

연구논문



Received: April 13, 2024
Revised: April 28, 2024
Accepted: May 3, 2024

†Corresponding author :
Kwangsun Ryu
Tel : +82-42-350-8619
E-mail : kwangsun@kaist.ac.kr

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

ORCID

Jimin Hong
<https://orcid.org/0009-0005-1763-6253>
Yoon Shin
<https://orcid.org/0009-0003-9573-5199>
Sebum Chun
<https://orcid.org/0000-0003-1367-7734>
Sangwoo Youk
<https://orcid.org/0009-0009-5313-3994>
Jinkyu Kim
<https://orcid.org/0000-0001-5650-2163>
Wonho Cha
<https://orcid.org/0000-0003-2388-0904>
Seongog Park
<https://orcid.org/0000-0002-0363-6579>
Seunguk Lee
<https://orcid.org/0000-0001-8045-6398>
Suhwan Park
<https://orcid.org/0009-0006-4963-1024>
Jeong-Heon Kim
<https://orcid.org/0000-0003-4953-5228>
Kwangsun Ryu
<https://orcid.org/0000-0001-8550-4213>

저고도 전리권 관측을 위한 사운드링 로켓 실험용 IAMMAP(Ionospheric Anomaly Monitoring by Magnetometer And Plasma-Probe)의 과학적 목표와 임무 설계

홍지민¹, 신동윤², 천세범², 육상우², 김진규¹, 차원호¹, 박성욱¹, 이승욱¹, 박수환¹, 김정현³, 유광선^{1†}

¹한국과학기술원 인공위성연구소

²페리지에어로스페이스(주)

³한국천문연구원

Scientific Objectives and Mission Design of Ionospheric Anomaly Monitoring by Magnetometer And Plasma-Probe (IAMMAP) for a Sounding Rocket in Low-Altitude Ionosphere

Jimin Hong¹, Yoon Shin², Sebum Chun², Sangwoo Youk², Jinkyu Kim¹, Wonho Cha¹, Seongog Park¹, Seunguk Lee¹, Suhwan Park¹, Jeong-Heon Kim³, Kwangsun Ryu^{1†}

¹Satellite Technology Research Center (SaTRec), Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34141, Korea

²Perigee Aerospace Inc, Daejeon 35203, Korea

³Korea Astronomy and Space Science Institute, Daejeon 34055, Korea

요약

사운드링 로켓은 저렴한 비용과 빠른 개발 기간을 통해 전리권이나 무중력 환경을 직접 탐사하는 유용한 도구이다. 이러한 로켓은 목표 고도에 신속하게 도달하며, 다양한 과학적 장비를 탑재하여 데이터를 실시간으로 수집할 수 있다. 페리지에어로스페이스(주)는 2024년 상반기에 첫 시험 발사를 진행한 뒤, 2025년 1월 경에는 2차 성능시험 사운드링 로켓을 발사할 예정이다. 이 로켓은 제주 해상에서 발사될 예정이며, 약 150 km의 목표 고도에 총 30 kg의 탑재체를 싣고, 준궤도 영역에서 다양한 실험을 수행할 것이다. 특히, 중위도 지역의 전리권에서는 간헐적으로 전자 밀도가 증가하는 스포라딕 E층과 적도 전기제트에 의한 자기장의 미세변화를 관측할 수 있을 것으로 예상된다. 이러한 관측을 위해 KAIST 인공위성연구소에서 개발 중인 탑재체 IAMMAP(ionospheric anomaly monitoring by magnetometer and plasma-probe)의 사운드링 로켓 버전이 발사체에 실릴 예정이다. 본 연구는 중위도 지역의 전리권에 대해서 이해하고, 2차 성능시험에서의 관측 가능한 임무 설계에 중점을 두고자 한다.

Abstract

Sounding rockets are cost-effective and rapidly deployable tools for directly exploring the ionosphere and microgravity environments. These rockets achieve their target altitudes quickly and are equipped with various scientific instruments to collect real-time data. Perigee Aerospace plans its inaugural test launch in

the first half of 2024, followed by a second performance test launch in January 2025. The second launch, scheduled off the coast of Jeju Island, aims to reach an altitude of approximately 150 km with a payload of 30 kg, conducting various experiments in the suborbital region. Particularly in mid-latitude regions, the ionosphere sporadically exhibits increased electron densities in the sporadic E layers and magnetic fluctuations caused by the equatorial electrojet. To measure these phenomena, the sounding rocket version of ionospheric anomaly monitoring by magnetometer and plasma-probe (IAMMAP), currently under development at the KAIST Satellite Research Center, will be onboard. This study focuses on enhancing our understanding of the mid-latitude ionosphere and designing observable missions for the forthcoming performance tests.

핵심어 : 전리권, 사운드링로켓, 스포라딕 E 층, 적도 전기제트, 미션설계

Keywords : ionosphere, sounding rocket, sporadic e layer, equatorial electrojet, mission design

1. 서론

전리권(ionosphere)은 지구의 중성대기 일부분이 이온화한 영역으로 고도 50 km 이상의 상부 중간권 및 열권을 포함한 넓은 영역에 분포하고 있다. 지구의 전리권은 주로 고에너지 태양 복사선인 X선과 자외선, 그리고 외부의 우주선(cosmic ray)에 의해 생성된다. 이온화된 하전 입자들은 집단을 이루면서 플라즈마를 형성하지만, 여전히 전기적으로 중성인 입자가 많이 존재하기 때문에 중성대기와의 상호작용을 무시할 수 없다. 또한, 우주공간에서 플라즈마(태양풍 등)가 지속적으로 유입되고 지진 활동, 쓰나미 등 지표면의 현상도 전리권에 영향을 미치므로 역동적인 상태를 유지하게 된다[1]. 전리권은 GPS(global positioning system)와 전파 통신을 포함한 다양한 기술적 응용에 큰 영향을 미치기 때문에 다양한 요인에 의한 변화를 이해하고 해석하는 것이 중요하다.

대표적인 지상 관측 방법으로 이오노존데(ionosonde)가 있다. 주파수를 변화시켜 가면서 전파를 전리권에 수직으로 방출하여 반사되어 돌아오는 시간과 임계주파수를 측정함으로써, 이온화된 층의 상세한 전자 밀도 정보를 획득한다. 또한, 전리권을 통과하는 GNSS(global navigation satellite system) 전파를 이용한 차폐(occultation) 및 신틸레이션(scintillation) 측정법이 있으며, HF, VHF, UHF 주파수를 사용하는 간섭 산란 레이더(coherent scatter radar)는 도플러 효과를 활용하여 오로라, 자기적도, 유성 트레일과 같은 현상을 관측할 수 있다. 반면에, 비간섭 산란 레이더(incoherent scatter radar)는 이온 밀도, 온도, 표류 속도, 중성 대기의 특성을 포함하여 전리권의 상태에 대한 다양한 정보를 제공한다[2]. 광학관측으로는 국내에서 남극 세종과학기지에 유성레이더와 전천카메라를 설치하여 운영하고 있으며, 추가로 간섭계를 이용하여 상층 대기 및 전리권 연구를 수행하고 있다[3]. 직접적인 방법으로는 인공위성 탑재체로 전리권의 상층부를 관측하거나, 로켓을 이용하여 현장 측정(in-situ) 데이터를 획득하는 방법이 있다. 특히, NASA의 사운드링 로켓(sounding rocket) 프로그램은 연구자들이 비교적 저렴하고 간단하게 우주 환경에서 실험을 수행할 수 있는 유연한 플랫폼을 제공한다.

