

리뷰논문

큐브위성 기반 우주 레이저 통신 기술 동향

여찬일[†], 허영순, 박시웅, 박형준

한국전자통신연구원

Technology Trends in CubeSat-Based Space Laser Communication

Chanil Yeo[†], Young Soon Heo, Siwoong Park, Hyoung Jun Park

Electronics and Telecommunications Research Institute, Daejeon 34129, Korea



Received: April 26, 2024

Revised: May 6, 2024

Accepted: May 9, 2024

[†]Corresponding author :

Chanil Yeo

Tel: +82-62-970-6634

E-mail: ciyeo@etri.re.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

Chanil Yeo

<https://orcid.org/0000-0002-5425-4773>

Young Soon Heo

<https://orcid.org/0009-0003-8445-4885>

Siwoong Park

<https://orcid.org/0000-0002-3815-828X>

Hyoung Jun Park

<https://orcid.org/0000-0002-8258-3224>

요약

큐브위성은 저비용, 짧은 개발 기간, 임무 지향적 성능 고도화, 군집 및 편대 비행을 통한 다양한 임무 수행이 가능하여 지구관측, 우주탐사, 우주 과학기술 검증 등 다양한 분야에서 활용성이 높다. 최근 큐브위성의 활용성이 높아지고 응용 분야가 확대됨에 따라 대용량 데이터의 고속 전송에 대한 요구가 전례 없이 증가하고 있는 추세이다. 레이저 기반 자유공간 광통신 기술은 기존 전파통신 방식 대비 고속으로 대용량 데이터 전송이 가능하고, 비면허대역 스펙트럼 사용, 저비용, 저전력, 높은 보안 특성 및 소형 통신 플랫폼의 활용 가능성 등 다양한 장점이 있어 큐브위성 임무 지원을 위한 고성능 통신 수단으로 적합하다. 본 논문에서는 큐브위성 기반 우주 레이저 통신 핵심 구성요소 및 특징을 살펴보고, 최근 연구동향, 대표 기술개발 사례 그리고 실증 결과와 함께 향후 개발 계획 등에 대해 살펴보고자 한다.

Abstract

CubeSats are being utilized in various fields such as Earth observation, space exploration, and verification of space science and technology due to their low cost, short development period, enhanced mission-oriented performance, and ability to perform various missions through constellation and formation flights. Recently, as the availability of CubeSats has increased and their application areas have expanded, the demand for high-speed transmission of large amounts of data obtained by CubeSats has increased unprecedentedly. Laser-based free space optical communication technology is capable of transmitting large amounts of data at high speeds compared to the existing radio communication methods, and provides various advantages such as use of unlicensed spectrum, low cost, low power, high security characteristics, and of use a small communication platform. For this reason, it is suitable as a high-performance communication technology to support CubeSat missions. In this paper, we will present the core components and characteristics of CubeSat-based space laser communication system, and recent research trends, as well as representative technology development results.

핵심어 : 우주 레이저 통신, 큐브위성, 레이저 통신 터미널, 광지상국

Keywords : space laser communication, cubesat, laser communication terminal, optical ground station

1. 서론

최근 우주산업의 급속한 변화와 발전으로 개발 비용이 크게 소요되는 대형 인공위성을 대신하여 저비용, 짧은 개발 기간, 임무 지향적 성능 고도화, 군집 및 편대 구축을 통한 다양한 임무 수행 등 여러 장점을 가지고 있는 큐브위성(CubeSat)이 지구관측, 우주탐사, 우주실험 및 우주 기술 검증을 비롯하여 저궤도(LEO, low earth orbit) 통신 네트워크 구축 등을 목적으로 크게 주목 받고 있으며, 실제 활용되고 있다[1-4]. 위성의 소형화와 함께 초소형 센서 기술의 발전 및 원격 이미징 기술의 해상도 향상으로 인해서 위성에서 지상으로 전송하는 데이터 용량이 전례 없이 급격히 증가하고 있다[5,6]. 그러나 기존 X-대역 및 Ka-대역과 같은 무선 주파수(RF, radio frequency) 통신 방식은 스펙트럼 가용성이 제한되고, 지속적으로 증가하는 다운링크 전송 용량과 속도에 대한 요구사항을 충족하기 어려운 한계 상황에 직면하고 있다[1,3,7].

이러한 상황에서 자유공간 광통신(FSOC, free space optical communication) 기술은 기존 RF 통신 방식 대비 고속으로 대용량 데이터 전송이 가능하고, 비면허대역(unlicensed spectrum) 스펙트럼 사용, 저비용, 저전력, 높은 보안 특성 및 소규모 플랫폼에서 고성능 통신용 페이로드(payload)로 활용 가능 등 다양한 장점을 제공하여 우주-우주(S2S, space-to-space), 우주-지상(S2G, space-to-ground) 간 초고속-대용량 우주 통신 네트워크 구축을 위한 목적으로 활발히 연구되고 있다[6-11]. 큐브위성의 임무가 복잡해지고 활용분야가 확대됨에 따라 큐브위성에 대해 더 높은 데이터 전송 속도를 요구하는 수요가 점차 증가하는 추세이다. 최근 세계적으로 큐브위성 탑재를 위해 소형, 경량, 낮은 전력 소비 특성을 갖도록 설계된 큐브위성용 우주 레이저 통신 터미널(space laser communication terminal)과 이를 활용한 S2S 및 S2G 통신기술에 대한 다양한 연구와 실증이 대규모 프로젝트를 기반으로 미국의 항공우주국(NASA, National Aeronautics and Space Administration), 제트추진연구소(JPL, Jet Propulsion Laboratory), MIT(Massachusetts Institute of Technology)의 링컨연구소(Lincoln Lab) 및 유럽우주국(ESA, European Space Agency), 독일 항공우주센터(DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt), 일본 국립정보통신연구기구(NICT, National Institute of Information and Communications Technology) 등 우주 기술 강국과 선진 연구기관을 중심으로 진행되고 있다[7,11-17]. 앞으로 레이저 통신 터미널을 탑재한 큐브위성은 정지궤도(GEO, geosynchronous equatorial orbit) 위성을 포함한 고궤도 위성의 백본망(backbone network) 구성, 저궤도 위성 간 통신(ISL, inter satellite link) 구축 및 저궤도 위성과 성층권 비행선 또는 항공기 간 레이저 통신 링크 형성 등에 중추적인 역할을 할 것으로 기대된다[7,12-18].

본 논문에서는 큐브위성 기반 우주 레이저 통신 기술의 핵심 구성요소와 특징 및 큐브위성과 지상 간 레이저 통신을 위해 필요한 기술에 대해 서술하고, 최근 연구동향 및 유럽과 미국의 대표 기술개발 결과와 함께 향후 개발 계획 등에 대해 살펴보고자 한다.

2. 큐브위성 기반 레이저 통신 핵심 구성요소 및 특징

2.1 우주 레이저 통신 세그먼트

큐브위성의 한정된 크기와 무게 조건은 큐브위성용 레이저 통신 터미널에 대해 매우 엄격한 크기, 무게, 전력 소비(SWaP, size, weight and power) 조건을 요구한다. 이러한 이유에서

큐브위성용 레이저 통신 터미널은 낮은 SWaP 특성을 갖도록 구조와 기술 측면에서 혁신적 접근 방식이 필수적이다. 먼저 낮은 SWaP 달성을 위해 망원경 개구(telescope aperture)의 형태(반사 또는 굴절)를 포함하여 광신호 송신 광학부와 수신 광학부의 구성(monostatic 또는 bistatic) 등 광학시스템 구조 설계가 매우 중요하다. 특히 망원경 개구 크기는 전체 광학 시스템 및 레이저 통신 터미널의 크기와 부피를 결정할 뿐만 아니라 고대역 폭의 안정적 레이저 통신 링크 구축과 통신 품질 유지를 위한 레이저 통신 링크 마진(link margin) 확보를 위해 신중한 결정이 필요하다. 링크 마진 도출에는 망원경 개구 크기 외에도 송신 빔의 발산각, 전송 거리, 광원 출력, 광수신기 감도, 광학계 손실, 링크 형성 조건 등 다양한 요소들이 함께 고려되어야 한다. 여기서 광원 출력은 높을수록 충분한 레이저 통신 링크 마진 확보에 이점을 제공하지만, 소비 전력이 증가하는 문제가 있다. 이렇듯 레이저 통신 터미널의 핵심 구성요소 간 상충관계(trade-off)가 존재하므로 임무 및 시스템 요구사항을 종합적으로 고려하여 설계하고, 필요에 따라 대안 기술을 활용하는 전략이 요구된다. 일 예로, 광원 출력을 높이지 않고도 송신기 내부에 회절 한계 광학시스템을 고도로 설계하고 집적함으로써 송신 빔의 발산각을 최소화하는 기술을 통해 광 수신부로 입사하는 광신호의 에너지 밀도를 높임으로써 링크 마진을 높이고, 최대 달성 가능한 데이터 속도를 확보는 전략이 있다.

