

http://dx.doi.org/10.17703/JCCT.2024.10.4.589

JCCT 2024-7-68

Sounding Rocket 통신 시스템에서의 LTE-Cat.M1 사용 적합성 시험

LTE-Cat.M1 Conformity Test in Sounding Rocket Communication Systems

이승환*, 김태훈**, 김혜민***, 김다완****

Seung-Hwan Lee*, Tae-Hoon Kim**, Hyemin Kim***, Da Wan Kim****

요약 본 연구는 LTE-Cat.M1 모듈을 사용하여 Sounding Rocket LTE 통신 시험 결과를 소개한다. 개발된 LTE 데이터 송수신 시스템은 임무탑재장비와 지상관측장비로 구성되며, 10 Hz의 속도로 일정하게 임무탑재장비로부터 데이터를 송신하여 지상관측장비에서 수신 시 측정되는 데이터 사이 시간을 바탕으로 지연율을 확보하였다. 실제 비행 시험의 정확도를 높이기 위하여 지상 네트워크 지연율 시험과 하드웨어 내부 지연율 시험, 지상 시험을 수행하였다. 비행 시험 결과 상승 단계에서 핸드오버에 실패하여 13초간 통신이 유실되었음을 확인하였고, 이후 낙하산이 전개되어 일정한 위치 변위를 가진 상황에서 통신이 다시 연결됨을 확인하였다. 최종적으로 LTE-Cat.M1 기술은 Sounding Rocket 임무 중 하강 단계 관측 임무나 데이터 백업에 사용할 수 있을 것으로 기대한다.

주요어 : 사운드링 로켓, 통신 시스템, 항공전자, 엘티이

Abstract In this paper, we introduce the results of the Sounding Rocket LTE communication test using the LTE-Cat.M1 module. The developed LTE data transmission/reception system consists of Mission-Mounted Equipment(Payload) and Ground Observation Equipment(GOE), and the delay rate was secured based on the time between data measured when received from the GOE by constantly transmitting data from the Payload at a speed of 10 Hz. In order to increase the accuracy of the actual flight test, ground network delay rate tests, hardware internal delay rate tests, and ground tests were performed. As a result of the flight test, it was confirmed that the handover failed in the upward phase and the communication was lost for 13 seconds, and then the parachute was deployed and the communication was reconnected in a situation with a constant positional displacement. LTE-Cat.M1 technology is expected to be utilized for descent phase observation missions or data backup during Sounding Rocket missions.

Key words : Sounding Rocket, Communication System, Avionics, LTE, Cat.M1

I. 서론

근래에 들어 기술의 발전과 항공우주 분야의 개척이

진행되며, Blue Origin과 SpaceX, Virgin Galactic 등 다수의 민간 기업들이 우주 개발 사업을 추진하고 기존 까지 존재하지 않았던 새로운 기술 확보와 시도를 통해

*준회원, 한국교통대학교 전자공학과 학부과정 (제1저자)

**준회원, 한국교통대학교 항공기계설계학과 석사과정 (공저자)

***정회원, 한국교통대학교 항공기계설계학과 부교수 (교신저자)

****정회원, 한국교통대학교 전자공학과 조교수 (교신저자)

접수일: 2024년 4월 20일, 수정완료일: 2024년 5월 20일

게재확정일: 2024년 6월 10일

Received: April 20, 2024 / Revised: May 20, 2024

Accepted: June 10, 2024

****Corresponding Author: dawankim@ut.ac.kr

Dept. of Electronic Engineering,

***Corresponding Author: enok2695@ut.ac.kr

Dept. of Aeronautical&Mechanical Design Engineering,

Korea Nat'l Univ. of Transportation, Korea

국제적으로 항공우주 분야의 관심과 연구가 증가하고 있다[1-3].

특히나 통신기술의 발전으로 한정된 데이터만 저속 실시간으로 받아올 수 있었던 과거 환경과 달리, 차세대 위성 통신을 통해 비행 프로세스 중 수많은 센싱 데이터나 고화질 비행 영상을 실시간으로 받아올 수 있게 되었다[4].

