

연구논문

공유 지상국을 활용하여 획득한 마이크로중력 과학임무 큐브위성의 운영 결과와 교훈

이명규, 박설현[†]

조선대학교 기계공학과

Results and Lessons Learned from the Operation of a Cubesat for the Microgravity Science Mission with Shared Ground Stations

Myung-Kyu Lee, Seul-Hyun Park[†]

Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea



Received: April 2, 2024
Revised: April 22, 2024
Accepted: April 27, 2024

[†]Corresponding author :

Seul-Hyun Park
Tel : +82-62-230-7174
E-mail : isaac@chosun.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

Myung-Kyu Lee
<https://orcid.org/0000-0003-1207-3955>
Seul-Hyun Park
<https://orcid.org/0000-0001-8852-0016>

요약

현재 마이크로중력 환경을 활용한 과학실험은 초 단위 정도의 짧은 시간 동안 실험이 수행 가능한 낙하 탑부터 시간제한이 없는 우주정거장 등 여러 분야에서 수행되고 있다. 하지만 과학 실험에 필요한 긴 시간이 확보된 마이크로중력 환경을 구현하기 위해서는 적지 않은 개발비용과 시간이 소모된다. 따라서 고비용이 수반되는 마이크로중력 환경 실험을 큐브위성에서 수행한다면 저비용 고효율의 이점으로 과학 실험의 다양성과 시간의 제약에서 자유도가 더욱 높아질 것으로 판단된다. 이러한 특징점을 살린 KMSL(Korea Microgravity Science Laboratory) 큐브위성은 마이크로중력 환경에서의 과학 임무를 수행하였던 위성이다. KMSL 위성은 2021년 3월 22일 카자흐스탄 바이코누르 발사기지에서 Soyuz2.1a 발사체에 의해 발사되었고, 약 2개월간 정상적으로 임무를 수행하였다. 본 논문에서는 KMSL 위성의 운영 경험과 발생한 문제에 대한 분석을 바탕으로 마이크로중력 환경에서의 과학 임무를 성공적으로 수행하기 위한 해결책과 교훈을 제시하고자 한다.

Abstract

Currently, investigations in microgravity environments are carried out in a variety of applications, including drop towers, where experiments can be performed for short periods of time, and space stations, where time is not limited. However, producing a microgravity environment for long-term scientific research requires huge development expenditures and efforts. As a result, if the microgravity experiment is carried out on a cubesat, the variety of scientific studies will likely increase even more due to its low cost. The Korea Microgravity Science Laboratory (KMSL) cubesat, which has these features, is a satellite that has carried out microgravity science missions. On March 22, 2021, the KMSL satellite was launched by a Soyuz2.1a from Baikonur in Kazakhstan and operated normally for nearly two months. This article presents results and lessons gained for successfully completing science missions in microgravity based on the KMSL satellite's operational experience.

핵심어: 마이크로중력, 큐브위성, 경험 및 교훈

Keywords: microgravity, cube satellite, lesson learned

1. 서론

우리가 지상에서 경험할 수 있는 중력의 크기를 1 g라고 할 때 우주 환경에서 노출되어 경험할 수 있는 중력의 크기를 마이크로중력으로 정의하며, 10^{-6} g 이하의 중력 크기를 의미한다 [1]. 마이크로중력 환경은 우리가 지구의 중력에 의해 발생하는 부력(대류)으로 인해 관찰되지 않는 새로운 과학적 통찰력을 얻기 위한 중요한 수단을 제공할 수 있다. 현재 마이크로중력과 관련된 연구는 연소, 재료, 생물학, 기초 물리학에 이르기까지 다양한 분야에 걸쳐 적용되고 있다[2,3]. 이는 이전에는 관찰할 수 없었던 프로세스를 발견하고 우리 삶의 다양한 측면을 재구성할 수 있는 새로운 통찰력과 혁신을 제공할 수 있다는 점에서 그 중요성이 강조된다.

국제우주정거장은 마이크로중력 실험실의 역할을 수행하면서 국경을 초월한 과학자 간의 협력과 지식 공유를 촉진했다. 최근에는 민간 우주기업들도 마이크로중력 연구 분야에 뛰어 들고 있다[4]. 민간 우주 기업들은 연구자들을 위한 서비스와 플랫폼을 제공하기 시작하면서 정부 우주 기관을 대신해 마이크로중력 연구의 범위를 넓혀가고 있으며, 이러한 업계의 참여는 혁신을 촉진하여 우주라는 독특한 환경에 접근을 용이하게 하는데 큰 역할을 하고 있다. 하지만, 마이크로중력 환경을 활용하기 위해 우주에서 연구를 수행하는 데에는 여전히 한계점이 존재한다. 가장 눈에 띄는 한계는 우주에서 실험을 수행하는 데 드는 비용이 엄청나게 높다는 점이다. 이러한 재정적 장벽으로 인해 수행할 수 있는 실험의 수와 범위가 제한적이며, 이로 인해 마이크로중력 연구의 전반적인 진전이 제한되고 있다. 또한, 국제우주정거장의 제한된 수용 능력과 실험 슬롯에 대한 치열한 경쟁과 같은 요인으로 인해 마이크로중력 연구 기회도 제한되어 있다는 점이다.

최근 유인 우주탐사에 대한 관심이 증가하면서, 마이크로중력 환경에 노출되는 각종 기계 시스템의 성능검증과 장기간 새로운 환경에 노출될 우주인의 건강에 대한 과학적 데이터의 필요성이 강조됨에 따라 마이크로중력 연구 활동이 급증하고 있다. 이러한 마이크로중력 연구 수요에 대응하여 큐브위성을 포함한 소형 위성의 발전과 확산은 우주에서 실험을 수행할 수 있는 효율적인 플랫폼으로써 서평을 열었다. KMSL(Korea Microgravity Science Laboratory)은 저비용 큐브위성을 활용하여 마이크로중력 궤도 실험 플랫폼의 잠재력을 입증하는 것을 목표로 하였다. 이러한 목표를 실현하기 위해, 조선대학교는 KMSL 큐브위성을 개발하고 2021년 3월 22일 바이코누르 발사기지에서 Soyuz2.1a 발사체로 우주 궤도에 안착 하였다. KMSL 큐브위성은 마이크로중력 환경에서의 연소 실험과 곰벌레(tardigrade) 배양을 통한 생물학 실험을 수행하는 위성으로써 위성의 초기 운용 모드에서는 비행 소프트웨어 부팅, 안테나 전개, 비콘 신호 송신과 같은 기본 작업을 성공적으로 수행하였다. 이후 지상 명령을 통해 연소 실험 임무를 수행하고 일부 이미지 데이터를 수신하는 데도 성공함으로써 큐브위성이 마이크로중력 연구의 플랫폼으로 활용될 수 있는 가능성을 입증하였다. 하지만 위성의 운용이 약 2개월간 지속되던 중 KMSL 큐브위성은 갑작스럽게 작동 불능 상태에 빠졌다. 이렇듯 큐브위성을 마이크로중력 연구의 플랫폼으로 사용하기 위해서는 우주 환경에서 위성의 운용 중에 직면할 수 다양한 문제에 대한 깊은 이해와 대비책의 준비가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 KMSL 큐브위성의 운영 경험과 발생한 문제에 대한 분석을 수행하였고, 이를 기반으로 과학 임무를 성공적으로 수행하기 위한 대비책의 일환으로 위성의 운용 결과를 통해 얻은 교훈을 제시하고자 한다. 위성의 운용 결과와 교훈을 제시하기 위해 먼저 KMSL 큐

브위성의 운용 개념, 위성 시스템, 위성 구성, 위성의 운용 경과 그리고 교신 내용에 대해 서술하였다.

