

심우주통신: 심우주 탐사선과 통신을 위한 프로토콜

구철회 한국항공우주연구원 위성운영2부 책임연구원

1. 머리말

언젠가 ‘한국인에게 있어 가장 손 떨리고 조바심 나는 상황이 무엇인가?’라는 유머를 온라인에서 본적이 있다. 정답은 바로 ‘휴대전화 메인 화면에서 통신신호 세기를 가리키는 막대기가 1~2개로 줄어들었을 때’라는 것이다. ‘통신만큼 중요한 것도 없다’는 사실을 우회적으로 희화한 유머라고 생각된다.

이는 우리나라 같이 넓지 않은 영토에 조밀하게 이동통신 중계기가 설치된 곳에선 생소한 상황이다. 그러나, 이동통신 서비스 초기인 2000년대 초반만 해도 종종 있던 일이었다. 실제 도시권 밖으로 조금만 벗어나도 신호 세기가 감소하고, 심지어 깊은 산에선 통화가 터지지 않는 경우도 많았다. 이러한 경우, 휴대전화 안테나를 뽑아 머리 위로 들고 신호가 좀 더 강해지기를 희망하곤 했다. 그 당시엔 지금과 같은 인터넷 데이터 통신이나 유튜브 시청은 상상도 하지 못했었다. 지금 처럼 인터넷이 문화·경제·사회 성장 간 밀접한 관계가 있는 시대에선, 원활한 통신이야말로 서로 떨어진 대상과 어떠한 일을 도모하기 위한 최우선 선결 사항이 아닌가 싶다.

다행히 과거에서부터 현재의 3G·LTE를 넘어, 5G·6G로 나아가는 첨단 이동통신 시대를 관통하는 기술·산업·정책적 연결이 끊임없이 이어져 오고 있다. 이는 끊임없는 소비자의 요구에 따라, 이동통신에 대한 기술 투자와 진보가 지속적으로 이뤄졌기 때문이다. 이번 원고에선 그중에서도 심우주통신(Deep-Space Communication) 기술의 과거, 현재, 미래를 조망할 것이다. 독자들로 하여금, 심우주통신에 대한 관심과 상식의 영역을 넓히는 데 조금이나마 도움이 됐으면 한다.

심우주통신은 지구와 심우주 사이 공간을 연결하는 통신망 구축을 뜻한다. 심우주통신 기술은 그 통신망을 구축하기 위해 ‘새롭게’ 고려돼야 할 기술을 의미하며, 이번 원고에선 심우주통신의 기술적 측면, 특히 프로토콜(Protocol)에 대해 중점적으로 고찰하고자 한다.

2. 심우주통신의 정의, 프로토콜의 과거와 현재 그리고 연구동향

2.1 심우주통신이란?

ITU(국제전기통신연합, International Telecommunication Union) 정의에 따르면, 심우주통신은 ‘지구로부터 2백만km 떨어진 영역에 있는 탐사선과 통신하는 것’을 의미한다. 2백만km 떨어진 곳에선 지구와의 지연시간이 약 6.67초 발생한다. 또한 지구중력이 감소하고 태양 중력이 더 지배적인 영향을 미친다. 때문에 해당 영역부턴 근거리 우주통신과 차별화된 통신 프로토콜이 필요하다. ITU 분류와 달리, 지구와 약 38만km 떨어진 달 환경에서의 통신 기술은 심우주통신 범위로 통상

취급된다. 이는 달 환경에서의 통신이 화성 및 그 너머 심우주 탐사를 실현하기 위한 기술 교두보적인 의미가 있기 때문이다. 즉, 달 탐사를 위해 시험 개발되고 있는 우주통신 기술은 사실 향후 화성 탐사에 사용할 목적으로 연구되고 있다는 것이다. 참고로, 지구와 화성 간 평균 거리는 약 2억 2,500만km 떨어져 있다.

심우주통신은 긴 지연 시간과 경로 손실에 따른 높은 비트 오류율이 그 특징이다. 이를 극복하기 위해선 긴 지연 시간을 극복하는 특수 프로토콜이 필요하다. 또한, 높은 오류율에 대처하기 위한 에러 정정코딩 기술, 저장 및 자동 재전송과 같은 송신 오류 처리 방법도 적극 고려돼야 한다.