Sounding Rocket이란 과학로켓으로도 불리며, 페이로드를 탑재하여 포물선 궤도를 따라 짧은 임무를 수행하는 로켓으로, 궤도 우주 공학에서 높은 기술 준비성을 달성하고자 하는 항공우주 산업에서 주목받고 있다[5]. Sounding Rocket에서 사용하는 센싱 데이터 확보 기술에는 크게 내부 저장 방식과 통신 전송 방식이 있다. 내부 저장 방식은 가장 많이 사용되는 방식으로, 구조가 간단하고 정확한 데이터를 안전하게 확보가 가능하다는 장점을 가지고 있으나 로켓이 유실되는 경우 데이터 역시 확보가 불가능하다는 단점을 가지고 있다. 통신 전송 방식은 저장 방식보다 제작이 어렵고 실패 확률이 높으며, 여러가지 고려할 사항이 많다는 단점을 가지지만, 실시간 데이터 확인이 가능하며, 로켓이 유실되는 경우에도 데이터를 확보할 수 있다는 장점을 가진다[6]. 이러한 특징으로 대다수의 Sounding Rocket은 임무 데이터 확보에 있어 무선 통신을 이용하여 지상으로 데이터를 수신하되, SD카드와 같은 내부 탑재 저장 장치에 데이터를 추가로 백업하는 방식을 사용한다[7-8].

국내 Sounding Rocket 통신 기술에는 Radio Frequency (RF 통신), Long Range(LoRa 통신), ZigBee(지그비) 등이 있다[9-10]. 다만 RF 통신과 LoRa통신은 전송 데이터 용량의 한계로 원거리 통신은 가능하지만 다수의 데이터를 빠르게 보내기 어렵다는 단점이 있다. ZigBee 통신은 RF 대비 데이터 용량은 크지만 거리의 한계를 가지고 있어, 원거리에서 통신이 원활하지 않다는 단점이 있다. 하지만 LTE 기술은 영상 송수신이 가능하고 기지국의 통신 범위 이내라면 거리에 제약없이 데이터를 주고받을 수 있다는 장점을 가진 상업용 무선 통신 기술이다.

Sounding Rocket은 필요에 따라 매우 먼 거리를 비행하거나, 다량의 데이터를 빠르게 요구하는 임무에 사용될 수 있다. 따라서 Payload 데이터 송수신 거리나 대역폭의 향상은 더욱 다양한 임무를 수행할 수 있는 가능성을 열 수 있다.

본 연구에서는 데이터 송수신 지연을 데이터를 확보하기 위해 Sounding Rocket에 탑재할 LTE-Cat.M1 통신 모듈을 제작하여 실험을 수행한 결과를 소개한다.

II. LTE 데이터 송수신 시스템 설계 및 제작

1. LTE 데이터 송수신 시스템 구성

Sounding Rocket에 탑재하여 시험을 수행할 LTE-Cat.M1 통신 시험용 시스템을 Fig. 1과 같이 구성하였다. 관측 시스템은 상공에서 LTE 신호를 송신하는 임무탑재장비(Payload)와 지상에서 이를 수신하여 기록하는 지상관측장비(GOE; Ground Observation Equipment)로 구분된다.

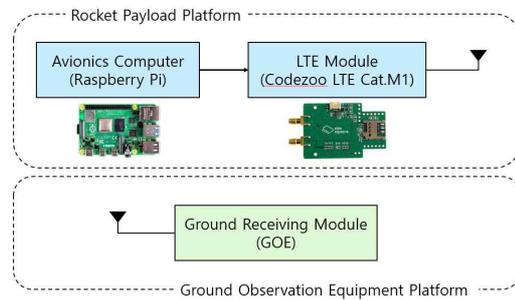


그림 1. LTE 통신 시스템 아키텍처
Figure 1. LTE Communication System Architecture

2. LTE 데이터 송수신 시스템 구성

Sounding Rocket에 탑재하여 시험을 수행할 Table 1은 임무탑재장비에 사용된 Avionics의 성능과 특징을 정리한 표이며 Fig. 2는 임무탑재장비의 구성도이다.