2. KMSL(Korea Microgravity Science Laboratory) 큐브위성

KMSL 위성은 마이크로중력 과학 임무를 수행하는 큐브위성으로, 우주 환경에서 두 개의 과학 임무를 수행할 수 있도록 제작되었다. 첫 번째 과학 임무는 유인우주선의 선실 내 화재에 대한 기초 특성을 분석하기 위해 수행되었다. 이 임무에서는 마이크로중력 환경에서 고체 연료의 점화 특성을 연구하고, 대류 열전달이 없는 조건에서 화재의 전파 및 소멸 현상을 분석하여 불활성 기체의 소화 능력을 평가하고자 하였다. 두 번째 과학 임무는 마이크로중력 환경에서 곰벌레의 생존 및 생활에 관한 연구로, 마이크로중력 환경에서 곰벌레의 생존율을 유전적 특성에 따라 분석하고, 우주 환경이 곰벌레의 생활에 미치는 영향을 연구하고자 하였다.

2.1 운용 개념

KMSL 큐브위성은 효율적인 운용과 시스템 분석을 위해 위성 발사 직후부터 임무 종료까지의 운용 시나리오를 설계하였으며, 이에 위성은 Fig. 1과 Table 1에 제시된 바와 같이 분리 모드(separation mode), 정상 모드(normal mode), 임무 모드(mission mode), 통신 모드(communication Mode), 안전 모드(safe mode)로 총 5가지 모드로 운용된다. 분리 모드는 위성이 발사체로부터 분리된 직후부터 비콘 신호 송신과 각속도 자세 제어까지의 모드이다. 위성은 파드에서 사출 후 분리 스위치(kill switch)에 의해 전력계에서 탑재 컴퓨터로 전원을 공급한다. 탑재 컴퓨터에 전원이 공급되면 비행 소프트웨어가 부팅되고 위성 상태 데이터 수집이 시작된다. 또한, 사출 후 15분이 경과하면 안테나가 자동으로 전개되고 1분 후에 비콘 신호를 지상으로 10초 간격으로 송신하게 된다. 동시에 탑재 컴퓨터는 각속도 자세 제어를

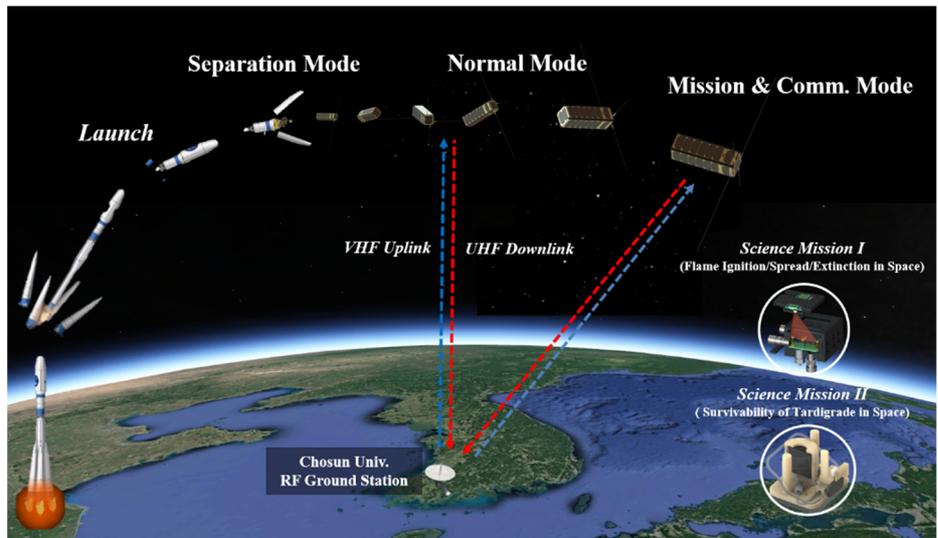


Fig. 1. Operation concept of the Korea Microgravity Science Laboratory (KMSL) cubesat.

Table 1. Summary of each of operation modes

Mode	Description
Separation mode	<ul style="list-style-type: none"> • Separation switch behavior when separating a satellite from the POD • UHF/VHF antenna deployment (15 min. after ejection) • Beacon signal transmit (10 second interval) • De-tumbling control
Normal mode	<ul style="list-style-type: none"> • Satellite commissioning and condition check • Maintain beacon signal transmission and de-tumbling control • Waiting for ground command
Mission mode	<ul style="list-style-type: none"> • Combustion experiment • Biological experiment
Communication mode	<ul style="list-style-type: none"> • Transmission of mission data • Transmission of housekeeping data
Safe mode	<ul style="list-style-type: none"> • Maximize power charging while keeping only main systems running • Reboot the system when a system error is detected

POD, picosatellite orbital deployer; UHF, ultra high frequency; VHF, very high frequency.

시작한다. 비콘 송신과 각속도 자세 제어를 통해 자세 안정화까지 완료되면 위성은 정상 모드로 전환된다. 정상 모드는 자세 안정화 유지, 배터리 충전, 위성 상태 데이터 수집, 지상국 명령 대기를 수행하는 모드이다. 임무 모드와 통신 모드는 모두 정상 모드에서 진입할 수 있도록 설계를 수행하였다. 위성 운용의 대부분은 정상 모드로 유지되며, 임무 모드는 지상국 명령에 의해서만 전환된다. 임무 모드는 마이크로중력 환경에서의 과학 임무를 수행하는 것이 주목적이다. 연소 실험의 경우, 실험을 위해 2개의 카트리지가 사용되며, 각각의 카트리는 지상 명령에 의해 독립적으로 임무를 수행한다. 이때 온도 및 압력 조건을 판단하고, 요구조건 충족 시 연소기와 카메라에 전원이 공급되어 실험을 수행한다. 이후 촬영된 데이터를 저장한 뒤 정상 모드로 전환된다. 생물 육성 실험은 곰벌레를 활성화하기 위해 모듈의 펌프를 사용하여 물을 주입한다. 이후 모듈 내부를 현미경 카메라로 촬영하고 저장한 후 정상 모드로 전환된다. 통신 모드는 위성과 지상국 간의 통신을 수행하는 모드이며, 위성이 획득한 임무 데이터와 위성 상태 데이터(housekeeping data)를 지상으로 송신한다. 아울러 통신 모드에서는 배터리 SoC가 7.8 V(70%) 이상인 경우에만 데이터를 송신하도록 설계하였다. 또한, 데이터 송신 시에는 비콘 신호가 비활성화되며 통신 모드 종료 시 로직에 의해 비콘 신호가 재 활성화된다. 마지막으로 안전 모드는 배터리 SoC가 7.6 V(50%) 미만으로 떨어지면 진입할 수 있도록 하였고 이때, 탑재 컴퓨터와 전력계, 통신계(비콘 신호)를 제외한 모든 시스템의 전원 공급을 중단하고 전력 충전을 가장 우선순위로 두었다. 또한, 비행 소프트웨어에서 시스템

에러를 감지하였을 때도 안전 모드로 진입할 수 있으며, 이때 알고리즘에 의해 시스템을 재부팅하고 에러에 대한 보고를 자동 저장할 수 있도록 설계하였다.

