함으로써 과학 연구와 새롭고 혁신적인 발견을 할 수 있는 기회를 제공해야 한다. 이를 준비하기 위해 이 장에서는 우리나라의 우주 관측 자료 전략 권고 사항을 제안하고자 한다.

우주관측 자료 전략 권고 사항을 언급하기 전에 과학 자료에 대한 운영 원칙 2가지를 강조 하고자 한다. 이는 NASA의 SMD 자료 관리 및 컴퓨팅 전략에서도 나오는 내용으로 실제 구 현하는 단계에서 고려해야 하는 주요한 운영 원칙이다. 우리나라에서도 아래 원칙을 바탕으 로 자료 정책을 수립하기를 제안한다.

- · 수집한 자료를 변형하거나 손상시키지 않는다.
- ·새로운 프로젝트를 활용하여 시스템(하드웨어, 소프트웨어 모두 포함)을 지속적으로 개선 하다.

첫 번째 원칙은 과학 자료 전 분야에서 가장 중요하게 인식되어야 할 항목이다. 과학 자료 는 연구 목적에 따라 가공/변형되면서 정보가 손실되거나 추가될 수 있다. 따라서 원본 자료 를 보존하는 것은 연구의 투명성과 윤리성을 담보한다. 또한 자료는 수많은 자원(예산, 인력, 시간, 노력 등)이 투입된 결과물로서 상당한 가치를 가진다. 예를 들어 2010년 발사된 NASA 의 태양 관측 위성인 Solar Dynamics Observatory(SDO)의 개발 예산(첫 5년간의 운영비 포 함)은 865백만 달러(약 9천억 원)[9]이고. 위성 개발 계획부터 개발 후 발사까지 약 10년이 걸 렸다. NASA측 프로젝트 투입 인력만 수십 명이고, 위성체와 발사체 관련 인력, Atmospheric Imaging Assembly(AIA)와 Helioseismic and Magnetic Imager(HMI)를 개발한 스탠포드 대 학과 록히드마틴까지 포함하면 수백 명에 이를 것으로 보인다. SDO는 발사 후 현재까지 10 년 넘게 운영되고 있으며, 자료 용량은 약 6 PB이다. 또한 SDO와 관련된 연구 결과 논문은 한 해에 수백 편이 출판되며, 2020년까지 인용횟수는 약 6만 건이 넘었다[10]. SDO의 관측 자료는 특히 장기간 다량의 자료를 이용한 빅 데이터와 딥 러닝 기반의 태양 물리 연구를 가능 하게 하였다. 이처럼 과학적 관측 또는 연구를 기반으로 생성된 자료는 대체 불가능한 자료 (irreplaceable data)이고, 과거 자료이든 최신 자료이든 생성된 시기에 상관없이 동일하게 중 요한 가치를 지닌다. 예산, 인력 등 그 어떤 이유로 이미 수집한 자료를 훼손하는 것은 절대 하지 말아야 할 것이다.

두 번째 원칙은 시스템 관점에서의 전략이다. IT 시스템의 하드웨어와 소프트웨어 관련 기

술은 끊임없이 발전하고 있고, 짧은 주기로 새로운 기술이 소개되고 있다. 이에 맞춰 사용자 경험도 수준이 높아져 자료를 제공하고 관리하는 기관 입장에서는 이러한 상황 변화에 부응 해야 한다. 특히 아카이브 관점에서는 자료를 저장하고 처리/분석/배포하는 전반적인 작업을 하드웨어(저장장치, 계산 자원 등)와 소프트웨어에 절대적으로 의존하고 있기 때문에 이러한 시스템을 주기적으로 개선할 필요가 있다. 이를 위해서는 예산이 필요한데, 새로운 임무 계획 에 따라 시스템 개선을 계획한다면 전체적인 시스템을 보다 효율적으로 운영할 수 있을 것이 다. 또한 현재 시스템의 상태에 대한 평가와 진단을 지속적으로 수행하고, 이를 토대로 신규 임무의 자료 관리 계획과 기존 자료의 이전(migration) 작업의 계획을 세울 수 있다.

위 두 가지의 우주관측 자료 운영 원칙을 기반으로 다음과 같은 우주관측 자료 전략 수립 을 위한 권고 사항을 정리하였다. 우주관측 자료 전략 권고 사항은 학계, 민간 산업, 군 등 다 양한 분야의 자료 사용자들과 우주관측 자료 정책을 수립할 때 근간이 되기를 강력하게 권장 한다.

- 가. 프로젝트를 계획할 때부터 장기간의 자료 관리에 대한 계획을 포함해야 한다. 자료 관 리 계획에는 자료 제품(data product), 관련 소프트웨어 및 툴 개발, 자료 배포 계획 등 이 포함되어야 한다. 또한 프로젝트 주기에 맞춰 자료 관리 계획도 구체화되어야 한다.
- 나. 모든 우주 임무에 대한 자료 개방 정책 표준을 확립해야 한다. 자료의 활용성을 확대하 기 위해서는 자료 접근성, 용이성, 개방성을 높여야 하며, 이를 위한 표준을 세워 우리 나라에서 진행하는 우주 임무(새로운 임무는 물론 운영 중인 임무도 포함)에 적용해야 한다.
- **다. 기관 차원의 우주관측 자료의 아카이브 계획을 세워야 한다.** 임무가 종료된 이후 자료 를 장기적으로 관리하는 방법을 계획할 때 자료 수명 주기 접근 방식을 취해야 한다. 각 프로젝트 단위의 임무 아카이브, 최종 아카이브, 딥 아카이브에 대한 계획과 구체적 인 운영 계획이 필요하다.
- 라. 오픈 소스 및 협업 도구를 채택하여 개발해야 한다. 국내외의 광범위한 과학 커뮤니티 에서는 오픈 소스 사용이 확대되고 있고, 협업을 위한 다양한 도구 활용도 커지고 있다. NASA에서도 과학, 공학, 의학 분야에서의 오픈 소스 정책을 채택하고 있다. 단, 중요 기술에 대해서는 비공개 정책을 준수해야 한다.
- 마. **아카이브의 IT 시스템에 대한 평가 및 개선은 5년 이내의 주기로 계획한다**. 통상적인 IT 시스템의 수명주기는 5년이다. 때문에 5년 이내로 시스템에 대한 평가 및 개선이 이루어져야 한다. 이를 통해 저장장치의 용량, 서버 자원 요구 사항(컴퓨팅 자원 포함) 등을 평가하고, 새로운 리소스에 대한 수요를 조사하기 위한 전략 개발에 사용되어야 하다.
- 바. 자료 분석, 계산, 소프트웨어 개발, 자료 관리 등은 학계(타 분야 포함)와 산업계에 있는 **자료 전문가들과 협력해야 한다.** 자료 및 소프트웨어 관련 기술은 빠르게 변화하고 있 으며, 이러한 환경에서 연구자들이 주도하는 자료 분석 및 관련 소프트웨어 개발은 한 계가 있을 수 있다. 이를 고려하여 자료 과학 전문가(data science professionals)를 영 입하는 것이 필요하며, 다양한 분야의 전문가들과 공동 연구를 진행해야 한다. 또한 새 로운 기술을 지속적으로 도입하고 분석해야 하며, 자료 관리를 위한 방법 및 알고리즘

에 대한 개발과 교육도 지속적으로 병행해야 한다.

- 사. 자료 및 소프트웨어의 유용성, 검색 용이성, 접근성을 평가할 수 있는 프로세스(process) 를 개발해야 한다. 여기에는 컴퓨팅 자원 활용도도 포함되어야 한다. 보통은 자료를 얼 마나 잘 생성하고 운영하는지 정도만 파악하고, 위의 항목들과 관련된 사항은 고려되 지 않는다. 자료 및 소프트웨어의 유용성, 검색의 용이성, 접근성, 컴퓨팅 자원 활용도 까지 파악할 수 있는 프로세스가 개발되면 수집된 정보를 통해 아카이브 운영에서 의 사 결정하는 데 사용할 수 있다.
- 아. 학제 간 연구를 가능하게 하는 메타자료를 개발해야 한다. 과학 자료는 임무별로 생성 되지만 여러 임무 자료를 융합하여 사용할 수 있도록 해야 한다.
- 자. 클라우드 컴퓨팅 및 인공지능(artificial intelligence, AI)/기계학습(machine learning, ML)을 포함한 새로운 계산 기술을 연구하도록 장려해야 한다. 또한 AI/ML을 사용하는 새로운 연구 방법에 대해 커뮤니티에 장려하고 교육하기 위한 투자를 해야 한다.
- 차. 관련 기관에서는 우주관측 자료 정책에 대한 지속적인 개선을 위한 위원회를 조직하고, 과학 자료 및 정보 책임자를 임명해야 한다. 위원회와 책임자는 아래와 같은 업무에 포 함된다.
- · 우주관측 자료 정책 설정, 규정 준수 확인 및 외부 정책에 대한 인식
- · 새로운 기회 포착, 선택 및 예산 조달을 위한 부서 간 협력 유지
- ·목표와 기능에 투자하고 진행 상황 추적
- ·워크숍, 연구, 교육 등을 통해 우주관측 자료 및 컴퓨팅 커뮤니티 육성
- · 우주관측 자료 및 컴퓨팅 포트폴리오의 구조와 내용에 대해 주기적인 평가

마지막으로 우주관측 자료 전략 개선, 커뮤니티 의견 수렴, 최종적으로 자료 정책 수립을 위한 협의체를 구성하는 방안에 대해 언급하고자 한다. 이러한 협의체들은 다양한 분야의 연 구, 기술, 개발하는 실무자들로 구성되어야 하며, 연구 커뮤니티, 민간기업, 학계까지 포함하 여 폭넓은 관점과 지식, 의견을 수렴할 수 있어야 한다. 이를 위해 각 협의체의 목적과 필수 적인 구성워도 아래와 같이 권고한다.

가. 우주분야 자료 운영관리위원회

- ·목적: 포괄적인 우주관측 자료 전략과 정책의 수립 및 개선, 우주관측 자료의 운용, 관리 를 위한 실무적 논의
- ·필수 구성원: 자료 및 정보 전문가, IT 시스템 전문가(민간기업), 자료 과학자(학계 또는 민간기업), 각 연구 분야(천체물리, 태양권물리, 행성과학) 전문가

나. 우주관측 자료 커뮤니티 협의체

목적: 우주관측 자료를 생산 및 활용하는 커뮤니티의 의견 수렴 필수 구성원: 각 연구 분야(천체물리, 태양권물리, 행성과학) 자료 실사용자 및 자료 생산자

5. 결론

세계적으로 다양한 천문학 및 우주과학 관측 시스템이 운영되고 있고, 우리나라에서도 국

제협력을 통해서 또는 독립적으로 관측 시스템을 개발하고 있다. 두 가지 경우, 모두 정부에 서 예산을 투입하여 직간접적으로 개발 및 운영하는 것이기 때문에 여기서 나오는 자료도 체 계적인 관리가 필요하다. 지금까지 프로젝트 또는 기관별로 자료 관리에 대한 고민을 해왔을 것이다. 하지만 이를 실현하기 위한 구체적인 지침이나 정책은 없는 실정이다.

미국은 국가 차원에서 자료 계획에 대한 큰 그림의 개념을 가지고 있으며, 이를 바탕으로 NASA에서는 과학, 기술, 의학에 관련된 디지털 자료 계획을 수립하였다. NASA의 자료 계획 에는 디지털 자료 관리 원칙, 관리 대상 범위, 요구 사항, 적용 범위, 계획 및 구현 등 실질적 으로 자료 정책을 수립하는 데 필요한 구체적인 사항을 포함한다. 이와 함께 NASA SMD의 자료 전략은 과학 자료에 특화된 내용을 담고 있다. 여기에는 과학 자료의 비전과 목표, 각 목표에 따른 전략들을 구체적으로 제시하고, 이를 토대로 전략 목표와 권고 사항을 기술한다. NASA SMD의 자료 전략은 연구 부서인 천체물리 본부, 지구과학 본부, 태양권물리 본부, 행 성과학 본부를 위한 것으로, 각 부서에서는 분야별 특성에 맞는 과학 자료 관리 정책을 수립 하거나 관리 체계를 갖추고 있다. NASA의 자료 계획이나 SMD 자료 전략에서 강조하는 것은 오픈 엑세스(open access)이다. 수많은 임무를 통해 획득한 자료를 최대한 많이 활용할 수 있 도록 개방하고, 이를 위한 다양한 전략을 제시한다. 또 하나의 중요한 점은 이 두 문서에서는 가장 상위에서의 기본 지침(guideline)만 제시한다는 것이다. 임무나 연구 분야의 특성이 상 이하고 같은 연구 부서 내에서도 관측 대상이나 관측 기기에 따라 자료가 매우 다양하기 때 문에 일원화된 관리 체계를 강제할 수 없으며, SMD에서도 이를 인정하고 다양성과 유연성을 용인한다. 다만 NASA의 자료 계획이나 SMD 자료 전략의 기본적인 지침을 따르도록 하고, 조금 더 구체적인 사항은 연구 부서 자체의 자료 관리 정책으로 대신한다.