표 1. 항공전자 시스템 성능 특성 표
Table 1. Avionics Performance Properties Table

Item	Specification	Remark
Raspberry Pi Computer		
CPU	1.5GHz ARM Cortex-A72 MP4	Broadcom BCM2711 SoC
RAM	4GB LPDDR4-3200 SDRAM	
PORT	USB 3.0 / USB 2.0	USB Type-A
CodeZoo Cat-M1 Modem		
Chipset	Quectel BG96	
PORT	USB 2.0	USB Type-B Micro
USIM	Simsquare Global IoT SIM	

임무탑재장비의 중앙연산장치와 인터페이스보드는 일정하게 10Hz 속도로 시간 값 데이터를 송신하는 임

무를 수행하기 위해 Raspberry Pi Foundation사의 Raspberry Pi 4 Model B 4GB 컴퓨터를 사용하였다. LTE 모듈과 연결 가능한 USB 3.0 포트를 가지고 있으며, UPS 모듈을 통하여 안정적인 전원 공급이 가능하고, Debian Linux 기반 Raspberry Pi OS를 사용한다.

상용화된 마이크로컴퓨터용 LTE 모듈은 크게 모듈 형과 쉘드형 두 종류의 제품군으로 나뉘어져 있다. 쉘드형 모듈의 경우 Raspberry Pi 컴퓨터 상단에 적층식으로 탑재되어, 주요 칩셋을 냉각하여 스로틀링을 막기 위한 쿨링 시스템을 부착할 수 없다는 단점을 가진다. 따라서 Raspberry Pi 컴퓨터에서 사용 가능한 LTE 모듈 중 별도의 분리된 모듈 형태를 가지며, 국내 유심으로 동작이 가능한 Codezoo사의 LTE Cat.M1 모듈을 사용하였다.

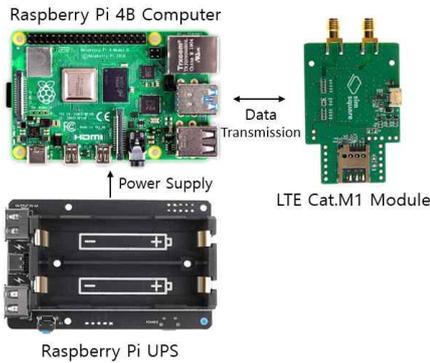


그림 2. 통신 시험용 페이로드 구성도
 Figure 2. Components of Communication Test Payload



그림 3. 페이로드 탑재 모듈
 Figure 3. Payload Mount Module

Raspberry Pi 컴퓨터를 중심으로 USB 포트를 통해 LTE 모듈과, GPIO 포트를 통해 UPS 모듈과 연결된다.

Figure 3는 Sounding Rocket에 탑재를 위한 Payload 프레임과 Avionics 장비를 탑재한 완성된 모듈이다.

3. 지상관측장비(GOE)

지상관측장비는 일반적인 윈도우 데스크탑을 사용하였다. 안정적이고 원활한 데이터 확보를 위해 이더넷을 사용하였다. 중앙 서버에 접속하여 임무탑재장비에서 송신하는 데이터를 지상국 수신 시간에 맞춰 데이터를 저장하는 역할을 수행한다.

4. 관측로켓(Sounding Rocket)

실험에 사용할 Sounding Rocket은 한국교통대학교 Atlas 로켓을 사용하였다. Table 2는 Atlas 로켓의 제원이다.