2.2 위성 시스템 및 구성

KMSL 위성은 우주 환경에서 과학 임무를 수행하는데 초점을 맞추어 설계가 수행되었다. 특히 우주 궤도 실험실로써 시스템 재사용이 용이하도록 설계되었으며, 위성 운용의 성공률을 높이기 위해 간결하고 최적화된 시스템 설계에 중점을 두었다. 위성의 시스템 사양은 Table 2와 같다. 표에서 알 수 있듯이 KMSL 위성의 수명은 6개월을 목표로 설계하였고, 과학 임무를 위해 2개의 과학 임무 탑재체를 탑재하였다. 위성의 크기는 3-unit 큐브위성으로 가로, 세로, 높이가 각각 $100 \times 100 \times 340.5$ mm이며, 총 질량은 약 3.6 kg이다. 임무 궤도는 태양 동기 궤도를 따른다. 위성의 과학 임무는 별도의 지향을 요구하지 않기 때문에 2 deg/s 이하의 각속도를 유지하도록 무 지향 각속도 제어(detumbling control)만을 수행한다. 위성 제어 및 데이터 통신을 위해 상향 링크는 초단파(very high frequency, VHF) 대역을 사용하며, 반대로 하향 링크의 경우 극초단파(ultra high frequency, UHF) 대역을 사용하여 데이터를 주고받는다.

상기 시스템을 구성하기 위해 Fig. 2와 같은 구성품을 이용하여 위성을 구성하였다. 위성의 서브시스템 중 구조계(structure), 통신계(communication system, CS) 그리고 전력계(electrical power system, EPS)는 임무 성공 확률을 높이기 위해 비행 이력이 있는 해외 제품을 선정하였다. 우선 구조계는 Endurosat社의 3-unit 구조체를 사용하였으며, 통신계는 ISISpace社의 UHF/VHF 통신 모듈과 전개형 안테나를 사용하였다. 마지막으로 전력계는 30 Wh급 배터리와 전력 변환 및 공급을 위한 전력계 보드로 구성되며, Clyde社의 제품을 사용하였다. 아울러 KMSL의 목표 중 하나인 국내 제품의 검증을 위해 태양전지 패널의 경우

Table 2. System specifications of the KMSL cubesat

Contents	Specification
Life time	6 month
Payload	Combustion experiment module Biological experiment module
Volume	$100 \times 100 \times 340.5$ mm
Mass	3.595 kg
Altitude / orbit	550 km / Sun Synchronous
Altitude control	$< 2^\circ$ (omnidirection)
Interface	USB, UART, I2C, Serial
Communication system	Uplink: VHF (145.835 MHz, 9.6 kbps) Downlink: UHF (437.265 MHz, 9.6 kbps)

KMSL, Korea Microgravity Science Laboratory; UART, universal asynchronous receiver/transmitter; VHF, very high frequency; UHF, ultra high frequency.

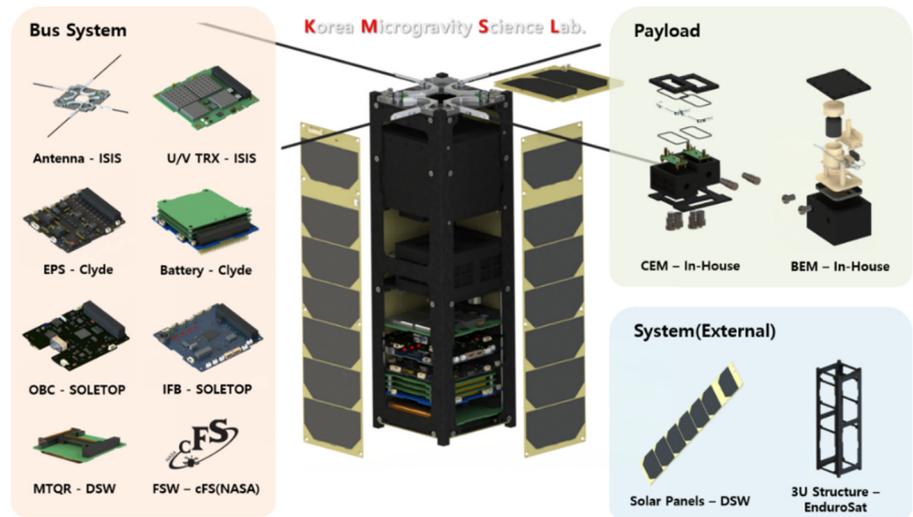


Fig. 2. Overview of hardware and avionics consisting of the Korea Microgravity Science Laboratory (KMSL) cubesat.

국내 업체인 드림 스페이스 월드의 제품을 장착하였다. 과학임무 수행을 위한 탑재체인 연소 실험 모듈(combustion experiment module, CEM)과 생물 육성 실험 모듈(biological experiment module, BEM) 모두 위성 개발팀에서 자체 제작을 수행하였다. 명령 및 데이터 처리계(command & data handling, C&DH)는 온 보드 컴퓨터(on board computer, OBC), 인터페이스 보드(interface board, IFB)로 구성되며, 국내 제조사인 (주)솔탑의 제품을 사용하여 구성하였다. 자세제어계(attitude determination and control system, ADCS)의 경우 각속도 제어만을 수행하기 때문에 국내 업체인 드림 스페이스 월드의 자기 토크(magnetorquer, MTQR)를 사용하였다. 마지막으로 상기 구성품들의 제어를 위한 비행 소프트웨어는 미국 항공 우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)에서 개발한 오픈 소스 플랫폼인 cFS(Core Flight Software)를 사용하였다.

3. KMSL(Korea Microgravity Science Laboratory) 큐브위성 운용 결과

3.1 운용 경과

KMSL 위성은 2021년 3월 22일에 카자흐스탄 바이코누르 발사기지에서 Soyuz2.1a 발사체로 발사가 완료되었으며, 네트워크 개방형 지상국인 SatNOGS(Satellite Networked Open Ground Station)를 통해 에스토니아 공화국에서 최초로 비콘 신호를 수신 및 복조에 성공하였다. 이후 23일 한국 시간 23시 44분경 지상국에서 송신된 명령에 의해 위성 상태 정보를 수신하여 첫 교신에 성공하였다. 이후 임무 시나리오에 따라 위성을 정상적으로 운용하였다. 이 시기에 안전 모드의 진입이나 OBC 및 비행 소프트웨어의 재시동 없이 양호한 상태로 정상모드-임무모드-통신모드 간 모드 변환을 성공적으로 유지하였다. 또한, 운용 분석 결과를 바탕으로 국내에서 제작된 부품도 실제 우주 환경에서 정상적으로 작동하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3). 하지만, 2021년 5월 21일 이후부터 통신이 두절되었고, 문제 해결을 위해 통