다음으로 큐브위성용 레이저 통신 터미널 소형화 및 경량화를 위해 광신호의 송신과 수신에 사용되는 트랜시버(transceiver) 모듈 및 통신에 필요한 모뎀을 큐브위성 폼팩터(form factor)에 맞도록 규격화 및 소형화 하는 기술이 필요하다. 이를 위해 광자 집적 회로(photonics integrated circuits)에 반도체 기반 레이저 광원(laser diode), 애벌런치 광검출기(APD, avalanche photo diode), 변조기(modulator) 등 능동 소자와 렌즈(lens), 필터(filter), 스플리터(splitter) 등 수동 소자를 포함하여 고속 디지털 회로를 온보드(on-board) 통합해야 한다. 이렇게 고도로 통합된 트랜시버 모듈과 통신 모뎀은 각 구성요소와 전체 디바이스에 대해 우주 발사 및 운영 환경 특성을 고려한 표준 시험 조건에 따라 기계, 열, 전자기 시험 검증을 거치고, 신뢰성을 확보되어야 한다.

끝으로 큐브위성에 탑재 가능한 레이저 통신 터미널 개발을 위해 레이저 통신 링크 구축 및 운영을 위해 필수적으로 필요한 PAT(pointing, acquisition and tracking) 시스템 경량화 및 소형화 기술이 요구된다. PAT 제어는 큐브위성의 움직임 및 진동 정도와 통신 링크 형성 단계에 따라 coarse PAT 모드와 fine PAT 모드를 적응적으로 전환하여 동작할 수 있도록 하는 것이 일반적이다. 레이저 통신 링크 형성을 위해 송신 빔과 수신 빔이 정확히 동일한 광학 경로로 결합되도록 하는 양방향 광정렬 PAT 프로세스는 큐브위성의 자세 결정 및 제어 시스템(attitude determination control system)을 활용하여 $\pm 1^\circ$ 범위 내로 coarse 포인팅(pointing)을 수행하고, 레이저 통신 터미널 내부에 포함된 광학시스템에 집적된 FPA(fine pointing assembly) 제어를 통해 $\pm 1^\circ$ 범위의 불확실성 원뿔을 \sim 수 μrad 수준으로 정확히 지향하도록 하는 fine 포인팅 순서로 진행된다[17]. 여기서 레이저 통신 터미널의 FPA는 일반적으로 광기반 사분할 광검출기(QPD, quadrant photo diode)와 고속 스티어링 미러(FSM, fast steering mirror)로 구성되며, 경우에 따라 데이터 통신을 위한 APD가 함께 활용된다. QPD는 상대편 레이저 통신 터미널 또는 광지상국(OGS, optical ground system)에서 보낸 비콘 빔을 감지하여 각도 오프셋을 측정하고, 온보드 마이크로 컨트롤러에 의한 정렬 각도 오류 계산에 활용된다. FSM은 PAT 제어 루프를 통해 빠른 속도로 각도를 제어함으로써 측정된

각도 오프셋을 신속히 보상하여 데이터 수신율을 높이는데 활용되며, 상대편 레이저 통신 터미널로 향하는 송신 빔의 정밀 지향과 PAA(point ahead angle) 기능 제공을 통해 송신 에러 감소에 활용된다. 큐브위성용 레이저 통신 터미널에 사용되는 QPD 및 FSM 모듈의 크기와 배치에 따라 광학시스템 전체 크기가 변경될 수 있으므로 소형 QPD 및 FSM 모듈을 집적하고, 이들을 포함한 광학시스템 내부 광경로의 최적화 설계가 필요하다. 아울러 저전력 FSM 사용 및 PAT 제어 루프 최적화를 통한 소비전력 최소화가 동반되어야 한다.

2.2 광지상국 세그먼트

광지상국은 큐브위성용 레이저 통신 터미널과 대조적으로 낮은 SWaP 제약 조건에서 상대적으로 자유롭다. 이러한 이유로 광지상국은 큐브위성용 레이저 통신 터미널보다 큰 규모의 망원경을 설치하여 위성용 레이저 통신 터미널에서 미약한 신호가 도달하더라도 데이터 통신을 가능하게 하고, 복잡한 PAT 시스템을 포함한 추가 구성 요소를 구비함으로써 위성과 위성용 레이저 통신 터미널이 갖는 낮은 PAT 정밀도 성능 한계를 보완하는 역할을 한다.

대표적으로 광지상국에는 대기외란(atmospheric turbulence)로 인해 광신호의 위상(phase)과 강도(intensity)가 변하고, 신호 왜곡이 발생하는 현상을 감소시킴으로써 레이저 통신 품질을 높이기 위해 적응광학(AO, adaptive optics) 시스템을 추가적으로 구비된다. 적응광학 기술은 큐브위성에서 전송되어 도달한 다운링크 신호를 수신부 광섬유 또는 광 검출기에 효과적으로 결합시키고, 시간에 따른 수신 광량의 강도 변동을 감소시키는 솔루션 기술이다. 광지상국은 적응광학 시스템을 통해 광 검출기에 입사되는 광량이 대기의 영향으로 데이터 분석을 위해 필요한 임계값 아래로 떨어지는 현상을 개선함으로써 데이터 프레임 손실 방지 기능을 갖는다. 적응광학 시스템은 대표적으로 수신 빔의 파면 측정 및 분석을 위한 파면 센서(wavefront sensor)와 변형된 파면을 보정하기 위한 변형 거울(deformable mirror) 및 이를 실시간 제어하는 제어시스템(real-time control system)으로 구성된다.

광지상국에는 큐브위성과 광지상국 간 레이저 통신 링크 형성을 위해 PAT 초기단계에 활용되는 비콘(beacon) 송신기가 추가적으로 집적된다. 광지상국은 Coarse PAT 프로세스 단계에서 높은 광 출력과 넓은 빔폭의 비콘 빔을 사용하여 큐브위성을 먼저 포인팅하고, 포인팅 정밀도 향상을 위해 비콘 신호 또는 RF 신호를 활용한 피드백 정보를 수신하여 추가적으로 포인팅 각도를 조정한다.

3. 큐브위성 기반 레이저 통신 연구동향

큐브위성 기반 우주 레이저 통신 기술개발과 실증을 위한 연구는 2010년대 들어 미국, 유럽, 일본 등에서 국가 프로젝트를 통해 다수가 수행되었으며, 저궤도를 이용하였다. Table 1에는 현재까지 수행된 큐브위성 기반 레이저 통신 기술 관련 글로벌 프로젝트와 상세 내용이 정리되어 있다. 각 프로젝트는 추진 목적과 특징에 따라 서로 다른 링크 유형, 전송 거리, 전송 속도, 변조방식 및 레이저 통신 터미널의 크기, 무게, 소비전력 등 특징을 갖는다.