우리나라도 우주관측 자료 정책이 필요하다. 하지만 자료 정책을 수립하기 위한 상위 개념 의 자료 계획이나 전략이 먼저 구성되어야 할 것이다. 이 논문에서는 우리나라의 우주관측 자 료 전략 방향과 이를 위한 권고 사항을 제안하였다. 이는 높은 수준의 포괄적인 전략으로 우 리나라의 우주관측 자료 정책을 수립하고, 우주관측 자료 활용성을 극대화할 수 있는 기반이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국천문연구워 '차세대 우주환경 관측 네트워크 구축 및 운영' 과제의 일부로 수행 되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

- 1. Government of Korea, 2014-2040 Mid- to long-term space development plan for space exploration, Amendment to the 2nd Space Development Promotion Basic Plan (2013).
- 2. NASA, NASA Heliophysics Science Data Management Policy, version 1.2 (NASA, Washington, DC, 2016).
- 3. Yun JM, Lee PJ, Kim GB, Yang YS, Jeon SB, et al., A basic research on the establishment of legal system for the management and utilization of national scientific data, Korea Institute of Science and Technology Information Report, K-12-SG-102-01P-1 (2012).

- 4. Ministry of Science and ICT, The Space Development Promotion Act (2020) [Internet], viewed 2020 Dec 22, available from: https://www.law.go.kr/%EB%B2%95%EB%A0%B9/ %EC%9A%B0%EC%A3%BC%EA%B0%9C%EB%B0%9C%20%EC%A7%84%ED%9D%A5%EB%B 2%95
- 5. Lee SH, Kim TJ, Ryu BJ, Park HS, Shin JS, et al., A study on establishing the scientific data management and application framework to build up the National Scientific Data Center, Korea Institute of Science and Technology Information Report, K-11-L05-C05-S02 (2011).
- 6. Park SU, Hahn SH, Lee PW, Lee YS, Kim ST. A study on establishment of performance analysis model for National Science Data Center Construction, Proceedings of the The Korea Contents Association Spring Conference, Jeju, 20-21 May 2011.
- 7. NASA, Science Mission Directorate's strategy for data management and computing for groundbreaking science 2019-2024 (2019) [Internet], viewed 2021 Jan 10, available from: https://science.nasa.gov/science-pink/s3fs-public/atoms/files/SDMWG%20Strategy_Final.
- 8. European Space Agency, ESA digital agenda (2017) [Internet], viewed 2021 Jan 12, available from: http://www.esa.int/About Us/Digital Agenda/ESA affirms Open Access policy for images_videos_and_data
- 9. Lovertt RA, First light for Solar Dynamics Observatory, Nature (2010) [Internet], viewed 2021 Mar 11, available from: https://doi.org/10.1038/news.2010.374
- 10. NASA, SDO (Solar Dynamics Observatory) mission (2011) [Internet], viewed 2021 Feb 25, available from: https://sdo.gsfc.nasa.gov/

Author Information

백지혜 jhbaek@kasi.re.kr



충북대학교 천문우주학과에서 석사학위를 받 았으며, 충남대학교 컴퓨터공학과 박사과정을 수료하였다. 2005년부터 한국천문연구원에서 선임연구원으로 재직 중이며, 데이터 파이프라 인 개발 및 데이터 센터 구축 등의 기술 개발을 수행하였다. 최근에는 '국제우주정거장용 태양

코로나그래프(CODEX)'의 지상 시스템 및 지상 소프트웨어 개발을 진행하고 있으며, SDO 데이터를 활용한 딥러닝 연구도 수행하고 있 다. 관심분야는 데이터센터, 데이터정책, 컴퓨터비전, 딥러닝이다.

김수진 sikim@kasi.re.kr



경희대학교에서 2009년 태양물리학 박사학위 를 받았다. 2010년부터 2013년까지 일본국립 천문대 노베야마전파관측소에서 박사후연구원 으로 태양전파물리 연구를 수행하였으며, 현재 한국천문연구원 우주과학본부 책임연구원으로 재직 중이다. 태양 폭발, 코로나 플라즈마 구조,

태양활동주기 등 태양의 다양한 활동을 연구하고, 태양활동으로 인 한 우주환경변화 예측 연구를 진행하고 있다.

최성환 shchoi@kasi.re.kr



경희대학교 우주과학과를 졸업하고, 동대학원 에서 박사학위를 취득하였다. 2004년부터 현 재까지 한국천문연구원 책임연구원으로 재직 중이며, 우주환경 관측기술과 우주환경 빅데이 터 기술에 대한 연구를 수행하고 있다. 2012년 부터 2014년까지는 미국 뉴저지공과대학 빅베

어태양천문대 객원연구원으로 태양망원경의 적응광학 시스템을 개 발하였으며, 현재는 NASA와 공동프로젝트인 국제우주정거장 태양 코로나그래프 개발 시스템 엔지니어로 한국측 기술 총괄을 담당하 고 있다.

심채경 cksim@kasi.re.kr



현 한국천문연구원 선임원구원이며, 민간 달 착륙선 탑재체 서비스(CLPS) 한국 프로젝트 과 학자이다. 경희대학교에서 우주과학 학사(2005), 석사(2008), 우주탐사학 박사(2014)를 취득했다. 한국형 시험용 달 궤도선(KPLO)에 탑재될 광시 야 편광 카메라(PolCam) 등 우주 탐사 임무에

참여하고 있으며, 태양계 천체의 대기, 달과 수성 등 대기가 없는 천 체의 표면 성질과 우주 풍화에 관해 연구한다.

박종엽 parkjy@kasi.re.kr



2013년 경희대학교 우주탐사학과 박사과정 수 료 후, 현재 한국천문연구원 선임연구원으로 재직 중이다. 국제우주정거장용 태양코로나그 래프 개발 사업에서 비행소프트웨어 개발을 담 당하고 있다. 관심분야는 소프트웨어(SW) 엔지 니어링, SW 플랫폼이다.

양태용 yty16@kasi.re.kr



2016년 한국과학기술연합대학원에서 천문우 주과학 박사학위를 받았으며, 현재 한국천문 연구원에서 선임연구원으로 재직 중이다. 천문 연에서 개발 중인 근지구 우주환경 관측 위성 (SNIPE, 도요샛) 개발 프로젝트에 참여하여 지상국 운영을 담당하고 있으며, 위성 및 지상

관측자료를 활용하여 전리권/고층대기를 연구하고 있다.

정민섭 msjeong@kasi.re.kr



2017년 달 과학으로 천문학 박사학위를 받았 다. 2015년부터 지금까지 한국천문연구원에서 선임연구원으로 재직 중이다. 한국형 달 탐사 시험용 달 궤도선 사업에서 광시야 편광 카메 라(PolCam)을 개발했으며, 한미 민간 달 착륙 선 탑재체 공동연구사업으로 미국 항공우주국

의 CLPS 프로그램에 참여해 달 착륙선용 알갱이 카메라(GrainCams) 를 개발 중이다.

최영준 yjchoi@kasi.re.kr



한국천문연구원 우주과학본부 책임연구원으로 재직 중이며, 이스라엘 텔아비브대학에서 카이 퍼 벨트 천체 연구로 박사학위를 받고, NASA PostDoc Fellow로 제트추진연구소에서 근무 했다. 소행성, 혜성, 달 등 태양계 소천체 대한 관측 및 분석연구에 관심이 많으며, 달시험궤

도선의 광시야 편광 카메라(PolCam) 개발과 한미 민간 달착륙선 사 업의 책임자이고, 소행성 아포피스탐사임무를 기획하고 있다.

조영수 stspeak@kasi.re.kr



KAIST에서 2012년 물리학 박사학위를 받았 다. 현재, 한국천문연구원의 우주천문그룹에서 선임연구원으로 재직 중이다. 원자외선 전천 관 측 정보를 기반으로 성간물질 연구분야인 성간 먼지 산란에 의한 몬테카를로 시뮬레이션, 수 소분자 형광방출선, 고온기체, 기계학습법을

이용한 전천지도 작성 연구 등을 수행하였다. 현재 SPHEREx 우주 망원경 개발에 참여하고 있다.

논문

(초)소형위성의 New Space 대응 및 산업화 전략

서인호†, 정현재

국방과학연구소

New Space Response and Industrialization Strategy for Micro & Small Satellites

Inho Seo[†], Hyun-Jae Jeong

Agency for Defense Development, Daejeon 34186, Korea

요 약

본 논문에서는 (초)소형위성의 뉴스페이스 특징 및 대응방안을 소개하고, 국내기술을 활용한 우리나라의 우주산업화 전략을 제시한다. 최근 스타링크를 포함하여 전세계적으로 개발되는 (초)소형위성들은 저비용 및 경량의 군집위성 특징을 가지고 있으므로, COTS(Commercial Off-The-Shelf) 부품 사용 및 위성 중 량, 형상, 대량생산 등을 고려하고 군집운용을 준비해야 한다. 특히 다중위성 운용시 주파수 간섭을 고려하 여 MIMO(Multi Input Multi Output) 기술 개발 및 정부 차원의 주파수 확보를 위한 준비와 노력이 필요하 다. 삼성전자와 SK하이닉스의 상용급 메모리 중에서 내방사선성이 좋은 메모리와 중소기업의 고신뢰성 패 키징 및 우주환경시험 기술을 이용하는 우주급 메모리 분야는 우주산업화 전략으로 가능성이 있다.

Abstract

In this paper, the New Space characteristics and response of micro & small satellite, and space industrialization strategy using domestic technologies are described. Recently, micro & small satellites are developed worldwide, including Starlink, having the characteristics of low-cost, light-weight and satellite constellation. Therefore, it is necessary to prepare for the constellation operation by considering the use of Commercial Off-The-Shelf (COTS) parts, satellite weight, shape and mass production. In particular, it is necessary to develop Multi Input Multi Output (MIMO) technology in consideration of the frequency interference during constellation operation, and to prepare and make efforts to secure frequencies in the government. Among the commercial-grade memories of Samsung Electronics and SK Hynix, the spacegrade memory field using radiation tolerant memory and the high reliable packaging and space environment test technology has potential as a space industrialization strategy.

핵심어:(초)소형위성, 뉴스페이스, 메모리

Keywords: micro & small satellites, new space, memory

1. 서론

'21년 5월 4일 기준 미국 스페이스X의 스타링크 위성은 대략 1,500기가 발사되었으며, 27 년까지 총 42.000기를 이용해서 전세계에 인터넷 서비스를 제공할 계획이다[1]. 영국의 원웹



Received: July 20, 2021 Revised: August 4, 2021 Accepted: August 4, 2021

[†]Corresponding author:

Inho Seo

Tel: +82-42-821-2086 E-mail: inho@add.re.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

Inho Seo https://orcid.org/0000-0003-3623-5138 Hyun-Jae Jeong https://orcid.org/0000-0002-5726-1602 위성도 '21년 7월 1일 기준 254기가 발사되었으며, '22년까지 총 648기를 이용하여 영국에 인터넷 서비스를 제공할 예정이다[2]. 미국의 아마존도 Kuiper 프로젝트를 통해서 3,236기의 위성을 이용한 인터넷 서비스를 계획하고 있으며, 캐나다의 Telesat도 298기의 위성을 이용 해서 위에서 언급한 위성들과 동일한 인터넷 서비스를 계획하고 있다[3-4]. 미국의 플랫닛랩 은 200여기의 지국관측용 큐브위성을 운용하고 있다[5]. 이처럼 최근에 전세계적으로 개발되 는 지구 저궤도 위성들 중에서 (초)소형위성들은 개발기간 및 위성수명이 짧고, 저비용, 다중 위성발사, 대량의 군집위성 특징을 가지고 있다. 따라서, COTS(Commercial Off-The-Shelf) 부품 사용, 위성의 중량 및 형상, 대량생산 등을 고려하고, 군집운용을 준비해야 한다. 특히 다중위성 운용시 주파수 간섭을 고려하여 MIMO(Multi Input Multi Output) 기술 개발이 필 요하며, 정부 차원의 주파수 확보를 위한 준비와 노력이 필요하다.

미국의 스페이스X는 재사용 발사체, 엄청난 숫자의 스타링크 군집위성, 전세계 인터넷 서 비스를 통해서 비즈니스 모델을 확보하였다. 인공위성의 특성상 수명이 다한 위성들을 대신 해서 신규 위성들을 발사해야 하는데, 기존에는 고가의 위성 1기를 개발하고 발사하였다면, 뉴스페이스 시대의 우주에 대한 새로운 비즈니스 모델은 자동차 양산과 비슷한 개념으로 위 성을 계속 제작하고 발사하게 된다. 하지만, 우리나라의 우주분야 기술수준을 고려하면, 단기 간에 미국과 유사한 우주산업화 전략을 수립할 수 없으므로 가격 및 성능에서 글로벌 경쟁력 있는 구성품 또는 부품 확보 전략이 필요하다. 특히, 우리나라가 세계시장 점유율 1위에 있는 메모리 분야는 그 중 하나가 될 수 있다. 기존 삼성전자와 SK하이닉스의 상용급 메모리 중에 서 내방사선성이 좋은 메모리와 고신뢰성 패키징 기술을 이용하면 되므로, 전세계 모든 위성 에 탑재되는 우주급 메모리 분야는 우리나라의 우주산업화 전략 중 하나로 가능성이 있다.