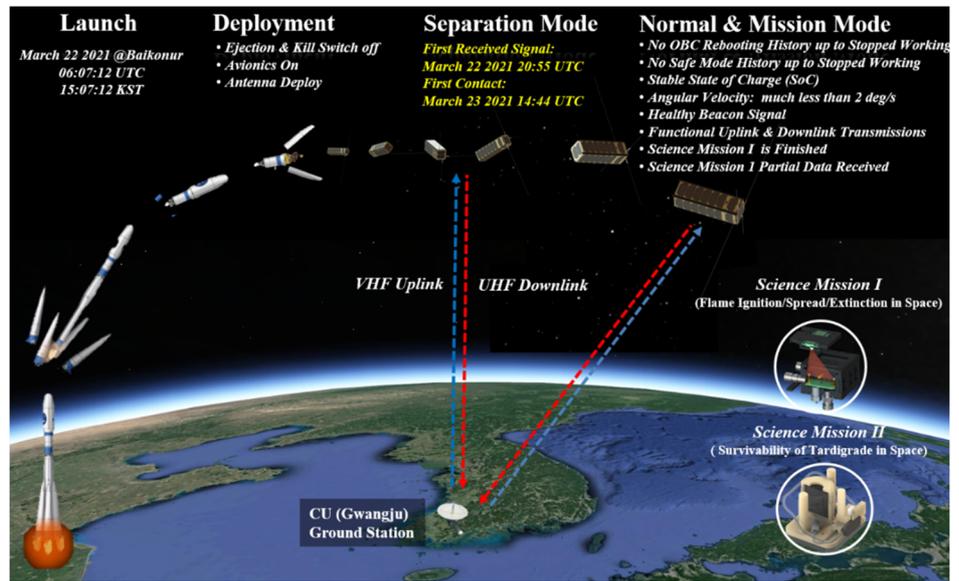


Fig. 3. Summary of Korea Microgravity Science Laboratory (KMSL) operations results.

신계, 비행 소프트웨어 및 시스템 재부팅 명령을 송신하였으나, 위성이 응답하지 않아 공식적으로 위성의 운용을 종료하였다.

3.2 비콘 신호 수집 결과 및 분석

위성의 비콘 신호는 지상 명령과 무관하게 위성의 작동 및 존재를 알릴 때 사용되며, 일반적으로 초 간격으로 신호(데이터)를 송신한다. KMSL 위성의 경우 10초 간격으로 비콘 신호를 송신하였으며, 비콘 신호 정보는 Table 3과 같다. 표에서 알 수 있듯이 비콘 신호에 담긴 데이터는 위성 콜사인, 모드 상태, 부팅 횟수, 안테나 전개 시도 횟수 및 상태, 비행 소프트웨어 부팅 이후 시간, TRX uptime 및 offset, 그리고 위성 전력량 등이 있다.

Table 3. Information of beacon transmitted from the KMSL cubesat

Data	Type	Bit
Satellite Callsign	Char	32
Mode Status	Char	8
Flight Software Boot Count	Char	8
Antenna Deploy Count	Char	8
Antenna Deploy Status	Uint	16
Flight Software Boot Time	Char	48
TRX Uptime	Uint	32
TRX Offset	Uint	16
Battery Voltage	Uint	16

KMSL, Korea Microgravity Science Laboratory; TRX, transceiver.

일반적으로 큐브위성은 아마추어 무선(HAM) 통신 방식과 주파수 대역을 사용하기 때문에, 아마추어 지상국에서 신호를 수신할 수 있다. SatNOGS는 전 세계 아마추어 무선 통신 중사자들이 협력하여 지상국 네트워크를 구축하고 신호를 수신하여 데이터화하는 오픈 플랫폼이다. 이러한 플랫폼을 활용하여 KMSL 위성이 한반도 외의 지역을 지날 때 송신하는 비콘 신호를 수신하여 위성이 안정적으로 운용되고 있는지 확인할 수 있었다. Fig. 4는 KMSL 위성의 비콘 신호를 수신한 지상국의 위치를 표기한 그림이다.

이러한 지상국 네트워크는 특히 위성의 초기 운용 시 매우 유용하게 사용될 수 있다. 실제로 KMSL 위성의 경우 위성의 사출 후 2021년 3월 22일 20시 50분(UTC)에 위성의 첫 번째 신호를 Fig. 5(a)와 같이 수신할 수 있었다. 수신된 데이터의 복조를 통해 산출된 데이터(Hex)를 취합하고 정리하기 위해 Fig. 5(b)와 같은 디코더를 개발하여 해당 데이터를 가시화하였다. 그 결과 운용 시나리오에 따라 정상적으로 안테나가 전개되었고 이후 비콘 신호가 송신되고 정상 모드로 진입한 것을 확인할 수 있었다.

그러나 KMSL 위성의 경우, 각속도 감쇠 제어를 통해 각속도가 2 deg/s 이하로 진입되어야 로직에 따라 정상 모드로 전환이 이루어진다. 이는 위성의 질량 중심이 X축 -2.1 mm, Y축 -0.8 mm, Z축 -1.52 mm로 형상 중심에서 크게 벗어나지 않았기 때문에, 사출 시 초기 각운동량이 높지 않아 제어 조건인 2 deg/s 이상에 진입하지 않았고, 따라서 자기 토커가 초기에 작동하지 않고 정상 모드로 바로 전환된 것으로 판단된다. 아울러 KMSL 위성의 비콘 신호에는 각속도 정보가 없어 상기 기술된 내용을 명확히 판단할 수는 없지만, 4월 4일부터 5월 16일까지 수신된 위성의 각속도 데이터를 Fig. 6과 같이 수신한 결과, 위성의 전체 운용 기간 동안 각속도가 1 deg/s 정도를 유지하였다. 따라서 제어 조건에 진입하지 않아 자기 토커가 작동하지 않았음을 알 수 있다.



Fig. 4. Location of shared ground stations on the Satellite Networked Open Ground Station (SatNOGS) network for Korea Microgravity Science Laboratory (KMSL) beacon reception.

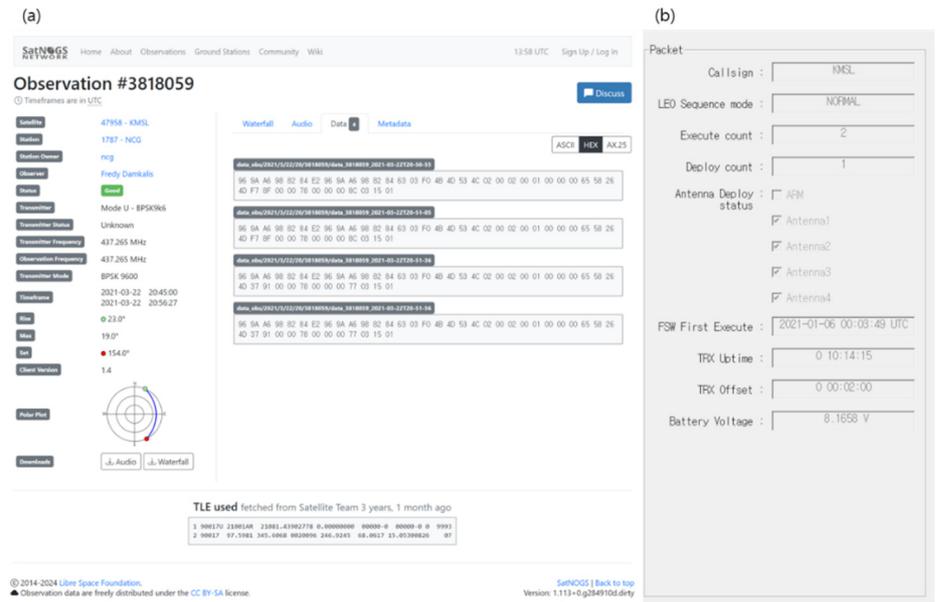


Fig. 5. First received beacon signal released from the Korea Microgravity Science Laboratory (KMSL) cubesat [5]. (a) record of beacon signals received on SatNOGS, (b) beacon signal demodulated by KMSL beacon decoder.

