

우주 광통신 기술 동향

Technology Trends in Space Optical Communications

여찬일 (C.I. Yeo, ciyeo@etri.re.kr)	광ICT융합연구실 선임연구원
허영순 (Y.S. Heo, ysheo@etri.re.kr)	광ICT융합연구실 책임연구원
박시웅 (S.W. Park, swp@etri.re.kr)	광ICT융합연구실 연구원
김거식 (K.S. Kim, keosikis@etri.re.kr)	광ICT융합연구실 책임연구원
강현서 (H.S. Kang, hskang87@etri.re.kr)	호남권연구센터 책임연구원/센터장

ABSTRACT

Space optical communication technology capable of large-capacity, high-speed, and low-latency communication can reduce the size, weight, and power consumption of radio frequency communications in existing satellite systems, thereby reducing launch costs, accommodating additional science instruments, and extending lifetime. Despite the high technical difficulty, various projects are being carried out in advanced countries regarding space technology for use in national security and defense, earth observation, and space communications. We review the advantages, key components, and development trends of space optical communication technology, which is attracting attention in applications such as satellite communications, intersatellite linking, and deep space communications.

KEYWORDS 광학 지상국, 우주 광통신 프로젝트, 우주 광학 터미널, 우주 중계 노드

1. 서론

인류가 달, 화성을 넘어 태양계를 탐사하고, 최근 우주 임무가 지구 및 우주 관측, 우주 실험, 소행성 탐사, 위성 간 통신 등 다양하고 복잡해짐과 동시에 우주 과학 장비가 4K 고화질 영상 획득이 가능하도록 고도화됨에 따라 우주 임무를 원활히 수행하고 대용량 우주 데이터를 신속하게 지구로 전송하기

위해 고속·대용량 데이터 전송이 가능한 기술이 필요하다[1,2].

1950년대 우주 비행이 시작된 이래 현재까지 우주 통신에서 사용하고 있는 무선 전파(RF: Radio Frequency) 통신 기술은 안정성 및 성숙도 측면에서 우수한 특징을 보이지만, 미래 우주 임무와 통신 지원을 위해 필요한 초광대역 디지털 연결 기술로써 한계를 갖는다. 전파 통신과 적외선 광통신은 모두 스

* DOI: <https://doi.org/10.22648/ETRI.2023.J.380209>

* 본 연구는 한국전자통신연구원 연구운영지원사업의 일환으로 수행되었음[과제명: 호남권 지역산업 기반 ICT 융합기술 고도화 지원 사업, 과제번호: 23ZK1100, 기여율: 100%].

펙트럼 영역에서 파장을 갖는 전자기 복사(Electromagnetic Radiation)이지만 적외선 광통신 기술은 전파 통신 기술 대비 데이터를 보다 촘촘한 파동으로 압축하여 더 많은 데이터 전송이 가능하다[3]. 따라서 대용량 데이터를 고속 전송하기 위해 넓은 대역폭을 갖는 적외선 레이저 기반 광통신 기술을 차세대 우주 통신에 활용함으로써 전례 없는 데이터 전송 능력으로 우주 임무를 더욱 강화하기 위한 목적의 연구들이 최근 활발히 진행되고 있다. 우주 광통신 기술은 무선 전파 통신 기술보다 달에서 지구로 10~100배 더 많은 데이터 전송이 가능하다. 실제로 아폴로(Apollo) 호의 무선 전파 통신 시스템은 달에서 흑백 영상을 보냈지만, 2024년 발사 예정인 아르테미스II(Artemis II) 임무에 탑재 예정인 우주 광통신 시스템은 달 궤도에서 4K 초고화질 동영상상을 지구로 보낼 예정이다. 앞으로 화성 탐사가 더욱 활발해져 화성의 완전한 지도 정보를 지구로 보내야 하는 경우, RF 통신 기술은 대략 9주가 소요되는 반면, 우주 광통신 기술은 약 9일이 소요될 것으로 예상된다[3].

현재 우주 레이저 통신 기술은 더 많은 우주 임무 및 사업화에 활용하기 위해 다수의 프로젝트와 실증연구가 수행되고 있으며, 미래 우주 공간에서 인간, 로봇, 위성, 우주 비행선 등의 활동이 증가함에 따라 우주에서 데이터를 송수신하는 표준화된 방법이 될 것으로 기대된다[4].

본고에서는 우주 광통신 기술의 장점과 핵심 구성요소 및 다양한 우주 광통신 프로젝트와 연구 개발 동향을 살펴보고자 한다.

II. 우주 광통신 기술 장점

우주 통신은 다양한 원인으로 송수신 시스템 간 통신 연결이 즉시 이루어지지 않으며, 특히 거리가

늘어날수록 통신 연결과 데이터 전송을 위해 필요한 시간 지연이 증가한다. 실제로 지구 관측에 주로 활용되는 저궤도(LEO: Low Earth Orbit) 위성의 고도는 약 2,000km 이하이며, 통신·기상관측을 위해 활용되는 정지궤도(GEO: Geostationary Earth Orbit) 위성의 고도는 약 36,000km이다. 따라서 우주 공간에서 원활히 임무를 수행하고 정보를 전달하기 위해 1초에 약 30만km 속도로 이동하고, 넓은 대역폭을 갖는 빛(Light)을 활용한 우주 광통신 기술이 연결 시간 단축, 통신 지연 문제 해결, 대용량 정보 전송 지원 등을 위해 적합하다.