2.2 심우주통신 프로토콜의 필요성

통신 프로토콜은 '나와 상대방과의 통신을 수립하기 위해 필요한 절차를 서로 약정하는 것'을 의미한다. 논의 과정을 거쳐 최종 정리된 절차를 '통신표준'이라고 한다. 우리는 통신 비전문가라도 인터넷을 쉽고 자유롭게 안전하게 사용할 수 있다. 이는 바로 인터넷 통신 프로토콜 표준이 지속적으로 사용자 요구에 맞춰 진화해 왔기 때문이다. 3G, LTE, 5G-6G 이동통신 프로토콜 모두 각각 운용 환경에 맞춰 특색있게 진화했거나 개발되고 있으며, 심우주통신 프로토콜도 이와 다르지 않다. 기존 심우주통신 프로토콜은 근지구통신 기술의 확장에 머물렀다. 좀 더 먼 곳으로의 통신은 안테나에서 좀 더 강한 출력을 내고, 좀 더 큰 직경을 가진 안테나를 구축하는 것으로 해결했으며, 소프트웨어 프로토콜 혁신은 크게 없었다. 통신 주파수 대역이 S-band, X-band에서 Ka-band, 레이저 광 영역으로 진화하고 있는 중이지만, 통신 프로토콜 측면의 획기적 변화는 감지하기 어려웠다.

지금껏 심우주 관측데이터 수신 중 문제가 생겨 통신이 중단되면, 다시 처음부터 받는 것으로 문제를 해결했다. 하지만 통신 속도가 고속화됨에 따라, 이런 통신오류 처리에 드는 인력·비용의 문제가 점차 커지게 됐다. 이에 더해, 심우주 탐사 목적지에서 더욱 복잡하고 어려운 임무를 수행하기 위해선, 중간에 통신오류가 발생해도 임무 중단을 야기하지 않도록 관리 가능한 통신 프로토콜이 필요하게 됐다.

2.3 심우주통신 프로토콜의 연구 동향

심우주통신의 목적은 지상 인터넷과 마찬가지로 끊임없는 연결성(connectivity)을 서비스 요청자에게 제공하는 것이 아니다. 통신중단이 간헐적으로 발생하더라도, 이를 자동으로 보상해 임무 수행에 차질이 없도록 지원하는 통신 서비스를 제공하는 것이다. 지상국 또는 심우주에 위치한 심우주 탐사선이 서비스 요청자에 해당될 수 있다.

상대적 위치가 고정돼 있는 지상 인터넷과 달리, 천체가 각각 회전하고 있는 지구-달 간 통신에선 끊임없는 연결을 제공하기 위한 통신중계위성이 필요하다. 더불어, 통신이 중간에 끊기면서 발생하는 지연 및 결함을 보상해 온전한 데이터 전달성을 보장하는 통신 프로토콜도 요구된다. 결국 지상 인터넷 기술과 유사하지만 여러 면에서 다른 IPN(행성간 네트워크, Interplanetary Network) 또는 DTN(결함허용네트워크, Delay/Disruption-Tolerant Networking) 개념이 전산학자 빈트 서프(Vint Cerf) 및 NASA(미항공우주국, National Aeronautics and Space Administration), JPL(제트추진연구소, Jet Propulsion Laboratory) 우주통신 연구자들로부터 제안됐다[1].

지금부터 이번 원고에서 심우주통신 프로토콜이라 함은, DTN 프로토콜을 지칭하는 것으로 하겠다. 쉽게는 다누리 DTNPL(DTN 탑재체) 시험[2]을 통해 대중에게 널리 알려진 대로, '우주 인터넷'이라는 이름으로 이해해도 무방할 것으로 생각된다.

필자는 '행성 간 인터넷'이라는 이름이 좀 더 심우주통신망 기술의 취지와 가깝다고 생각하지만, 우주 인터넷도 전혀 다른 취지의 이름은 아니다. 다만 스페이스X(SpaceX) 스타링크, 블루오리진 원웹(OneWeb) 등 근지구 릴레이위성을 이용한 인터넷 제공 서비스가 이미 우주 인터넷으로 불리고 있기에, 이와 DTN 프로토콜이 혼동될 수 있다. 따라서, 상황에 따라 의미를 달리 해석할 필요가 있다고 생각한다.