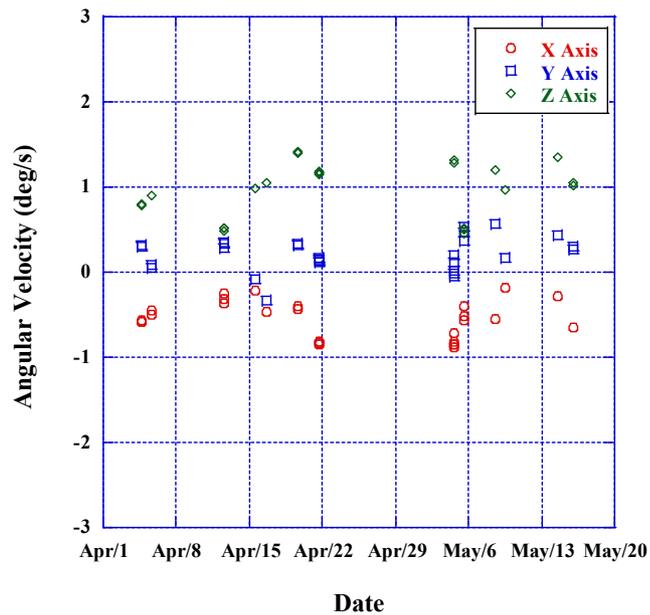


Fig. 6. Angular velocity data received from Korea Microgravity Science Laboratory (KMSL) cubesat.

3.3 양방향 교신 결과

KMSL 위성의 경우 GPS가 없어 시간 동기화를 명령을 통해 수행해야만 했다. 따라서 비행 소프트웨어 부팅 시간이 발사체 탑재 전 이루어진 시험 시간인 2021년 3월 22일 10:07:54 UTC로 기록되어 있었고 이를 지상 명령을 통해 변경하였다. 이후 지상국 네트워크에 수신된

비콘 신호 데이터를 확보하였고, 비콘 디코더를 통해 Fig. 7과 같이 가시화하였다. 그 결과 위성의 사출 시간에 비행 소프트웨어가 동작된 것으로 변경됨을 확인할 수 있었다.

KMSL 위성의 연소 실험의 경우, 실험을 위해 2개의 카트리지가 탑재되었다. 각각의 카트리지는 지상 명령에 의해 독립적으로 임무를 수행하며, 온도 및 압력 조건이 충족되면 연소기와 카메라에 전원이 공급되어 실험을 수행한다. 이때 이미지의 빠른 전송과 저장 용량을 고려하여 촬영된 데이터를 제이펙(Joint Photographic Experts Group, JPEG) 이미지 형태로 저장하도록 설계를 수행하였다.

위성의 운용 기간 중 수신된 연소 실험 탑재체의 상태 데이터는 Fig. 8과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 2개의 카트리지 모두 임무 설계 요구 조건 중 하나인 탑재체의 내부온도(~40℃)를 만족함을 확인할 수 있었다. 압력 조건의 경우 첫 번째 카트리지가 내부 기밀 상태를 안정적으로 유지하지는 못하였으나, 요구 조건(~0.3 atmabs)을 초기에 만족하여 Fig. 9에서와 같이 2개의 카트리지 모두 지상 명령에 의해 실험을 완료한 것을 확인할 수 있었다. KMSL 위성은 운용 과정에서 일부 이미지 데이터를 수신하는데 성공하였다. 하지만, 해당 데이터를 분석한

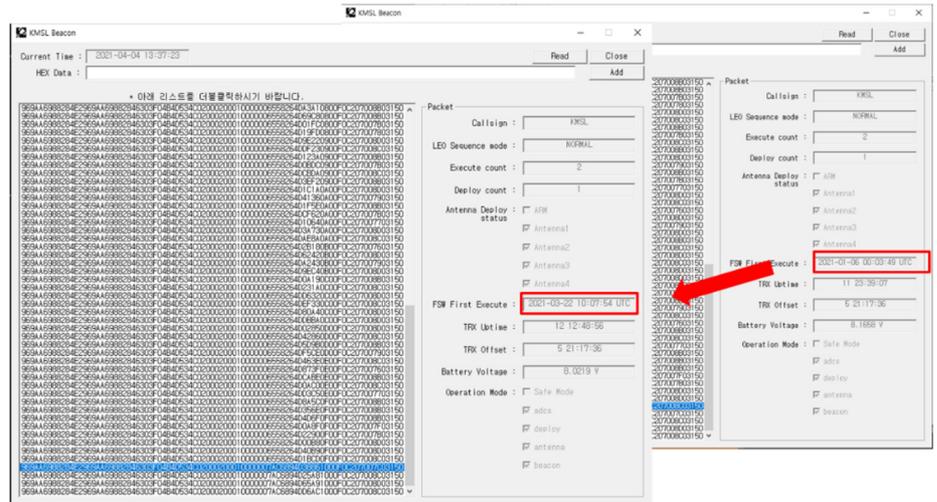


Fig. 7. On board computer (OBC) up-time synchronization process through telecommands.

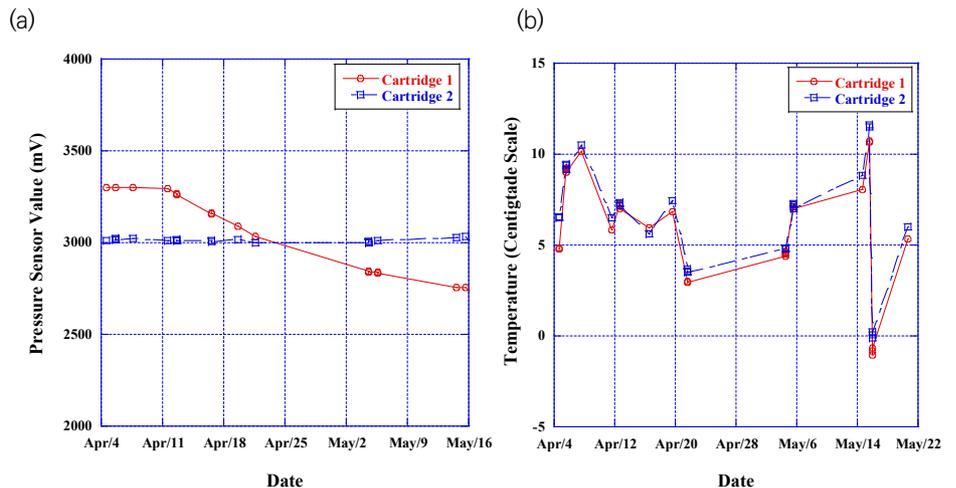


Fig. 8. Combustion experiment status data received from Microgravity Science Laboratory (KMSL) cubesat. (a) received pressure sensor data, (b) received temperature data.