우주 광통신 시스템은 크기, 무게, 전력 사용 측면에서 전파 통신 시스템 대비 장점이 있어 우주 임무 활용에 더욱 적합하다. 실제로 글로벌 근집위성 통신 서비스를 위해 높은 성능과 함께 컴팩트한 위성탑재체가 요구된다[5]. 우주 광통신 시스템의 작은 크기는 다양한 임무 수행을 위해 필요한 과학기기의 추가 탑재가 가능하도록 더 많은 공간 제공이 가능하고, 적은 무게는 발사 비용 절감을 가능하게 하며, 낮은 전력 사용은 배터리 시스템의 전력 소모를 줄임으로써 임무 수행 기간 연장을 가능하게 한다[3]. 이러한 우주 광통신 기술의 장점은 심우주(Deep Space)를 탐험하고자 할 경우, 더 많은 이득을 제공한다. 2013년 미국 항공 우주국(NASA: National Aeronautics and Space Administration)은 달 레이저 통신 시연(LLCD: Lunar Laser Communications Demonstration)을 통해 기존 전파 통신방식 대비 절반의 무게를 갖는 우주 광통신 터미널을 활용하여 25% 적은 전력 사용으로 무선 전파 통신보다 약 6배 빠른 달-지구 간 데이터 전송 결과를 달성했다[3].

우주 레이저 통신 기술은 전파 통신 기술 대비 좁은 빔 폭을 사용하여 간섭을 최소화하고, 통신링크를 가로챌 수 있는 영역을 크게 감소시켜 우수한 보안 특성을 갖는다. 뉴 스페이스(New Space) 시대 도래

에 따라 위성 데이터에 대한 의존도가 높아지고 점점 더 많은 위성 서비스가 필요함에 따라 우주 레이저 통신 기술 개발과 활용은 자연스럽게 요구되는 사항이다.

III. 우주 광통신 구성요소

1. 광학 지상국

우주에서 지상으로 전송된 데이터를 수신하여 지상 네트워크를 구축하고, 우주로 임무 정보를 전달하기 위해 지상에는 광학 지상국(Optical Ground Station)이 필요하다. 광학 지상국은 광신호가 대기를 통과하는 과정에서 구름, 먼지, 에어로졸, 난기류(Turbulence)와 같은 대기 교란 요소에 의해 방해받고, 왜곡이 발생할 수 있어 대기 교란 요소들이 적은 고지대에 대부분 위치한다. 표 1과 같이 NASA는 미국 캘리포니아(California) 테이블 마운틴(Table Mountain)과 하와이(Hawaii) 할레아칼라(Haleakala) 지역에 광학 지상국을 설치하여 운영 중에 있고, 유럽 우주 항공국(ESA: European Space Agency)은 스페인 카나리아 제도 테네리페(Tenerife) 지방의 테이데 천문대(Teide Observatory)에 광학 지상국을 설치하여 운영하고 있으며, 독일 항공 우주 센터(DLR: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)는 오버파펜호펜

(Oberpfaffenhofen) 지역에 광학 지상국을 운영하고 있다[5-10].

광학 지상국에서는 인공위성(Satellite), 우주선(Spaceship) 등이 상공을 지날 때 수백 km에서 수십만 km 거리까지 데이터 송수신을 수행하며, 이를 위해 정확한 트래킹을 통한 신속한 가시선(Line-of-Sight) 정렬이 필요하다. 아울러 우주 광학 터미널의 계획된 이동 경로와 거리를 바탕으로 광신호가 우주 광학 터미널에 도달하는 데 소요되는 시간을 고려하여 예상 위치에 광신호를 송신하는 지향각(Point-Ahead Angle) 제어 기술이 요구된다[11]. 광학 지상국에는 우주에서 지상으로 전송된 미약한 광신호를 수신하기 위해 광자 계수 수신기(Photon-Counting Detector)와 같은 매우 민감한 광신호 검출기 및 대기에 의한 영향을 보정 과정을 통해 최소화하기 위해 파면 측정장치(Wavefront Sensor), 변형 가능한 거울(Deformable Mirror) 등으로 구성된 적응 광학(Adaptive Optics) 시스템이 필요하다[11,12].

2. 우주 광학 터미널

우주 광학 터미널(Space Optical Terminal)은 우주에서 지상으로 방대한 과학 수집 데이터와 우주선 및 인공위성의 상태 데이터를 전송하거나 지상에서 우주로 전송된 임무 정보를 수신하기 위해 필요한 시스템으로 인공위성, 큐브위성(CubeSat), 우주 정거장(Space Station), 궤도선(Orbiter) 등에 탑재되어 운용된다. 우주 광학 터미널은 수백 km에서 수십만 km 이상 떨어진 곳과 대용량 데이터를 고속으로 송수신하기 위해 광학 지상국과 동일하게 정확한 가시선 정렬 및 지향각 제어 기능과 민감한 광신호 검출기가 필요하다. 우주 광학 터미널은 극한의 우주 공간에서 정상 동작하기 위해 유해 우주광선(Space Ray), 극저온, 급격한 온도변화 환경에서 내구성을 갖도

표 1 대표적 광학 지상국 현황

	Altitude(m)	Telescope Diameter(m)	Operation
Table Mountain	2,286	1.0	JPL
Haleakala	3,052	0.6	IfA
Teide	2,393	1.0	ESA
Palomar	1,702	5.1	Caltech
Oberpfaffenhofen	656	0.8	DLR

출처 Reproduced from [5-10].