2. 초소형위성의 New Space 특징 및 대응

서론에서 언급한 바와 같이 최근에 전세계적으로 개발되는 지구 저궤도 위성들 중에서 뉴 스페이스 개념의 (초)소형위성들은 다음과 같은 특징들을 가지고 있다. '21년 1월 24일에 발 사된 Falcon-9 발사체에는 Fig. 1에서[1-2,6-8] 보는 바와 같이 무려 143기의 위성들이 탑재 되어 있었다[6]. 이 위성들 중에서 스타링크 위성의 목표 고도는 550 km였으나, 고도 350 km 에서 발사체와 분리되었다[8]. '21년 5월 4일 기준 스타링크 위성이 약 1,500기가 발사되었는 데, 매달 발사되었거나, 한달에 두 번 발사된 경우도 있으므로, 인공위성 양산을 고려해야 한 다[1]. Fig. 1에서 보는 바와 같이 다중위성 발사 고려시 위성의 형상을 고려해야 하며[6], 군집 위성의 특성상 인공위성을 독특한 형상으로 개발하면 탑재 공간의 부족으로 발사 횟수가 증 가하여 발사 비용이 증가한다는 것을 의미한다. 이러한 (초)소형위성의 특징들을 자세히 살펴 보면 다음과 같다.

일반적으로 발사체는 위성과 목표 궤도에서 분리되기 때문에, 저궤도위성에서의 추력 능력 은 상대적으로 중요도가 낮으며, 저비용의 초소형위성 및 큐브위성은 추력 능력이 없는 경우 도 있다. 그러나 Fig. 1의 경우, 위성을 143기나 탑재한 발사체의 중량 제한조건으로 인하여, 스타링크 위성은 350 km에서 분리되어 550 km까지 궤도 기동을 하였으며[8], 다른 위성들도 필요시 목표 궤도까지 기동을 해야 한다.

스타링크 위성들이 한 번에 60기씩 발사되고, 한 달에 두 번씩 발사된 경우까지 고려한다면,

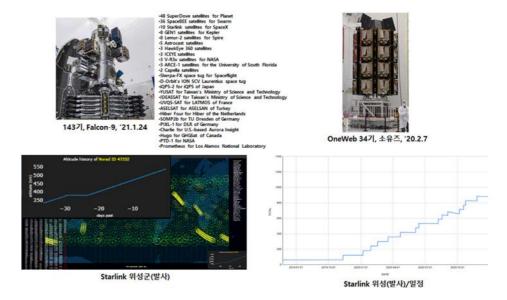


Fig. 1. Characteristics of new space micro & small satellites.

한 달에 120기의 위성을 준비해야 한다[1]. 따라서 위성 1기씩 제작하고 환경시험하는 개념 으로는 일정을 만족할 수 없으므로, 탑재 형상을 고려하여 여러 기의 위성들을 한번에 환경시 험하고 자동화된 기능시험 환경을 구축했을 가능성이 높다.

Fig. 2에서[9-12] 스타링크 위성 60기가 줄지어 날아가는 영상을 보면[9], 주파수 간섭의 영 향으로 지상국에서 위성 1기씩 명령을 주고 받으면서 궤도 기동을 하기보다는 기 프로그밍된 절차에 따라서 스스로 목표 궤도로 기동하고 있을 가능성이 높다.

'21년 1월 1일 기준으로 6,542기의(3,372기 정상동작, 3,170기 동작불능)[14] 인공위성이 저궤도에 있으며, 지금까지 언급한 스타링크, 원웹, Telesat, Kuiper, 플래닛랩 위성들이 모두 저궤도에서 운용된다면, 엄청난 숫자의 위성으로 인하여 위성충돌에 대비해야 하므로 회피기 동을 위한 추력기능은 저궤도위성의 필수기능이다.

지금까지 설명한 (초)소형위성의 특징 및 대응을 Fig. 3에 요약 및 정리하였다[1-14]. (초)소 형위성들은 개발기간 및 위성수명이 짧고 저비용, 다중위성발사, 대량의 군집위성 특징을 가 지고 있다. 따라서, COTS 부품 사용[13], 위성의 중량 및 형상, 대량생산을 고려하고 군집운 용을 준비해야 한다. 또한 궤도조정, 충돌회피를 위한 추력기능과 군집운용이 필수이며, 지금 까지 언급한 기능들이 대량의 군집위성에서 능동적으로 수행하기 위해서는 지상국의 명령에 따라서 수동적으로 동작하기보다는 위성들이 능동적으로 동작하고 대처해야 한다.

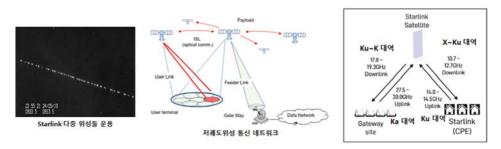


Fig. 2. Low earth orbit satellite communication structure (example).



Fig. 3. Characteristics & response of new space micro & small satellites.

군집운용에 대해서 자세히 살펴보면, 기존 위성 시스템은 위성의 숫자가 많아지면, 주파수 간섭에 의한 위성운용 문제를 해소하기 위해서 다수의 안테나를 설치한다. 하지만, 스타링크 처럼 위성의 숫자가 너무 많은 메가위성군은 다수의 안테나 설치로 위성운용 문제를 해결할 수 없으며, 할당된 주파수를 공유하는 지상국-위성 간 MIMO 기술을 도입하여 주파수 간섭 문제를 해소한다. 스마트폰의 CDMA(코드분할다중접속) 기술과 비슷한 개념으로써, 정부에 서 '31년까지 초소형위성 100기 개발을 발표하였으므로[15] 우리나라도 지금부터 준비할 필 요가 있다. 또한 위성주파수로 활용되는 S대역과 X대역은 이미 포화상태이므로, 정부차원에 서 Ku, K, Ka 대역의 주파수 확보를 위한 준비와 노력이 필요하다.

서론에서 언급한 바와 같이 미국의 스페이스X는 재사용 발사체, 엄청난 숫자의 스타링크 메가위성군, 전세계 인터넷 서비스라는 비즈니스 모델을 확보하였다. Fig. 4와[16-22] 같이 뉴 스페이스 시대의 우주에 대한 새로운 순환형 비즈니스 모델은 자동차 양산과 비슷한 개념으 로 위성을 계속 제작하고 발사하므로, 진정한 의미의 위성 산업화이다.

하지만 우리나라의 우주분야 기술수준을 고려하면 미국과 유사한 우주산업화 전략은 기술 이 뒷받침되어야 하므로, Table 1과 같이 가격 및 성능에서 글로벌 경쟁력 있는 구성품 또는 부품 산업화 전략을 제안한다. 우리나라가 전세계에서 경쟁력 있는 정보통신과 반도체 기술 을 뉴스페이스 위성분야에 투자함으로써 스마트폰 집적화 기술, Ethernet 등 네트워크 통신 기술, EO/IR센서, 배터리/태양전지, 메모리 분야는 우리나라 우주 산업화 전략 중의 하나로 성공 가능성이 있다. 특히, 우리나라가 세계시장 점유율 1위에 있는 메모리 분야는 삼성전자 와 SK하이닉스의 상용급 메모리 중에서 내방사선성이 좋은 메모리와 고신뢰성 패키징 기술 을 이용한다면, 전세계 모든 위성에 탑재되는 우주급 메모리 분야에서 우리나라의 우주산업 화 전략으로 제안할 수 있을 것으로 판단된다.

우주 환경에서 반도체 소자들이 받는 영향을 Fig. 5에 표시하였으며[23-24], 특히 메모리의 영향은 다음과 같다. 지구 주변의 밴앨런벨트와 태양 및 심우주에서 오는 양성자, 중성자, 중 이온 및 알파 입자와 같은 우주방사선은 메모리의 민감한 영역에 고장 또는 단일 이상현상



Fig. 4. New space business model and strategy.

Table 1. Heritage acquisition strategy

ᄀᆸ	헤리티지 비교 단위			
구분 	인공위성/탑재체	구성품/부품		
10년간 우주에서 헤리티지 예측	· 2-3회: 개발기간 3-5년 고려 · (초소형)군집위성 양산시 헤리티지 횟수 증가 · 수출(판매) 기회/실적 경쟁 높음 · 신규 개발 필요 : 요구사항 변경시 양산 불가	· 2-3회: 위성 프로그램 3-5년 고려 · 구성품/부품 중복 사용시 헤리티지 횟수 증가 · 수출(판매)시 헤리티지 회수 대폭 증가 · 수출(판매) 경쟁력 있는 구성품/부품 확보 필요 · 부품 단종 고려		

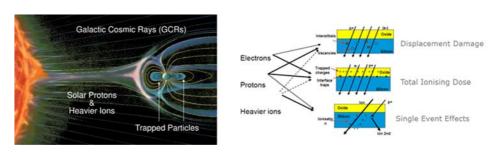


Fig. 5. Memory effects in space radiation environment.

(Single Event Effect, SEE)을 유발하여 시스템 오동작 등의 영향이 있다. 그 이상현상은 크게 세 가지로 분류할 수 있으며, SEU(Single Event Upset)는 메모리 에러를 유발하고, SEL(Single Event Latch-up)은 고전류가 흘러서 고장이 발생하므로 전원을 차단하는 보호회로 구성이 필요하며, TID(Total Ionizing Dose)는 메모리 내부에 이온화를 유발하여 성능 저하 또는 고 장이 발생한다.

국산 메모리가 인공위성에 적용된 사례를 Fig. 6에 나타내었다[25-32]. 우리별3호와 과학위 성1호에는 삼성전자의 SRAM, Flash 메모리, SDRAM이 적용되었으며, 차세대소형위성1호에 는 SK하이닉스의 DDR SDRAM이 적용되었다. 우리별3호와 과학위성1호의 경우, 요구사항과 인터페이스에 맞도록 삼성전자에서 메모리 모듈을 제작하고 시험까지 수행하여 무상으로 제 공하였으며, 차세대소형위성1호는 Fig. 7[33]의 3D-PLUS사와 유사한 형태로 메모리를 적층 하여 위성용 대용량 메모리를 국산화 하였다[30-32]. Fig. 6의 세 가지 사례 모두 상용메모리

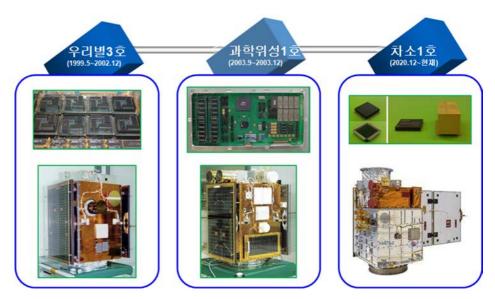


Fig. 6. SAMSUNG and SK Hynix memory heritage in space.

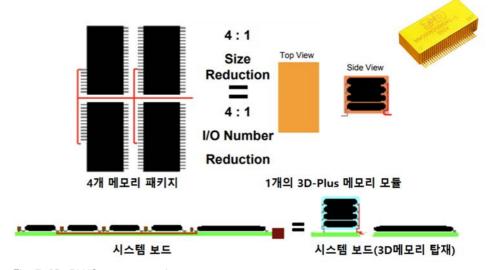


Fig. 7. 3D-PLUS memory packaging.

를 적용하였지만 우주에서의 정상동작을 확인하였으며, 이상현상에 대비하여 EDAC(Error Detection And Correction) 코드를 적용하여 에러를 복구할 수 있도록 하였다[27].

'19년과 '20년 기준 상용 메모리와 우주급 메모리의 매출 규모를 살펴보면, Table 2에서 [34-47] 보는 바와 같이 상용 메모리는 삼성전자와 SK하이닉스가 전세계 매출의 80% 정도를 차지하지만, 우주급 메모리 분야는 국내 매출이 없다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 3D-PLUS사는 내방사선성이 좋은 삼성전자를 포함한 상용메모리를 적층하여 패킹징한 후에 Fig. 8[48-49]의 규격 조건에 맞도록 각종 환경시험을 수행하는 형태로 우주급 메모리를 제작한다.

국내의 경우, 삼성전자에서 우리별3호와 과학위성1호에 메모리를 제공해준 사례와[27-29] 차세대소형위성1호에서 3D-PLUS사와 유사한 형태로 메모리를 적층하여 위성용 대용량메모 리를 국산화하여[30-32] 우주에서 검증한 경험이 있다. 따라서, 삼성전자와 SK하이닉스의 상 용급 메모리 중에서 내방사선성이 좋은 메모리를 대기업에서 중소기업에 제공하고, 기 확보 된 고신뢰성 패키징 기술을 이용한다면, 우주급 메모리 분야는 우주산업화 전략으로 성공 가 능성이 있다고 판단된다.