일반적인 궤도 임무 로켓과 달리 사운드링 로켓은 목표하는 고도까지 빠르게 상승하여 짧은 시간이지만 100 km 이상의 우주공간을 경험한 후 하강하기 때문에 즉각적인 데이터 획득이

가능하다. 위성 궤도에 진입하지 않아서 고가의 부스터나 고성능의 텔레메트리(telemetry, TM) 및 지상국이 필요하지 않으므로 개발 비용이 저렴하다. 300 km 미만의 고도에서는 대기 항력으로 인해 인공위성의 궤도 유지가 어렵기 때문에 사운드 로켓이 100-200 km 고도의 상층대기를 관측하는 유일한 현장관측 방법이라 할 수 있다. 페리지어어로스페이스(이하 페리지)에서는 우주발사체 기능시험을 겸한 사운드 로켓을 개발하여, 2024년 상반기 내 시험 발사 예정에 있다. 이는 1990년대 진행됐던 한국형 과학관측 로켓(korea sounding rocket, KSR) 시리즈를 계승하는 의의가 있으며, 서브오비탈 영역에서 수행할 수 있는 여러가지 실험 기회를 제공할 수 있을 것으로 생각된다. 미소중력(10^{-5} g 이하) 및 재진입 실험이 가능하며 위성 탑재체의 성능 검증에도 이용할 수 있다.

본 논문에선 2025년 1월 이후 발사예정인 페리지 사운드 로켓의 2차 성능시험에 대한 임무설계를 하고자 한다. 하부 전리권 관측 및 과학탑재체 검증에는 KAIST 인공위성연구소에서 개발하고 있는 IAMMAP(ionospheric anomaly monitoring by magnetometer and plasma-probe) 탑재체의 페리지 사운드 로켓(perigee sounding rocket, PSR) 버전이 이용될 예정이다.

2. 사운드 로켓

페리지는 2018년 설립된 우주발사체 스타트업으로, 2022년 3월에 사운드 로켓 Blue Whale(BW)-0.1의 세 번째 발사를 성공하면서, 발사체 초기 모델 개발을 완료하였다. 이어서, 재사용 가능한 발사체 기술을 확보하기 위해 BW-0.3과 발사체의 1, 2단부 및 BW-0.4의 개발을 진행 중이다. 이를 기반으로 최종적인 모델인 BW-1은 저렴한 발사 비용과 높은 신뢰성에 중점을 두고 개발될 것이다. 약 200 kg의 탑재체를 태양동기궤도로 수송할 수 있고, 이륙 질량 약 20톤의 소형 발사체로 비용 절감 및 구조비 개선 등의 다양한 설계가 채택되었다.

BW-1의 추진제 탱크는 강화 레진(toughened resin) 기반의 탄소섬유 강화 플라스틱으로 제작되어, 초저온 및 내화성을 갖추면서 질량 효율을 향상시켰다. 또한, 1단 엔진은 9개의 3톤급 터보펌프 메탄 엔진으로 구성되어 높은 추중비를 유지하며, 내폭 설계된 격리 엔진룸을 사용하여 엔진 실패로 인한 임무 실패 가능성을 줄였다. 2단 엔진은 가압식 구조를 채택하여 구조 단순화를 통해 공중 점화에 대한 신뢰성을 확보하고 생산비용을 절감하였다. 구조비를 15% 내외로 유지하여 전기모터식 추진기관을 채택한 금속 소재의 타사 상단에 비해 우수한 수준을 유지하고 있다. 추가적으로, 해저 암반에 다리를 내려 플랫폼 구축이 가능한 잭업(jack-up) 발사선박(해상 발사를 위한 바지선) “Cetacea-1”을 건조하여 해상 발사장을 자체 개발, 보유하고 있어 발사 위치 및 일정의 유연성을 높일 수 있다.

향후 안정적인 발사를 위해서는 BW-1에 적용 예정인 핵심 기술들의 검증이 필수적이다. 이를 위해 BW-0.4를 이용하는 준궤도 발사체 임무를 기획하였다. 2023년 12월, 120초의 단연소 시험을 성공적으로 끝냈으며[Fig. 1(a)] 현재 첫 번째 FM의 제작이 마무리 단계에 있다. 이후, 2024년 상반기 내 시험발사를 거쳐 2025년 1월경 2차 성능시험 예정에 있다. 1차 시험 발사의 목표 고도는 85 km이며, 건조 중량은 270 kg(탑재체 100 kg)이다. 대략적인 비행 시간은 약 6-7분 정도로 예상되며, 낙하점까지의 거리는 21 km이다. 2차 성능시험에서는 페이로드의 중량에 따라서 최소 100 km에서 최대 220 km의 목표 고도 설정이 가능하다[Fig. 1(b)]. 탑재체의 총 무게인 30 kg를 고려한다면, 대략적인 비행시간은 10분 정도로 미소중력

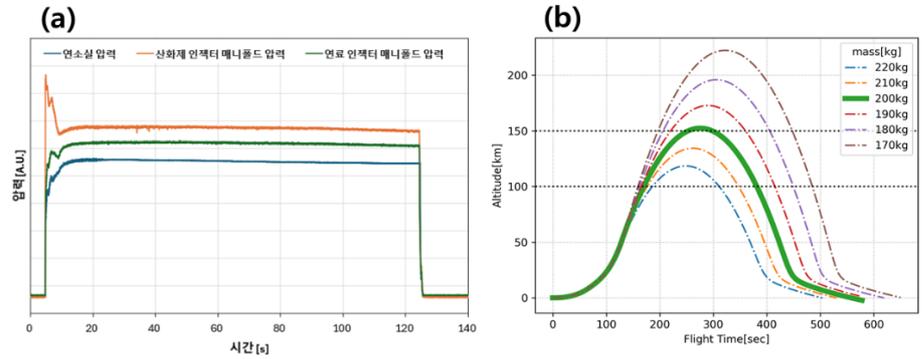


Fig. 1. Combustion experiment and flight altitude analysis of BW-0.4 (a) Results of 120-second combustion experiment conducted at Perigee Aerospace in December 2023, (b) Maximum flight altitude by payload mass.

상태를 약 3분 정도 경험하면서 전리권 하부 영역을 탐색할 수 있는 기회를 제공한다. 페어링 단에서 페이로드 유닛들과 연결할 수 있는 RS-422 플랫폼과 28V 전원부가 제공되므로, 차세대 중형위성 3호에 탑재될 전제로 개발된 IAMMAP은 최소한의 설계 변경만으로 임무를 수행할 수 있다. 이를 통해 단기간에 전자 회로와 구조체만 개발하면 전리권 하부를 관측할 수 있는 기회를 얻을 수 있다.