JPL: Jet Propulsion Laboratory
IfA: Institute for Astronomy

록 엄격한 재료 선정과 부품 선정 및 구조설계가 필요하다. 또한, 다양한 임무 장비 탑재, 발사 및 제작 비용 절감, 임무 수행 기간 연장 등을 위해 소형·경량·저전력 설계가 요구된다. 현재까지 개발된 우주 광학 터미널에는 NASA에서 2013년 LLCD 프로젝트를 위해 개발한 LLST(Lunar Laser Communication Space Terminal), 2014년 국제 우주 정거장(ISS: International Space Station)에서 진행한 레이저 통신 시연용 OPALS(Optical Payload for Lasercomm Science), 2017년 큐브위성을 활용한 최초의 고속 우주 광통신 다운링크 시연(OCS: Optical Communications and Sensor Demonstration) 터미널, 중계형 레이저 통신 시연(LCRD: Laser Communications Relay Demonstration)을 처음으로 사용할 예정인 LEO 사용자 모뎀 및 증폭기 터미널(ILLUMA-T: Integrated LCRD Low-Earth Orbit User Modem and Amplifier Terminal) 등이 있으며[3], ESA에서 추진하는 중계형 우주 통신 시스템(EDRS: European Data Relay System)을 위한 우주 레이저 통신 터미널(Kaser Communication Terminal, LCT-135) 및 LEO 소형 우주 레이저 통신 터미널(Smart LCT-70) 등이 있고[13,14], 일본 우주항공 개발기구(JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency)에서 추진 중인 중계위성 기반 우주 광통신(JDRS: Japanes Data Relay System)을 위한 우주 레이저 통신 시스템(LUCAS: Laser Utilizing Communication System) 등이 있다[15].

3. 우주 중계 노드

우주와 지상 간 직접적인 데이터 통신방식 외에도 중계 위성, 우주 정거장 등 중계 노드(Relay Node)를 활용한 통신방식이 있다. 중계 노드를 활용한 방식은 글로벌 커버리지(Coverage)를 갖는 우주 광통신 네트워크의 유연한 구축과 지구-달(약 40만km) 및 지구-화성(약 5,600만km) 간 장거리 심우주 광통신

링크의 효과적인 구축을 위해 필요한 기술이다. 실제로 지구의 서로 다른 3개 궤도에 중계 위성을 적절히 배치할 경우, 전 세계 커버리지를 갖는 우주 광통신 네트워크 구축이 가능하다[3]. 기존의 우주-지상 간 직접 통신방식은 광학 지상국 상공을 우주 광통신 터미널이 통과하는 시간에 한정적으로 데이터 통신이 가능했으나, 우주 중계 노드 기반 통신방식은 하루 24시간 데이터 통신이 가능한 장점이 있다. 우주 중계 노드의 활용은 지구 궤도 임무 수행 뿐만 아니라 달과 달 궤도선(Moon Orbiter) 및 화성과 화성 궤도선(Mars Orbiter) 간에도 활용 가능하며, 달 지상국-달 궤도선-지구 궤도 중계 위성-지구 지상국 및 화성 지상국-화성 궤도선-지구 궤도 중계 위성-지구 지상국 간 광통신 링크 구축에도 확대하여 활용 가능하다. 우주 광통신 중계 기술 개발을 위해 NASA에서는 우주 시험 프로그램 위성(STPSat-6: Space Test Program Satellite)을 활용한 LCRD 프로젝트를 진행 중이고[3], ESA에서도 지구 관측용 Sentinel 위성을 활용한 EDRS 프로젝트를 진행 중이며[14], JAXA에서도 GEO 중계 위성을 활용한 JDRS 프로젝트를 진행 중이다[15].

IV. 우주 광통신 프로젝트

1. 미국 항공 우주국

가. LLCD

미국 항공 우주국(NASA)에서는 미래 우주 통신 수요 변화에 대응하고 기존 무선 주파수 시스템의 대역폭, 스펙트럼, 소비전력 문제를 보완하기 위한 목적으로 우주 레이저 통신 기술 로드맵을 수립하여 다수의 연구 개발을 수행하고 있다. 2013년 NASA에서는 지구에서 평균 약 38만km 떨어진 달 궤도를 도는 달 대기 및 먼지 환경 탐색 위성(LADEE: Lunar Atmosphere and Dust Environment

Explorer)에 탑재한 LLST(달 레이저 통신 우주 터미널)를 활용하여 지구로 622Mbps 전송속도 레이저 통신 및 지구에서 LADEE로 20Mbps 전송속도 레이저 통신을 연결하는 LLCD(달 레이저 통신 시연)를 성공적으로 완료했다[3]. 한 달간 진행된 LLCD를 통해 고화질 비디오 스트림을 LLST와 주고받았으며, NASA의 JPL(제트 추진 연구소)에서 운영하는 테이블 마운틴 광학 지상국 및 ESA의 테네리페 광학 지상국과 레이저 통신 테스트를 수행했다. LLCD는 현재까지 수행된 레이저 통신 중에서 거리가 가장 긴 양방향 레이저 통신 시연이다. NASA에서는 LLCD를 통해 주간 상황, 달의 밝기 변화, 광학 지상국의 위치 변화 등 우주 레이저 통신과 관련하여 다양한 광학적 스트레스 조건에 대한 테스트도 진행했다. 이를 통해 낮 동안 오류 없는 통신을 시연하고, 바람과 대기의 난기류가 우주 레이저 광통신에 큰 영향을 미치지 않으며, 얇은 구름이 있는 환경에서도 통신이 가능함을 확인했다. LLCD는 차세대 우주 레이저 통신연구와 기술 개발에 초석이 되는 초기 단계의 결과물로 우주 레이저 통신 기술을 검증하고, 추가 연구 개발을 위한 단계를 설정하는 계기가 되었다.