표 2. Atlas 로켓 성능 특성표

Table 2. Atlas Rocket Performance Properties Table

Parameter	Value
Length	1100 mm
Diameter	90 mm
Weight (include avionics)	4.3 Kg
Static Margin	1.66
Propellant	KNSB
Thrust	183 N
Maximum Altitude	257 m
Flight Time	53.7 sec
Maximum Acceleration	2 G

KNSB를 추진제로 사용하는 Atlas 로켓은 최종 비행 시험을 위해 Payload 모듈을 탑재하여 53.7초간 최대 고도 257m로 비행 임무를 수행한다.



그림 4. 로켓 페이로드 탑재 개략도
 Figure 4. Schematic Diagram of the Payload in Rocket

Figure 4는 Atlas 로켓 모식도이며, Payload는 로켓 중앙 Avionics 탑재부에 결합되어 있다.

5. 소프트웨어 설계 및 구성

통신을 수행할 소프트웨어는 파이썬을 기반으로 TCP/IP 프로토콜을 이용하여 제작하였다.

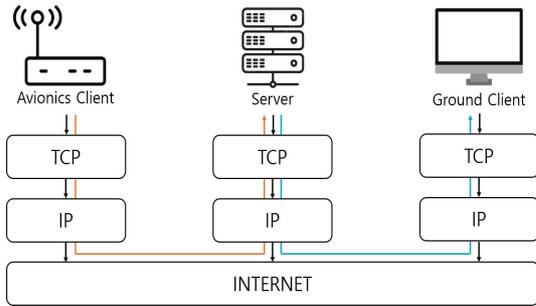


그림 5. 통신 시스템 네트워크 구성
Figure 5. Communication System Network Configuration

소프트웨어는 파이썬을 이용하여 10 Hz의 속도로 시간 데이터를 송신하는 Payload Client, 지상관측장비에서 데이터를 수신 시간과 함께 저장하는 Ground Client, 두 클라이언트를 중계하고 연결하는 M2M Server 세 가지를 제작하였다.

LTE 모듈은 고정 IP를 할당 받기 까다롭다는 단점을 가지기에, 양방향 통신을 위해서는 본인의 IP를 알려주고 상대방의 IP를 제공받을 수 있는 고정적인 IP를 가진 M2M(Machine to Machine) 서버를 필요로 하여, 클라이언트 시스템 실행 시 M2M 서버 IP로 접속을 시도하고 M2M 서버는 각 클라이언트의 현재 사용중인 IP를 확보하여 클라이언트 간 IP를 중계하는 방식으로 원활한 라우팅이 가능하도록 제작하였다[11].

III. 통신 시험 결과 및 분석

1. 지상 LTE 네트워크 지연율 확보 시험

지역에 따른 LTE 네트워크 지연율을 확보하기 위해 Launch site를 중심으로 총 5개의 지역에서 Payload 모듈의 LTE 환경 Ping 테스트를 진행하였다. 차량을 이용하여 위치를 변화하며 실험을 수행하였으며, 사전에 지정된 위치에 도달 후 Terminal ping 테스트를 수행하였다.

실험 결과 평균 약 400ms의 지연율이 발생함을 확인

하였다. 현대에는 네트워크 기지국이 보편화되어 거리에 따른 큰 지연율의 차이는 없었으나, 유동인구가 많은 지역에서는 상대적으로 높은 편차를 확인할 수 있었다.

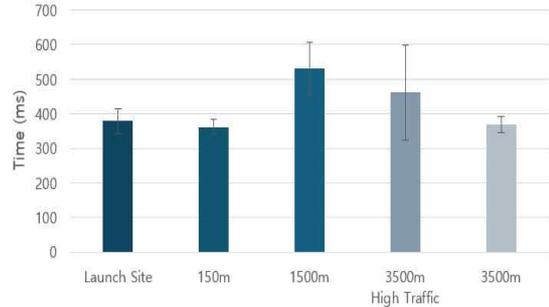


그림 6. 위치에 따른 지상 LTE 데이터 지연율
Figure 6. LTE data latency rate by ground location

2. Desktop/Rpi 환경 내부 지연율 확보 실험

Payload에 사용되는 Raspberry Pi-LTE Module 통신 장치는 일반적인 데스크탑과 달리 별개의 하드웨어로 구분되어 있으며, 성능적인 측면에서도 차이가 있어 데이터 송수신에 있어 서로 다른 내부 지연율을 가지고 있다. LTE Module 통신 장치의 경우 공급되는 전류가 상대적으로 낮은 저전력 프로세서의 특성과 한계로 인해 일정 부하가 지속되는 경우 장치가 단시간 비활성화되거나, 처리 지연이 생길 수 있다.