DTN 통신 프로토콜과 기존 레거시 우주통신 프로토콜의 가장 두드러진 차이점은 '망(network)' 구성에 대한 지원 여부라고 요약할 수 있다. 기존 우주통신 프로토콜은 서비스 이용자 간 직접적 점대점(point-to-point) 통신이다. 이는 중간에 타인이 들여다보는 것을 허락지 않으며, 오류에 따른 자동 재전송 기능이 고려돼 있지 않다. 통신운용 중에 오류가 발생하면 이용자가 직접 확인 후 재전송을 요청해야 하는 구조로 돼 있다. 그렇기에, 어쩔 수 없이 시간 및 정보 공간의 낭비를 감수할 수밖에 없다.

반면, DTN 통신 프로토콜은 인터넷과 마찬가지로 망 구성 기능을 제공한다. 이 기술의 최종 목표는 행성 간 인터넷워킹(internetworking) 통신망을 구축하는 것이다. 나와 통신 상대방 사이에서 네트워크 노드가 중계(릴레이) 역할을 수행한다. 네트워크 노드는 통신오류 발생 시 나 대신 해당 오류를 처리하고, 최근 송신측에 자동 재전송을 요청한다. 이를 통해 완전한 데이터를 최종 목적지에 전달해주거나, 역으로 최초 송신자가 보낸 데이터를 나에게 완전하게 전달해 준다. 만약 상대방이 수신 준비가 돼 있지 않다고 하면 다른 루트(route)를 찾거나, 이도 여의찮으면 상대방이 준비될 때까지 친절하게 기다려 주기까지 한다. 이 모든 과정이 프로토콜에 의해 자동으로 처리되므로 사용자는 DTN 통신 서비스를 통해 최상의 결과를 얻을 수 있다.

DTN 통신 프로토콜에 대한 자세한 소개는 참고문헌[3]으로 대신한다. DTN 통신 프로토콜은 여러 가지 구성 프로토콜로 구성돼 있으며, 번들 프로토콜(bundle protocol), 융합계층 프로토콜(convergence layer), 심우주파일전송프로토콜(CCSDS file delivery protocol) 등이 대표적이다.

[그림 1]은 DTN 통신 프로토콜의 우주 적용 역사를 보여주고 있다. [그림 2]는 DTN 통신 프로토콜의 소프트웨어 계층 간 구조를 보여 준다. <표 1>엔 각 DTN 통신 프로토콜 계층에 대한 간략한 설명을 추가했다.

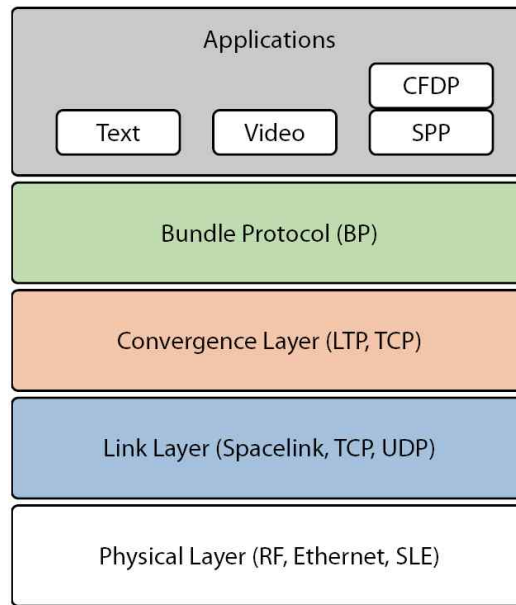
심우주통신의 구조적 어려움은 통신 노드 간 상대적 위치, 거리, 심우주탐사선의 자세가 끊임없이 변경된다는 것이다. 따라서, 현재 통신 가능한 패스의 확인가능 여부를 확인하고, 최적의 통신 중계 루트를 찾는 것은 매우 중요한 문제다. 통신 중계경로 선정 방법에 대한 연구는 많은 초창기 DTN 연구자들의 과제였고, 여전히 흥미로운 연구 주제이기도 하다[6]. DTN 프로토콜 표준화는 IETF(국제인터넷표준화기구, Internet Engineering Task Force) 및 CCSDS(우주데이터시스템자문위원회, Consultative Committee for Space Data Systems)에서 전 세계 전문가들이 참여한 가운데 진행하는 중이며, 관련 정보는 각 기관 홈페이지에서 확인할 수 있다. 최근 중점적으로 논의되고 있는 표준화 이슈는 번들 프로토콜 표준의 버전 변경(6→7), 번들 암호화, 번들 라우팅에 대한 것들이다.