먼저 세계 최초의 큐브위성 기반 레이저 통신 페이로드 임무는 미국 NASA와 US Aerospace가 공동으로 수행한 OCSD(Optical Communication and Sensor Demonstration) 프로젝트로 큐브위성을 활용하여 우주 레이저 통신을 실제로 검증하고, 위성 간 통신 성능 개선을

Table 1. Details of CubeSat-based laser communication projects

	OCSD	CLICK-A	Q4	TBIRD	CubeLCT	VSOTA
Research institute (Country)	NASA/US Aerospace (US)	NASA/MIT (US)	NASA/JPL (US)	NASA/MIT (US)	TESAT/DLR (Europe/Germany)	NICT (Japan)
Link type	LEO-GND	LEO-GND	LEO-LEO	LEO-GND	LEO-GND	LEO-GND
Range (km)	450	400	200	530	560	700
Data rate	5–200 Mbps (downlink) 10 kbps (uplink)	10 Mbps (downlink)	1 Gbps (downlink)	200 Gbps (downlink) 5 kbps (uplink)	100 Mbps (downlink)	1 Mbps (downlink)
Modulation method	OOK (downlink) PPM (uplink)	PPM	NRZ OOK /M-PPM	QPSK (downlink) PPM (uplink)	IM/DD	NRZ (downlink)
Optical power of terminal (W)	2	–	1	1	–	0.27 (980 nm) 0.54 (1,550 nm)
Aperture diameter of terminal (mm)	–	–	10 (Tx) 25 (Rx)	22 (Tx) 23 (Rx)	20 (Tx)	–
Aperture diameter of telescope (mm)	400	300	–	1,000	400 (stationary) 600 (transport)	1,500 (stationary) 300 (transport)
Wavelength (nm)	1,064 (downlink) 1,550 (uplink)	1,550 (downlink) 975 (beacon)	850 (downlink)	1,550 (downlink) 1,537 (uplink)	1,550 (downlink) 1,590 (beacon)	980/1,550 (downlink)
Volume of terminal (cm)	–	96 × 119 × 96	–	18 × 10 × 10	9 × 9.5 × 3.5	–

Table 1. (Continued)

	OCSD	CLICK-A	Q4	TBIRD	CubeLCT	VSOTA
Weight of terminal (kg)	-	0.8	-	2.25	0.397	~0.7
Power consumption of terminal (W)	-	15	-	100	8.5	< 10
Launch time	2015/2017	2022	-	2022	2021	2018

OCSD, Optical Communication and Sensor Demonstration; CLICK, CubeSat Infrared Laser Bidirectional Communication-A; TBIRD, TeraByte InfraRed Delivery; NASA, National Aeronautics and Space Administration; MIT, Massachusetts Institute of Technology; JPL, Jet Propulsion Laboratory; DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; LEO, low earth orbit; NICT, National Institute of Information and Communications Technology; PPM, pulse position modulation; OOK, On-off keying; QPSK, Quadrature Phase Shift Keying; IM, Intensity Modulation; DD, Direct Detection; NRZ, non-return-to-zero.

위한 목적으로 수행되었다. OCSD 큐브위성을 이용하여 LEO-GND(ground) 정밀 광정렬 포인팅 및 광무선 통신 링크 검증을 위해 OCSD-A 위성이 2015년 10월 발사되고, OCSD-B/C 위성이 2017년 11월 발사되었다[13,14]. OCSD 테스트는 맑은 날 야간에 OCSD 큐브위성과 미국 캘리포니아 윌슨(Wilson) 마운틴에 위치한 광지상국 망원경(30 cm) 간 정밀 광정렬 포인팅 및 광무선 통신 링크 검증을 수행하여 200 Mbps 속도로 다운링크에 성공했다[14].

NASA와 MIT는 동일한 지구궤도에서 400 km 떨어진 큐브위성을 활용하여 LEO-GND 간 광통신 실험을 목적으로 CLICK(CubeSat Infrared Laser Bidirectional Communication-A) 프로젝트를 수행했다. CLICK-A 프로젝트에 사용된 큐브위성용 레이저 통신 단말기(1.2 U)는 개발비용 절감을 위해 상용 기성품(Commercial off-the-shelf, COTS) 광학 장치와 광섬유 장치가 사용되었다. NASA는 CLICK 프로젝트를 통해 FSM을 활용한 정밀 포인팅 성능 및 제어 루프 알고리즘을 검증했다. 또한 넓은 빔 폭과 수신각을 갖는 RF 신호를 활용한 초기 PAT 프로세스 테스트를 수행했다[13,15].

NASA와 제트추진연구소는 위성 간 전방향 광통신기(ISOC, inter-satellite omnidirectional optical communicator) 기반 차세대 군집 위성 간 레이저 링크 플랫폼인 Q4 임무를 제안하고, Gbps 데이터 속도로 다수의 큐브위성 간 동시 통신 구현을 위해 필요한 주요 임무 검증 목표를 수립했다. Q4 임무에는 최대 시야각 커버리지(360°), 최대 200 km 신호 송수신, 최대 1 Gbps 데이터 속도의 위성 간 통신, 동시 다중 사용자 액세스 유지 기능 검증이 있다. Q4 임무는 6 U 크기 큐브위성 4기로 구성(1기의 리더 위성과 3기의 추종 위성)되며, 각 큐브 위성에는 10 mm 크기의 송신기(Tx, transmitter)와 25 mm 크기의 수신기(Rx, receiver)를 갖는 레이저 통신 터미널이 탑재된다[16].

NASA와 MIT 링컨연구소는 COTS 제품과 기술을 활용하여 최대 200 Gbps(채널당 최대 100 Gbps) 데이터 전송 속도를 갖는 6 U 크기를 갖는 큐브위성과 광지상국 간 LEO-GND

다운링크 핵심기술을 개발 및 검증하기 위한 TBIRD(terabyte infraRed delivery) 프로젝트를 수행했다. TBIRD에 대한 상세 내용은 Chapter 4.2에 상세히 기술되어 있다.

유럽의 TESAT은 2018년 독일 DLR 및 GomSpace사와 함께 혁신적인 소형 위성의 임무 수행 및 거의 실시간에 가까운 글로벌 우주 데이터 전송 서비스 상용화를 위해 LEO-GND 간 100 Mbps 다운링크 속도를 제공하는 0.3 U($9.5 \times 9.5 \times 3 \text{ cm}^3$) 크기의 큐브위성용 레이저 통신 단말 제품인 CubeLCT를 개발했다. CubeLCT에 대한 상세 내용은 Chapter 4.1에 상세히 기술되어 있다.

일본 NICT의 우주 레이저 통신 연구 역사는 오래되었으며, 2005년 처음으로 저궤도 위성 과 지상 간 양방향 레이저 통신 링크 구축 기술을 확보했다. 일본 최초의 큐브위성용 레이저 통신 단말기 연구는 VSOTA(Very Small Optical TrAnsponder) 프로젝트를 통해 2016년 NICT와 도쿄대학이 함께 협력하여 시작되었으며, LEO-GND 간 통신을 목표로 한다. VSOTA에서 개발되는 큐브위성용 레이저 통신 단말은 듀얼 밴드 파장(980 nm 및 1,550 nm) 전송 지원을 특징으로 한다[13].

4. 대표 기술개발 사례 및 상세 기술

4.1 유럽 CubeLCT(가장 작은 우주 레이저 통신 터미널)

CubeLCT는 초소형 레이저 통신 터미널로 위성 광통신 분야에서 세계적 선두기업인 TESAT Spacecom과 독일 DLR의 통신 및 항법 연구소(institute of communications and navigation)가 공동으로 개발을 진행한 OSIRIS4CubeSat(Optical Space Infrared Downlink System for CubeSats) 프로젝트 결과 도출된 큐브위성을 위한 상업용 레이저 통신 터미널이다(Fig. 1)[19]. TESAT은 저궤도-지상 간 레이저 통신 상용 솔루션을 제공하기 위해 프로젝트 초기부터 주요 기업으로서 공동개발에 참여했다. CubeLCT는 산업체와 연구 기관이 각각 보유한 경험과 인프라 및 특화기술을 함께 결합하여 완성한 결과물로 현재 가장 작은 우주 레이저 통신 터미널이다[8, 17-19].



Fig. 1. OSIRIS4CubeSat project: (a) Illustration of optical download from CubeLCT to optical ground station, (b) highly compact laser communication terminal CubeLCT and (c) optical ground station on the roof of the DLR institute of communications and navigation in Oberpfaffenhofen [19]. OSIRIS4CubeSat, Optical Space Infrared Downlink System for CubeSats; DLR, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.

4.1.1 CubeLCT 설계

CubeLCT는 큐브위성 폼팩터에 맞춰 개발되었으며, $9 \times 9.5 \times 3.5 \text{ cm}^3$ (~0.3 U)의 크기와 0.397 kg의 무게 및 8.5 W의 피크 소비전력 특성을 갖는 큐브위성용 레이저 통신 터미널로 저궤도에서의 운영 기간은 약 5년이다. 0.3 U 크기로 소형화하기 위해 CubeLCT는 인쇄 회로 기판(PCB, printed circuit board)을 광학 벤치로 사용하여 광학 부품을 PCB에 배치하고 통합했다[17-20]. 초기 CubeLCT의 PCB 재료의 열변형에 따른 정렬 틀어짐 및 오류를 방지하기 위한 목적으로 열팽창계수(CTE, coefficient of thermal expansion)가 제로에 가까운 Copper-Invar-Copper(CIC) 사용이 고려되었으나, 설계 분석단계에서 CIC 재료를 사용함에도 불구하고 고온과 저온의 우주 환경조건에서 PCB 상단에 통합된 광기계(optomechanics)의 움직임으로 인해 정렬을 보장하기 어려운 것으로 나타났고, 이를 해결하기 위해 DLR은 광학 부품을 두 개의 알루미늄 블록으로 감싸는 방향으로 설계를 변경했다[20]. 그 결과 CubeLCT에는 알루미늄과 열팽창계수가 불일치하는 CIC 재료를 대신해 일반적인 PCB 재료 사용이 가능하게 되었다.