따라서, 네트워크의 지연율을 확보하기 위해서는 최종적으로 확보된 데이터에서 내부 지연율을 제거하여야 한다. 특정한 패턴을 가진 문자열 데이터를 10Hz로 일정하게 전송하여 최종적으로 발신되는 순간의 시간 데이터를 확보한 후 이전 발신 시간과의 차이를 통해 내부 지연율을 확보하는 방향으로 실험을 진행하였다.

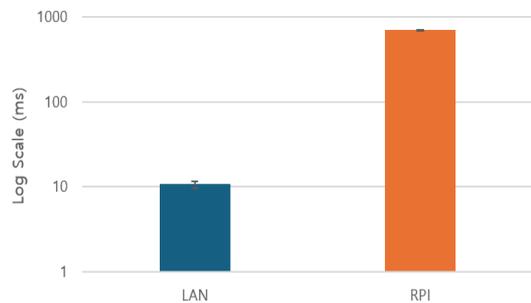


그림 7. 라즈베리파이 환경과 랜 환경 내부 지연율
Figure 7. Environment internal delay rate for LAN and RPI

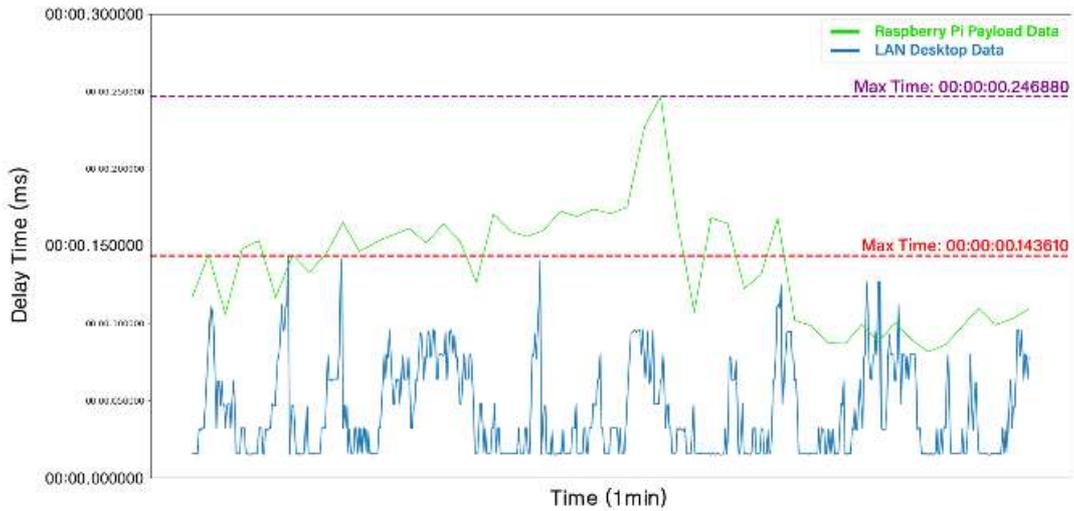


그림 8. 지연시간 측정 실험 데이터
 Figure 8. Delay Time measurement experimental data

정확한 비교를 위해 동일한 장소에서 Payload 모듈과 Desktop의 네트워크 내부 지연율을 확보한 결과이다. 평균적으로 LAN 환경에서 약 0.01ms, Raspberry Pi 환경에서 약 0.7ms의 내부 지연이 발생하였고, 약 70배 정도의 차이를 확인하였다.