[그림 1] DTN 및 통신 중계 우주 미션 현황[4]

<표 1> DTN 프로토콜 계층 기능

계층	기능
응용 (application) 계층	전달할 데이터를 생성하거나 수신한 데이터를 처리하는 역할을 담당하는 계층. DTN 프로토콜의 특성상 수신 데이터가 생성 순서로 정렬돼 도착하지 않기 때문에 비정렬 수신 데이터를 정렬하는 기능이 필요. 우편을 보내기 위해서 편지지에 내용, 사연을 기록하는 과정이라고 비유할 수 있음
번들 프로토콜 계층	송신자, 수신자 등의 정보가 포함된 데이터 패킷 전달 메시지 작성을 담당하는 계층. 암호화 등의 보안 처리도 이 계층에서 담당함. 우편 봉투에 편지지를 넣고 보내는 사람 주소, 받는 사람의 주소를 적고 다른 사람이 볼 수 없도록 인장을 찍는 과정(암호화)으로 비유할 수 있음.
융합 계층	불완전한 심우주통신 링크에서 상위 생성된 번들 메시지를 완전하게 전달하는 기능을 담당하는 계층. 전송 오류가 발생한 번들 메시지를 확인해 재전송을 요청하고 최종 완전한 번들 메시지로 합치는 기능을 수행함. 우편물을 직접 실수 없이 배달하는 우편원의 역할로 비유할 수 있음. DTN 프로토콜의 신뢰성 전송 기능을 담당하는 부분이며, TCP 융합계층의 경우 복잡하지 않으나, LTP 융합계층[5]의 경우 DTN 프로토콜 구현 시 실제 가장 많은 개발 공수가 들어가는 모듈임.
링크 계층	가장 낮은 수준의 심우주통신 수단을 제공하는 계층. 레거시 우주통신이 제공했던 서비스가 이 계층에 해당됨. 통신 과정 중 열악한 심우주통신 환경에 의해 손실된 패킷이 발생할 수 있음. 우편물을 수신지 우편물함에 넣는 과정으로 비유할 수 있음. 이 과정에서 강우·강풍에 의해 우편물이 훼손되거나 독수리·강아지 등 동물에 의해 유실될 가능성이 있는 것과 마찬가지로, 패킷 손실을 비유적으로 설명할 수 있음
물리 계층	RF, 광(Optic)을 포함한 물리적 신호 발생을 담당하는 계층. 프로토콜이 아닌 단위 패킷 프레임에 대한 1차적인 통신오류 처리를 담당함. 우편물을 트럭, 오토바이, 자전거 등의 운송수단으로 실어 나르는 과정으로 비유할 수 있음.



[그림 2] DTN 프로토콜 소프트웨어 구조

우주통신은 유선이 아닌 무선으로 수립되는 것이기에 우주통신 주파수에 대한 확보와 보호 역시 매우 중요한 이슈다. 심우주탐사에 필요한 주파수 보호 관련 정보는 참고문헌[7]에서 확인할 수 있다.

2.4 심우주통신 프로토콜 운용

지구 직접 통신(direct to earth)과 같은 레거시 통신 방법이 아니라, 심우주통신 네트워크를 사용해 통신하려고 한다면 다음과 같은 점을 고려해야 한다.

우선 본인 탐사선이 심우주통신 네트워크와의 호환성을 갖고 있어야 한다. 즉, 사용 주파수와 송수신 출력, 안테나 감도 등이 상대방 통신 시스템과 호환돼야 상대방 노드와 접속(컨택) 가능하다. 또한, 상대방 노드의 위치와 향후 진행 방향을 알아야 컨택이 지속적으로 이뤄질 수 있다. 물론 상대방 노드 역시 사전에 본인 탐사선의 위치를 파악하고, 컨택 준비를 하고 있어야 한다. 이와 관련해선 ISL(위성간링크, Inter-satellite Link) 기술을 참고하면 좋을 것으로 생각된다.

최근엔 RF(Radio Frequency) 외에 레이저 통신도 활발하게 사용되고 있다. 대표적으로 스타링크의 인터넷 중계위성 간 ISL 통신이 레이저 방식으로 이뤄지고 있다[8]. 심우주통신은 무선으로 수행되는 것이기에, 관련 주파수 허용에 대한 국제적 규제에 맞춰 진행해야 한다.