나. OPALS

2014년 NASA는 지구에서 약 420km 떨어진 ISS에서 4개월간 OPALS 레이저 통신 테스트를 진행하여, 1969년 아폴로 11호의 달 착륙 고화질 비디오를 7초 만에 광학 지상국으로 다운링크하는 데 성공했다[3,16]. SpaceX의 Falcon 9 Dragon 화물 우주선을 이용하여 ISS에 운송된 OPALS는 우주 광통신을 위한 집속(Focused) 레이저 에너지의 사용을 테스트하기 위한 목적으로 설계되었으며, 고가의 우주 인증 부품이 아닌 일반 상용 제품(COTS: Commercial Off-The-Shelf)을 사용하여 NASA의 JPL에서 제작했다. OPALS를 통해 NASA는 다양한 운용 조건 및 환

경에 따른 지상-우주 간 광통신 링크 유지 실험, 왜곡된 데이터의 처리 실험, 광통신 링크 설정을 위한 절차 설계, 광신호 송수신에 필요한 장비 테스트 등을 수행했다[3]. OPALS-지상 간 데이터 다운링크는 NASA JPL 테이블 마운틴 광학 지상국, ESA 테네리페 광학 지상국, DLR 오버파펜호펜 광학 지상국 등을 통해 수행되었다.

다. OCSD

NASA는 OCSD 프로젝트를 통해 2017년 큐브위성에서 광학 지상국으로 최초의 2.5Gbps 고속 우주 레이저 통신 다운링크를 시연했다[3]. OCSD에 사용된 3개의 1.5-Unit(1.5U) 큐브위성은 10cm×10cm×17cm 크기와 2.5kg 무게를 가지며, 지구 저궤도(고도 약 450km)에서 2개의 임무를 수행했다. 2015년에 수행한 첫 번째 임무에서는 두 번째 임무를 지원하기 위한 개선 사항 도출을 목표로 하나의 큐브위성을 사용하여 별 추적기(Star Tracker), 카메라, GPS(Global Positioning System), 전원 장치, 전개 장치(Deployment Mechanism)를 포함한 주요 하위 시스템 성능 검증을 실시했다. 2017년 수행한 두 번째 임무에서는 첫 번째 OCSD 임무를 통해 수집한 정보를 바탕으로 수정된 두 개의 큐브위성을 활용하여 큐브위성-광학 지상국 간 최초의 고속 우주 레이저 다운링크 및 업링크 통신을 시연했다. 현재까지 OCSD는 30cm 망원경 기반 소형 광학 지상국에 200Mbps 속도로 우주 광통신 다운링크가 가능한 수준으로 정밀도가 발전했다. OCSD에 사용된 우주 레이저 통신 시스템은 큐브위성에 탑재 가능하도록 소형 및 경량 설계되어 다른 우주용 레이저 통신 시스템과 차별되게 별도의 조향 제어 장치 없이 전체 큐브위성 방향 제어를 통해 레이저 빔의 조향을 제어한다. OCSD를 통해 우주 광통신 기술은 기존 RF 통신 전송용량을 초과하는 대용량 데이터를

생성하는 SAR(Synthetic Aperture Radar) 및 초분광 이미징(Hyper-Spectral Imaging) 분야에 큐브위성 활용 가능성을 열어주는 계기가 되었다. 아울러 큐브위성 우주 광통신 무리(Constellation) 또는 큐브위성 우주 광통신 중계 노드를 활용한 지구 전체 영역에 대한 저지연 고속 우주 광통신 서비스 가능성을 보였다[3].

라. LCRD

LCRD는 2021년 NASA에서 지구 궤도 및 심우주 임무에 레이저 통신 기술을 사용한다는 비전 아래 수행 중인 양방향 레이저 중계 시스템 기술 시연으로, 우주 레이저 통신 터미널 간 1.2Gbps 데이터 송수신이 가능할 것으로 기대된다[3]. LCRD의 통신임무 장비는 라우터(Router) 역할을 수행하는 SSU(Space Switching Unit)에 의해 연결되는 한 쌍의 레이저 광통신 터미널로 구성된다. LCRD는 2021년 12월 미국방부의 STPSat-6 위성에 통합되어 미국방부 우주군의 우주선을 통해 발사되었으며, 고도 36,000km 지구 정지궤도에서 우주 레이저 통신 중계 노드 역할을 수행한다. LCRD를 첫 번째로 활용할 것으로 예상되는 ILLUMA-T가 발사되기 전까지 LCRD는 지상의 링크 터미널(PGLT: Payload to Ground Link Terminal)에서 무선 주파수 신호로 전송된 데이터와 LCRD가 탑재된 우주선의 상태 데이터를 미국 테이블 마운틴과 하와이 할레아칼라에 위치한 광학 지상국으로 전송하는 우주 레이저 통신 다운링크 테스트를 수행한다. LCRD는 다양한 환경 조건과 운영 시나리오에 따라 기능을 테스트함으로써 우주 레이저 통신 기술의 수명과 신뢰성 입증에 활용 예정이며, 달과 지구 간 중계형 우주 광통신 시나리오를 테스트함으로써 NASA의 아르테미스 달 탐사 임무에 우주 레이저 광통신 기술이 어떻게 활