3. 관측임무 및 탑재체

3.1 관측임무

3.1.1 Sporadic E layer

전리권은 낮과 밤에 따라서도 변화하며, 위도에 따라 그 변화의 경향성이 다양하게 나타난다. 일반적으로 고도에 따라 D, E, F층으로 분류되며, 경우에 따라서는 F층을 F1, F2층으로 나눠서 분류하기도 한다. 중위도에서는 전리권의 E층에서 간헐적으로 전자 밀도가 급격하게 증가하는 스포라딕-E(sporadic-E, Es) 현상이 발생한다. Es층은 약 90-120 km 고도에 위치하며 두께는 약 1-2 km, 수평 길이는 수십-수백 km에 달하며 주위보다 밀도가 2-3배 높다[4]. 현재까지 밝혀진 생성 원인으로는, 주로 유성의 금속성 이온(Fe^+ , Mg^+) 잔해가 수평 방향의 중성 전단풍(wind shear)으로 인해, Es층을 발생시킬 수 있다고 알려져 있다[5,6]. 이러한 Es층은 여름에 더 많이 발생하는 경향성을 띄는데, 겨울에는 수평 중성풍이 전리권 E층에서의 금속 이온을 분산시켜 형성을 억제하기 때문이다. 이러한 생성 매커니즘에 따라 한반도 지역에서는 여름철 Es층의 발생률이 평균적으로 80%에 육박하는 반면, 겨울철에는 약 45% 발생률을 통계적으로 보이고 있다[7]. 이 층은 20-200 MHz에 이르는 주파수의 전자기파를 반사하기 때문에, 전파 통신에서 신호를 교란 시키거나 반사하는 등의 영향을 주며, 지상에서 전리권을 모니터링하는 것을 방해한다. Fig. 2는 선행 연구에서 발견된 Es층의 특징과 실제 관측 결과를 보여준다.

페리지의 2차 성능시험은 2025년 1월경으로 예상하고 있으며, 목표 고도는 150 km로 진행될 예정이다. 기존 연구를 통해, 로켓 발사예정 시기인 중위도의 겨울철에는 Es층 발생빈도

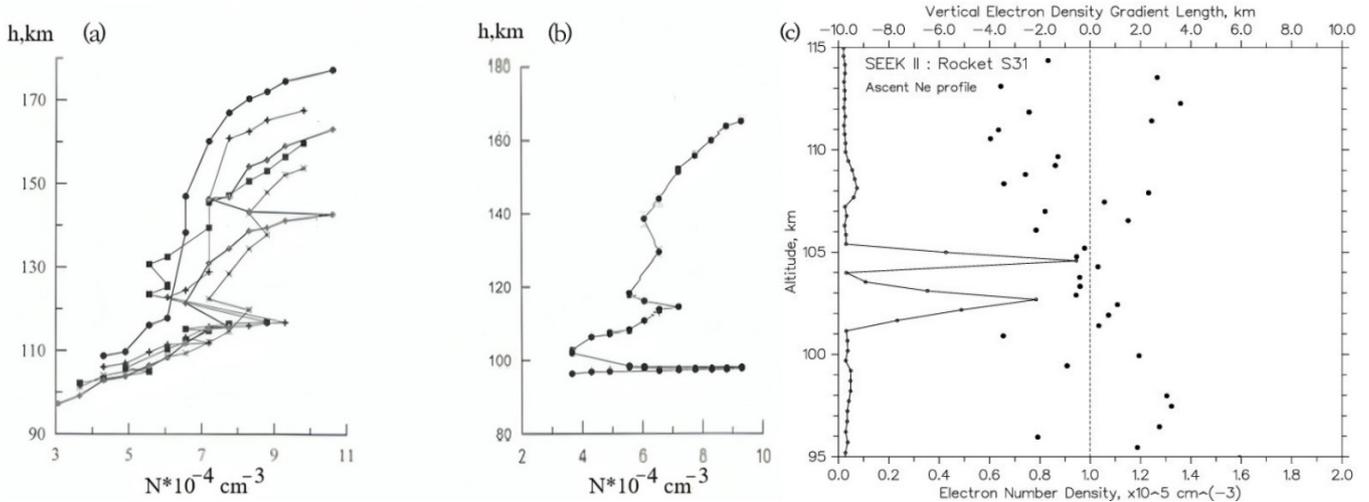


Fig. 2. Measurements of ionosphere. (a,b) Profiles of electron density in ionosphere using by artificial periodic irregularities (API technique) [8], (c) Es layer electron density profile (solid line) observed from sporadic E experiment over Kyushu (SEEK II) rocket and computed vertical plasma density scales (dots) expressed in kilometers [9].

가 약 45% 정도로 발생하고 있고, 정오 부근 가장 많이 활성화 된다는 통계자료[7]가 있으므로 Es층의 관측을 시도할 수 있다고 판단된다. 특히, 제주 지방의 자료를 확인하면 이른 오전보다 오후의 Es층의 활성화도가 높은 것을 확인할 수 있으며, 이는 발사시간을 11-16시로 설정한다면 보다 확실한 전리권의 프로파일을 얻을 것으로 예측된다. 또한, Es층의 발생 원인 중 하나로 여겨지는 금속성 이온 잔해의 영향을 극대화하기 위해, 1월의 사분의자리(Quadrans Muralis) 유성우를 중심으로 발사 구간을 설정하는 것이 관측 가능성이 높다. 2024년을 기준으로 할 때, 1월 4일이 유성우의 절정이므로, 1월 1일부터 1월 8일까지를 발사 구간으로 선정하는 것이 유성우의 영향을 받는 Es층 현상을 포착할 가능성이 가장 높다.

3.1.2 Equatorial electro-jet

전리권에서는 중성풍과 지구 자기장의 상호 작용에 의해 적도 전기제트(equatorial electro-jet, EEJ)라고 불리는 서쪽에서 동쪽으로 흐르는 좁고 강렬한 전류가 나타난다. 일반적으로 EEJ는 두가지 성분에 의해 활성화되는데, 첫 번째는 낮 지역의 새벽지역(dawn side)에서 황혼지역(dusk side)로 발생하는 동쪽 방향의 전류이다. 이는 새벽지역의 전리권에 쌓인 전하가 황혼지역으로 이동하면서 발생하며, 이는 일반적으로 전리권 낮 지역에서 발생하는 동향 전류(pedersen current, J_p)이다. 이 페더슨 전류로부터 다시 발생하는 홀 전류(hall current, J_h) 성분이 더해지게 되며, 결론적으로는 이 두 성분이 모두 동쪽 방향으로 흐르기 때문에 낮 지역의 적도부근에서는 강한 EEJ가 발생할 수 있게 된다. 그 세기는 낮에 최고조에 달하며 태양 복사 및 지자기 조건과 같은 요인의 영향을 받아 계절에 따라 변동성을 나타낸다.

EEJ는 자기장이 남북 방향을 따라 수평으로 형성되는 지자기 적도에서 발생하는 것이 일반적이며, 전리권 E층에서 활성화된 EEJ는 더 높은 고도인 F층까지 전자기장의 변화를 야기한다. 이러한 현상은 전리권 교란 또는 불균일(irregularity)을 일으켜 전파통신에 문제를 발생시킬 수 있다. 선행 연구를 통해 EEJ는 적도를 지나는 인공위성 궤도에서 수-수십 nT 정도의

자기장 세기를 갖는 것으로 알려져 있다[10]. 이것을 명확하게 구별하려면 분해능과 잡음이 1 nT 미만의 정밀한 자력계가 필요하다.