이 컨택이 성공적으로 이뤄졌다면, 다음은 프로토콜 소프트웨어 처리다. 컨택 후엔 양 노드 간에 프로토콜 데이터 교환이 진행된다. 수신기를 통해 입수된 프로토콜 데이터는 심우주탐사선에 탑재된 심우주통신 프로토콜에 의해 해석·처리된다. 입수된 프로토콜 데이터의 최종 목적지가 자신이라면 이 프로토콜 데이터를 자신의 어플리케이션 계층으로 보내고, 그렇지 않다면 최종 목적지로 가는 최적 경로를 계산해 프로토콜 데이터를 전달한다. 만약 적절히 보낼 경로가 현재 존재하지 않으면, 새로이 전달할 기회가 올때까지 일정 시간 보관한다. 성공적으로 받은 프로토콜 데이터의 경우, 수신 성공 확인을 상대방에게 보내 상대방이 불필요한 데이터를 지울 수 있도록 한다. 심우주통신 프로토콜 운용의 소프트웨어 측면을 살펴보면 다음과 같다. 심우주탐사선의 컴퓨팅

파워는 지상과 비교할 때 매우 성능이 낮다. 컴퓨터 프로세서의 성능도 상대적으로 낮고 메모리 용량도 차이가 크다. 컴퓨팅 파워를 높이려고 해도 심우주탐사선의 전력 버짓은 늘 부족하기만 하다.

하지만 이 프로토콜 소프트웨어는 긴 통신지연 및 빈번한 통신중단 상황을 처리할 수 있어야 한다. 때문에, 해당 소프트웨어를 개발하는 과정엔 여러 가지 도전적 과제가 도사리고 있다. 소프트웨어 동작 중에도 심우주탐사선 자체 생존이 최우선이기 때문에 전력 부족 등의 이유로 갑자기 심우주통신 프로토콜 서비스 지원이 불가능해 질수도 있다. 이런 이유로, 항상 최악의 상황을 고려해 심우주통신 프로토콜을 이용한 탐사선 임무 수행을 계획해야 한다.

반면 지상 관제국 등에서 운영되는 심우주통신 프로토콜 소프트웨어는 이러한 제약에서 어느 정도 자유롭다. 그렇기에 코어 개발 개념은 공유하되 구현은 각각 상황에 따라 다르게 접근하는 방식이 될 가능성이 많다. 요약하자면, DTN 프로토콜 등 심우주통신 프로토콜이 제공할 수 있는 서비스는 만능이 아니며, 지상의 인터넷 서비스 수준과 다름을 인식해야 한다는 것이다. 이를 바탕으로, 전력·컴퓨팅 능력 측면에서 제한이 있는 심우주탐사선 운용 시 시간적 여유와 백업 플랜을 가지고 대비해야 한다. DTN 프로토콜은 NASA, ESA(유럽우주국, European Space Agency), 한국항공우주연구원을 비롯한 각국 우주기관 및 기업에서 활발히 그 참조 구현을 개발하고 있는데, 개발 현황은 참고문헌[9,10]을 참조하면 된다. 한국항공우주연구원은 2013년부터 관련 연구를 시작해, 2022년 NASA의 ION 소프트웨어와 DTN 통신이 호환되는 DTN 프로토콜 소프트웨어 참조 구현을 완료한 바 있다. 해외에선 우주기관·기업에서 활발히 관련 연구를 진행하고 있으며, 직접 참조구현 외에도 국내외 대학을 중심으로 번들 프로토콜 및 라우팅 기술에 대한 연구가 진행 중인 것으로 파악된다.

2.5 아르테미스 유무인탐사 임무와 루나넷

NASA 아르테미스(Artemis) 유무인탐사[11]는 대단한 규모와 도전적 임무들을 자랑한다. 또한, 그 과정을 통해 심우주통신 프로토콜 분야에 기술적 혁신을 가져올 것으로 기대되고 있다. 이에 더해, 루나넷(LunaNet)[12,13]을 통해 구축될 지구-달 인터넷 서비스는, 지금까지 해보지 못했던 다양한 임무를 달궤도·표면에서 수행토록 만들 전망이다.