Table 2. Global commercial and space grade memory sales comparison

	우주급 메모리						당용 메모리	
제조사	3D-	Cobham-	Honeywell-	DDC	Cypress	삼성전자	SK	Micron
게 그 시	PLUS	CAES	Aerospace	(US)	(US)	(국내)	하이닉스	(US)
	(France)	(US)	(US)				(국내)	
다이	상용다이	자체제조	자체제조	상용다이	자체제조	자체제조	자체제조	자체제조
공급				자체제조				
SDRAM	Ο	0		0				
DDR	0			0		0	0	0
MRAM	0	0	0		0	0		
SRAM	Ο	0	0	0	0			
PROM	0	0		0				
Flash	0	0		0		0	0	0
NAND								
Flash	0	0		0	0			0
NOR								
매출	€55M	\$662M	\$11.5B	\$125M	\$2.2B	\$56B	\$25B	\$22B
	@'20	@'19	@'20	@'20	@'19	@'20	@'20	@'20
		(비메모리	(비메모리	(비메모리	(비메모리			
		포함)	포함)	포함)	포함)			

[Screening Test]

[Lot Acceptance Test-Group A,B,C,D,E] Elect Photograph of circu sample Mechanical shock of nina nina 10 100% 101 101 100 100 101 AIL-STD-88 12 Gross leak 13 2000 2007 2007 240h 1550 1614 MIL-STD-88 Fine Leak 21 Gross leak

Fig. 8. Space grade memory verification specification (MIL-PRF-38535, ECSS 9000).

3. 결론

(초)소형위성의 New Space 특징 및 대응방안을 요약하면 개발기간 및 위성수명이 짧고 저 비용, 다중위성발사, 대량의 군집위성 특징을 가지고 있다. 따라서, COTS 부품 사용, 위성의 중량 및 형상, 대량생산을 고려하고, 군집운용을 준비해야 한다. 또한 궤도조정, 충돌회피를 위한 추력기능과 군집운용이 필수이며, 지금까지 언급한 기능들이 대량의 군집위성에서 능동 적으로 수행하기 위해서는 지상국의 명령에 따라서 수동적으로 동작하기보다는, 위성들이 능 동적으로 동작하고 대처해야 한다.

우주산업화 전략에 대해서 글로벌 가격 및 성능에서 경쟁력 있는 구성품 또는 부품 확보 전략이 필요하며, 우리나라가 세계시장 점유율 1위에 있는 메모리 분야는 그중 하나가 될 수 있다. 국산 메모리가 우리별3호, 과학위성1호, 차세대소형위성1호에 적용된 경험을 바탕으 로, 대기업에서 중소기업에 메모리를 제공하고, 기 확보된 고신뢰성 패키징 기술과 환경시 험 기술을 이용한다면, 우주급 메모리 분야는 우주산업화 전략으로 성공 가능성이 있다고 판단된다.

감사의 글

본 논문을 검토해주신 심사위원님들과 편집에 도움을 주신 거목문화사에 감사드립니다.

References

- 1. Wikipedia, Starlink (2009) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://en.wiki pedia.org/wiki/Starlink
- 2. Smart Maritime Network, OneWeb confirms plans for first launch of 34 satellites (2020) [Internet], viewed 2020 Feb 7, available from: https://smartmaritimenetwork.com/2020/ 01/31/oneweb-confirms-plans-for-first-launch-of-34-satellites/

- 3. GeekWire, Amazon to offer broadband access from orbit with 3,236-satellite 'Project Kuiper' constellation (2019) [Internet], viewed 2019 Apr 4, available from: https://www. geekwire.com/2019/amazon-project-kuiper-broadband-satellite/
- 4. Reuters, Canada's Telesat takes on Musk and Bezos in space race to provide fast broadband (2021) [Internet], viewed 2021 Apr 11, available from: https://www.reuters.com/techno logy/canadas-telesat-takes-musk-bezos-space-race-provide-fast-broadband-2021-04-11/
- 5. Planet, Planet to become publicly traded company through merger with DMY IV (2021) [Internet], viewed 2021 Jul 7, available from: https://www.planet.com/pulse/planet-tobecome-publicly-traded-company-through-merger-with-dmy-iv/
- 6. Spaceflight Now, SpaceX smashes record with launch of 143 small satellites (2021) [Internet], 2021 Jan 24, available from: https://spaceflightnow.com/2021/01/24/spacex-launchesrecord-setting-rideshare-mission-with-143-small-satellites/
- 7. Starlink, Satellite group (launch) 1 (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://satellitemap.space/
- 8. Spaceflight Now, SpaceX launches 60 more Starlink spacecraft; FCC clears SpaceX to fly satellites at lower altitudes (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https:// spaceflightnow.com/2021/04/29/spacex-launches-60-more-starlink-spacecraft-fcc-clea rs-spacex-to-fly-satellites-at-lower-altitudes/
- 9. Starlink Multi-satellite operation (2019) [Internet], viewed 2019 May 31, available from: https://phys.org/news/2019-05-spacex-starlink-satellites-harder.html
- 10. Kodheli O, Lagunas E, Maturo N, Sharma SK, Shankar B, et al., Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges, IEEE commun. surv. tutor. 23, 70-109 (2021). https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3028247
- 11. Kim PS, Ryu JG, Byun WJ, Research trends in global wireless communication technology based on the LEO satellite communication network, Electron. Telecommun. Trend. 35, 83-91 (2020). https://doi.org/10.22648/ETRI.2020.J.350507
- 12. Starlink Services, Petition of Starlink Services, LLC for designation as an eligible telecommunications carrier (2021) [Internet], viewed 2021 Jul 10, available from: https:// ecfsapi.fcc.gov/file/1020316268311/Starlink%20Services%20LLC%20Application%20for% 20ETC%20Designation.pdf
- 13. SK Jeong, CS Lee, JU Seo, YS Kim, SW Lee, et al., Study for guidelines of usage of COTS EEE parts for small satellites. Proceeding of the KSAS 2020 Fall Conference, Jeju, 18-20 Nov 2020, 423-424. ksas.or.kr/Publications/sub_05_11.asp
- 14. Geospatialworld, Starlink launched satellites (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from https://www.geospatialworld.net/blogs/how-many-satellites-are-orbitingthe-earth-in-2021/
- 15. Ministry of Science and ICT, Development of 100 ultra-small satellites by industry led by 2031 (2021) [Internet], viewed 2021 Jun 18, available from: https://www.korea.kr/news/ policyNewsView.do?newsId=148888960

- 16. TESLARAT, SpaceX celebrates historic rocket landings with new 4K footage (2020) [Internet] viewed 2020 Apr 13, available from: https://www.teslarati.com/spacex-falconheavy-booster-landing-4k-video/
- 17. Tech Recipe, Crew Dragon, SpaceX Crew Dragon successfully docked at the International Space Station (2020) [Internet], viewed 2020 Jun 2, available from: https://en.techre cipe.co.kr/posts/9888
- 18. THE SUN, Blue origin new shepard vs virgin galactic: How do the two spaceships compare (2021) [Internet], viewed 2021 Jul 20, available from: https://www.the-sun.com/tech/ 3255585/virgin-galactic-vs-blue-origin/
- 19. Teslarati, SpaceX Starship nails 'flip' maneuver in explosive landing video (2020) [Internet], viewed 2020 Dec 9, available from: https://www.teslarati.com/spacex-starship-nearlysticks-landing-high-altitude-debut/
- 20. The Dallas Morning News, Tune in Wednesday when Jeff Bezos' blue origin sends a rocket skyward in prelude to human flight (2021) [Internet], viewed 2021 Apr 13, available from: https://www.dallasnews.com/business/technology/2021/04/13/tune-in-wednesday-whenjeff-bezos-blue-origin-sends-a-rocket-skyward-in-prelude-to-human-flight/
- 21. Airbus, OneWeb Satellites has shipped first satellites for the OneWeb constellation to launch site (2019) [Internet], viewed 2019 Jan 22, available from: https://www.airbus. com/newsroom/press-releases/en/2019/01/oneweb-satellites-has-shipped-first-satellitesfor-the-oneweb-constellation-to-launch-site.html
- 22. CGTN, Chinese space startup successfully launches a reusable rocket to a new height (2019) [Internet], viewed 2019 Aug 10, available from: https://news.cgtn.com/news/2019-08-10/Chinese-startup-successfully-launches-a-reusable-rocket-to-new-height-I2FWXoChxe/index.html?from=timeline&isappinstalled=0
- 23. Endo K, The radiation environment (n.d.) [Internet], available from: https://radhome. gsfc.nasa.gov/radhome/papers/apl 922.pdf
- 24. TRAD, Memory effects in space (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://www.trad.fr/
- 25. STRC, Science and technology satellite, next-generation small satellite (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: http://satrec.kaist.ac.kr/
- 26. Ministry of Science and ICT, After the initial operation of the next-generation small satellite No. 1, the full-scale mission was performed (2019) [Internet], viewed 2019 Apr 17, available from: https://m.blog.naver.com/htiger31/221515999525
- 27. IH Seo, JJ Lee, HY Park, DS Oh, MJ Choi, et al., Proto flight model design and implementation of mass memory unit for STSAT-2, J Korean Soc. Aeron. Space, 36, 195-201 (2008) http://ksas.or.kr/Publications/sub_05_11.asp
- 28. Maeil Business Newspaper, Development of semiconductor memory device for satellite...Samsung Electronics (1997) [Internet], viewed 2021 Jul 11, available from: https:// www.mk.co.kr/news/home/view/1997/08/47939/

- 29. Maeil Business Newspaper, Samsung electronics donates memory modules to science satellite (2001) [Internet], viewed 2021 Jul 11, available from: https://www.mk.co.kr/ news/home/view/2001/04/76999/
- 30. Lim JS, Kim JH, Kim HJ, Jung KW, Lee H, et al., 3D SDRAM package technology for a satellite, J. Microelectron. Packag. Soc. 19, 25-32 (2012). http://dx.doi.org/10.6117/ kmeps.2012.19.1.025
- 31. Park MY, Chae JS, Lee C, Gu BJ, Lee JS, et al., Development of 3-dimensional stacked mass memory module for space applications, Proceeding of the KSAS 2016 Fall Conference, Jeju, 16-18 Nov 2016, 1120-1121.
- 32. Park MY, Chae JS, Cho HG, Ryu KS, Conceptual design of space qualified high density SDRAM module, Proceeding of the KSAS 2010 Fall Conference, Pyeongchang, 15-16 Apr 2010, 529-534.
- 33. 3D-PLUS, 3D PLUS Memory Products Overview (2004) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://escies.org/download/webDocumentFile?id=1887
- 34. 3D-PLUS, Space Memory (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https:// www.3d-plus.com/
- 35. Cobham, Radiation hardened solutions and high reliability components (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://caes.com/products/radiation-hardenedsolutions-high-reliability-components
- 36. Honeywell-Aerospace, Microelectronics (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://aerospace.honevwell.com/us/en/learn/products/microelectronics
- 37. DDC, Simplify 1553 Design with the fastest SPI controller! (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://www.ddc-web.com/en
- 38. Cypress, Radiation hardened & high reliability memories (n.d.) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://www.cypress.com/products/radiation-hardened-memory
- 39. Samsung Electronics, Product portfolio (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://www.samsung.com/semiconductor/
- 40. SK Hynix, Product portfolio (2020) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https:// product.skhynix.com/home.go
- 41. Micron, Unleash the full potential of 5G and artificial intelligence (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://www.micron.com/
- 42. Compass, 3D-PLUS (2020) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://kr.kom pass.com/c/3d-plus/fr0084865/
- 43. Craft, CAES (2019) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://craft.co/cob ham-advanced-electronic-solutions
- 44. Statista, Honeywell's net sales from FY 2018 to FY 2020, by segment (in million U.S. dollars) (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://www.statista.com/statistics/ 593428/net-sales-of-honeywell-by-segment/
- 45. Dun & Bradstreet, Data device corporation (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available

- from: https://www.dnb.com/business-directory/company-profiles.data_device_corpora tion. e6931bd5dece450c4f1110f88307fd2b.html
- 46. Statista, Cypress revenue of cypress semiconductor corporation worldwide from 2015 to 2019 (in million U.S. dollars) (2020) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://www.statista.com/statistics/1103507/cypress-semiconductor-corporation-world wide-revenue/
- 47. TechWorld, Samsung Electronics 3 memory semiconductor looking back in graph (2020) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: http://www.epnc.co.kr/news/articleView. html?idxno=110960
- 48. Defense Supply Center Columbus, Performance specification: integrated circuits (microcircuits) manufacturing, general specification for (2002) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: https://nepp.nasa.gov/DocUploads/591D8C5B-C750-4462-B37E007D5 78B121D/MIL-PRF-38535.pdf
- 49. ESCC, ESCC Generic Specification No. 9000 (2021) [Internet], viewed 2021 Feb 20, available from: http://escies.org/escc-specs/published/9000.pdf

Author Information

서인호 inho@add.re.kr



한국과학기술원 항공우주공학과에서 2008년 에 박사학위를 받았다. 한국과학기술원 인공위 성연구소에서 과학기술위성1호부터 3호까지 개 발에 참여하였으며, 삼성전자 생산기술연구소 에서 반도체 메모리 검사장비를 개발하였다. 현재는 국방과학연구소 국방위성체계단에서 체

계종합 업무를 수행하고 있다.