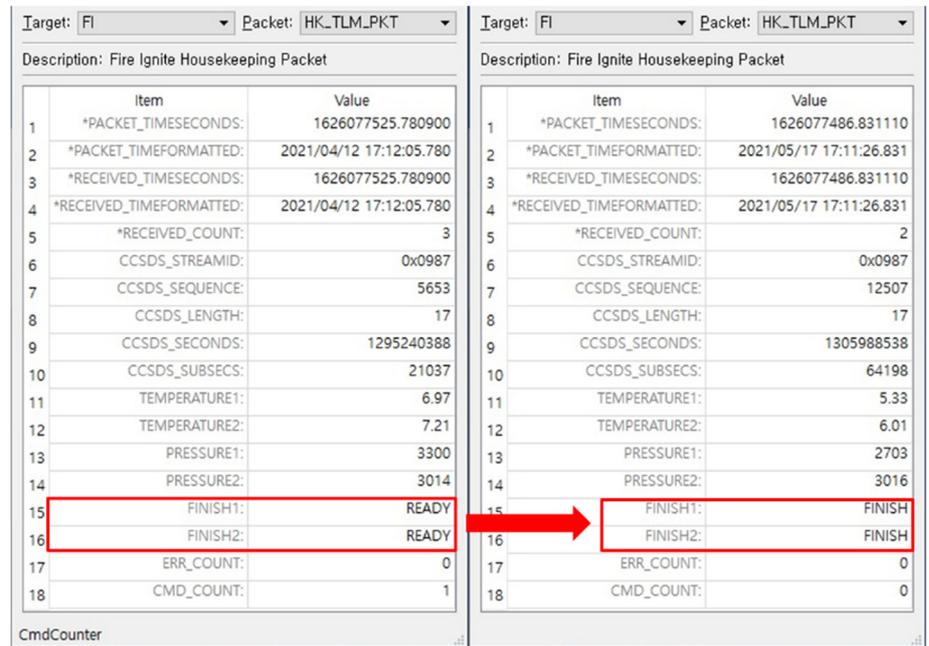


Fig. 9. Combustion experiment results received from Microgravity Science Laboratory (KMSL) cubesat.

결과, 점화 전 이미지로 판단되었다. 이후 추가로 일부 이미지를 수신하였으나, 상기 기술한 바와 같이 KMSL 위성의 연소 실험 데이터는 제이팩 형식으로 저장된다. 제이팩 형식은 데이터 전송과 저장에 이점이 있지만, 데이터 일부가 유실되면 이미지가 왜곡되거나 누락된 영역이 발생할 수 있다. 따라서 파일이 완전히 수신되지 않은 경우, 압축된 데이터가 완전하지 않을 수 있으며, 이는 이미지를 제대로 해독할 수 없게 만들 수 있다. 실제 KMSL 위성도 추가로 수신한 데이터가 불완전하여 실험 결과를 판독할 수 없었고, 이후 후술할 문제에 의해 위성의 운용을 종료할 수밖에 없었다. 따라서 저장 용량을 고려하여 제이팩 이미지를 저장하고 송신한다고 가정하면, 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 위성과 같이 한 장의 이미지를 여러 개로 분할하여 송신하는 방식을 고려해 볼 필요가 있다고 생각된다. 이렇게 함으로써 데이터 일부 손실에도 불구하고 전체 이미지를 복구할 수 있는 가능성을 높일 뿐 아니라, 실험 결과를 신속하게 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 위성 동작 중단: 원인 및 교훈

3.4.1 통신계 이슈

KMSL 위성은 발사 및 사출 당일인 2021년 3월 22일부터 2021년 4월 22일까지, SatNOGS의 비콘 신호 수신 및 개발팀과의 양방향 교신을 통해 정상적으로 운용되어 임무를 수행했다. 그러나 4월 23일 이후, 지상 명령에 의해 위성의 제어가 중단되었고, 이에 따라 SatNOGS의 기록을 확인한 결과, Fig. 10과 같이 위성의 비콘 신호가 더 이상 수신되지 않는 것을 확인하였다.

위성의 통신 불능 시, 회복 프로토콜이 준비되어 있었다. 해당 프로토콜은 비콘 설정 초기화, 통신 모듈 초기화, 비행 소프트웨어 초기화, 시스템 초기화(reset EPS)의 순서대로 진행할

3989679	KMSL	437.265 MHz	BPSK 9600	2021-04-23 07:15:01 2021-04-23 07:27:17		Fredy Damkalis	1920 - VAGRPI Alberta Canada.
3989667	KMSL	437.265 MHz	BPSK 9600	2021-04-23 05:46:05 2021-04-23 05:58:16		Fredy Damkalis	853 - NewUlm-UHF-2
3989664	KMSL	437.265 MHz	BPSK 9600	2021-04-23 04:06:59 2021-04-23 04:19:14		Fredy Damkalis	432 - kc1fha
3989673	KMSL	437.265 MHz	BPSK 9600	2021-04-23 04:06:20 2021-04-23 04:18:34		Fredy Damkalis	1461 - VE2DSK-VHF-UHF
3989676	KMSL	437.265 MHz	BPSK 9600	2021-04-22 23:17:23 2021-04-22 23:29:36		Fredy Damkalis	1663 - DK05B-UHF-Omni
3989660	KMSL	437.265 MHz	BPSK 9600	2021-04-22 23:17:02 2021-04-22 23:29:18		Fredy Damkalis	40 - CGBSAT-UHF
3990903	KMSL	437.265 MHz	BPSK 9600	2021-04-22 21:49:08 2021-04-22 21:52:33		sp7thr	2012 - SP7THR-UHF

Fig. 10. Microgravity Science Laboratory (KMSL) cubesat beacon signal recording from April 22nd to 23rd, 2021 [6].

예정이었다. 그러나 워치독 타이머의 작동을 통해 시스템이 초기화될 수 있었기 때문에, 대기 하면서 프로토콜을 다시 한번 점검하였다. 그 후, 4월 25일부터 27일까지 비콘 초기화 명령을 송신했으나 응답이 없어 28일부터 30일까지는 통신 모듈 소프트웨어 초기화 명령을 송신하였다. 이후 마지막으로, 통신 모듈의 하드웨어 초기화 명령을 송신하여 5월 3일 자정부터 위성이 다시 정상적으로 작동하는 것을 Fig. 11과 같이 확인할 수 있었다.

3.4.2 우주 방사선 이슈

위성이 궤도에서 임무를 수행하는 동안, 위성 버스의 각 서브시스템에서 발생하는 오작동이나 갑작스러운 멈춤 현상의 중요한 원인으로 우주 방사선 환경이 크게 작용하는 것으로 알려져 있다[7]. 우주 환경에서의 방사선은 심우주로부터의 고에너지 우주 입자(galactic cosmic ray), 태양으로부터의 고에너지 우주입자(solar cosmic ray), 지구 자계에 포획된 고에너지 입자 띠(Van Allen Radiation belts, 밴 앨런 벨트) 등으로 구성된다[8]. 이들 방사선은 주로 양성자로 이루어져 있으며, 약 85%를 차지한다. 더불어 이러한 우주 방사선은 지구의 대기권과 상호 작용하여 2차 우주 방사선을 생성하며, 이러한 과정에서 충돌로 인해 중성자, 알파 입자, 베타 입자, 감마 선 등 다양한 2차 방사선이 발생시킨다. 우주 방사선 환경에 노출 되면 위성의 전자품에 설치된 반도체 소자들, 특히 메모리와 같은 부품이 주로 영향을 받는다. 지구 주변의 밴 앨런 벨트와 태양 및 심우주에서 발생하는 양성자, 중성자, 중이온, 알파 입자