3. Payload 지상 네트워크 지연율 확보 실험

Payload 장치의 네트워크 지연율을 확보하기 위하여 지상 실험을 수행하였다. 1분간 비행 실험에 사용할 서버를 이용하여 지연율 데이터를 확보하였으며, 앞서 확보한 내부 지연율 데이터를 이용하여 보정하였다. LAN 환경에서 확보한 데이터와 비교하여 Fig. 8과 같이 나타내었다.

실험 결과 Payload 네트워크 지연율은 LAN 환경 대비 약 100 ms 최대 지연율 차이를 확인하였다.

4. LTE 데이터 송수신 비행 실험

비행 중 LTE 통신 지연율 데이터를 확보하기 위해 Atlas Sounding Rocket에 탑재하여 비행 실험을 수행하였다. 최대 고도 257 m 로 50 s 동안 비행하였으며 비행 준비부터 상승, 하강 후 회수까지 전 과정 데이터를 확보하였다.

가속 단계에서 네트워크 유실이 발생하여 재연결까지 약 13초간 통신이 중단되었음을 확인하였다.

측정 결과 Fig. 9와 Fig. 10에서 네트워크가 유실된 지점이 급격한 고도 상승 지점 및 높은 순간 가속도가

계측된 지점과 일치하는 것으로 보아 LTE 통신 과정에서 고속으로 위치가 이동하는 순간 핸드오버에 실패하여 통신 불가 상태가 되었을 것으로 판단된다[12].

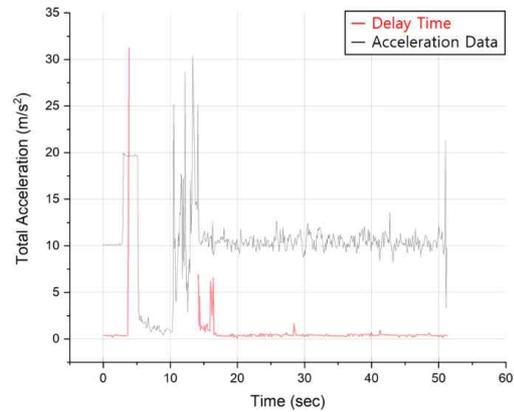


그림 9. 비행 시험에서의 지연시간과 가속도 데이터
 Figure 9. Delay Time and Acceleration data in Flight test

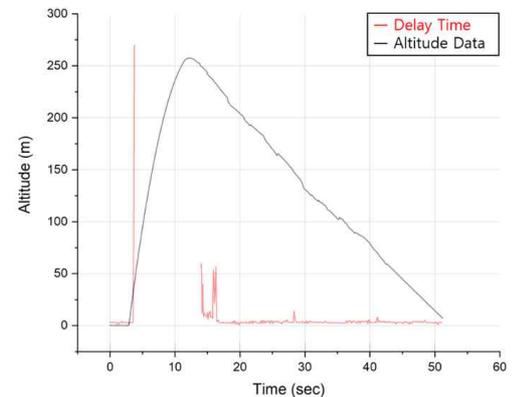


그림 10. 비행 시험에서의 지연시간과 고도 데이터
 Figure 10. Delay Time and Altitude data in Flight test

IV. 결론

본 논문에서는 소형 Sounding Rocket 데이터 통신 방식으로 LTE-CAT.M1 기술을 제시하였고, 운용 적합성에 대한 시험을 수행한 후 결과를 소개하였다. 실험을 위해 제작된 페이로드는 Raspberry Pi 컴퓨터를 중심으로 일정한 데이터를 LTE-CAT.M1 모듈을 통해 지상으로 전송되도록 제작되었다. 점진적으로 위치를 변화하는 차량을 이용한 지상 모의 시험에서는 안정적인 기능을 수행하였으나, 급격한 위치 변화를 동반한 실제 비행 시험 중 상승 과정에서 통신이 유실됨을 확인하였다. IoT 용도로 제작된 저전력 LTE 통신 기술인 Cat.M1은 고속으로 운용되는 환경에서 통신이 온전하게 수행되지 않음을 증명하였다. LTE-Cat.M1 통신 기술은 상승 단계에서 실시간 데이터 관측을 필요로 하는 임무의 Sounding Rocket에 사용하기 적합하지 않으며, 하강 단계 관측 임무나 데이터 백업에 사용할 수 있을 것으로 기대한다. 향후 LTE-CAT.M1보다 상위 기술인 LTE CAT.6 등을 활용하여 LTE 기술 운용 적합성에 대해 추가 검증 실험이 필요할 것으로 판단된다.