일반적으로 송신 빔과 수신 빔의 정렬 복잡도는 광학요소들의 자유도 증가에 따라 기하급수적으로 증가한다. 이러한 이유에서 두 알루미늄 블록에 통합되는 CubeLCT의 모든 광학 요소들은 조정 가능한 메커니즘 없이 구축되도록 설계되었다. 이와 같은 접근방법은 광기계의 정확한 제작과 함께 제작 공차를 고려한 광학시스템 설계 및 분석을 요구한다[20]. CubeLCT에서 수신 광학부의 개구는 20 mm 크기를 가지며, 레이저 광원은 전자 메인보드 위에 집적되고, 드라이버 전자 장치는 수동 냉각 요소가 상단에 위치한 인쇄 회로기판에 위치하며, 수신기 센서는 별도의 PCB에 탑재되어 모듈식으로 집적된다[19,20].

OSIRIS4CubeSat 프로젝트 개발은 향후 더 높은 데이터 전송 속도 제공 기능을 포함하여 양자 키 배포(quantum key distribution)와 위성 간 링크 기능도 동일 플랫폼을 활용하여 제공 가능하도록 모듈식 설계 접근 방식이 고려되었다. 이러한 이유로 OSIRIS4CubeSat 플랫폼은 큰 틀에서 재설계하지 않고 광학, 전자, 기계, 소프트웨어, 제어 및 인터페이스 등 하위 시스템(subsystem)을 모듈식으로 쉽게 변경 및 조정함으로써 추가적인 성능 향상과 기능 확장이 가능하다[18].

4.1.2 CubeLCT 레이저 통신

CubeLCT는 1,550 nm(C-band) 데이터 전송 파장을 활용하여 저궤도에서 광지상국으로 약 100 Mbps 속도로 다운링크 전송이 가능한 광무선 통신 하위 시스템을 갖는다. 광지상국과 저궤도 CubeLCT 간 업링크에는 1,590 nm(L-band) 전송 파장이 활용되며, 업링크 빔은 비콘 역할로도 활용된다[17-20].

CubeLCT 데이터 통신은 소형 온보드 장치에서 100 mW 피크 전력으로 구동하는 고휒력 레이저 다이오드(high power laser diode) 신호 세기를 변조하고, 광 검출기에서 직접 신호를 검출하는 IM/DD(intensity modulation/direct detection) 방식을 사용한다. CubeLCT 내부는 외부 신호로부터 완전히 독립적이며, 어떠한 데이터 처리도 수행하지 않도록 설계되었다. 이러한 이유로 순방향 오류 수정(FEC, forward error correction)을 포함한 채널 코딩은 큐브 위성 버스에서 수행되며, 필요에 따라 온보드 컴퓨터(OBC, onboard computer), 소프트웨어

정의 라디오(SDR, software defined radio), 페이로드 컨트롤러(PCON, payload controller) 등 기타 큐브위성 하위 시스템에서 채널 코딩 수행이 가능하다[18].

4.1.3 CubeLCT PAT

CubeLCT를 통해 광지상국으로 최대 달성 가능한 다운링크 속도는 광지상국에서 수신되는 광신호의 세기와 직접적으로 관련이 있다. 따라서 높은 데이터 전송률을 달성하기 위해 CubeLCT로부터 광지상국으로 더 많은 광신호 에너지가 도달하여 광-전 변환(optical-electrical conversion)이 일어날 수 있도록 돕는 기술이 요구된다. 이를 위해 CubeLCT와 광지상국 간 정확한 상호지향과 양방향 광정렬이 필수적이다. CubeLCT에는 광지상국을 정확하게 지향할 수 있도록 하기 위해 위성의 자세 결정 및 제어 시스템과 함께 절대 포인팅 영역에 대한 요구사항을 $\pm 1^\circ$ 범위 내로 유지하도록 포인팅 오류를 보상하고, 정확한 광정렬이 가능하도록 돕는 FSM 장치가 탑재되어 있다. 또한 CubeLCT는 신호의 전파 시간 경과에 따른 경로 오차를 보상하기 위한 PAA 보정 기능도 포함하고 있다. 이를 통해 CubeLCT는 단일 광지상국과 최대 15분간 통신이 가능하다. 광지상국에서는 CubeLCT와 정밀한 레이저 통신 링크 구축을 위해 비콘 레이저 빔을 CubeLCT를 향해 송신한다. CubeLCT에서는 광학시스템에 내장된 QPD 광 검출기를 활용하여 광지상국으로부터 전송된 비콘 신호를 검출하고, CubeLCT와 광지상국 간 포인팅 오류 값을 제어시스템에 제공함으로써 FSM 제어를 통해 포인팅 오류를 보상한다. 포인팅 오류 수정을 위해 CubeLCT 내부에는 비콘과 동일한 광 경로로 광지상국을 향해 광신호가 정확히 전송될 수 있도록 하는 FPA 장치와 제어 루프 컨트롤을 담당하는 마이크로 컨트롤러가 탑재된다. $\pm 1^\circ$ 의 시야(FOV, field-of-view)를 커버할 수 있는 FPA 장치는 200 Hz 대역폭의 제어 루프를 통해 높은 에너지 밀도의 광신호가 광지상국으로 정확히 전달될 수 있도록 한다[18].

4.1.4 CubeLCT 인터페이스

CubeLCT는 우주 데이터 시스템 자문 위원회(CCSDS, Consultative Committee for Space Data Systems)의 O3K(Optical On-Off Keying) 표준을 따른다[18]. O3K를 위한 CCSDS 표준화 실무그룹은 DLR 주도로 시작되었으며, CubeLCT 레이저 통신 터미널의 상업적 사용 확장에 기여했다. CubeLCT는 데이터 통신을 위한 인터페이스로 저전압 차등신호(LVDS, low voltage differential signal) 방식을 지원하며, TM/TC(Telemetry and Telecommands) 통신을 위해 UART(Universal Asynchronous Receiver Transmitter) 인터페이스를 지원한다. 또한 우주에서 재프로그래밍(reprogramming) 가능하도록 JTAG(joint test action group) 인터페이스가 구현되어 있다[19-21]. CubeLCT는 추가 개발 로드맵에 따라 향후 저궤도-광지상국 간 1 Gbps 다운로드 속도 지원 및 위성 간 양방향 100 Mbps 광통신 링크 지원이 가능하도록 인터페이스를 제공한다.

4.1.5 CubeLCT 광지상국

DLR 광지상국은 독일 Oberpfaffenhofen에 위치한 통신 및 항법 연구소 건물 옥상에 고정식으로 장착되어 있다. 통신 및 항법 연구소 건물 옥상에 설치된 DLR 광지상국은 40 cm 직경의 주경을 갖는 반사형 망원경 구조를 갖는다. DLR은 고정식 광지상국과 별도로 이동식

광지상국(TOGS, transportable optical ground station)을 2011년 개발했다. 이동식 광지상국은 접이식 구조를 통해 최대 3.5 m 높이까지 배치 가능한 60 cm 직경의 알루미늄 Ritchie-Chrétien 망원경 구조를 갖는다[19]. Ritchie-Chrétien 망원경은 이동 중 충격과 먼지로부터 보호받기 위해 탄소 섬유로 만들어진 충격 흡수 마운트에 설치된다. 이동식 광지상국의 신속한 위치 선정과 자세 결정을 위해 위성 내비게이션 및 자세 센서 기반 매개변수 자동 식별 시스템이 사용되며, GPS 위치 기반 레이저 반사경이 추가 개발되어 활용되고 있다. 이동식 광지상국은 재해 발생 후 재난 현장에 대한 항공 사진 또는 위성 사진을 신속하게 다운로드하여 실시간 정보를 바탕으로 인명 구조 및 피해 상황 파악 등 다양한 임무 수행이 가능하도록 하는 역할을 한다. 아울러 이동식 광지상국은 기상 조건에 의한 영향을 줄임으로써 위성-지상 간 레이저 통신이 원활히 수행되도록 돕는 기능 외에도 구름의 범위 및 기상 통계 측면에서 고정식 광지상국의 신규 위치 선정 및 평가 수단으로 활용된다[19].