EEJ는 적도지방에서 주로 발생하지만 그 규모에 따라 중위도 지방에서도 관측 가능한 현상이다. Kikuchi et al.은 지자기 교란 기간 동안 DP2(disturbance polar of the second type) event가 발생하고, PPEF(prompt penetration electric field)라고 불리는 현상이 EEJ를 유도 및 강화시킬 수 있다고 언급한 바 있다[11]. 또한, 강한 지자기 폭풍 기간 동안 중위도 지방의 지자기 성분의 변화와 EEJ가 상관관계가 있는 것으로 파악되며, 이는 중위도 지방에서도 EEJ의 변화가 간접적으로 관측될 수 있음을 시사한다. 물론 지자기 폭풍이 발생해야 한다는 조건이 있지만, 현재 25 태양주기의 강한 태양활동 기간으로 다른 기간보다 지자기 폭풍이 자주 발생하고 있으므로, 중위도까지 확장된 전류계의 영향을 관측할 확률이 높다. 이러한 점과 페리지의 2차 성능시험의 목표 고도(150 km)를 고려하였을 때, 낮에 전류가 강화되는 특징이 있으므로 10-14시가 EEJ 관측에 적절한 발사 시간 대역이며, Es층과 함께 관측하기 위해선 11-14시가 발사의 최적 시간으로 고려된다. Fig. 3은 IRI 모델을 이용한 2024년 1월 4일 정오의 전리권의 전자 밀도를 보여주고 있으며, Table 1에 제시된 IAMMAP의 사양으로 관측이 가능하다. 또한, 자력계(AIMAG, adaptive in-phase magnetometer) 성능(Table 1)도 EEJ 현상에 의한 자기장 변화를 관측할 수 있을 것으로 판단된다.

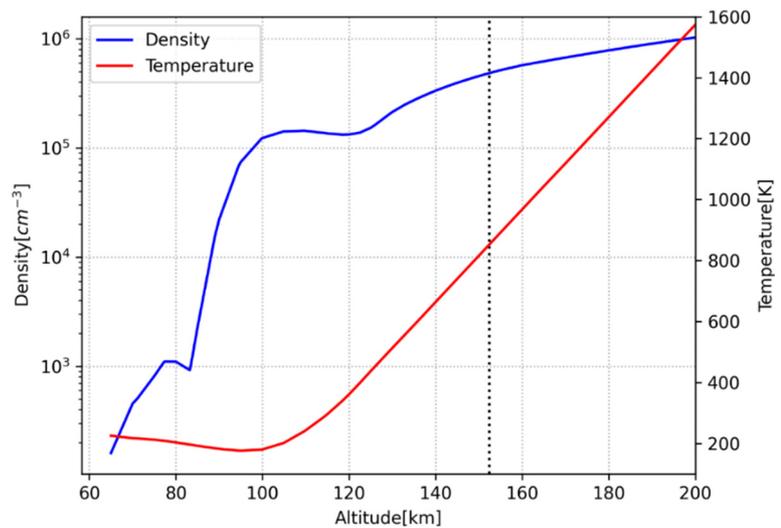


Fig. 3. This is a density and temperature of ionosphere using the IRI 2020 at noon on January 4, 2024, when the maximum of Quadrantid meteor shower. The black vertical dashed-line indicates the maximum altitude of perigee sounding rocket.

Table 1. IAMMAP specification

Units	Parameters	Capability
Langmuir probe (AIPIM)	Density (cm^{-3})	$10^4 - 10^6$
	Temperature (K)	600 - 3,000
	Resolution (ms)	20

Table 1. (Continued)

Units	Parameters	Capability
Impedance probe (AIPIM)	Frequency (MHz)	0.1 – 10
	Density (cm ⁻³)	10 ⁴ – 10 ⁶
	Resolution (ms)	1
Magnetometer (AIMAG)	Measuring range (nT)	±60,000
	Resolution	1 nT @ 10 Hz
	Noise	300 pT/√Hz @ 1 Hz
	Temperature coefficient	0.1%/°C

IAMMAP, ionospheric anomaly monitoring by magnetometer and plasma-probe; AIPIM, advanced impedance probe for ionospheric monitoring; AIMAG, adaptive in-phase magnetometer.

3.2 관측 탑재체 구성과 특성

IAMMAP은 2025년 한국형 우주발사체(KSLV-II)에 실려 올라갈 차세대 중형위성 3호(CAS500-3)의 탑재체 중 하나이다. IAMMAP의 관측 대상은 적도 지방에서 발생하는 EIA(equatorial ionization anomaly) 및 EEJ이며, 두 현상 사이의 복잡한 상호작용을 규명하는 것이 목표이다[12]. IAMMAP에는 플라즈마 측정을 위한 랭뮤어 프로브(langmuir probe, LP) 및 임피던스 프로브(impedance probe, IP)가 포함된 AIPIM으로 구성되며, AIMAG라는 고정밀 플럭스게이트 자력계 세트가 포함된다[13]. 현재 인증모형(engineering qualification model, EQM) 개발이 완료된 상황이며, 이를 기준으로 IAMMAP-PSR 버전이 개발될 예정이다. Fig. 4는 페리지 사운드링 로켓에 탑재될 IAMMAP의 구성도를 보여주고 있다. 기존 위성용

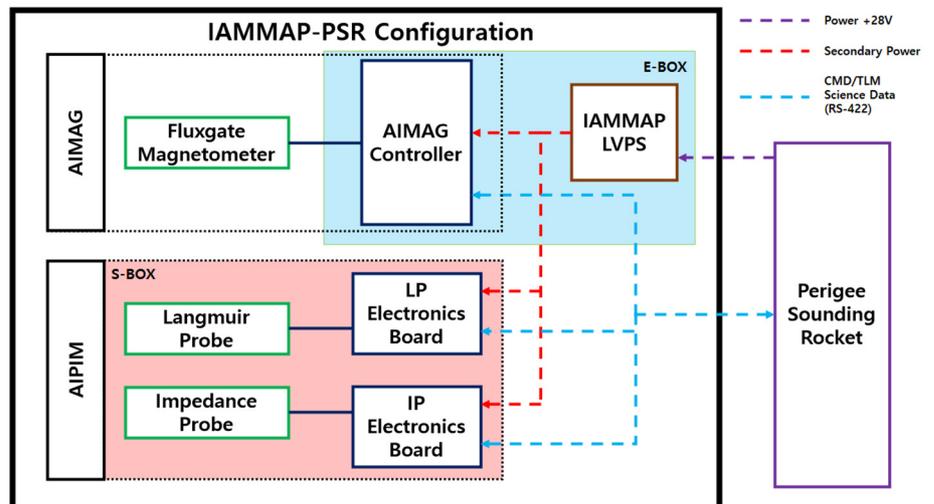


Fig. 4. Ionospheric anomaly monitoring by magnetometer and plasma-probe perigee sounding rocket (IAMMAP-PSR) electronics configuration. AIMAG, adaptive in-phase magnetometer; AIPIM, advanced impedance probe for ionospheric monitoring; LVPS, low voltage power supply; LP, langmuir probe; IP, impedance probe.

버전과는 자료 전송 방식이 달라 1553B 및 채널링크 통신을 위한 모듈 등이 생략되었으며, 전원 인가 방식은 동일하다.

3.2.1 AIPIM(advanced impedance probe for ionospheric monitoring)

3.2.1.1 Langmuir probe

LP는 Langmuir & Mott-Smith에 의해 발명됐으며, 플라즈마 진단에서 가장 간단하면서 강력한 도구이다[14]. V-2 로켓에 처음 탑재되어[15], 그 유효성이 입증되면서 많은 사운드 로켓 임무와 위성에 탑재되기 시작했다. 외부에 노출된 금속 프로브에 전압을 스위프(sweep)하면 플라즈마를 구성하는 하전입자들이 표면으로 수집되는데, 이때 발생하는 움직임에 따라 전류가 발생하고 이를 측정하여 플라즈마의 특성을 측정할 수 있다. Fig. 5와 같이 일반적인 I-V(current-voltage) 곡선의 해석을 통해 전자 및 이온의 포화영역, 비행체 전위(spacecraft potential) 등을 유도할 수 있고, 각 영역에 대한 특성 방정식을 이용하여 플라즈마의 밀도와 온도를 유도하게 된다. IAMMAP의 경우 Guard ring + Disk-type의 형태를 채택하여, 전기장의 왜곡을 방지하였으며, 연구소에 보유하고 있는 우주 플라즈마 챔버를 이용하여 프로브의 보정을 진행하였다[16].