정현재 nowholic@add.re.kr



전북대학교 기계공학과에서 2019년에 석사학 위를 취득한 후, 2019년부터 지금까지 국방과 학연구소 국방위성체계단에서 위성 체계종합 업무를 수행하고 있다.

기술동향



Received: August 11, 2021 Revised: August 18, 2021 Accepted: August 18, 2021

[†]Corresponding author:

Kangjin Lee

Tel: +82-42-716-0286 E-mail: kjlee@soletop.co.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

Kangjin Lee https://orcid.org/0000-0001-8969-9169 Seong-Gyeong Jeon https://orcid.org/0000-0002-2783-9936 Seok-Yong Seong https://orcid.org/0000-0001-6827-2107 Ki-mook Kang https://orcid.org/0000-0003-4970-4597

SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상 분석도구 개발기술 동향

이강진1+, 전성경1, 성석용1, 강기묵2

1(주)솔탑

²K-water연구원

Technology Trend in Synthetic Aperture Radar (SAR) **Imagery Analysis Tools**

Kangjin Lee^{1†}, Seong-Gyeong Jeon¹, Seok-Yong Seong¹, Ki-mook Kang²

¹SOLETOP, Co., Ltd., Daejeon 34051, Korea

²K-water Research Institute, Water Resources Satellite Research Center, Daejeon 34045, Korea

요 약

합성 개구 레이다(SAR, synthetic aperture radar)는 주야간 및 기상 조건에 구애받지 않고 원하는 지점을 관측할 수 있다는 장점으로 인해 최근 그 수요가 점점 늘어나고 있다. SAR 위성으로 관측한 원시 데이터 는 위성궤도보정, 방사보정, multi-looking, geocoding과 같은 전처리 과정이 필요하며, 사용자의 목적에 따라 물체 탐지, 변화탐지, DEM(Digital Elevation Model) 등 영상 활용을 하기 위해서는 추가적인 처리 과 정이 요구된다. 이러한 전처리와 연산과정은 매우 복잡하며 많은 시간과 컴퓨팅 자원을 필요로 한다. 주로 SAR 영상을 활용하는 기관에서는 영상을 편리하고 쉽게 처리하기 위해 각 기관의 활용 목적에 맞는 분석 도구를 개발하여 사용 및 외부 수요자들에게 제공하고 있다. 본 논문에서는 국내외에서 이용하고 있는 대 표적인 SAR 분석도구들의 기능 및 특성에 대해 소개하고자 한다.

Abstract

Recently, the synthetic aperture radar (SAR) has been increasingly in demand due to its advantage of being able to observe desired points regardless of time and weather. To utilize SAR data, first of all, many preprocessing such as satellite orbit correction, radiometric calibration, multi-looking, and geocoding are required. For analysis of SAR imagery such as object detection, change detection, and DEM(Digital Elevation Model), additional processings are needed. These pre-processing and additional processes are very complex and require a lot of time and computational resources. In order to handle the SAR images easily, the institutions that use SAR images develop analysis tools and provide users. This paper introduces the function and characteristics of representative SAR imagery analysis tools.

핵심어: SAR(synthetic aperture radar) 영상 분석, SAR 영상 활용, SAR 영상 분석도구 **Keywords**: SAR (synthetic aperture radar) imagery analysis, SAR imagery utilization, SAR imagery analysis tools

1. 서론

합성 개구 레이다(synthetic aperture radar, SAR)는 능동(active) 센서로 위성 또는 비행체 에서 지상과 해양으로 마이크로파를 순차적으로 쏘아 굴곡면에서 반사되어 돌아오는 미세한 시간차를 처리하여 지형도를 만들거나 지표를 관측하는 레이다 시스템이다. 마이크로파 주파 수대를 사용하기 때문에 수동(passive) 방식인 광학(optical) 센서의 가시/적외선 파장대와는 달리 주야간 및 기상 조건에 영향을 받지 않아 전천후 관측이 가능하다.

SAR의 개발은 군용 정찰장비로 개발되기 시작했으며, 점차 민간 분야로 영역을 넓혀가는 중이다. SAR는 관측하는 위치에 따라 센서를 비행 물체에 탑재하여 대기 중에서 지표면을 관 측하는 방식, 위성에 탑재하여 우주에서 지구를 관측하는 방식, 지상에 센서를 설치하여 관측 하는 방식으로 구분된다. Table 1은 2010년 이후 발사된 SAR 위성의 동향을 보여준다. 특별

Table 1. List of SAR satellites launched since 2010

Satellite	Country	Launch	Lifetime	Wave- length	Purpose
RISAT-1	India	2012	≥ 5 years	С	Land observation
KOMPSAT-5	South Korea	2013	≥ 7 years	X	Land observation
ALOS-2	Japan	2014	≥ 7 years	L	Land observation
Sentinel-1	Europe	2014	≥ 7 years	С	All-weather ocean and land high resolution multi-purpose observation
SAOCOM	Argentina	2018	≥ 5 years	L	Hydrology and land observation
RCM	Canada	2019	≥ 7 years	С	Multi-purpose SAR observation, expecially for ice
NISAR	USA / India	2023 planned	≥ 3 years	L/S	High-resolution all-weather imagery of ocean and land, especially suited for soil moisture
BIOMASS	Europe	2023 planned	≥ 5 years	Р	To quantify the forest biomass, the extend of forest and deforested areas and the delimitation of flooded forests
TanDEM-L	Germany	2023	≥ 5 years	L	All-weather land observation, in- cluding surveillance and emergency management
Capella	USA	2018	≥ 3 years	X	All-weather high-resolution land observation; sea-ice
ICEYE	Finland	2018	≥ 2 years	X	All-weather high-resolution land observation; sea-ice

SAR, synthetic aperture radar.

히 주목할 만한 점은 최근 초소형 SAR 위성의 개발이 증가하고 있다는 것이다. 초소형 SAR 위성은 대부분 군집 형태로 운영이 되는데, 초소형 군집위성은 상대적으로 높은 시공간 해상 도를 갖고 있어 물체의 식별이나 모니터링에 유용하다는 장점이 있다. 반면에 촬영범위가 상 대적으로 좁기 때문에 이동하는 물체의 경로 추적이나 넓은 범위에서 발생하는 변화는 분석 하기 어렵다는 단점도 있다[1]. 현재 개발 중인 대표적인 초소형 SAR 위성으로는 ICEYE와 Capella 위성이 있다. ICEYE는 18개의 군집위성으로 구성되며, 선박탐지를 주 목적으로 한 다[1,2]. Capella 위성은 36개의 군집위성으로 구성되며, 1시간 단위의 짧은 재방문시간을 이 용하여 변화탐지를 주 목적으로 한다[2,3].

SAR 위성의 경우, 해상도를 향상시키기 위해 저고도의 극궤도 위성이 대부분이며, 그에 따 라 위성이 이동하면서 관측하고자 하는 목표 지점을 촬영하는 방식을 따르게 된다. 위성의 자 세와 관측 모드 등 여러 상황에 따라 관측되는 영상의 상태가 제각각이기 때문에 일반적으로 사용자에게 익숙한 ground range와 진북 방향으로 고정된 정사영상으로 변환해주는 작업이 필요하다. 또한 지형을 반영하기 위한 보정 작업, 위상 정보의 적용 유무 등에 따라 결과 영 상은 달라지게 된다. 하지만 위성궤도보정, 방사보정, multi-looking, geocoding과 같은 전처 리 작업은 일반 사용자들에게는 굉장히 어려운 작업이고, 각 단계별 결과를 해석하는 방법도 전문적인 지식을 토대로 오랜 경험과 노하우가 바탕이 되어야 한다. 이에 따라 전세계의 SAR 영상을 활용하는 기관에서는 SAR 영상을 손쉽게 처리하고 분석할 수 있는 분석 도구를 개발 하여 이용하고 있다.

본 논문에서는 국내외 대표적인 SAR 영상 분석도구들의 개발 현황 및 활용 범위 등에 대해 살펴보고자 한다. SAR 영상에 대한 수요가 증가하고 있지만, 현재까지 국내에서 개발하여 사 용 가능한 SAR 위성은 다목적실용위성 5호(아리랑 5호)가 유일하다. 향후 국내에서도 차세대 중형위성 5호(수자원위성)와 같은 중형급(500 kg급) 위성뿐만 아니라, 초소형 위성에도 SAR 센서를 탑재할 것으로 예상된다. 앞으로 국내에도 SAR 영상의 공급이 더욱 활발하게 이루어 짐에 따라 빠른 시간 안에 보다 효율적인 영상 활용을 위해 자체 기술을 통한 영상분석도구 의 개발도 병행되어야 할 것이다. 본 논문을 통해 향후 국내 SAR 위성 영상 분석도구를 개발 하는 데 있어 여러 대표적인 SAR 영상분석도구의 주요 기능 및 특징을 파악하는 데 도움이 되길 기대한다.

2. SAR 분석 도구의 필요성

일반적으로 SAR 영상은 위성으로부터 관측한 원시 데이터(raw data)를 지상국에서 수신하 고 전처리 과정을 거쳐 SLC(Single Look Complex) 혹은 GRD(Ground Range Detected) 데 이터와 같은 Level 1 영상으로 일반 사용자에게 제공된다. 사용자는 제공된 Level 1 데이터를 이용하여 각자의 활용 목적에 맞게 추가적인 처리 과정을 수행한다. SAR 영상을 분석하고 응 용하는 것에 있어서 가장 많이 쓰는 것은 SAR 영상에서 후방산란계수를 도출하여 그 값을 이용하는 것이다. 후방산란계수 값은 물체의 반사도에 따라 다른 값을 갖기 때문에 금속 탐지, 선박 탐지 및 분류 등 물체를 탐지하는 분야에서 많이 쓰인다. 뿐만 아니라 홍수 피해 탐지, 해양 기름 유출 측정 등 재난/재해 모니터링에도 쓰이고 있다.

후방산란계수를 도출하는 과정은 각 위성마다 SAR 영상을 측정하는 방법 및 관측모드 등 에 따라 조금씩 다르지만 기본적으로 위성궤도보정, 방사보정, multi-looking, geocoding의

과정을 거친다. 위성 궤도 보정(satellite orbit correction)은 SAR 영상을 찍은 위성의 궤도 정보를 정확한 값으로 보정하여 위성의 위치에 따른 상대적인 SAR 데이터의 오차를 줄이는 작업이다. 방사보정(radiometric calibration)은 SAR 영상의 픽셀값이 후방산란계수값을 나 타낼 수 있도록 보정해주는 작업이다. 기본적으로 Level 1 SAR 영상은 방사 보정이 되어 있 지 않아 방사적 편향이 심한데, 방사 보정은 이러한 편향을 보정하고 정확한 후방산란계수 값을 구하기 위해 필수적인 과정이다. 또한 다른 프로세스로 처리된 SAR 영상과 비교하려면 보정 후 영상을 비교해야 정확한 비교를 할 수 있다. 단일로 관측한 SAR 영상은 Speckle Noise가 심하여 그로부터 산출한 후방산란계수는 오차가 크다. 이를 보정하기 위하여 SAR 영상을 다중으로 사용하여 평균을 취해 잡음을 제거하는 방식으로 보정을 하는데, 이를 multi-looking이라 한다. Multi-looking의 경우, 해상도는 떨어지는 효과가 있지만 필터링 (speckle filtering)과 달리 후방산란계수의 값이 유지되는 경우가 많다. 반대로 필터링의 경우, 해상도는 유지하지만 후방산란계수의 값의 정확도가 달라진다. SAR 영상 분석에서는 해상도 보다 후방산란계수의 정확성을 더 요구하기 때문에 대부분 multi-looking의 방식을 선호한 다. 지오코딩(geocoding)은 변환된 후방산란계수값을 보정하기 위하여 지상의 관측정보를 활 용하여 후방산란계수값을 업데이트 하는 식으로 그 값을 보정하는 작업이다. 이와 같이 SAR 영상을 활용하기 위해서 여러 전처리 과정을 거친 후에 사용자가 확인할 수 있는 후방산란계 수 값이 도출된다. 앞선 내용과 같이 SAR 영상의 활용을 위해서 행해야 하는 전처리가 상당 히 많고, 각 과정에서도 SAR 영상의 상태에 따라 세부적으로 나뉘어서 처리해야 하는 복잡함 과 어려움이 있다. 뿐만 아니라 전처리 과정은 긴 시간과 많은 자원을 필요로 한다. 이러한 전문성을 요구하는 과정들은 진입장벽이 높기 때문에 SAR 영상을 활용하기 원하는 사용자 측면에서 SAR 영상 분석 및 활용에 큰 부담을 가지게 된다. 많은 기관에서 이런 단점들을 보 완하고. SAR 영상처리 과정을 단순화하기 위해 분석도구를 개발 및 배포하고 있으며, 사용자 친화적인 UI 형태로 개발함으로써 편리하게 작업할 수 있도록 하여 SAR 영상의 활용을 촉진 하고 있다.