4.1.6 CubeLCT 실증

CubeLCT는 2021년 1월 미국 플로리다 케이프 커네버럴 우주군 기지(space force station)에서 OSIRIS4CubeSat 프로젝트 개발 결과의 궤도 시연(IOD, in-orbit demonstration)과 기능 확인을 통한 신뢰성 검증을 목적으로 PIXL-1(Photo Images Cross Laser-1) 임무를 위한 3 U 규격(3.4 kg)의 소형 큐브위성 플랫폼인 CubeL(GomSpace사 제작)에 탑재되어 SpaceX의 Falcon-9을 이용해 태양 동주기 궤도(SSO, sun-synchronous orbit)로 발사되었다[18-20]. PIXL-1은 큐브위성 규모의 소형 위성에 탑재 가능한 컴팩트한 레이저 통신시스템을 설계 및 제작하고, 이를 활용하여 실제로 지구 저궤도에서 촬영한 고해상도 이미지를 광지상국으로 레이저 통신을 통해 전송하는 것을 목표로 독일 DLR과 TESAT사가 공동으로 수행한 임무이다. CubeLCT의 신호는 2021년 8월 광지상국에서 처음으로 수신되었으며, 이후 CubeLCT에 내장된 FPA 추적 루프 활성화를 통해 2021년 9월 초 첫 번째 추적 잠금(tracking lock) 프로세스를 완료했다. CubeLCT와 지상 간 통신 시험에는 독일 DLR의 고정식 광지상국과 이동식 광지상국이 함께 사용되었다. 안타깝게도 광지상국에서 CubeLCT 신호 수신에는 성공했으나, 온보드 별 추적기(star tracker)가 안정적인 추적에 필요한 수준의 성능을 발휘하지 못하고, 보조 센서인 자력계(magnetometer) 또한 별 추적기에 비해 큰 오차를 보임으로써 OSIRIS4CubeSat 프로젝트는 아직까지 최종 단계를 완전히 완료하지 못한 상황이다[18]. 현재 CubeLCT와 광지상국 간 성공적인 데이터 다운로드 최종 목표 달성을 위해 DLR의 우주작전 센터(GSOC, German Space Operations Center)와 GomSpace사가 함께 별 추적기의 정확성을 높이고, 자세 방향 제어시스템(AOCS, attitude orientation control system)을 안정화하여 포인팅 정확도를 향상시키기 위해 협력하고 있다.

4.1.7 추가 개발 계획 - CubeISL

DLR은 소형 군집 위성을 활용한 위성 간 통신(ISL) 시대를 대비하여 CubeLCT를 위성 간 통신 분야로 확장하기 위한 CubeISL 프로젝트를 시작했다. 2025년 발사 예정인 CubeISL 프로젝트의 목표는 최대 1,500 km 거리에서 100 Mbps 속도로 양방향 데이터 전송이 가능한 위성 간 레이저 통신 시스템의 개발 및 실증이며, 이와 함께 지상으로 데이터 다운로드 전송 속도를 1 Gbps로 높이는 목표를 설정했다[22]. CubeISL 페이로드는 크기 1 U, 무게 1 kg, 최

대 소비전력 30 W, 위성 간 데이터 전송 속도 100 Mbps, 광지상국 다운링크 속도 1 Gbps 및 FPA 관심 영역 $\pm 1^\circ$ 이내 값을 갖는다. CubeISL은 큐브위성 간 양방향 통신 및 CCSDS의 O3K 표준과 호환 운영하기 위해 1,537 nm와 1,553 nm(C-band) 두 파장을 사용함으로써 송신 빔과 수신 빔을 구분하도록 구성된다. 또한 광지상국으로부터 1,590 nm(L-band) 비콘 빔 수신이 가능하도록 구성된다[18,22]. CubeISL은 CubeLCT의 모듈식 접근 방식의 도움으로 개발에 필요한 노력이 감소하고, 개발과 인증에 필요한 시간 단축이 가능하다. CubeLCT를 기반으로 하는 CubeISL 터미널은 CubeLCT와 동일한 20 mm 수신 개구 크기를 가지며, 고출력 레이저 다이오드를 비롯하여 CubeLCT에 적용된 대부분의 부품 재사용이 가능하다. CubeISL에는 CubeLCT와 차별적으로 양방향 데이터 통신을 위한 APD 광검출기와 1 W 광출력을 생성하기 위한 EDFA(erbium doped fiber amplifier) 증폭기가 송신기 시스템에 추가 장착된다. 또한 CubeISL은 송신 데이터를 준비하고, 수신 데이터를 분석하는 동시에 큐브위성 버스에 인터페이스를 제공하는 등 CubeISL의 주요 운영 프로세서 역할을 하는 데이터 처리 장치(DHU, data handling unit)를 추가 탑재한다.

DLR 통신 및 항법 연구소와 RSC3(responsive Space Cluster Competence Center)는 CubeISL의 시연 및 검증을 위해 약 8 kg 무게의 12 U(2×6 U) 큐브위성($30 \times 20 \times 10$ cm³)을 2대를 활용할 예정이다[18]. 2대의 큐브위성은 모두 높은 경사도의 지구 저궤도로 발사될 예정이며, 최대 통신 거리인 1,500 km까지 다양한 거리에 대해 큐브위성 간 양방향 레이저 통신 실험을 수행할 예정이다. CubeISL 검증을 위해 위성에는 추진기가 장착되며, 두 위성의 알려진 위치와 실제 위치 간 차이를 포함하여 최대 허용 오차 $\pm 0.1^\circ$ 를 갖도록 GNSS(global navigation satellite system) 수신 센서가 장착된다. 또한 위성의 정밀한 자세 결정 및 제어를 위해 별 추적기가 장착된다. CubeISL 검증을 위한 두 큐브위성의 운영은 DLR GSOC에서 담당하며, 이를 위해 큐브위성은 GSOC 지상국과 호환을 위해 극초단파(UHF, ultra high frequency) 방식을 대신하여 TM/TC용 S-band 대역의 트랜시버를 사용한다. CubeISL 레이저 통신 터미널은 큐브위성 간 ISL 외에도 메인 위성과 다수의 큐브위성이 클러스터를 형성하여 운영되는 개념을 추가 검증할 예정이다[18]. 추가 검증의 목적은 큐브위성의 운용 전력 수준에 적합하지 않은 작업을 메인 위성의 온보드에서 처리할 수 있도록 메인 위성이 큐브위성의 데이터를 수집하고, 메인 위성에서 처리한 결과를 큐브위성 간 ISL을 통해 다시 전달하는 기술을 검증함으로써 우주 위성 인프라의 효율적 활용법을 완성하고자 하는데 있다.

4.2 미국의 TBIRD(세계 최고 성능의 큐브위성용 레이저 통신 터미널)

미국 NASA의 고더드 우주비행센터(Goddard space flight center)와 MIT 링컨연구소는 2014년부터 상용 COTS 제품을 사용하여 저렴한 비용으로 우주 임무를 지원하기 위해 TBIRD 프로젝트를 기획했다(Fig. 2)[23]. TBIRD 프로젝트는 NASA의 고더드 우주비행센터, 제트추진연구소, 에임스 연구센터(Ames research center), MIT 링컨연구소 및 테란 오비탈(Terran orbital)사가 공동으로 소형 폼팩터를 갖는 6 U 큐브위성(테란 오비탈 개발)에 탑재된 레이저 통신 터미널(MIT 링컨연구소 개발)을 이용하여 캘리포니아 테이بل 마운틴에 위치한 제트추진연구소의 광통신 망원경 연구소(OCTL, Optical Communications Telescope Laboratory) 광지상국으로 최대 200 Gbps 속도 다운링크를 목표로 수행되었다[6-7,10]. 그 결과 2023년 5월 고도 약 530 km에 위치한 TBIRD 큐브위성에서 OCTL 광지상국으로 5분

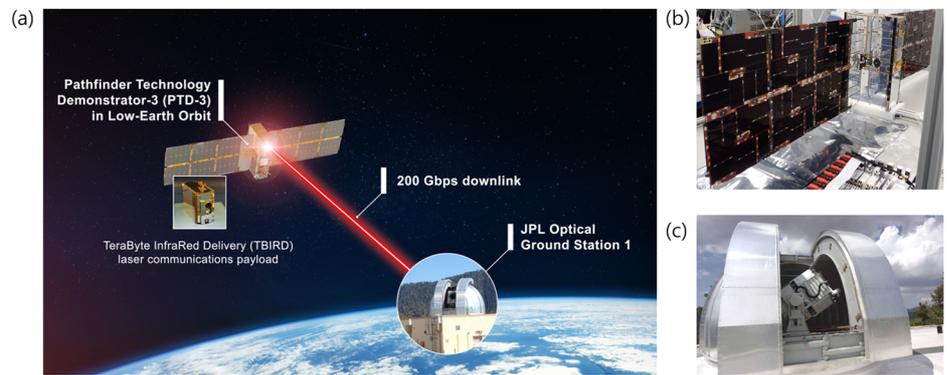


Fig. 2. TBIRD project: (a) Illustration of TBIRD downlinking data over lasers links to optical ground station, (b) PTD-3 CubeSat with laser communication terminal and solar panels deployed and (c) TBIRD's optical ground station in Table Mountain, California [23]. TBIRD, terabyte infrared delivery; PTD, pathfinder technology demonstration).