용되는지를 사전에 보여줄 것으로 기대된다[3]. 미래에 실현될 우주 데이터 전송 임무는 LCRD를 거쳐 지상에 지정된 광학 지상국으로 중계가 이루어질 것으로 예상되며, 대기에 의한 통신품질 저하 및 중단을 회피하고 유연한 우주 광통신 네트워크 구축을 가능하게 할 것으로 기대된다.

마. TBIRD

2022년 NASA는 200Gbps 데이터 다운링크가 가능한 우주 레이저 통신 기술개발을 위해 TBIRD(TeraByte InfraRed Delivery) 프로젝트를 시작했다. TBIRD 시스템은 6U급 PTD-3(Pathfinder Technology Demonstrator-3) 큐브위성에 탑재되어 지구 저궤도(고도 약 500km)에서 미국 테이블 마운틴 광학 지상국으로 폭발적인 레이저 광통신 링크 시연을 목표로 한다[3]. PTD-3 위성은 TBIRD의 레이저 통신 다운링크가 용이하게 수행될 수 있도록 광학 지상국을 향해 안정적인 본체 지향이 가능하도록 설계되었다. PTD-3 큐브위성에 탑재된 우주 광학 터미널은 하루 50TB 이상의 데이터 전송이 가능하다. TBIRD 시스템은 극한의 우주 환경에 사용 가능하도록 수정된 COTS 제품을 활용하여 MIT(Massachusetts Institute of Technology) 링컨 연구소에서 제작했으며, 이를 통해 큐브위성 탑재가 가능한 저비용·고효율 레이저 통신 제품 상용화를 앞당기는 동시에 큐브위성의 활용성을 높이는 역할을 할 것으로 기대된다. TBIRD 우주 광통신 터미널은 통신 링크 단절로 인한 데이터 전송 실패를 대비하여 데이터 패킷의 재전송을 요청하고, 이를 수행하도록 광송수신 시스템, 제어기, 메모리 등을 포함하는 자동 재전송 요구(ARQ: Automatic Repeat reQuest) 시스템을 탑재한다. NASA는 2022년 12월 TBIRD 임무를 통해 1.4TB 다운링크에 성공했다고 밝혔다[17].

바. ILLUMA-T

ILLUMA-T는 NASA에서 ISS에 탑재된 기존 RF 통신 시스템을 광통신 시스템으로 변경하기 위한 목적으로 개발하는 레이저 터미널로 LCRD를 처음으로 사용할 것으로 예상된다. ILLUMA-T는 ISS에서 수집한 고해상도 영상 정보와 방대한 양의 과학 및 탐사 데이터를 우주 레이저 광통신 링크를 통해 1.2Gbps 전송 속도로 LCRD로 보내고, 최종적으로 LCRD에서 미국 테이블 마운틴 광학 지상국 또는 하와이 할레아칼라 광학 지상국으로 데이터를 전송하는 구조이다. ILLUMA-T는 2023년 발사가 계획되어 있으며, ISS에 설치되기 전에 적도 상공 36,000km 지구 정지궤도에서 광학 지상국과 데이터를 주고받는 테스트를 진행할 예정이다. ILLUMA-T는 MIT 링컨 연구소에서 제작했으며, NASA의 고다드 우주 비행 센터(Goddard Space Flight Center)에서 운영할 예정이다[3].

사. DSOC

DSOC(Deep Space Optical Communication)는 기존 RF 통신 대역폭 한계로 인한 심우주 탐사 통신 문제를 해결하기 위한 레이저 기반 우주 광통신 기술 개발 연구이다[3]. DSOC는 화성과 목성 사이에서 태양 궤도를 여행하며 태양계 초기 행성의 노출된 니켈-철 코어(Nickel-Iron Core) 구조를 갖는 것으로 예상되는 금속 소행성인 프시케(Psyche)를 연구하기 위한 Psyche 우주선을 타고 비행하는 동안 지구와 심우주 레이저 통신을 테스트한다. DSOC는 NASA에서 달을 넘어 실시하는 최초의 심우주 레이저 통신이 될 전망이며, 이를 통해 우주 광통신 기술에 대해 많은 지식과 깊은 통찰력을 얻을 것으로 예상된다. DSOC의 핵심 목표에는 지상 시스템과 심우주 레이저 통신 시스템 간 상호 신호 고정(Lock) 시연, 지구에서 멀리 이동하는 동안 예정된 심우주 레