3. 국내외 SAR 영상 분석 도구 및 활용 현황

SAR 영상 분석도구는 다양한 방식으로 제공되는데, 일반적으로 목적에 맞는 분석도구를 개발하여 설치 프로그램을 제공한다. 사용자는 각자 PC에 분석도구를 설치한 후 SAR 영상을 수집하여 분석하게 되는데, 이는 PC 성능에 따라 처리 속도가 차이가 난다는 단점이 있다. 또 다른 방법으로 클라우드 서비스를 이용한 플랫폼 제공이 있다. 클라우드 서비스 플랫폼은 기본적으로 사용자 개인의 PC 환경에 구애받지 않고 데이터 수집 절차도 필요하지 않다는 장점이 있으나, 여전히 대용량의 SAR 영상을 이용한 많은 전처리 과정을 거쳐야 하는 어려움 이 존재한다. 현재까지 클라우드 플랫폼은 아직 많이 사용되고 있진 않지만, 각 분야에서 클 라우드 서비스가 활성화됨에 따라 SAR 분석도구 또한 클라우드 플랫폼으로 많이 개발되고 있다. 클라우드 서비스를 이용한 대표적인 분석도구로 HyP3(Hybrid Pluggable Processing Pipeline)와 Capella가 있다.

본 장에서는 국내외 SAR 영상 처리 및 분석을 위해 개발된 분석 도구 중 주로 이용되고 있 는 6개의 분석 도구에 대해 소개하고자 한다. Table 2는 각 도구에 대한 일반적인 특성을 요 약하여 정리하였으며, 각각의 도구에 대한 상세한 설명은 별도로 기술한다.

Table 2. The characteristics of 6 SAR imagery analysis tools

Name	Company	Country	Utilization	Access
НуР3	ASF/DAAC	USA	Radiometric terrain correctionInterferometric SARChange detection	A limited amount of processing for a user per month
GAMMA	GAMMA	Switzer- land	DEMDisplacement mapsLand use maps	Commercial
SNAP S1TBX	ESA	Europe	 Calibration Speckle filtering Co-registration Orthorectification Mosaicking Data conversion Polarimetry Interferometry 	Free
ENVI SARscape	L3Harris	USA	 Flood mapping Dem extraction Change detection Displacement map Ship detection Persistent scatters Image geocoding 	Commercial
ISCE	JPL, Stanford Univ.	USA	EarthquakesVolcanismMountain buildingMicro-plate tectonics	Members only
PG- STEAMER	Pixoneer	South Korea	Land cover mapDisaster analysisTerrain information	Application dependent; Free for non-profit

SAR, synthetic aperture radar; ASF, Alaska Satellite Facility; DAAC, Distributed Active Archive Center; HyP3, Hybrid Pluggable Processing Pipeline; DEM, Digital Elevation Model; SNAP, SeNtinel's Application Platform; S1TBX, Sentinel-1 ToolBoX, ENVI, Environment for Visualizing Images; ISCE, InSAR Scientific Computing Environment; JPL, Jet Propulsion Laboratory; PG-STEAMER, Pixoneer Geomatics Software Tools for Exploitation And Management of Earth Resources.

3.1 ENVI (Environment for Visualizing Images)

ENVI(Environment for Visualizing Images)는 L3Harris에서 자료 처리 및 분석 플랫폼으 로 위성 영상을 처리하고 분석하는 목적으로 개발하였다. ENVI는 각종 기본 기능 및 add-on 모듈을 통해 기타 영상 및 레이다, 라이다 등의 데이터 처리도 지원하며, 사용자가 최선의 결 정을 내리는 데 필요한 정확한 정보를 제공한다. 이미지 분석가, GIS 전문가 및 과학자가 지 리 공간 이미지에서 신뢰할 수 있는 정확한 정보를 추출하는 데 사용된다. 멀티 스펙트럼, 하 이퍼 스펙트럼, 열, LiDAR 및 SAR를 포함한 모든 유형의 데이터를 지원하며, 별도의 프로그 래밍이 필요 없이 직관적인 도구와 워크 플로우를 통해 사용자들이 딥러닝에 액세스할 수 있 다는 장점이 있다.

ENVI의 SARscape는 SAR 영상 분석을 위한 SARscape analytics toolbox 모듈을 지원한 다. SARscape analytics toolbox는 홍수탐지, 선박탐지, 변화탐지 등 SAR 영상을 활용한 12 가지 응용 및 분석법을 하나의 GUI로 처리할 수 있도록 만들어진 모듈이다(Fig. 1). 일반적인 SAR 영상 처리는 많은 세부적 조정과 처리 순서가 중요하지만, 이 모듈을 통하여 사용자는 복 잡한 처리과정을 직접 구성하지 않고, 손쉽게 목적에 맞는 처리과정을 진행할 수 있다. 또한 몇 가지 옵션을 변경하여 추가적인 목표에 따른 처리를 수행할 수 있다[4]. ENVI는 Windows 또 는 Linux 운영 체제 기반이며, 최소사양으로 8 GB 이상의 RAM과 4코어 이상의 CPU를 권 장한다.

3.2 GAMMA

GAMMA가 개발하고 관리하는 상용 소프트웨어로 SAR 데이터에서 DEM(Digital Elevation Model), 변위 맵 및 토지 이용 맵과 같은 최종 산출물을 산출할 수 있는 전체 처리 프로세스 를 지원한다. 특별히 Fig. 2와 같이 SAR 영상의 interferometric 프로세싱 목적으로 개발되어 여러 모듈이 포함되어 있으며, 각 모듈은 구조화된 코드로 구성되어 있다. 프로그램은 커맨드 라인 상에서 개별적으로 실행될 수 있으며 스크립트를 통해 자동화하여 효율적으로 처리할 수 도 있다. GAMMA에서 적용 가능한 위성 데이터로는 AR ERS-1/2, JERS-1, SIR-C/X-SAR, RADARSAT-1/2, ENVISAT ASAR, ALOS PALSAR, TerraSAR-X, Cosmo-SkyMed 등이 있으 며, 위성영상을 활용하기 위한 주요 기능은 Table 3과 같다[5,6]. GAMMA는 UNIX 운영 체 제 기반이며, PC/LINUX 및 PC/NT와 함께 워크스테이션에서 실행 가능하다.

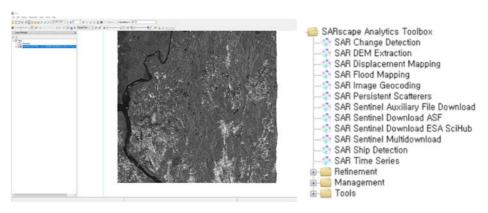


Fig. 1. Analysis of SAR imagery observed by Sentinel-1. The ENVI SARscapce allows users to easily display, monitor and automatically extract information from SAR data. SAR, synthetic aperture radar; ENVI, environment for visualizing images.

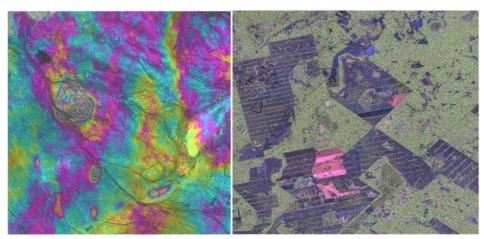


Fig. 2. Results of SAR processing using GAMMA. Sentinel-1 interferogram over oil fields in Yibal, Oman (left) and SAOCOM-1A Pauli decomposition of TOPS(Terrain Observation with Progressive Scans) acquisition over Formosa province, Argentina (right). SAR, synthetic aperture radar.

Table 3. The key features of GAMMA

Function	Description
Modular SAR Processor	· Range compression with optional azimuth prefiltering
(MSP)	· Autofocus
	· Azimuth compression
	· Multi-look post processing
Interferometric SAR	· Precision registration of interferometric image pairs
Processor (ISP)	· Adaptive filtering of interferograms
	· Phase unwrapping
	· Generation of topographic height
Differential Interferometry	· Differential interferometric processing
and Geocoding Software	· Required for 2-pass differential interferometry
(DIFF & GEO)	
Interferometric Point	· Surface deformation histories, terrain heights, and relative
Target Analysis (IPTA)	atmospheric path delays
	· Optimal match to the observed interferometric phases
Land Application Tools	· Filtering
(LAT)	· Classification
	· Visualization
	· Mosaicking
Geocoding and Image	· Generate multi-look intensity image (MLI) in slant range geometry
Registration Software	· Co-register multiple images in slant range geometry
(GEO)	· Display and raster file generation tools
Display Tools (DISP)	· Single look complex and detected multi-look intensity SAR images
	· Interferograms, unwrapped phase, and interferometric correlation
	· Display and editing of phase unwrapping flag files

SAR, synthetic aperture radar.

3.3 HyP3 (Hybrid Pluggable Processing Pipeline)

(Distributed Active Archive Center)에서 만든 오픈소스 툴로 사용자 맞춤형 SAR 프로세싱 을 제공한다. HvP3는 최대 월 단위 처리 서비스를 제공하며, 현재 베타 상태로 접근이 제한 되어 있다. HvP3는 ASF의 데이터 검색 도구인 Vertex에 통합되어 있어 사용자가 지구상의 관심 영역을 쉽게 선택할 수 있으며, 사용 가능한 SAR 영상을 찾아 방사선 측정 지형 보정 (RTC), 간섭계 SAR(InSAR), 변화 탐지 처리를 수행한다(Fig. 3). 빠른 결과 생성을 위해 각각 의 처리는 AWS 클라우드 컴퓨팅을 활용하여 병렬로 수행되며, 처리과정에서 사용자가 최종 산출물을 정의할 수 있는 옵션을 제공한다. 또한 Vertex UI 외에도 프로그램 액세스와 HyP3 를 사용자 워크플로우에 구축할 수 있는 RESTful API 및 Python 소프트웨어 개발자 키트 (SDK)를 제공한다. HyP3는 SAR 처리에 대한 많은 지식을 가지고 있지 않아도 사용자가 이 용함에 있어서 입력 데이터와 옵션만 설정하면 쉽게 처리된다는 장점이 있다. 일본 PALSAR RTC의 co-registered 세트와 같은 UTM 좌표계로 투영된 co-registrated 이미지셋은 모두 분석 가능하며, ASF DAAC에 의해 보관 및 배포된다[7,8].

3.4 ISCE (InSAR Scientific Computing Environment)

ISCE(InSAR Scientific Computing Environment)는 객체 지향 언어를 기반으로 NASA의 JPL(Jet Propulsion Laboratory)과 스탠포드 대학교가 협업하여 개발하였다. 사용자의 편의성, 효율성, 유연성, 확장성을 고려하여 SAR Processing 환경을 구축하였으며, 입력 데이터 형식 은 GDAL(The Geospatial Data Abstraction Library) format뿐 아니라 TIFF, GeoTIFF, ENVI,

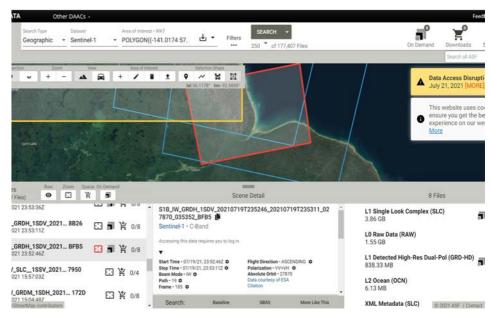


Fig. 3. On demand processing in Vertex which is ASF's data search portal. Vertex is the easiest way to use Hyp3 and provides a friendly interface. ASF, Alaska Satellite Facility; HyP3, Hybrid Pluggable Processing Pipeline.

NetCDF, HDF5 등을 지원한다. 프레임 워크는 파이썬 기반이며, 소스코드는 처리 엔진을 통 해 입출력 동작을 분리하여 구성된다. 이를 통해 입력 데이터에 대한 유연성과 확장성이 향 상되며, 새로운 데이터 형식 및 센서를 사용할 때 소스의 수정이 필요한 상황에서 프로그램 에 미치는 영향이 적다는 장점이 있다. ISCE에서는 ALOS, ERS, ENVISAT, Cosmo-SkyMed, RadarSAT-1, RadarSAT-2 및 TerraSAR-X 등의 위성 데이터를 처리할 수 있으며, Fig. 4와 같이 주로 InSAR 분석을 수행한다. ISCE는 최근 Sentinel-1A SAR 데이터(stripmap 및 TOPS(Terrain Observation with Progressive Scans) 모드)를 처리하기 위한 구성 요소와 TOPS 모드 데이터를 처리하기 위한 새로운 워크플로우가 개발되어 추가되었다. ISCE는 리눅 스, 유닉스, MacOS 등 다양한 운영체제를 기반으로 동작한다[9].