간 최대 4.8테라바이트(TeraByte, TB) 규모의 데이터 다운링크에 성공했다[7]. 다만 최대 200 Gbps 다운링크 속도는 광자상국 내부 교란에 의한 드롭아웃(dropout) 현상으로 다운링크 전체 시간 동안 유지되지 못한 것으로 보고되었다[7]. NASA에서는 TBIRD 프로젝트에 몇 가지 COTS 제품과 관련 기술을 활용했으며, 특히 전례 없는 데이터 전송을 위해 100 Gbps 상용 트랜시버와 고속 판독이 가능한 테라바이트급 온보드 저장 버퍼를 적용했다. TBIRD 프로젝트는 통신 링크 구축 및 복구를 위해 필요한 PAT 시간 경과에 따른 지연 문제 및 대기 현상에 의한 페이딩(fading) 에러가 없는 안정적 데이터 전송을 보장하기 위해 수신되지 않은 데이터 프레임을 자동 반복 요청(ARQ, automatic repeat request)하여 재전송하도록 하는 맞춤형 프로토콜을 기반으로 개발되었다[6-7,10].

4.2.1 TBIRD 설계

TBIRD 프로젝트를 위해 MIT 링컨연구소는 3 U보다 작은 크기와 3 kg 이하 무게를 갖는 우주 레이저 통신 터미널을 설계 및 제작했다. 레이저 통신 터미널의 핵심인 광 어셈블리(optical assembly)는 다운링크 데이터 전송을 위한 22 mm 직경의 송신부 개구와 업링크 데이터 수신을 위해 23 mm 직경의 수신부 개구를 별도로 갖는 바이스태틱(bistatic) 광학구조를 가지며, 액추에이터(actuator)가 없는 모놀리식(monolithic) 하우징에 장착된다[10]. Terran Orbital사는 6 U 크기의 큐브위성 버스를 설계 및 제작하고, 제트추진연구소의 OCTL은 TBIRD 레이저 통신 터미널에서 지상의 OCTL 광자상국으로 전송된 광신호가 단일 모드 광섬유에 높은 효율로 입사되게 함으로써 안정적 데이터 통신이 가능하도록 1 m 직경의 망원경과 적응광학 시스템을 구축하고 일부 기능을 개선했다[10]. MIT 링컨연구소는 레이저 통신 터미널 외에도 OCTL 광자상국과 TBIRD 큐브위성 간 업로드 및 다운로드를 위해 필요한 고속 디지털 전자 장치를 설계하고 제작했다. TBIRD 레이저 통신 터미널에는 테라바이트 데이터 캐시 처리를 위해 PC급 고속 SSD(solid state drive) 4개로 구성된 2 TB 버퍼가 설계되어 온보드에 장착되었다[24]. SSD는 다른 COTS 구성 요소와 함께 감마 및 양성자 방사선 테스트를 거쳤으며, 우주 임무에 적합한 것으로 확인되었다.

TBIRD 시스템은 우주 레이저 통신 터미널 버퍼(2 TB)에서 광지상국 버퍼(2 TB)로 100 Gbps 전송 모드 또는 200 Gbps 전송 모드로 데이터 전송이 가능하다. 레이저 통신 터미널에 포함된 버퍼는 200 Gbps 모드에서 100 Gbps의 판독 속도를 두 개의 채널 중 하나에 제공하며, 이때 다른 100 Gbps 채널은 가상 버퍼의 더미 데이터(dummy data)로 채워지도록 설계되었다[6]. TBIRD 레이저 통신 터미널은 OCTL 광지상국에서 제공하는 1,534 nm 업링크 신호를 활용하여 큐브위성이 자세 결정 및 제어 시스템을 통해 광지상국을 정확히 지향하도록 10 Hz 속도로 피드백을 제공하는 기능이 포함되었 있다. 한편, OCTL 광지상국은 공간 다이버시티(spatial diversity)를 위해 4채널로 구성된 낮은 데이터 속도(2 kbps)의 광학 업링크를 제공하도록 설계되었으며, 광학 업링크 신호는 자동 반복 요청 피드백 기능 구현과 함께 큐브위성의 본체 포인팅과 공간 추적을 위한 비콘 역할로 사용 가능하도록 설계되었다[6,7].

TBIRD 레이저 통신 터미널은 트랜시버, FPGA(field programmable gate array) 및 SSD 등 모든 전자 부품이 동작하는 동안 최대 100 W의 전력이 소비되며, 그 결과 약 3°C-4°C 온도 상승이 발생하여 통신 임무 지속 시간이 제한된다[6]. 이러한 이유에서 송신 및 수신 광학부는 열적 드리프트(thermal drift)를 방지하기 위해 전자장치로부터 열적으로 절연되도록 설계되었다.

4.2.2 TBIRD 레이저 통신

TBIRD 레이저 통신 터미널과 광지상국 간 다운링크는 채널당 최대 100 Gbps 속도의 COTS 기반 광섬유 트랜시버에서 생성된 1,550 nm 광신호가 파장 분할 다중화되어 1 W 출력을 갖는 EDFA로 전송되고, 최종적으로 송신부 개구를 통해 150 μ rad 이하 발산각으로 방사됨으로써 시작된다. 100 Gbps 또는 200 Gbps 모드로 선택적 동작이 가능한 레이저 통신 터미널의 최대 광 출력은 0.8 W이며, 200 Gbps 모드에서 광 출력은 두 채널 간에 균등하게 배분된다[6,24]. TBIRD 레이저 통신 터미널이 200 Gbps 모드로 동작하는 경우, 100 Gbps 모드 대비 COTS 모듈 하나를 추가 활성화되고 약 20 W의 추가 전력 소모가 필요하다. 다운링크에 사용되는 트랜시버는 기존 1,550 nm 대역의 유선 광통신에서 사용되는 이중 편파(dual polarization) QPSK(quadrature phase shift keying) 변조와 FEC를 함께 활용하여 전력측면에서 효율적이고, 오류 없는 작동이 가능하도록 했다. TBIRD 다운링크 통신에서 페이딩이 없는 경우, 최대 데이터 처리량 100 Gbps 및 200 Gbps에 대해 광지상국의 광 검출기에서 요구되는 수신 전력은 각각 약 -42 dBm 및 -39 dBm 수준이다[7].

TBIRD 시스템은 누락되거나 삭제된 모든 프레임이 성공적으로 수신될 때까지 재전송 되도록 하는 맞춤형 자동 반복 요청 프로토콜을 활용하여 레이저 통신 터미널의 오류 없는 데이터 전송을 보장한다. TBIRD의 자동 반복 요청 프로토콜은 유효 전송 시간이 없는 가상 채널 세트를 형성하도록 함으로써 수신 광량에 밀리초급 변동이 발생하는 경우에도 높은 처리 효율을 달성하도록 맞춤 설계되었다. TBIRD 레이저 통신 터미널에서 광지상국으로 다운링크 되는 데이터는 자동 반복 요청 프레임에 캡슐화되어 전송된다. 광지상국이 자동 반복 요청 프레임을 성공적으로 수신한 경우, 광지상국은 이를 TBIRD 레이저 통신 터미널에 알리기 위해 긍정 확인(positive acknowledgement) 신호를 업링크를 통해 반복 전송한다. 자동 반복 요청 프레임 전송에 소요되는 시간은 약 1 ms이고, 프레임 크기는 조정 가능하며 일반적으로 100 Gbps 및 200 Gbps 모드에서 각각 약 15 MB 및 30 MB 수준이다[10]. 자동 반복 요청

메시지는 가상 채널당 1비트로 구성되며, 각 메시지가 단일 Reed-Solomon(223, 255) 업링크 코드의 페이로드 대부분을 채우도록 1,752개의 가상 채널이 있다. 레이저 통신 터미널의 업링크 수신기는 광지상국으로부터 수신한 메시지에 대한 유효성 판단을 위해 각 자동 반복 요청 메시지에 추가된 순환중복검사(cyclic redundancy check) 코드를 확인한다. 유효한 업링크 메시지가 수신되는 경우, 레이저 통신 터미널에서는 모든 가상 채널에 대한 상태 업데이트가 진행된다[24].