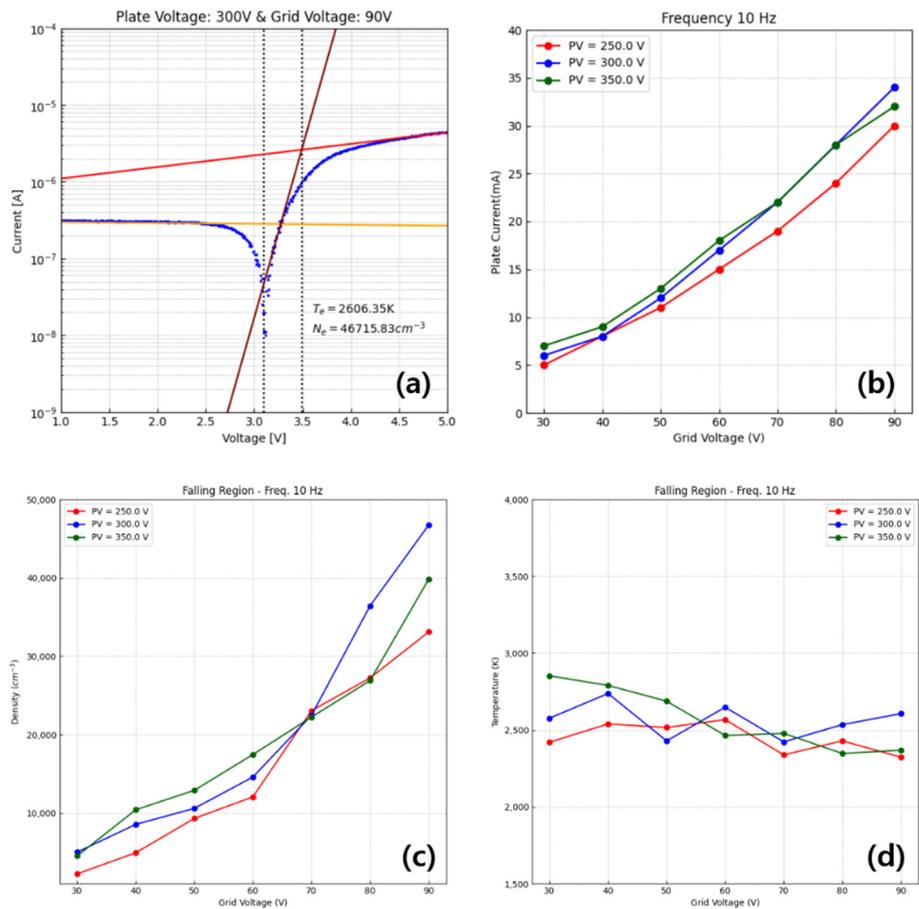


Fig. 5. Analysis of plasma experiment using langmuir probe. (a) I-V curve obtained via LP, (b) linearity between grid voltage & plate current with plate voltage at a 10 Hz sweep frequency, (c) electron number density, (d) plasma temperature.

IAMMAP의 LP에서는 MCU(micro controller unit) 내부의 DA(digital to analog) 컨버터를 사용하는 DMAC(direct memory access controller)와 프로그램 가능한 칩인 WG(waveform generator)을 이용하여 전압 스위프 형상을 결정하게 된다. 이 두 가지 방식은 MUX(multiplexer)를 통해 채널을 선택하게 되며, 이후 프로브를 통해 플라즈마 전류를 측정할 수 있도록 회로를 구성하였다.

3.2.1.2 Impedance probe

IP를 단독으로 사용하기엔 극복해야 할 몇 가지 사안이 존재하는데, 크게 전극 표면의 오염과 위성 표면적 문제가 있다. 이 두 가지 문제는 플라즈마의 밀도와 온도가 유도되는 I-V 곡선을 왜곡하고, 이에 따라 잘못된 물리값을 제공할 위험성이 있다[17,18]. 따라서, 위의 제한 사항을 받지 않는 IP를 함께 구성하여 플라즈마 임피던스를 측정하는 것이 IAMMAP의 큰 장점이라 할 수 있다.

IP는 Fig. 6과 같이 주파수를 스위핑하여 플라즈마의 임피던스를 스캔하고 상부 혼성 주파수(upper hybrid frequency, f_{UHR})를 찾을 수 있도록 하며, 이 f_{UHR} 와 밀도 사이의 관계를 통해 플라즈마 매개변수를 추론하게 된다. 직접 전류를 측정하는 것이 아니기 때문에 비교적 오염과 표면적 문제에서 자유롭다는 장점이 존재하지만, 안테나나 플라즈마 쉬스(sheath)의 임피던스 범위가 f_{UHR} 와 겹치지 않도록 조정이 필요하다(약 1-10 MHz). EQM 실험결과를 바탕으로 15 cm의 모노폴 안테나를 적용하여 전리권 플라즈마 측정에 사용할 수 있음을 확인하였다[19].

3.2.2 AIMAG(adaptive in-phase magnetometer)

플럭스게이트 자력계는 1936년에 처음 발명되었으며[20], 1958년 스푸트니크 III에 탑재된 후 위성에서도 점진적으로 사용되기 시작했다[21]. 전리권 플라즈마를 이해하고 연구하는 데에 자기장 데이터는 필수적인 요소이지만, 수 nT의 약한 자기장 변화를 관측해야 하므로, 신호

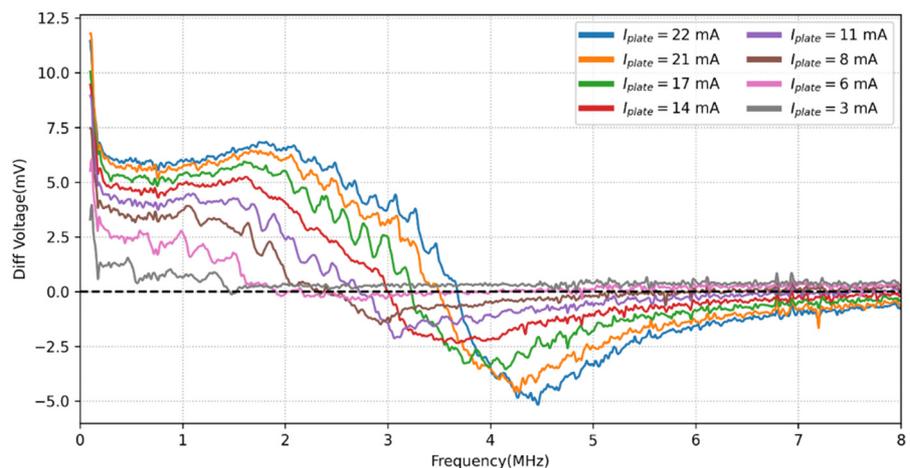


Fig. 6. Impedance probe (IP) sweeps through frequencies to locate the upper hybrid frequency (f_{UHR}). It identifies f_{UHR} by comparing the output to the background and selecting the frequency where the voltage reduction is observed.

대 잡음비가 높아야 한다. 일반적인 플럭스게이트 자력계의 성능은 픽업(pick-up) 신호의 위상이 온도에 따라 민감하게 반응하기 때문에, 극한의 온도 조건에서 신호가 불안정 해지고 출력 노이즈에 영향을 미치게 된다[22]. 이를 보정하기 위해서 자력계는 온도 변화에 저항할 수 있는 재료와 회로 디자인을 적용해야 한다. Fig. 7에서 AIMAG를 포함한 IAMMAP의 전체적인 형상을 보여주고 있다.