3.5 PG-STEAMER(Pixoneer Geomatics Software Tools for Exploitation And Management of Earth Resources)

PG STEAMER(Pixoneer Geomatics Software Tools for Exploitation And Management of Earth Resources)는 국내 기업인 픽소니어에서 개발한 원격탐사 자료에 대한 처리, 분석, 가공 및 출력을 위한 전문적이고 통합적인 소프트웨어 솔루션으로 별도의 모듈이 없는 하나 의 통합 패키지로 구성되어 있다. 다양한 종류의 위성 영상자료, 벡터자료를 읽어 들일 수 있

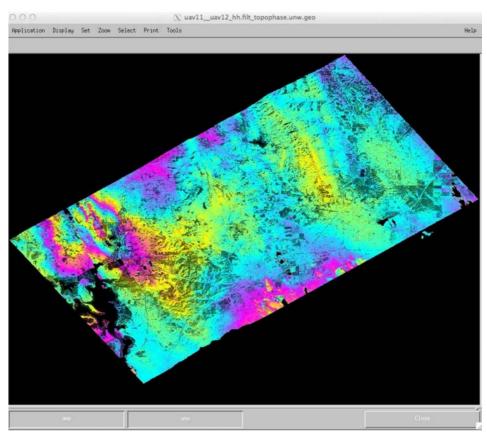


Fig. 4. Visualizing the output products of an UAVSAR interferogram on August 24, 2014. The strong fringe caused by the South Napa earthquake is shown in ISCE. ISCE, InSAR Scientific Computing Environment. UAVSAR, Uninhabited Aerial Vehicle Synthetic Aperture Radar.

으며, 주요 기능으로 위성영상으로부터 정보를 추출하기 위한 기하보정, 정사보정, 모자이크, 분류 등의 각종 영상처리 및 분석기능, DEM 생성, 3차원 영상분석, 위성영상 지도 제작, GIS 기능 등을 제공한다. 테라바이트(TB) 이상의 대용량 위성영상 데이터를 실시간으로 육안 분 석할 수 있고, 또한 PG-STEAMER 4.0 버전부터 실시간 프로세싱(RTP, real time processing) 이 가능하다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 아이콘 기반의 사용자 인터페이스로 사용자가 메뉴를 선택하는 데 있어 매우 직관적이며, 또한 RTP 기법을 적용하여 초보자도 쉽게 사용을 할 수 있도록 구현되었다. PG-STEAMER의 주요 상세 기능은 Table 4와 같다[10].

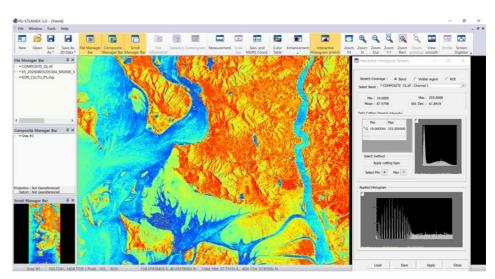


Fig. 5. Image processing of a sample SAR imagery observed by KOMPSAT-5. PG-STEAMER has robust image processing tools that are easy to use interface and functionality. SAR, synthetic aperture radar. PG-STEAMER, Pixoneer Geomatics Software Tools for Exploitation And Management of Earth Resources.

Table 4. The key features of PG-STEAMER

	December to a		
Function	Description		
Catalog	· View metadata from raster (xdm, jpeg, bmp, tiff, MrSID,		
	JPEG2000) and Vector (xvc, dxf, shp, dgn, xyz)		
	· Preview data file (raster, vector)		
	· Export to HTML file from metadata		
Image Composer/Analyzer	· Open multiple datasets in multiple coordinate system		
	· Auto-warping and mosaic with raster and vector bands		
	· Statistics (histogram, scattergram)		
	· Vector file overlay		
Vector Composer	· Support DXF, DGN, SHP, and XVC file		
	· Coordinate conversion from vector file		
	· Interactive histogram stretch		

Table 4. Continued

Function	Description
3D Composer	· Interactive 3D view
	· Path analysis
	· Line of sight analysis
Map Composer	· Auto gridding for map image
	· Vector overlay on map image
	· Tile printing for big workspace
Tools & Utilities	· Mosaic images
	· Convert map projection
	· Coordinate conversion
	· Image local warping
Image Processing	· Geometric correction
	· Auto GCP(ground control point) matching
	· Orthorectification GCPs & RPC
	· Spatial filtering
DEM Tools	· Stereo DEM generation/upgrade
	· DEM generation from vector generation
	· DEM from XYZ
	· DEM interpolation

3.6 SNAP S1TBX (SeNtinel's Application Platform Sentinel-1 ToolBoX)

SNAP(SeNtinel's Application Platform)은 ESA가 개발한 공개 소프트웨어로서 SAR와 광 학위성을 포함한 Sentinel 위성 시리즈에서 얻은 자료를 처리하는 여러 개의 Toolbox로 이 루어져 있다. S1TBX(Sentinel-1 ToolBoX)는 주로 Sentinel-1A/B 영상과 간섭기법을 처리 하기 위한 프로그램으로 대중적으로 쓰이고 있는 SAR 분석 도구 중 하나이다. SAR 영상처리 에 필요한 calibration, speckle filtering, coregistration, orthorectification, mosaicking, data conversion, polarimetry, interferometry 등 대부분의 처리과정을 진행할 수 있으며, 자체적으로 그래프, 통계, 도수분포와 같은 분석과 지도/비지도 분류도 제공하고 있다. Fig. 6 은 Sentinel-1 위성영상을 이용한 전처리 프로세싱의 모습을 보여준다. 한편, SNAP은 단순한 SAR 영상처리 외에도 Graph Builder와 같은 흐름도 방식의 자료처리 기법을 제공한다. Graph Builder는 사용자의 목적에 맞도록 기본 처리과정을 구성하고, 사용자의 요구에 따라 별도의 처리 또한 손쉽게 추가하여 분석할 수 있다. 또한 DEM 자동다운로드 및 모자이크 등 을 포함한 편리한 기능을 탑재했다. 그 밖에도 SNAP을 통해 처리한 SAR 영상을 타 분석 도 구나 위성자료의 파일형식으로 변경하여 내보낼 수 있다. 이처럼 SNAP은 타 위성 자료를 처 리할 뿐 아니라, 타 분석도구의 전처리 과정 역할도 수행할 수 있다. SNAP은 Windows, Unix, MacOS 등 다양한 운영체제를 기반으로 동작하며, 최소 사양으로 8 GB 이상의 RAM 과 4코어 이상의 CPU를 권장한다[11].

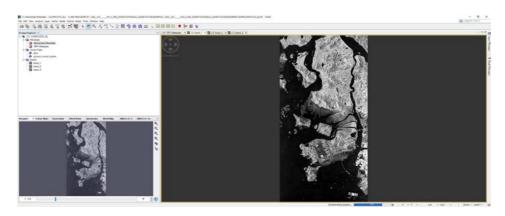


Fig. 6. Analysis of Sentinel-1 SAR imagery using SNAP. SAR, synthetic aperture radar; SNAP, SeNtinel's Application Platform.

4. 결론 및 제언

지금까지 SAR 영상분석도구는 기본적인 SAR 처리 및 시각화에서부터 간섭계 및 시계열 분석에 이르기까지 각각의 목적에 맞게 다양하게 개발이 되어오고 있다. 하지만 SAR 영상분 석도구는 기본적으로 진입장벽이 높기 때문에 많은 사용자들이 어려움을 겪고 있는 실정이다. 이러한 문제점을 최대한 극복하기 위해 향후 개발되는 도구들은 목적에 맞게 정의하고 패키 지화 하여 제공이 되어야 할 것이다. 또한 사용자가 이해하기 쉽고 다루기 용이하도록 UI를 구 성하는 것도 매우 중요하다. 한편, SAR 영상은 기본적으로 용량이 크기 때문에 원활한 분석 및 활용을 위해서는 저장용량, 메모리, GPU 등 하드웨어 성능도 충분히 뒷받침되어야 할 것이다.

2022년부터 본격적으로 개발될 예정인 차세대중형위성 5호는 세계 최초 중형급 C-밴드 SAR 위성으로 수자원/수재해 활용산출물 생성을 통해 수자원분야 위성활용 미래기술을 선도 할 것으로 기대된다. 차세대중형위성 5호의 주된 목적은 1) 홍수, 토양수분, 가뭄 등 수량 중 심의 수자원변동 모니터링, 2) 수자원시설물 안정성 분석 및 시계열 감시, 3) 레이다를 활용한 환경/생태 분야 모니터링이다. 본 논문에서 소개한 주요 SAR 영상 분석 도구들의 구조 및 기 능을 참고하고 장점들을 모아 수자원/수재해 분야 맞춤형 분석 도구를 개발한다면 국내뿐 아 니라 전세계적으로 SAR 위성 영상을 활용하는 데 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 한국환경산업기술원의 수요대응형 물공급서비스 연구사업(20190026500 03)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Kim Y, Kang K, A study on the utilization of SAR microsatellite constellation for ship detection, Korean J. Remote Sens. 37, 627-636 (2021). https://doi.org/10.7780/kjrs.2021. 37.3.21

- 2. Paek S, Balasubramanian S, Kim S, Weck O, Small-satellite synthetic aperture radar for continuous global biospheric monitoring: a review, remote Sens. 12, 2546-2577 (2020). https://doi:10.3390/rs12162546
- 3. Capella Space, Visualizing a changing world (2021) [Internet], viewed 2021 Aug 17, available from: https://www.capellaspace.com/
- 4. l3harrisTM, ENVI® SARscape® products (2021) [Internet], viewed 2021 Jul 20, available from: https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI-SARscape
- 5. GAMMA Remote Sensing, The GAMMA Software (2021) [Internet], viewed 2021 Jul 20, available from: https://www.gamma-rs.ch/software
- 6. GAMMA Remote Sensing, GAMMA Software (2021) [Internet], viewed 2021 Jul 20, available from: https://gamma-rs.ch/uploads/media/GAMMA_Software_information.pdf
- 7. Alaska Satellite Facility [ASF], ASF Hyp3 (2021) [Internet], viewed 2021 Jul 20, available from: https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/
- 8. Hogenson K, Arko SA, Buechler B, Hogenson R, Herrmann J, et al., Hybrid pluggable processing pipeline (HyP3): a cloud-based infrastructure for generic processing of SAR data, Proceedings of the 2016 AGU Fall Meeting, San Francisco, CA, 12-16 Dec 2016.
- 9. Rosen PA, Gurrola E, Sacco GF, Zebker H, The InSAR scientific computing environment, Proceedings of the EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Nuremberg, 23-26 Apr 2012, 730-733.
- 10. Pixoneer, PG-STEAMER (n.d.) [Internet], viewed 2021 Jul 20, available from: https://www. pixoneer.co.kr/products/pg-steamer/pg-introduce/
- 11. European Space Agency [Esa] Tutorials, [Internet], viewed 2021 Jul 20, available from: http://step.esa.int/main/doc/tutorials/

Author Information

이 강진 kilee@soletop.co.kr



경희대학교 우주탐사학과에서 우주기상으로 박 사학위를 취득하였으며, 2016년부터 2019년까 지 한국전자통신연구원에 재직하며 후속 정지 궤도 기상위성 지상국 개발 사업에 참여하여 우주기상자료처리시스템 개발을 담당하였다. 현재는 (주)솔탑에서 수자원 SAR 위성, 후속

해양탑재체 개발, 차세대 기상기후 관측위성 등에 관련된 연구, 기 획 및 관리 업무를 수행하고 있다.

성석용 syseong@soletop.co.kr



공주대학교 대기과학과 이학사를 취득하고, 대 기환경모델링 연구실에서 석사과정 진행 중이 며 현재 수료상태이다. 2016년부터 (주)솔탑에 입사하여 2019년까지 후속 정지궤도 기상위성 (천리안 2A호) 지상국 개발 사업의 기상 알고 리즘 모듈화/표준화 및 테스트베드 서버 운영/

관리 업무를 수행했다. 이후 현재까지 천리안 2A호 위성 지상국 시 스템 유지보수, 공군기상단 극/저궤도 위성을 이용한 구름연직분포 연구, 수자원 SAR 위성, 후속 해양탑재체 개발 등의 업무를 수행 중 이다.

전성경 sgjeon@soletop.co.kr



경희대학교 우주탐사학과에서 우주기상으로 석 사학위를 취득하고, 2018년부터 동 대학에서 박 사과정을 진행 중이다. 현재는 우주기상분야에 딥러닝을 적용하는 연구를 진행 중이다. 2021년 부터 (주)솔탑에 입사하여 AI 기반 위성영상활 용 연구 기획 및 수자원 SAR 위성에 관련된 업

무를 수행 중이다.

강기묵 mook0416@kwater.or.kr



서울대학교 지구환경과학부에서 인공위성지구 물리 전공으로 박사학위를 취득하였으며, 2018 년부터 2019년까지 서울대학교 기초과학연구 소에 재직하며, SAR 위성영상 활용기술 연구를 수행하였다. 2019년부터 K-water연구원에서 수 자원위성(차세대중형위성 5호) 탑재체 핵심기

반기술 및 재난상황시 위성영상 활용기술 등에 관련된 연구를 수행하 고 있다.