4.2.3 TBIRD PAT

TBIRD 임무에서 PAT 프로세스는 TBIRD 큐브위성의 자세 결정 및 제어 시스템에 의존하며, 레이저 통신 터미널의 지향각을 다운링크 빔폭 내로 향하도록 조정하기 위해 광지상국으로부터 수신한 업링크 비콘 각도 측정값을 활용한다. TBIRD 레이저 통신 터미널은 지향각 정밀 조정을 위해 $10 \mu\text{rad}$ RMS(root mean square) 정확도의 10 Hz 포인팅 오류 피드백을 TBIRD 큐브위성의 자세 결정 및 제어 시스템에 제공하고, 폐쇄 루프(closed-loop) 기반 body 포인팅을 통해 데이터 다운링크가 가능하도록 한다[6]. TBIRD의 body 포인팅 방식은 온보드 별 추적기 및 자이로 센서 등 자체 센서 정보에 의존하는 기존의 개방형 루프(open-loop) 포인팅 접근 방식과 차별적이다. TBIRD 큐브위성의 body 포인팅은 큐브위성 버스에 장착된 리액션 휠(reaction wheels)을 활용한다. 약 530 km 고도에서 임무를 수행하는 TBIRD의 PAA 각도는 약 50 mrad 수준이며, 레이저 통신 터미널에 함께 내장된 가시광 카메라의 시야각은 1 rad 수준이다[10].

광지상국은 카메라를 통해 TBIRD 레이저 통신 터미널에서 전송된 다운링크 빔을 가장 먼저 감지하고, 카메라 피드백 정보를 기반으로 김발(gimbal) 포인팅을 수정하기 위해 제어 루프를 닫는다. 이는 광지상국으로 전송된 빔을 적응광학 시스템의 파면 센서로 향하도록 조정하고, 적응광학 시스템의 팁/틸트(tip/tilt) 및 변형 거울 제어 루프를 통해 다운로드 빔을 광섬유 또는 광 검출기에 결합되도록 하기 위함이다. 광지상국에서 적응광학 루프 폐쇄(loop closure)를 위한 다운링크 빔 감지 프로세스는 약 10초가 소요되며, 전체 획득(acquisition) 프로세스는 TBIRD 레이저 통신 터미널에서 초기 업링크 빔을 감지한 후 약 20초 이내에 완료된다[7].

한편, 광지상국은 TBIRD 레이저 통신 터미널을 정확하게 포인팅하기 위해 TBIRD 큐브위성의 궤도력(ephemeris) 정보가 필수적이다. 광지상국에서 TBIRD 레이저 통신 터미널로 업로드 되는 빔의 반치전폭(FWHM, Full Width Half Maximum)은 $380 \mu\text{rad}$ 이하 수준으로 0.1 dB 미만의 포인팅 손실을 갖는다[7]. 추적 오류는 바이어스와 0.01 Hz 이하 저주파 드리프트(low-frequency drift)에 의해 결정되고 포인팅 성능은 제어 알고리즘 최적화를 통해 향상 가능하며, 향상된 포인팅 정확도는 더 작은 빔폭 사용을 가능하게 하여 추가 링크 마진 확보에 이점이 있다.

4.2.4 TBIRD 광지상국

TBIRD 임무를 위한 제트추진연구소의 OCTL 광지상국은 1 m 반사 망원경에서 TBIRD 레이저 통신 터미널로부터 수신한 빔을 쿠데(Coudé) 경로를 통해 단일 모드 광섬유로 연결하기 위한 벤치 탑(bench-top) 적응광학 시스템을 갖추고 있다[6]. OCTL 광지상국에 도달하여

적응광학 시스템을 거쳐 단일 모드 광섬유로 출력되는 광신호는 사전 증폭(preamplification) 및 파장 역다중화(demultiplexing) 과정을 거쳐 지상 모뎀으로 전송되어 복조(demodulation) 및 복호화(decoding) 된다. 지상 모뎀에서 성공적으로 수신된 데이터 프레임은 100 Gbps 속도로 광지상국의 버퍼에 기록되며, 최종적으로 파일 검색 및 분석을 위해 서버로 다운로드 된다. 광지상국에 설치되는 버퍼는 12.5 Gbps 속도로 드라이브에 쓰기가 가능한 8개의 SSD로 구성된 병렬 아키텍처를 가지며 최대 100 Gbps 쓰기 속도를 지원한다. TBIRD 다운링크가 200 Gbps 모드(2채널)로 운영되는 경우, 광지상국 버퍼는 두 개 채널 중 하나의 채널 데이터만 기록한다[6]. OCTL 광지상국은 2022년 초부터 운영을 시작한 LCRD(laser communications relay demonstration) 임무의 주요 광지상국(OGS-1)이기도 하다. OCTL 광지상국은 TBIRD 임무 요구사항을 수용하기 위해 LCRD 임무 지원을 위한 광학 및 운영 설정을 수정하였으며, 일부 설정 조정을 통해 LCRD 모드와 TBIRD 모드 간 전환이 가능하도록 운영하고 있다[6].

TBIRD 업링크 신호는 1,534 nm 파장을 활용하여 이진(binary) 펄스 위치 변조(PPM, pulse position modulation) 방식을 통해 2 kbps 전송 속도로 송신된다. 이때 레이저 통신 터미널의 업링크 수신기가 대기외란의 유효 섬광 지수(effective scintillation index)를 줄임으로써 페이딩 현상을 완화하기 위한 목적으로 업링크 빔은 4개의 공동 조준(co-boresighted) 송신부 개구에서 Spatial diversity 기술을 활용하여 동시에 전송된다[10]. 업링크 빔은 넓은 범위에 걸쳐 우주 레이저 통신 터미널을 지향하기 위해 다운링크 빔 대비 상대적으로 큰 FWHM(약 450 μ rad)을 갖는다. 2 kbps 업링크는 주로 FEC 코딩 오버헤드를 고려한 후, 반복 요청 신호 처리에 1.8 kbps의 사용자 데이터 전송 속도(user data rate) 사용이 가능하다[23].

4.2.5 TBIRD 실증

TBIRD 시스템은 태양 동기 궤도 시연(약 고도 530 km)을 위해 2022년 5월 말 PTD (pathfinder technology demonstration)-3 큐브위성에 탑재되어 발사되었으며, 2022년 6월 초 레이저 통신 운영을 시작했다. 2022년 6월부터 11월까지 43회의 실험(야간 29회, 주간 14회)을 통해 광지상국을 통과하는 5분간 200 Gbps 속도로 최대 4.8 TB 데이터를 오류 없이 다운링크하는 전송 시연에 성공했으며, 이는 현재 세계 최고 속도의 우주 플랫폼과 지상 간 데이터 다운링크 결과이다[7]. 43회의 다운링크 전송 시험에서 일반적으로 대기외란에 의한 영향이 상대적으로 적은 야간에 더 좋은 수신 신호 검출 결과가 도출되었다. 다운링크 처리량은 광지상국 하늘을 통과하는 동안 고도(거리) 변화 및 대기 페이딩 변화에 따라 변하는 결과를 보였으며, 일반적으로 높은 고도에서 최대의 다운링크 처리량 결과가 도출되었다[7].