이저 통신 다운링크 시연, 지구와 태양 간 평균 거리(약 1억 5천만km)까지 데이터 업링크 시연이 있다 [3]. DSOC 기술 시연은 Psyche 우주선 발사 직후부터 시작하여 화성의 중력을 이용하여 가속하는 스윙바이(Swingby)까지 이동하는 1년여간 진행될 예정이며, 테스트 결과에 따라 Psyche 우주선이 2억 4천만km 이상 떨어진 프시케 소행성까지 비행하는 약 3년 반 동안 확장된 추가 임무를 수행할 전망이다. DSOC 업링크에는 미국 JPL의 테이블 마운틴 광학 지상국 레이저 송신기 시스템이 활용되고, 다운링크에는 매우 높은 민감도를 갖는 초전도 나노와이어(Nano-Wire) 광자 계수 수신기와 5.1m 직경을 갖는 Hale 망원경이 설치된 미국 Caltech의 Palomar 광학 지상국이 활용될 예정이다. Psyche 우주선에 장착되는 광통신 터미널은 22cm 송수신 직경을 가지며, 우주선 진동으로부터 광학 터미널을 안정화시키는 액추에이터 및 스트럿(Struct)이 적용된 것으로 알려져 있다. DSOC는 데이터 집약적인 미래 심우주 임무에 우주 광통신이 활용 가능하다는 사실을 증명할 것으로 기대된다.

아. O2O

NASA는 아르테미스II 임무를 통해 1972년 아폴로 17호 달 탐사 우주선 이후 처음으로 인간을 달로 데려갈 유인 우주선인 오리온 우주선(Orion Spacecraft)을 2024년 5월경 발사할 예정이다. 아르테미스II 임무에서 지구와 우주 비행사 간 실시간 통신에 우주 레이저 광통신 기술이 사용될 예정이며, 이를 위해 O2O(Orion Artemis II Optical Communication System)를 개발하고 있다[2,3]. O2O 터미널은 달 비행 테스트 및 지구 귀환 임무를 수행하는 오리온 우주선에 탑재되어, 달에서 수집한 방대한 양의 과학 데이터를 지구로 실시간 전송하는 역할을 한다. 펄스 위치 변조(PPM: Pulse Position Modulation) 방식을 사용하는

O2O 우주 광통신 터미널은 최대 260Mbps 다운로드 속도와 20Mbps 업링크 속도 달성을 목표로 한다. O2O는 오리온 우주선이 귀환하기 전까지 최소 하루 1시간 아르테미스II 임무 수행을 위한 광통신 링크 연결에 사용될 예정이다. NASA의 아르테미스II 임무가 성공할 경우, O2O는 최초의 유인 우주선-지구 간 우주 레이저 광통신 시연이 될 것이다. O2O 우주 광통신 터미널 운영은 NASA의 존슨 우주 기지(Johnson Space Center)에서 수행할 예정이다.

2. 유럽 우주 항공국

유럽 우주 항공국(ESA)의 우주 레이저 광통신 기술 개발은 ESA 기술 연구 프로그램 및 일반 지원 기술 프로그램을 통해 시작되었다. 그 결과 2001년 세계 최초로 우주선 간 우주 레이저 광통신 시연을 성공했으며, 테네리페 광학 지상국을 활용하여 NASA와 함께 LLCD 프로젝트를 수행했다. 2013년에는 유럽의 고출력 통신 플랫폼인 Alphabus를 최초로 사용한 GEO 위성 Alphasat의 임무 수행을 위해 위성 간 L-대역 우주 레이저 통신 터미널을 독일의 DLR 주도로 개발했다[14].

ESA 역시 NASA의 LCRD와 유사하게 중계 GEO 위성을 활용한 EDRS를 추진했으며, 우주 레이저 광통신 터미널을 탑재한 Sentinel LEO(고도 약 700km) 위성을 통해 유럽의 환경 모니터링 정보를 EDRS(고도 약 36,000km)로 보내고 광학 지상국으로 최대 1.8Gbps 속도로 전송하는 데 성공했다. 이는 기존 X-대역 데이터 다운로드 속도와 다운로드 양 대비 각각 약 3.5배 및 14배 향상된 결과이다[4]. EDRS는 향후 LEO 위성 데이터의 지상 다운로드 속도를 최대 7.2Gbps까지 높이고, 우주 비행선과 지상 제어 센터 간 실시간 통신을 지원하도록 설

계되었다. ESA는 EDRS를 추진하기 위해 정지 데이터 중계 노드 역할을 하는 위성인 EDRS-A(170kg)와 EDRS-C(130kg)를 각각 2016년과 2019년에 발사했다. EDRS 중계 위성은 LEO 위성이 수집한 데이터를 지상으로 다운로드하는 데 필요한 가시선 정렬 소요 시간 대기 및 지연 문제 극복에 활용 가능하다. 실제 EDRS 위성 하나는 LEO 위성이 지정된 지상국의 상공에 도달하여 지상국과 통신이 가능한 가시성 시간(Visibility Time)을 위성 궤도 주기의 약 50%까지 향상시킴으로써 통신 시간을 4배 연장할 수 있다[14]. 따라서 EDRS는 넓은 유럽 커버리지를 갖는 우주 광통신 네트워크 구축을 가능하게 하고, 데이터 전송 비용을 절감시키며, 데이터 보급 용이성 및 효율성을 향상시킬 수 있다. 우주 레이저 광통신을 활용한 EDRS와 LEO 위성 간 링크(ISL: Inter-Satellite Link) 설정에는 45,000km 거리에 걸쳐 직경 135mm의 목표물을 트래킹하고 정렬하는 과정을 포함하여 약 55초가 소요되는 것으로 알려져 있다[14]. 유럽의 EDRS는 산업계에서 'SpaceDataHighway'라고도 불리며, 약 90분(LEO 위성 최대 통신지연 시간)마다 지구 주위를 도는 LEO 지구관측 Sentinel 위성 4개(1A/B 및 2A/B 위성)와 2개의 GEO 통신 위성 사이에 성공적인 양방향 우주 광통신 링크를 구축하고, 하루 최대 40TB의 데이터를 지구로 증계할 수 있다[4]. EDRS 리턴(Return) 링크는 LEO-GEO-지상 순으로 최대 1.8Gbps 전송속도를 지원하며, 정방향(Forward) 링크는 지상-GEO-LEO 순으로 최대 500bps 전송속도를 지원한다[4]. EDRS-A에는 별도의 Ka 대역 전파방식의 ISL 기능이 있으며, 리턴 링크와 정방향 링크는 각각 300Mbps 및 1Mbps 전송속도를 지원한다[4].