JSTA 투고규정

- 1. JSTA 는 연간 4회 (2월, 5월, 8월, 11월 말일) 발간된다.
- 2. *JSTA* 에 투고되는 원고는 교신 저자가 온라인 투고시스템(https://submission.jstna.org)을 통해 온라인으로 제출하여야 한다.
- 3. *JSTA* 투고를 위한 원고는 *JSTA* 홈페이지(https://www.jstna.org)나 *JSTA* 투고시스템(https://submission.jstna.org)에 게시되어 있는 투고지침에 따라 템플릿을 참조하여 MS-Word로 작성되어야 한다.
- 4. 제출된 논문 원고는 60일 이내에 *JSTA* 편집위원회에서 위임한 2인 이상의 전문가에 의해 심사되며, *JSTA* 편집위원장의 게재승인에 의거해 출판된다. 기고문은 전문가의 심사절차 없이 *JSTA* 편집위원회에서 출판을 결정한다.
- 5. 논문 원고는 독창적이어야 하고, 다른 학술지에 중복 제출되어서는 안되며, 심사를 통해 *JSTA* 에 출판이 승인된 원고는 일부라도 *JSTA* 의 허가 없이 다른 저널에 중복 출판되어서는 안된다.
- 6. 게재된 논문과 기고문의 기술적 내용에 대한 책임은 저자에게 있으며, 저자들은 출판에 앞서 저작권을 한국우 주과학회에 양도하여야 한다.
 - *저작권 이양동의서는 *JSTA* 홈페이지(https://www.jstna.org)나 *JSTA* 온라인 투고시스템(https://submission.jstna.org)의 '투고지침'에 탑재된 양식을 사용한다.
- 7. 논문과 기고문의 저자들은 출판에 앞서 윤리강령을 반드시 확인, 숙지하도록 한다. 윤리강령은 *JSTA* 홈페이지 (https://www.jstna.org)와 *JSTA* 온라인 투고시스템(https://submission.jstna.org)의 '투고지침'에 명시되어 있다.
- 8. 논문 및 기고문의 게재료는 1편당 200,000원으로, *JSTA* 발행완료 후 학회 사무국으로 납부한다.

AUTHOR'S CHECKLIST

Manuscript in a format of MS-Word 2013 or later.
Sequence of title page, abstract & keywords, introduction, methods, results, conclusions, acknowledgments, and references.
Title page with article title, author's FULL NAME(s) and affiliation(s).
Contact information of the corresponding author's E-mail address, Office Phone number, ORCID, and heading title, with all authors' ORCID.
Abstract up to 300 words and keywords up to 6 words or phrases.
All table and figure numbers are found in the text.
All tables and figures are numbered in Arabic numeral in the order of its appearance in the text.
Computer generated figures must be produced with high tones and resolution.
All references listed in the reference section should follow the reference citing rule and the valid reference format specified in INSTRUCTIONS FOR AUTHORS in JSTA.

COPYRIGHT TRANSFER AGREEMENT, DISCLOSURE OF CONFLICT OF INTEREST AND DECLARATION OF ETHICAL CONDUCTS

Ma	anuscript Title:		
CC	PYRIGHT TRANSFER AGR	EEMENT	
sub hold sim	mitted materials and the right to publish, the right to reproduce the article, include	transmit, and distribute them in t uding in reprints, photographic ticle for use in conjunction with	ce Science Society holds the copyright to all he journal or all other media; the Society also reproductions, or any other reproductions of computer systems and programs, including
DI	SCLOSURE OF CONFLICT I	NTEREST	
the who	manuscript. Disclosures include the sour	ce of funding, consultation fees le subject matter of the manusc	Igment that no conflicts exist, are included in and stocks and relationships with a company ript. All authors agreed to the terms outlined ation.
DE	CLARATION OF ETHICAL (CONDUCTS	
✓	I / We abide by the RESEARCH AND I	PUBLICATION ETHICS of the J	/STA Guidelines in submitting this manuscript.
✓	The author(s) has a specific and impor	rtant contribution, and is officially	y responsible for the content of the article
✓	This manuscript has not been published has been made on its acceptability for		ted for publication elsewhere until a decision
✓		e research content and its impo	writing reports, and presenting results) in an rtance in an objective and specific way, and
Co	orresponding Author	E-mail:	
Pr	int name	Signature	Date
Pr	int name(s) of Co-author(s)		
Print name		Signature	Date
Pr	int name	Signature	Date
Pr	int name	Signature	Date

Signature ____

Date _____

Date ___

Signature ____

^{*} All author(s) should sign this form in the order listed in the manuscript.

^{*} The above copyright transfer agreement must be signed and returned to the *JSTA* Editorial Office (Tel: +82-42-865-3351, Fax: +82-42-865-3392, E-mail: jass@ksss.or.kr) before the manuscript can be published.

우주기술과 응용 배포기관

1	가스로드	36	스마트코리아피씨비	72	큐니온
2	경희대학교	37	스페이스솔루션	73	텔레픽스주식회사
3	공군 우주발전처원	38	실텍	74	페리지항공우주
4	공군사관학교	39	쎄트렉아이	75	하이리움산업
5	공군우주처	40	아이엠티	76	하이퍼센싱
6	과학기술정보통신부	41	아이파이브	77	한국과학기술기획평가원
7	국립전파연구원	42	알에스피	78	한국과학기술연구원
8	국립환경과학원	43	에스티아이	79	한국기초과학지원연구원
9	국방과학연구소	44	엘테크	80	한국마이크로칩테크놀로지
10	국방기술품질원	45	엠아이디	81	한국연구재단
11	국토지리정보원	46	연세대학교	82	한국전기연구원
12	나라스페이스테크놀로지	47	우성테크	83	한국전자통신연구원
13	네오스펙	48	우주기술진흥협회	84	한국천문연구원
14	넥스트폼	49	우주전파센터	85	한국항공우주산업
15	단암시스템즈	50	웨이브온	86	한국항공우주연구원
16	동진커뮤니케이션시스템	51	위성전파감시센터	87	한국해양과학기술원
17	두시텍	52	이노스페이스	88	한양이엔지
18	두원중공업	53	이엘엠	89	한컴인스페이스
19	드림스페이스월드	54	이오에스	90	한화
20	디에스테크놀러지	55	인터콤전자	91	한화시스템
21	레볼루띠	56	인하대학교	92	한화에어로스페이스
22	레이다앤스페이스	57	저스텍	93	항공대학교
23	루미르	58	전략물자관리원	94	해양경찰청
24	마스텍	59	전북대학교	95	현대로템
25	바로텍시너지	60	제노코	96	현대중공업
26	방위사업청	61	제이엔티	97	AP 위성
27	부경대학교	62	조선대학교	98	Aurora Propulsion Tech.
28	부산대학교	63	지솔루션	99	KAIST 인공위성연구소
29	부산테크노파크	64	지아이이앤에스	100	KT sat
30	<u> </u>	65	지오스토리	101	KTL
31	비츠로넥스텍	66	카이로스페이스	102	LIG 넥스원
32	샘트라인터내셔널	67	캠틱종합기술원	103	S&K 항공
33	서울대학교	68	컨텍	104	SM 인스트루먼트
34	세종대학교	69	코리아테스팅	105	Space K
35	솔탑	70	코마틱코리아	106	Thales Korea

우주기술과 응용

제1권 2호

등 록 일 | 2021년 8월 31일

발 행 일 | 2021년 8월 31일

발 행 인 | 최기혁

편 집 인 | 오수연·김숙경

발 행 처 | 사단법인 한국우주과학회

대전광역시 유성구 대덕대로 776

TEL: 042-865-3391

E-mail: ksss@ksss.or.kr

Homepage: http://ksss.or.kr

편집 · 인쇄 | 거목문화사 · 거목인포

TEL: 02-2277-3324

E-mail: guhmok@guhmok.com

SOL=TOP

Remote sensing & Telepresence

New Space를 위한 인공위성 플랫폼 서비스 솔탑이 만들어 가겠습니다.

1995년 설립이래 다목적 실용위성 관제시스템 개발을 시작으로 위성 지상시스템, 위성 원격탐사 분야에서 지속적으로 성장하며 항공우주 전문기업으로 발돋움하였고 최근 초소형위성 시장에도 진출하였습니다.

다수의 위성 지상시스템 구축 경험을 바탕으로 안정적이고 신뢰도 높은 시스템 설계 및 구현 기술을 보유하고 있으며 해외 유수의 업체들과 협력하여 검증된 초소형 위성의 솔루션을 제공하고 있습니다.



초소형 위성 설계·제작시험



위성영상수신



실시간 데이터 분석·처리



위성관제

STEPCubeLab-2



탑재체·위성체 시험 및 분석

SOLESat-01

솔탑에서 개발하는 첫 번째 초소형 위성!

솔탑에서 자체 위성개발을 통해 솔탑의 위성설계, 제작 및 유용기술을 검증하고자 합니다.



Mission

- 초소형위성 플랫폼 검증
- 태양전지판 핵심 기술검증
- 지구관측
- 우주 기상 관측

솔탑에서 버스개발 참여

사업으로 개발중인 6U 초소형위성입니다.

Mission

STEP CubeLab-II 조선대학교 STSLab에서 큐브위성 경연대회

- 지구관측(백두산 폭발징후 관측)
- 태양전지판 기술검증
- 우주용 TDI 센서 검증
- 관심대상에 대한 동영상 촬영

Specifications

- 탑재체 : 지구 관측 카메라 Space Weather Sensor
- 궤 도:태양동기궤도
- 질 량:<6kg
- 크 기:3U
- 통 신: UHF, S-band
- 수 명:1년



Specifications

● 탑재체 : TDI 가시광선 카메라 LWIR 카메라 광대역 카메라

태양전지판 조절 장치(SADA) 점탄성 태양전지판

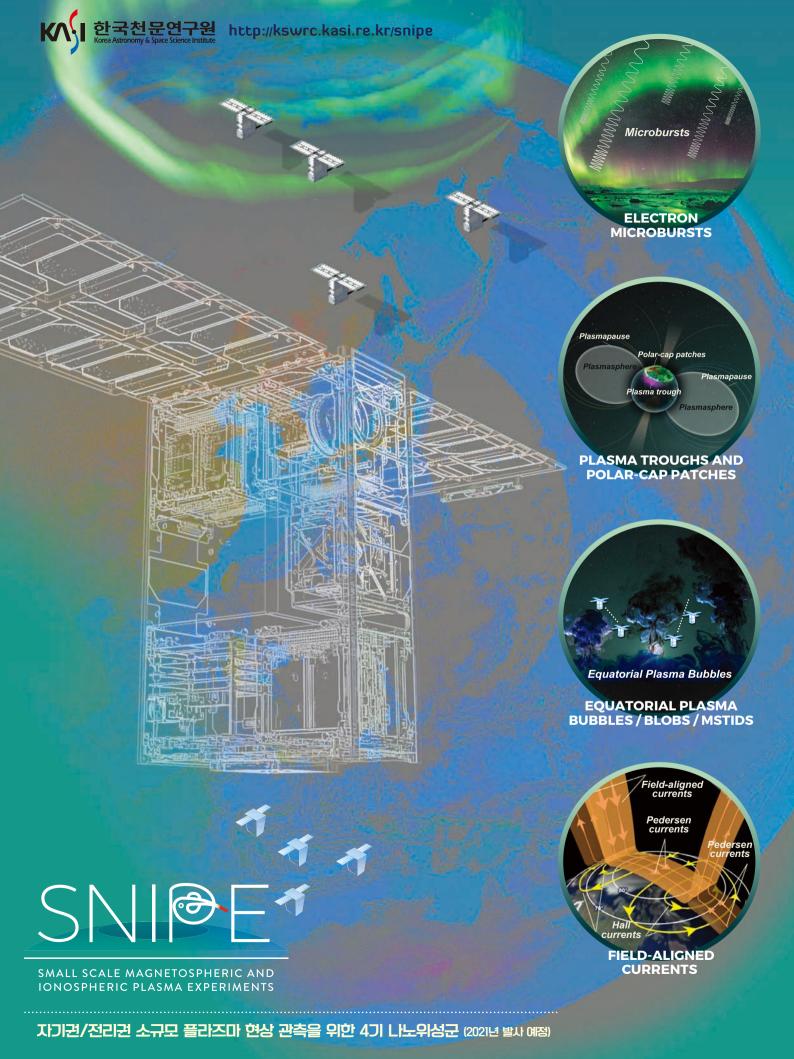
- 궤 도:태양동기궤도
- 질 량:<6kg
- 크 기:6U
- 통 신: UHF, S-band
- 수 명:1년



bright _______

SPACEFLIGHT







KF-21 보라매를 개발하기 위한 우리의 노력은 **대한민국 항공우주산업의 의지**입니다. **우리의 오랜 염원과 노력을 담아** 대한민국의 하늘에 한국형전투기가 날아오릅니다.



KF-21 최종 조립현장



KF-21 아이언버드(계통시험장)



KF-21 HOS(조종성 평가 시뮬레이터)

대한민국 항공우주산업의 시작과 미래, 한국항공우주산업이 만들어 갑니다.