5. 결론

본 논문에서는 지구관측, 감시정찰, 우주탐사 및 우주기술 검증 등을 목적으로 크게 주목받고 있는 큐브위성의 원활한 임무수행을 위해 차세대 우주 레이저 통신 기술 적용의 필요성을 인식하고, 큐브위성 기반 레이저 통신시스템 구현 및 활용에 필요한 핵심 구성요소와 이들의 특징에 대해 살펴보았다. 특히, 우주 기술을 선도하는 미국과 유럽의 세계 최고 성능 및

초소형 큐브위성 기반 레이저 통신 기술 개발 결과와 실증 사례를 자세히 분석하였다. 이를 통해 큐브위성과 지상 간 레이저 통신 링크 구축과 운영을 위해 필요한 시스템 설계, 통신방식, PAT 프로세스 및 임무별 광지상국 기술과 특징에 대한 폭넓은 정보를 얻을 수 있었다. 기존 지상 기반 통신 서비스영역이 우주로 확장되고, 국방 및 국가 안보 분야에서 우주통신의 역할과 중요성이 점차 커짐에 따라 국내에서도 우주 레이저 통신 핵심 기술확보와 제품 국산화 관련 필요성이 대두되고 있다. 최근 정부와 군에서 국내외 환경에 능동적으로 대응하기 위해 우주 레이저 통신 분야 기술 내재화 및 관련 산업 육성을 위한 프로젝트를 추진 중이다. 아울러 국내 중소기업 및 벤처기업을 중심으로 큐브위성에 활용 가능한 우주 레이저 통신 기술과 임무장비 개발 및 사업화를 진행 중이다. 앞으로 뉴 스페이스 시대에서 우주산업을 선도하고 국내기업의 차세대 우주 통신 서비스 신시장 선점을 돕기 위해 국가차원을 전폭적인 지원과 여러 연구기관 및 산업체의 공동 협력이 절실히 필요한 시점이다.

감사의 글

본 연구는 한국전자통신연구원 연구운영지원사업의 일환으로 수행되었습니다(24ZK1110, 호남권 지역산업 기반 ICT 융합기술 고도화 지원사업).

References

1. Sweeting MN, Modern small satellites-changing the economics of space, *Proc. IEEE*, 106, 343-361 (2018). <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2806218>
2. Poghosyan A, Golkar A, CubeSat evolution: analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions, *Prog. Aerosp. Sci.* 88, 59-83 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.11.002>
3. Saeed N, Elzanaty A, Almorad H, Dahrou H, Al-Naffouri TY, et al., CubeSat communications: recent advances and future challenges, *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 22, 1839-1862 (2020). <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.2990499>
4. Lee J, Sohn J, Park J, Yang TY, Song HS, et al., SNIPE mission for space weather research, *J. Space Technol. Appl.* 2, 104-120 (2022). <https://doi.org/10.52912/jsta.2022.2.2.104>
5. Kobayashi MM, Stocklin F, Pugh M, Kuperman I, Bell D, et al., NASA's high-rate Ka-band downlink system for the NISAR mission, *Acta Astronaut.* 159, 358-361 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.069>
6. Schieler CM, Riesing KM, Bilyen BC, Robinson BS, Wang JP, TBIRD 200-Gbps CubeSat downlink: system architecture and mission plan, in *IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications*, Kyoto, Japan, 29-31 Mar 2022.
7. Riesing K, Schieler C, Bilyeu B, Chang J, Garga A, et al., Operations and results from the 200 Gbps TBIRD Laser communication Mission, in *37th Annual Small Satellite Conference*, Logan, UT, 1-8 Aug 2023.
8. Heine F, Tercero AS, Pimentel PA, Höpcke N, Hasler D, et al., In orbit performance of tesat LCTs, in *SPIE LASE*, San Francisco, CA, 1-8 Mar 2019.

9. Park S, Yeo CI, Heo YS, Ryu JH, Kang HS, et al., Tracking efficiency improvement according to incident beam size in QPD-based PAT system for common path-based full-duplex FSO terminals, *Sensors* 22, 7770 (2022). <https://doi.org/10.3390/s22207770>
10. Schieler CM, Riesing KM, Bilyeu MC, Chang JS, Garg AS, et al., On-orbit demonstration of 200-Gbps laser communication downlink from the TBIRD CubeSat, in SPIE LASE, San Francisco, CA, 1-9 Mar 2023.
11. Casado AC, Do PX, Kolev D, Hosonuma T, Shiratama K, et al., Intersatellite-link demonstration mission between CubeSOTA (LEO CubeSat) and ETS9-HICALI (GEO satellite), in IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), Portland, OR, 1-5 Oct 2019.
12. Mathason B, Albert MM, Engin D, Cao H, Petrillo KG, et al., CubeSat lasercom optical terminals for near-Earth to deep space communications, in SPIE LASE, San Francisco, CA, 1-6 Mar 2019.
13. Li R, Lin B, Liu Y, Dong M, Zhao S, A survey on laser space network: terminals, links, and architectures, *IEEE Access* 10, 34815–34834 (2022). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3162917>
14. Rose, T, Rowen D, LaLumondiere S, Werner N, Faler A, et al., Optical communications downlink from a 1.5U Cubesat: OCS D program, in International Conference on Space Optics (ICSO), Chania, Greece, 1-12 Oct 2018.
15. Cierny O, Serra P, Kammerer W, Grenfell P, Gunnison G, et al., Testing of the CubeSat laser infrared crosslink (CLICK-A) Payload, in 34th Annual Small Satellite Conference, Logan, UT, 1-23 Aug 2020.
16. Velazco JE, Vega JS, Q4: a CubeSat mission to demonstrate omnidirectional optical communications, in 2020 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 1-6 Aug 2020.
17. Pimentel PM, Rödiger B, Schmidt C, Fuchs C, Rochow C, et al., Cube laser communication terminal (CubeLCT) state of the art, *Acta Astronaut.* 211, 326–332 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.06.026>
18. Schmidt C, Rödiger B, Rosano J, Papadopoulos C, Hahn MT, et al., DLR's optical communication terminals for CubeSats, in 2022 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), Kyoto, Japan, 29-31 Mar 2022.
19. Eoport, PIXL-1 / Formerly CubeL or OSIRIS4CubeSat (2021) [Internet], viewed 2024 Mar 10, available from <https://www.eoport.org/satellite-missions/pixl-1>
20. Rödiger B, Menninger C, Fuchs C, Grillmayer L, Arnold S, et al., High data-rate optical communication payload for CubeSats, in SPIE Optical Engineering + Applications, online conference, 22 Aug 2020.
21. DLR, A pioneering launch – compact satellite PIXL-1 carries the world's smallest laser terminal into orbit (2021) [Internet], viewed 2024 Mar 10, available from https://www.dlr.de/en/latest/news/2021/01/20210124_pioneering-launch-compact-satellite-with-smallest-laser-terminal

22. Nonay JR, Rüddenklau R, Sinn A, Jakobs JP, Berlitz J, et al., Horizontal free-space optical link with CubeSL over 143 km, J. Opt. Commun. Netw. 16, 593-601 (2024). <https://doi.org/10.1364/JOCN.518271>
23. NASA, CubeSat set to demonstrate NASA's fastest laser link from space [Internet], viewed 2024 Mar 25, available from <https://www.nasa.gov/directorates/somd/cubesat-set-to-demonstrate-nasas-fastest-laser-link-from-space/>
24. Schieler CM, Riesing KM, Horvath AJ, Bilyeu BC, Chang JS, et al., 200 Gbps TBIRD CubeSat Downlink: pre-flight test results, in SPIE LASE, San Francisco, CA, 1-7 Mar 2022.

Author Information

여 찬 일 ciyeo@etri.re.kr



광주과학기술원 정보통신공학부에서 2014년 박사학위를 취득한 후, 2015년부터 한국전자통신연구원 광ICT융합연구실에서 유·무선 통신, 광융합기술 관련 업무를 수행했으며, 현재는 광무선통신, 광학기술 등 우주 레이저 통신 관련 연구를 수행하고 있다.

박 시 웅 swp@etri.re.kr



2016년부터 한국전자통신연구원에 광ICT융합연구실에서 광센서, IoT 및 드론 관련 연구 개발 업무를 수행했으며, 광주과학기술원 전기전자컴퓨터공학부에서 2024년 박사학위를 취득한 후 현재는 MIMO 기반 우주 레이저 통신 기술 관련 연구를 수행하고 있다.

허 영 순 hsheo@etri.re.kr



2004년 전북대학교 물리학과 석사학위를 취득한 후, 2005년부터 한국전자통신연구원 광ICT융합연구실에서 유·무선 광통신 시스템 패키징, 시험 검증 및 분석 관련 업무를 수행했으며, 현재는 광무선통신 기술 기반 장거리 레이저 통신 관련 연구를 수행하고 있다.

박 형 준 spacegon@spacebeam.co.kr



전북대학교 전자공학과에서 2009년 박사학위를 취득한 후, 2010년부터 한국전자통신연구원 광ICT융합연구실에서 센서융합기술 및 ICT융합기술 관련 업무를 수행했으며, 현재는 광ICT융합연구실 실장으로 유·무선 광융합기술 기반 전력설비 진단, 전력IoT 및 통신 관련 연구 개발 수행하고 있다.