현재 EDRS는 LEO 지구관측 위성 4개에서 획득한 주야간 레이더 이미지 정보 및 멀티스펙트럼 고해상도 정보(환경정보, 지표면 이동 위험, 산불, 홍수,

해빙 지대 모니터링 정보 등)를 매일 거의 실시간으로 전송하고 있다. 또한, 정부 및 보안 서비스를 위해 지구 관측 위성 및 항공 플랫폼에서 수집한 민감 데이터에 대해 거의 실시간 암호화된 접속 서비스 제공이 가능하고, 유럽 외부 지상국에 대한 의존도를 제거함으로써 독립성을 강화한다.

Alphasat과 Sentinel-1A에 탑재되는 우주 레이저 광통신 터미널은 ESA와 DLR의 지원을 받은 독일 Tesat Spacecom에서 개발했다. Tesat에서 개발한 1세대 및 2세대(TRL9 획득) 우주 레이저 통신 장비는 동일하게 1,064nm 통신파장, 이진 위상 편이 변조(Binary Phase Shift Keying) 방식 및 Coherent 검출방식을 사용한다. 그러나 1세대/2세대 장비는 전송 속도(5.625Gbps/1.8Gbps), 링크 범위(>5,100km/>45,000km), 평균 전송 전력(0.7W/2.2W), 무게(35kg/56kg), 크기(0.5m×0.5m×0.6m/0.6m×0.6m×0.7m), 전체 소비전력(120W/160W), 비트 에러율($<10^{-11}$ / $<10^{-8}$), 망원경 직경(125mm/135mm) 등에서 차이점을 갖는다[18].

ESA의 Moonlight(Lunar Satellites) 프로젝트는 다수의 산업 파트너와 협력을 통해 달 주위에 통신 및 내비게이션 기능을 갖는 위성군을 배치하여 전용 달 통신 및 내비게이션 시스템을 갖추고, 다양한 달 탐사 임무 수행 지원 및 미래 상업적 서비스를 목적으로 추진 중이다. 달 레이저 통신 서비스는 2028년 이후 가파르게 증가할 것으로 예상되며, 달 탐사 데이터 수요에 맞춰 지구와 달 간 데이터 중계 서비스를 제공하고 지구에서 원격으로 달 반대편에 가시성 없는 지역에서 수행되는 임무가 지속적으로 유지될 수 있도록 돕는 역할 수행할 것으로 예상된다. 아울러 Moonlight 프로젝트를 통해 더 많은 ESA 회원국에서 적은 예산으로 자체 달 탐사 임무를 시작할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 일본 우주항공 개발기구

일본 우주항공 개발기구(JAXA)는 1993년 미래 우주 통신 인프라가 될 우주 레이저 광통신 기술의 실증 프로그램인 OICETS(Optical Inter-orbit Communications Engineering Tests)를 시작하여 2006년 ESA와 국제 협력을 통해 아르테미스 간 우주 통신 실험을 성공적으로 수행했다. 2020년에는 ISS 일본 실험 모듈 ‘키보(Kibo)’ 노출 시설에 설치된 SOLISS(Small Optical Link for International Space Station)를 활용하여 NICT(National Institute of Information and Communications Technology)의 광학 지상국과 양방향 적외선 레이저 통신이 가능한 통신링크를 구축하고, 소형 위성용으로 설계된 우주 레이저 통신 장치를 사용하여 양방향 100Mbps 이더넷(Ethernet) 방식 고해상도 이미지 다운링크에 세계 최초로 성공했다[19,20].

JAXA는 2015년 LEO 사용자 위성과 GEO 데이터 중계 위성 사이에 고속 우주 광통신 중계 시스템 개발을 위한 JDRS 프로젝트를 시작했다. 2020년 JAXA는 일본 다네가시마 우주센터에서 JDRS-1을 발사하고, NICT와 협력을 통해 NICT의 광학 지상국을 활용하여 JDRS의 우주 광통신 터미널과 일본의 정보 수집 위성 및 지상 간 광정렬 및 데이터 통신을 수행했다. 미쓰비시 전기(Mitsubishi Electric)에서 제작한 JDRS 위성 및 JAXA에서 개발한 LUCAS(우주 레이저 통신 시스템)는 망원경 직경 140mm를 가지며, 고도 35,400km 상공에서 고도 200~1,000km LEO 위성과 1,560nm 파장을 활용한 1.8Gbps 전송 속도의 리턴 링크와 1,540nm 파장을 활용한 50Mbps 전송 속도의 정방향 링크를 형성하고, 10^{-11} 이하의 비트 에러율(Bit Error Rate)을 갖는다 [20]. 여기서 리턴 링크와 정방향 링크는 각각 LEO-GEO-지상 및 지상-GEO-LEO 순서이며, 지상으

로의 데이터 다운링크는 Ka-band 무선 RF 통신을 통해 이루어진다.