AIMAG에서는 adaptive in-phase라는 온도 변화에 내성이 있는 회로 디자인이 적용되었다. 새로 고안된 이 회로는 픽업 신호의 위상이 어떻게 변하더라도 동일 위상(in-phase)을 유지하면서, 안정적으로 신호를 유지할 수 있다[13]. 또한, 교정(calibration) 및 최적화로 분해능은 1 nT의 고해상도로 구현하고, 노이즈 레벨은 약 $150 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$ 를 달성하여 요구 사항을 만족하였으며 정밀하게 자기장 필드를 관측할 수 있을 것으로 생각된다. 본 임무에서는 사운드링 로켓의 중량을 고려하여 1세트가 탑재될 계획이다[Fig. 7(c)].

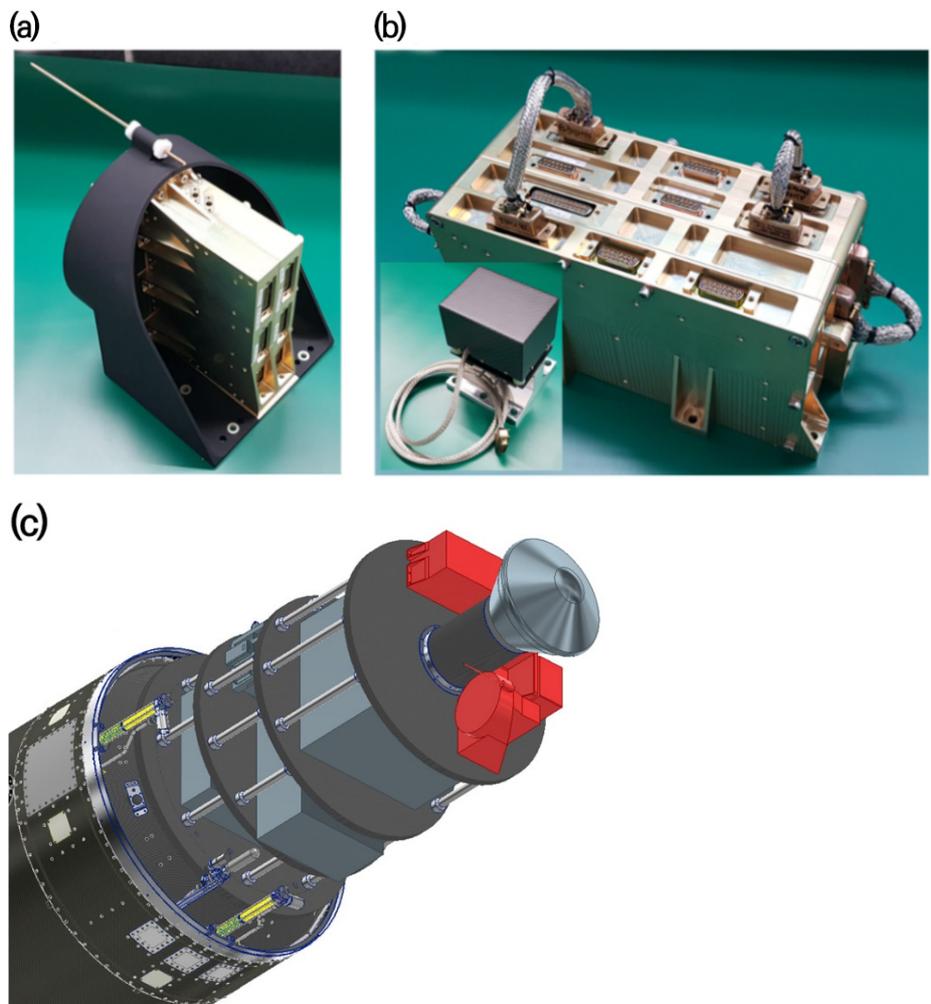


Fig. 7. Shape of IAMMAP and mounting on sounding rocket. (a) S-Box, AIPIM & Sensors, (b) E-Box, AIMAG & low voltage power supply (LVPS), (c) structure of ionospheric anomaly monitoring by magnetometer and plasma-probe (IAMMAP) on sounding rocket. AIPIM, advanced impedance probe for ionospheric monitoring; AIMAG, adaptive in-phase magnetometer.

4. 데이터 획득 및 처리

본 임무에서는 탑재체와 발사체 간의 통신에 RS-422 시리얼 통신 프로토콜을 사용할 예정이다. RS-422은 높은 잡음 내성과 차동 신호 방식을 통해 신뢰성 있는 데이터 전송이 가능하다. 따라서 외부 노이즈가 많은 환경인 인공위성이나 발사체에 많이 적용된다. 본 임무에서는 RS-422 프로토콜을 이용하여 탑재체와 발사체가 직접 연결되며, 명령(tele-command, TC)과 상태정보(state of health, SOH)를 송수신 할 수 있는 채널 라인 및 최대 500 kbps의 속도로 관측 자료를 전달할 수 있는 고속 데이터 채널이 제공될 것이다. 탑재체의 데이터들은 발사체의 PCU(payload control unit)를 거쳐 총 6개의 S-band 안테나를 통해 지상으로 전송되고, 지상에서는 페리지의 추적 안테나를 통해 TLM 수신기에서 받아 DB 서버에 보관하게 된다. 사용자가 직접 DB에 접근하는 방법도 존재하지만, TmoIP(telemetry over IP) 기능을 통해 TLM 수신기의 데이터들을 TCP/IP 프로토콜로 사용자에게 바로 전달할 수 있는 방법도 적용할 수 있다. Fig. 8은 탑재체와 발사체간 연결되는 통신 채널들을 보여준다.

IAMMAP은 S-Band(115,200 bps)를 통해 TM/TC를 주고 받으며, 명령 수행 및 상태 정보를 송수신할 수 있도록 설계되었다. 탑재체 유닛의 전류, 온도 등 상태정보를 포함하는 SOH는 16초 주기(1초 주기로 조정 예정)로 송신되며, 각각 46, 60, 54 bytes(LP, IP, AIMAG)의 한 개의 패킷으로 구성된다. ST(science telemetry)는 탑재체가 관측한 데이터 중 일부를 송신하여 전리권 플라즈마 및 자기장의 대략적인 상태를 알 수 있게 된다. LP는 4초마다 64 bytes의 5개 패킷을 송신하며, 총 136개의 관측 데이터 포인트를 가진다. IP는 관측된 데이터를 등간격으로 나눠 총 125개의 관측점을 4초마다 64 bytes의 5개 패킷으로 송신한다. AIMAG는 4초마다 62 bytes씩 6개 패킷을 송신하며, 각 패킷마다 2개의 FGM X, Y, Z축의 데이터를 전송한다. 하나의 패킷에 12개의 관측점이 포함되므로, 총 72개의 관측점을 얻을 수 있다.