4044398	KMSL	437.265 MHz	BPSK 9600	2021-05-03 15:24:59 2021-05-03 15:37:36		Fredy Damkalis	1093 - LU1KCQ Home
4044384	KMSL	437.265 MHz	BPSK 9600	2021-05-03 14:52:42 2021-05-03 15:05:18		Fredy Damkalis	158 - VK6SAT - UHF
4044390	KMSL	437.265 MHz	BPSK 9600	2021-05-03 10:56:19 2021-05-03 11:08:39		Fredy Damkalis	555 - CT1ETE
4044388	KMSL	437.265 MHz	BPSK 9600	2021-05-03 09:23:46 2021-05-03 09:36:06		Fredy Damkalis	519 - JO52
4044400	KMSL	437.265 MHz	BPSK 9600	2021-05-03 09:21:50 2021-05-03 09:34:11		Fredy Damkalis	1298 - primoz
4044412	KMSL	437.265 MHz	BPSK 9600	2021-05-03 09:21:30 2021-05-03 09:33:50		Fredy Damkalis	2128 - 9A3XX

Fig. 11. Microgravity Science Laboratory (KMSL) cubesat beacon signal recorded on May 3, 21 [6].

등의 우주 방사선은 메모리의 민감한 부분에 고장을 유발하거나 단일 이상 현상(single event effect, SEE)을 일으켜 시스템 오작동을 유발할 수 있다. 다행히도, 큐브위성은 주로 저궤도에서 운용되기 때문에 중·대형위성이 운용되는 중궤도나 정궤도에 비해 SEE가 발생할 가능성이 낮아지는 것으로 알려져 있다[8]. 그러나 저궤도에서도 양성자 방사선 벨트가 지구 자기장의 영향으로 남 대서양 지역에 낮게 분포하는 저궤도 근처를 위성이 지날 때 잦은 고장을 일으키는 경우가 있다. 이 특정 지역을 남 대서양 이상 지역(South Atlantic anomaly, SAA)이라고 한다[9]. Fig. 12는 위성의 SEE 발생 빈도를 보여주는데, 다른 지역에 비해 SAA 지역을 통과할 때 SEE 발생이 집중되는 것을 확인할 수 있다.

KMSL 위성은 2021년 5월 21일 이후부터 지상 관제 시설에서 보낸 명령이 수신되지 않는 것을 확인하였다. 따라서 해당 시각의 궤도를 분석한 결과, 위성이 남 대서양 이상 지역 지역을 지나는 것을 Fig. 13과 같이 확인할 수 있었다. 마지막 교신 당일 지상국으로 전달된 위성의 SoC는 80% 이상으로 양호하였고, 다른 특이점이 발견되지 않은 상태에서 통신이 두절되었기 때문에 우선 이전에 발생한 통신계의 비정상 작동을 의심하였다. 따라서 비콘 설정 초기화, 통신 모듈 초기화, 비행 소프트웨어 초기화, 시스템 초기화(reset EPS)의 순서대로 명령을 송신하였으나, 위성의 응답이 없어 공식적으로 운용을 종료하였다.

3.4.3 교훈과 향후 개선 방안

KMSL 위성은 2021년 5월 21일 남 대서양 이상 지역을 지난 이후로 위성의 운영에 문제가 발생하였다. 이를 해결하기 위해 프로토콜에 따라 많은 노력을 기울였으나, 위성이 회복하지 못하면서 위성의 운용이 종료되었다. 따라서 큐브 위성 또한 남 대서양 이상 지역에서 집중적으로 발생하는 SEE에 대한 대책을 수립할 필요가 있다고 판단된다. 중·대형 위성에 비해 투입되는 예산이나 개발 기간 등에 있어 제약 사항이 큰 큐브위성의 개발 특성을 고려해 보면, 현실적인 큐브위성의 SEE 대책은 가용 예산 범위 내에서 최대한 비행 이력이 있는 서브 시스템 전장품을 선택하거나 TID 테스트 결과를 제공하는 전장품을 선정하는 것이다. 또한,

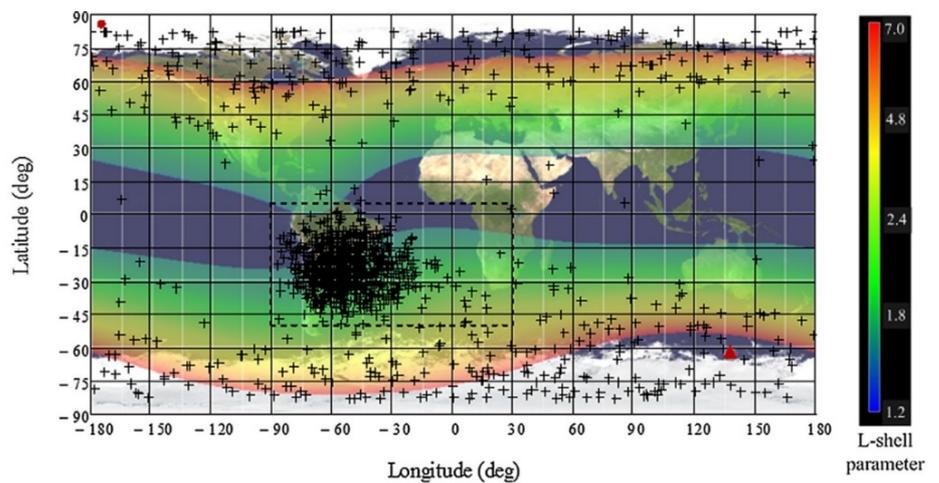


Fig. 12. Frequency of single event effect (SEE) occurrence in South Atlantic anomaly (SAA) region [9].

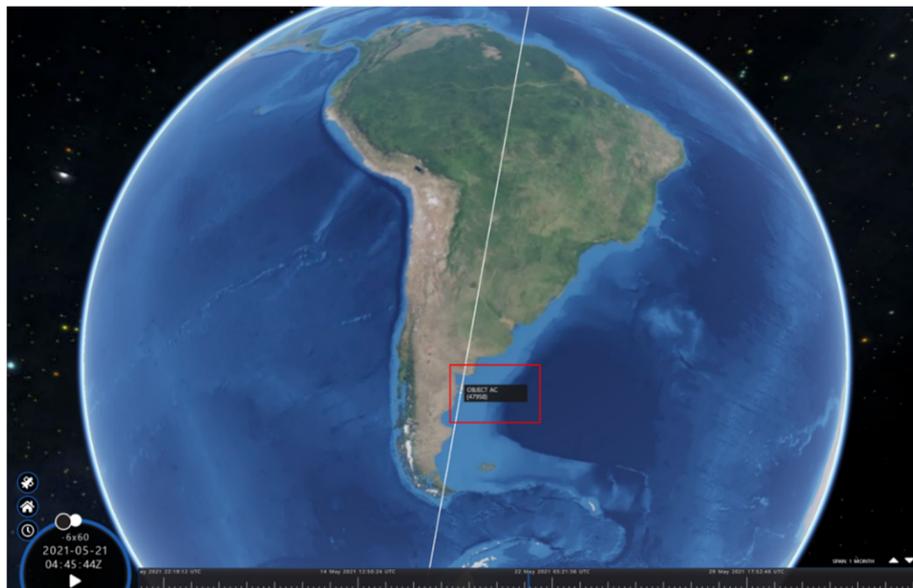


Fig. 13. Orbital position of Microgravity Science Laboratory (KMSL) cubesat on May 21, 2021 [10].