V. 결론

본고에서는 뉴 스페이스 시대에 다양한 우주 임무 수행 및 글로벌 위성통신 서비스 제공을 위해 필요한 대용량·초고속 우주 광통신 기술의 우수성과 핵심 요소기술을 살펴보고, 우주기술 선진국에서 추진하고 있는 우주 광통신 기술 관련 개발 프로젝트에 대해 알아보았다. 우주 광통신 기술은 높은 기술난이도를 요구하는 첨단 기술로 파급 효과가 크고, 국가안보와 차세대 성장동력 확보를 위해 국가 차원의 적극적이고 지속적인 연구 개발이 필요한 미래 핵심기술이다. 최근에는 경제적 이익 달성을 목적으로 공공-민간 파트너십 프로젝트를 통한 우주 광통신 장비와 기술에 대한 개발이 진행되고 있어 관련 시장의 급성장이 기대된다. 우리나라도 공간한계를 넘는 위성통신 기술 개발을 위한 전략을 수립하여 추진 중에 있으나, 우주 광통신을 적용하기 위한 연구와 인프라가 크게 부족한 실정으로 관련 핵심기술 확보를 위해 정부가 주도하고 민간이 공동참여하는 프로젝트 추진이 필요하다. 현재 ETRI에서는 우주·국방·보안통신 분야 응용을 위한 목적으로 적외선 레이저 기반 장거리 중계형 무선 광통신 기술 개발과 함께 실증을 통한 기술 고도화를 진행하고 있다.

약어 정리

ARQ	Automatic Repeat reQuest
COTS	Commercial Off-The-Shelf
DLR	Deutsches zentrum fur Luft- und Raumfahrt
DSOC	Deep Space Optical Communication

EDRS	European Data Relay System
ESA	European Space Agency
GEO	Geostationary Earth Orbit
GPS	Global Positioning System
IfA	Institute for Astronomy
ILLUMA-T	Integrated LCRD Low-Earth Orbit User Modem and Amplifier Terminal
ISL	Inter-Satellite Link
ISS	International Space Station
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
JDRS	Japanes Data Relay System
JPL	Jet Propulsion Laboratory
LADEE	Lunar Atmosphere and Dust Environmet Explorer
LCRD	Laser Communications Relay Demonstration
LEO	Low Earth Orbit
LLCD	Lunar Laser Communications Demonstration
LLST	Lunar Laser Communication Space Terminal
LUCAS	Laser Utilizing Communication System
MIT	Messachusetts Institute of Technology
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NICT	National Institute of Information and Communications Technology
OCSD	Optical Communications and Sensor Demonstration
OICETS	Optical Inter-orbit Communications Engineering Tests
OPALS	Optical Payload for Lasercomm Science
O2O	Orion Artemis II Optical Communication System
PPM	Pulse Position Modulation
PTD-3	Pathfinder Technology Demonstrator-3
PGLT	Payload to Ground Link Terminal

RF	Radio Frequency
SAR	Synthetic Aperture Radar
SOLISS	Small Optical Link for International Space Station
SSU	Space Switching Unit
STPSat-6	Space Test Program Satellite
TBIRD	TeraByte InfraRed Delivery

참고문헌

[1] D.J. Geisler, "Modem module development for NASA's orion spacecraft: Achieving FSO communications over lunar distances," in Proc. OFC Conf., (San Diego, CA, USA), Mar. 2020, Th3J.1.

[2] <https://esc.gsfc.nasa.gov>

[3] <https://www.nasa.gov>

[4] <https://www.eoportal.org/satellite-missions/edrs>

[5] 엄만석, 장동필, 이병선, "저궤도 군집 통신위성 탑재체 기술 동향," 전자통신동향분석, 제37권 제3호, 2022, pp. 41-51.

[6] <https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle>

[7] <https://www.iac.es/en/observatorios-de-canarias>

[8] <https://sites.astro.caltech.edu/palomar>

[9] <https://www.dlr.de/content/en/articles/news/2022>

[10] D. Giggenbach et al., "Downlink communication experiments with OSIRISv1 laser terminal onboard Flying Laptop satellite," Appl. Optics, vol. 61, no. 8, 2022, pp. 1938-1946.

[11] H. Kaushal et al., Free Space Optical Communication, Springer, New Delhi, India, 2017.

[12] L.C. Roberts et al., "Daytime adaptive optics for deep space optical communication," in Proc. SPIE, vol. 11133, (San Diego, CA, USA), 2019, pp. 1-9.

[13] 김정아, "정지궤도 자료중계위성과 광통신탑재체 동향," 항공우주산업기술동향, 제18권 제1호, 2020, pp. 75-85.

[14] <https://www.esa.int>

[15] <https://www.satnavi.jaxa.jp>

[16] <https://www.jpl.nasa.gov>

[17] Satellitetoday, NASA's TBIRD Mission Demonstrates 1.4 TB Optical Downlink, 2022. 12. 6.

[18] M. Gregory et al., "Commercial optical inter-satellite communication at high data rates," Opt. Eng., vol. 51, no. 3, 2012, article no. 031202.

[19] <https://www.nict.go.jp>

[20] <https://www.satnavi.jaxa.jp>