저속 통신라인을 통한 ST 자료만으로는 플라즈마의 미세변화를 정확하게 추정하기 어렵다. 이를 해결하기 위해서는 고속으로 데이터를 주고 받을 수 있는 SD(science data) 채널이 필

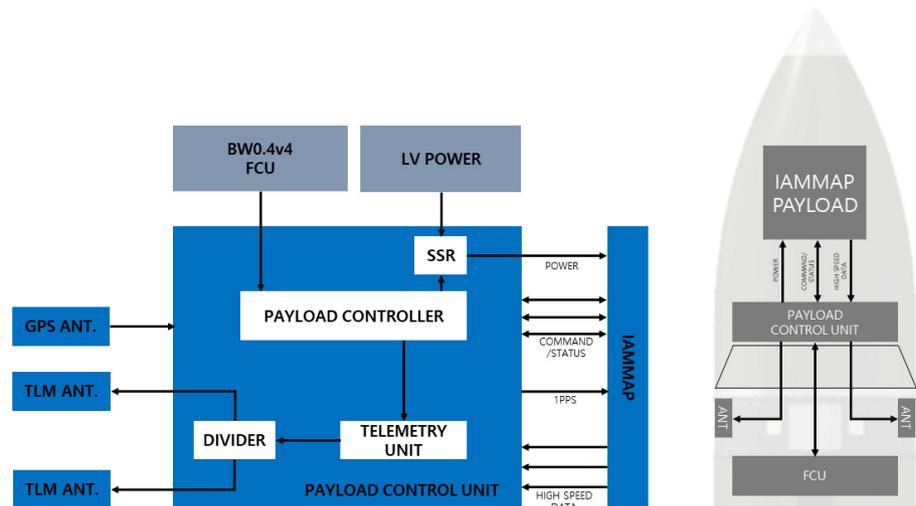


Fig. 8. Configuration of the communication link between launch vehicle and payload.

GPS, global positioning system; TLM, telemetry; SSR, solid state relay; FCU, flight control unit; IAMMAP, ionospheric anomaly monitoring by magnetometer and plasma-probe.

요하다. LP의 SD는 센서의 전류와 전압을 각각 2 bytes씩 한 세트모두 250개의 포인트로 구성되며, 2개의 ADC에서 sampling rate(2,500 Hz)에 따라 1초당 최대 10개의 패킷이 생성될 수 있다. 하나의 패킷 크기(1,018 bytes)를 고려하면 비행시간 약 10분 동안 6.1 MB의 데이터를 생성한다(10.18 KB/s). IP는 센서에서 관측된 전압만을 2 bytes씩 500개의 포인트로 한 패킷이 구성되며, 1초에 최대 5개의 패킷을 생성하고 약 10분 동안 3.05 MB의 데이터를 생성한다(5.09 KB/s). AIMAG는 4개의 ADC가 40 Hz로 동작하기 때문에, 1.525초마다 크기가 994 bytes인 패킷 3개를 만들 수 있다. 10분간 수신되는 총 패킷의 크기는 약 1.17 MB 정도이며, 실제 정상 패킷만 고려한다면 약 391 KB의 데이터를 이용할 수 있을 것으로 보인다.

실제 수신된 데이터는 탑재체의 ADC를 통해 변환된 16진수(Hex) 형태이므로, 이를 센서에서 측정된 아날로그 값으로 보정해줄 필요가 있다. 프론트엔드 소프트웨어(front-end SW)를 통해 S-band에서 명령 송수신 및 실시간 모니터링 기능을 구현한 바 있으며, 본 임무에도 적용할 예정이다. 또한, EGSE SW를 통해 수신된 ADC값을 각각의 유닛 센서의 아날로그 값으로 자동으로 변환하여 저장할 수 있으며, LP와 IP를 이용한 플라즈마 분석 도구 또한 python을 이용하여 구현된 상태이다.

5. 요약 및 결론

사운드 로켓은 목표하는 고도까지 빠르게 상승하기 때문에 즉각적인 데이터 획득에 용이하고 개발 비용이 저렴하다는 장점이 있다. 또한, 준궤도 영역에서 전리권 관측을 비롯한 여러 가지 실험 기회를 제공하여 발사체 및 탑재체의 성능 검증에도 이용될 수 있다. 본 연구에서는 페리지의 사운드 로켓을 활용하여 중위도 지방의 전리권을 관측하는 과학 임무를 설계하였다. 이번 임무의 목표 고도는 150 km이며, 이는 Es층과 EEJ의 직접적 및 간접적 관측이 가능할 것으로 예상된다. 특히, Es층의 관측 확률을 높이기 위하여 유성우가 활발한 기간인 1월 1일부터 8일 사이를 발사 주간으로 선정하였고, 전리권 활동이 가장 활발한 낮 시간대인 11:00부터 14:00 사이를 발사 시간으로 결정하였다. 이를 위해 탑재되는 IAMMAP은 본래 적도 전리권 관측을 목적으로 개발되었으나, 본 연구를 통해 중위도 지역에서도 충분히 전리권을 관측할 수 있을 것으로 분석하였다. 추후 페리지는 이번 임무에서 획득한 데이터를 바탕으로 다양한 발사체 신기술을 검증할 계획이며, KAIST 인공위성연구소는 차세대 중형위성 3호의 우주과학 탑재체 성능을 사전에 확인하고, 현재 개발 중인 IAMMAP FM의 성능 개선에 반영할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부와 한국연구재단(NRF)의 위성개발사업(NRF-2021-M1A3A4A06086639)과 뉴스페이스 리더 양성 사업(NRF-2021-M1A3C2078744)의 지원을 받아 수행된 연구 결과이며 이에 감사드립니다.

References

1. Ryu K, Parrot M, Kim SG, Jeong KS, Chae JS, et al., Suspected seismo-ionospheric coupling observed by satellite measurements and GPS TEC related to the M7.9 Wenchuan earthquake of 12 May 2008, *J. Geophys. Res. Space Phys.* 119, 305–323 (2014). <https://doi.org/10.1002/2014JA020613>
2. Kim E, Kim KN, Mid- and low-latitude earth ionospheric phenomena and current status of research, *J. Space Technol. Appl.* 3, 239–256 (2023). <https://doi.org/10.52912/jsta.2023.3.3.239>
3. Lee C, Lee WK, Division of solar and space environment of KSSS, ionospheric and upper atmospheric observations in Korea, *J. Space Technol. Appl.* 1, 199–216 (2021). <https://doi.org/10.52912/jsta.2021.1.2.199>
4. Maeda J, Heki K, Two-dimensional observations of midlatitude sporadic E irregularities with a dense GPS array in Japan, *Radio Sci.* 49, 28–35 (2014). <https://doi.org/10.1002/2013RS005295>
5. Chu YH, Wang CY, Wu KH, Chen KT, Tzeng KJ, et al., Morphology of sporadic E layer retrieved from COSMIC GPS radio occultation measurements: wind shear theory examination, *J. Geophys. Res. Space Physics.* 119, 2117–2136 (2014). <https://doi.org/10.1002/2013JA019437>
6. Yeh WH, Liu JY, Huang CY, Chen SP, Explanation of the sporadic-E layer formation by comparing FORMOSAT-3/COSMIC data with meteor and wind shear information, *J. Geophys. Res. Atmos.* 119, 4568–4579 (2014). <https://doi.org/10.1002/2013JD020798>
7. 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>
8. Yusupov KM, Bakhmetieva NV, Sporadic E layer with a structure of double cusp in the vertical sounding ionogram, *Atmosphere* 12, 1093 (2021). <https://doi.org/10.3390/atmos12091093>
9. Haldoupis C, Ogawa T, Schlegel K, Koehler JA, Ono T, Is there a plasma density gradient role on the generation of short-scale Farley–Buneman waves? *Ann. Geophys.* 23, 3323–3337 (2005). <https://doi.org/10.5194/angeo-23-3323-2005>
10. Tuo Z, Doumbia V, Coisson P, N’Guessan K, Abdel AK, Variations of the peak positions in the longitudinal profile of noon-time equatorial electrojet, *Earth Planets Space.* 72, 174 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40623-020-01305-z>
11. Kikuchi T, Hashimoto KK, Tanaka T, Nishimura Y, Nagatsuma T, Middle latitude geomagnetic disturbances caused by hall and pedersen current circuits driven by prompt penetration electric fields, *Atmosphere* 13, 580 (2022). <https://doi.org/10.3390/atmos13040580>
12. Ryu K, Lee S, Woo CH, Lee J, Jang E, et al., Science objectives and design of ionospheric monitoring instrument ionospheric anomaly monitoring by magnetometer and