References

[1] YAZICI, A. M., and TIWARI, S., "Space tourism: An initiative pushing limits," *Journal of Tourism Leisure and Hospitality*, 3(1), pp. 38-46, 2021. <https://doi.org/10.48119/toleho.862636>

[2] K. O. Lee, "An Analysis of Launch Vehicle Development Strategy of SpaceX," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineering*, vol. 23, no. 6, pp. 72-86, 2019. <https://doi.org/10.6108/KSPE.2019.23.6.072>

[3] J. B. Kim, "COVID-19's Impact on the Space Industry and Countermeasures in Korea," *The Journal of the Convergence on Culture Technology* vol. 6, no. 4, pp.195-201, 2020. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2020.6.4.195>

[4] 박혁, & 조안 아드리아 루이즈 데 아주아 (2021). 뉴스페이스 산업과 저궤도 위성 통신. *The Journal of The Korean Institute of Communication Sciences*, 39(1), 10-16. <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE10959073>

[5] A. Okninski, B. Marciniak, B. Bartkowiak, D. Kaniewski, J. Matyszewski, J. Kindracki, P. Wolanski, "Development of the Polish Small

Sounding Rocket Program", *Acta Astronautica*, 108, pp.46-56, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.actastro.2014.12.001>

[6] T. J. Higdon, "Rocket Cam: Low Frequency Analog Transmission of Digital Video," Dissertation, California Polytechnic State University, 2015. <https://digitalcommons.calpoly.edu/eesp/289>

[7] S. Pathak, S. Agarwal, S. Kakumanu, S. Sudhakar and G. Srinivas, "Design and implementation of flight computer for sounding rockets-s3fc," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineering*, vol. 23, no. 6, pp. 72-86, <https://2019.10.1109/ICECA55336.2022.10009446>

[8] A. V. Sutar, D. Satam, S. Reddy, A. Shetty, & A. Patil, "Payload for Sounding Rocket," 2022 6th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology. IEEE, pp. 164-170, 2022. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=10009446>

[9] S. H. Baek, "Design and data of PRocket-2 at Pusan National University," *The Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*, Busan, Korea, pp. 480-487, November 2020. <https://www.dbpia.co.kr/Society/articleDetail/NODE10546577?pubId=11369&selPid=&isView=N>

[10] J. Y. Kim, J. S. Jeong, S. Y. Ki, J. S. Kim, J. W. Kim, W. J. Park, J. W. Park, W. J. Seo, S. M. Lee, D. G. Jang, B. G. Cho, M. I. Cha and S. U. Choi, "Development of Real-time Data Collecting Rocket Using LoRa," *The Korean Society of Propulsion Engineers Fall Conference*, Busan, Korea, pp. 667-672, November 2020. <https://www.dbpia.co.kr/Society/articleDetail/NODE10546654?pubId=11369&selPid=&isView=N>

[11] J. W. Bae and S. J. Lee, "Development of Video Transfer System using LTE/WiFi for Small UAV," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 10-18, 2019. <https://doi.org/10.20910/JASE.2019.13.2.10>

[12] Y. G. Jung and H. Y. Youn, "Techniques for seamless handover from LTE high-speed environment," *Proc. of the Korean Society of Computer Information Conference 2015*, pp. 255-258, January 2010. <https://koreascience.kr/article/CFKO201523070249198.page>

※ 이 논문은 2024년도 한국교통대학교의 교내 학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.