운용 중 서브시스템의 초기화를 통한 메모리 오류의 회복(초기화)을 대안으로 고려해야 한다. 이를 위해서는 비행 소프트웨어 상에서 주기적으로 시스템을 초기화할 수 있도록 구현되어 있거나 지상 명령에 의해 실행될 수 있도록 로직을 마련해야 한다. 결국 상기 언급된 시스템의 초기화는 위성 버스를 구성하는 전체 탑재체 및 모든 서브시스템의 초기화, 비행 소프트웨어의 재시작을 의미한다. 하지만, 위성의 주요 핵심 부품의 재시작은 위성의 운영에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 강건한 재시동 프로토콜의 설계가 필요하다고 판단된다. 따라서 비행 소프트웨어의 로직은 시스템의 초기화 실행으로 발생할 수 있는 상황들에 대처할 수 있도록 설계되어야 한다. 예를 들어 전력계 초기화를 통해 비행 소프트웨어가 재시작될 때는 GPS가 없는 위성의 경우 시간 동기화가 되지 않는 상황이 발생한다. 이로 인해 다른 서브시스템들이 영향을 받는지 확인이 이루어져야 한다. 또한, 안테나와 태양 전지판과 같이 이미 전개가 이루어진 경우, 상태 값을 확인하고 다음 단계로 진행할 수 있도록 설계되어야만 한다. 아울러 전력계의 초기화에 의해 크게 영향을 받을 수 있는 부분은 파일 쓰기인데 초기화 전에 생성된 위성의 상태정보 데이터의 파일에 덮어쓰는 경우가 있는지 확인해야 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결론

KMSL 위성은 2021년 3월 22일 바이코누르에서 성공적으로 발사되었고, 국내 지상국으로 비콘 신호 수신과 위성-지상국 간의 데이터 송수신을 원활하게 수행하였다. 위성은 임무 시나리오에 따라 발사관에서 사출된 직후 시스템 부팅, 비행 소프트웨어 실행, 안테나 전개, 비콘 송신까지의 분리모드(separation mode)를 성공적으로 마무리하고 정상 모드(normal mode)로 진입하였다. 이후 지상 명령에 의해 위성의 상세 상태정보(house keeping, HK)를 송신하는 통신모드(communication mode)와 과학 임무를 수행하는 임무 모드(mission mode)를 정상적으로 수행하였다. 발사 이후 약 2개월 동안 KMSL 초소형위성은 안전모드의

진입이나 OBC 및 비행 소프트웨어의 재시동 없이 양호한 상태로 정상모드-임무모드-통신모드 간 모드 변환을 성공적으로 유지하였다. 운용 분석 결과를 바탕으로 국내에서 제작된 avionics도 실제 우주 환경에서 정상적으로 작동하는 것을 확인할 수 있었다. 다만, 자기 토커의 경우 사출된 KMSL 위성의 3축 각속도가 모두 제어 조건인 2 deg/s에 진입하지 않아 운용 중에 작동하지 않았다. 이러한 성과는 마이크로중력 환경에서 큐브위성을 활용한 연구에 대한 잠재력을 입증하였다. 그러나 갑작스럽게 발생한 작동 불능 상태로 인해 정상적인 위성의 임무 수행이 약 2개월로 제한되었다는 한계가 존재한다. KMSL 위성의 작동 불능은 남 대서양 이상 지역의 직·간접적 영향으로 인한 통신 보드의 송수신 기능 오작동(malfunction)으로 추정되며, 위성 운영기간 중 통신 보드의 송수신 기능의 오작동은 지상국 명령에 의한 위성 시스템의 복구(정상화)도 무력화시킬 수 있으므로 핵심 부품(통신계/전력계)의 주기적/간헐적 재시동과 같은 SEEs 대책이 필요하다. 다만, 주요 핵심부품의 재시동은 위성의 운영에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 강건한 재시동 프로토콜 설계가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부) 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(no. RS-2024-00337166, 메타데이터 학습을 통한 생성형 AI 기반 위성 정보 복합분석 및 공급활용 플랫폼 개발).

References

1. Barmatz M, Hahn IS, Lipa JA, Duncan RV, Critical phenomena in microgravity: past, present, and future, *Rev. Mod. Phys.* 79, 1-52 (2007). <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.79.1>
2. Sharp ML, Dietrich DL, Motil BJ, Microgravity fluids and combustion research at NASA Glenn Research Center, *J. Aerospace Eng.* 26, 439-450 (2013). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000293](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000293)
3. Benoit MR, Klaus DM, Microgravity, bacteria, and the influence of motility, *Adv. Space Res.* 39, 1225-1232 (2007). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.10.009>
4. Go JW, There's a reason for the biopharma 'space rush'... space medicine research is 'booming' (2023) [Internet], viewed 2024 Apr 27, available from: <https://m.dongascience.com/news.php?idx=59264>
5. SatNOGS, Observation #3818059 (2021) [Internet], viewed 2024 Apr 27, available from: <https://network.satnogs.org/observations/3818059/>
6. SatNOGS, Observations (2021) [Internet], viewed 2024 Apr 27, available from: <https://network.satnogs.org/observations/?norad=47958&page=185>
7. Koo IH, Lee MK, Park SH, Lessons and countermeasures learned from both domestic and foreign CubeSat missions, *J. Space Technol. Appl.* 3, 355-372 (2023). <https://doi.org/10.52912/jsta.2023.3.4.355>

8. Yi YS, Jeong SK, Hwang IR, Yang YS, Lee ML, et al., ICT device impacts and development trends on cosmic radiation environment, J. Electron. Telecommun. Trend. Res. 37, 21-29 (2022). <https://doi.org/10.22648/ETRI.2022.J.370203>
9. Christoph N, Boettcher M, Mohr U, Gaisser S, Alvarez Rua M, et al., Single event upset investigations on the 'Flying Laptop' satellite mission, J. Adv. Space Res. 67, 2000-2009 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.12.032>.
10. Spaceaware, Satellite catalog (n.d.) [Internet], viewed 2024 Apr 27, available from: <https://spaceaware.io/>

Author Information

이 명 규 leemg0214@chosun.kr



조선대학교 기계시스템공학과에서 2022년 석사 학위를 취득하고, 현재 동 대학교에서 박사과정에 재학 중이다. 제4회 큐브위성 경연대회에 참여하여 KMSL 큐브위성의 설계 및 지상 관제를 수행하였으며, 현재는 제6회 큐브위성 경연대회에 선정되어 개발중인

CPSat의 시스템 엔지니어링 등 큐브위성에 대한 다양한 프로젝트에 참여하고 있다.

박 설 현 isaac@chosun.ac.kr



2007년 미국 Drexel 대학 기계공학과에서 박사학위를 취득하고 2010년까지 미국 국립표준기술원(National Institute of Standards and Technology, NIST)에서 박사후 연구원으로 국제우주정거장 연소실험 탑재체 운용 및 해석연구에 참여하였다. 이후 2013년까지

한국항공우주연구원 선임연구원으로 재직하던 뒤, 현재는 조선대학교 기계공학과에서 유인우주 가압모듈 화재안전시스템, 우주정거장 과학 탑재체, 초소형위성 설계/제작을 포함한 우주 응용 시스템에 관련된 연구를 수행하고 있다.