- plasmaprobe (IAMMAP) for the CAS500-3 satellite, *J. Astron. Space Sci.* 39, 117-126 (2022).
<https://doi.org/10.5140/JASS.2022.39.3.117>
13. Lee S, Ryu K, Choi D, Park S, Kim J, et al., Design and testing of an adaptive in-phase magnetometer (AIMAG), the equatorial-electrojet-detecting fluxgate magnetometer, for the CAS500-3 Satellite, *Remote Sens.* 15, 4829 (2023). <https://doi.org/10.3390/rs15194829>
 14. Langmuir I, Mott-Smith HM, Studies of electric discharges in gases at low pressures, *Gen. Electr. Rev.* 27, 449-583 (2024).
 15. Reifman A, Dow WG, Dynamic probe measurements in the ionosphere, *Phys. Rev.* 76, 987-988 (1949). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.76.987>
 16. Ryu K, Lee J, Kim S, Chung T, Shin GH, et al., Characteristics of the plasma source for ground ionosphere simulation surveyed by disk-type langmuir probe, *J. Astron. Space Sci.* 34, 343-351 (2017). <https://doi.org/10.5140/JASS.2017.34.4.343>
 17. Oyama K, DC langmuir probe for measurement of space plasma: a brief review, *J. Astron. Space Sci.* 32, 167-180 (2015). <https://doi.org/10.5140/jass.2015.32.3.167>
 18. Fang HK, Chen WH, Chen AB, Oyama K, The effect of surface contamination of tiny satellite on DC probe ionosphere measurement, *AIP Adv.* 8, 105220 (2018). <https://doi.org/10.1063/1.5052489>
 19. Ryu K, Lee S, Woo CH, Design and validation of impedance probe for platform-independent ionospheric plasma diagnostics, *Curr. App. Phys.* 51, 71-79 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cap.2023.05.003>
 20. Aschenbrenner, H. A. N. S. (1936). Eine Anordnung zur Regisierung rauscher magnetischer Storungen. *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik*, 47(6), 177-181.
 21. Dolginov SS, Zhuzgov LN, Selyutin VA, Magnetometers in the third Soviet earth satellite, *Am. Rocket Soc.* 31, 1329 (1961).
 22. Nishio Y, Tohyama F, Onishi N, The sensor temperature characteristics of a fluxgate magnetometer by a wide-range temperature test for a Mercury exploration satellite, *Meas. Sci. Technol.* 18, 2721-2730 (2007). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/8/050>

Author Information

홍지민 hjm0137@kaist.ac.kr



충남대학교 우주지질학과에서 2022년에 석사 학위를 취득한 후, 2023년부터 KAIST 인공위성 연구소에서 재직 중이다. 현재는 2025년 발사에 정인 차세대중형위성 3호의 우주과학 탑재체 SW개발 및 데이터분석 업무를 수행하고 있다.

김진규 kjk@kaist.ac.kr



2001년부터 KAIST 인공위성연구소에서 위성 시스템 및 전력서브시스템 개발관련 업무를 수행하였으며, 충남대학교 전기공학과에서 2007년 석사학위를 취득하였고, 현재에도 위성 시스템 및 전력서브시스템 개발 업무를 수행하고 있다.

신동윤 yoonshin@perigee.space



2018년 페리지어어로스페이스를 창업하였다. 현재 페리지에서 탑재 질량 200 kg급 민간 우주발사체 “Blue Whale 1” 개발 및 우주시스템 연구개발사업을 수행하고 있다. KAIST에서 2022년 항공우주공학 학사학위를 취득하였고, 동 대학원 석사과정 중에 있다.

차원호 whcha@kaist.ac.kr



KAIST 인공위성연구소에서 위성 구조 연구 개발을 하고 있으며, 2006년 충남대학교 기계설계과 석사 학위를 취득하였으며, 현재 인공위성 구조 개발, 우주 환경시험, 위성 부품 개발 및 큐브위성 발사관과 분리 장치 개발을 수행하고 있다.

천세범 sbchun@perigee.space



2008년 건국대학교 항공우주공학과에서 공학 박사 학위를 취득하였으며, 2020년부터 페리지어어로스페이스에 재직 중이다. 위성 및 관성 항법 관련 연구를 수행 해왔으며, 현재는 발사체 비행 제어 시스템 개발 업무를 수행하고 있다.

박성욱 sopark12@kaist.ac.kr



전북대학교 전산통계학과에서 1996년 석사학위를 취득한 후, 2001년부터 KAIST 인공위성 연구소에서 소프트웨어 개발 및 위성 운용 업무를 수행하였다. 현재 OBC/탑재체 비행소프트웨어 개발, 지상 소프트웨어 개발, 시험 및 위성 운용과 관련된 연구를 수행하고 있다.

육상우 swyouk@perigee.space



2018년 페리지어어로스페이스 창업 당시 최초 멤버로 합류하였으며, 발사체 체계 설계 및 통합 업무를 담당한다. 현재 페리지의 준궤도 시험 발사체 개발 총괄을 맡고 있다. 충남대학교에서 2022년 항공우주공학 학사 학위를 취득했으며, 동 대학원 석사과정 중에 있다.

이승욱 lsu1080@kaist.ac.kr



2024년 충북대학교에서 천문우주학 박사학위를 받고 현재 KAIST 인공위성연구소에서 차세대중형위성 3호 우주과학 탑재체의 플라즈마 검출기와 자기장 측정기 개발을 담당하고 있다.

박수환 shpark1013@kaist.ac.kr



경북대학교 천문대기과학과에서 석사 학위를 취득했으며, 2023년부터 KAIST 인공위성연구소에서 위성탑재체 개발 연구 업무를 수행하고 있다. 현재 차세대중형위성3호 우주과학 탑재체 개발 프로젝트에 참여하여 센서 개발 관련 업무를 수행하고 있다.

유광선 kwangsun@kaist.ac.kr



KAIST 물리학과에서 2000년에 박사를 취득하였으며, 현재 KAIST 인공위성연구소에서 우주 플라즈마 및 과학탑재체 관련 연구를 수행하고 있다. 2025년 발사예정인 차세대중형위성 3호의 과학탑재체 IAMMAP(Ionospheric Anomaly Monitoring by Magnetometer And Plasma-probe: 플라즈마 관측기 및 자력계)의 연구책임자를 역임하고 있다.

김정현 kimjh@kasi.re.kr



충남대학교 우주지질학과에서 우주과학 박사 학위를 취득하였으며, 2019년부터 한국천문연구원 태양우주환경그룹에 재직 중이다. 전리권/고층대기 이론모델을 활용한 다양한 연구를 수행해왔으며, 현재는 그룹의 차세대 우주 환경 변화 연구 프로젝트에 참여하면서 자기권-전리권/고층대기-중층대기 우주환경 통합모델 개발 및 연구 업무를 수행하고 있다.