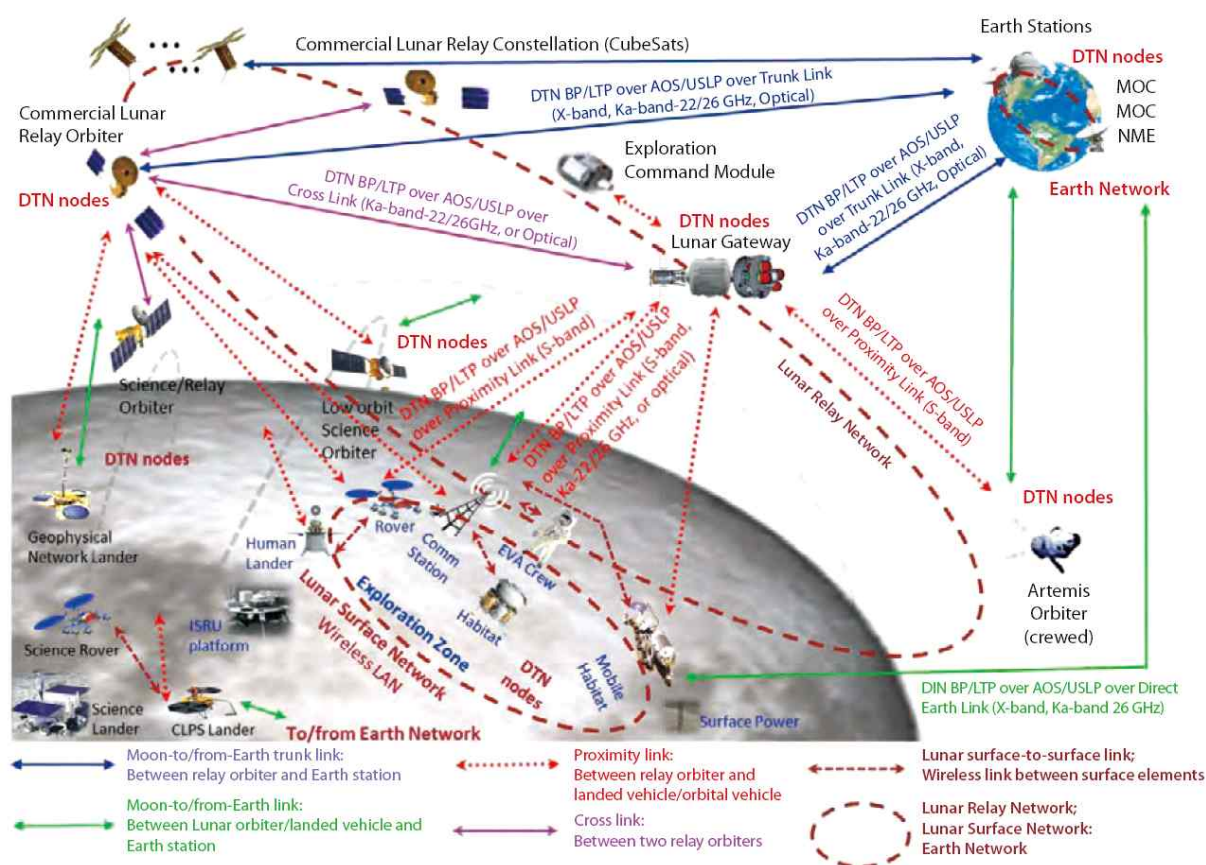
아르테미스와 루나넷이 계획대로 실현된다면, 2020년대 후반기엔 달 표면의 로버·우주인과 지구가 준실시간으로 상황 파악할 수 있을 것이다. 이를 바탕으로, 영화에서 보던 것처럼 시간·공간의 제약을 최소화하면서 우주탐사 임무를 수행하는 시대가 열릴 전망이다.

한때 중국이 달 뒷면에 착륙하는 창어-4(2019), 창어-5(2020) 달 착륙선을 지원하기 위해 첸차오-1[14]을, 창어-6(2024) 달착륙 귀환선을 지원하기 위해 첸차오-2[15] 중계위성을 발사·운용하며, 세계적으로 적지 않은 반향이 있었다. 심우주통신 연구자 중 하나로서 볼 때, 첸차오 중계위성과 아르테미스, 루나넷의 연속적인 달탐사 박-이벤트[16,17]로 인해, 2020년대 달 탐사는 어느 때보다 풍부한 볼거리, 연구테마가 넘쳐날 것으로 생각된다.

2030년대 심우주탐사의 주역은 점점 달에서 화성으로 넘어가게 될 것으로 보인다. 이 과정에서 DTN 프로토콜은 점점 고도화되고 중요한 포지션을 강화하게 될 것이다[18]. 이 시점에서, 우리나라는 전 세계적으로 쌓여진 심우주통신 역량에 대해, 어떤 식으로 대응하고 협력 혹은 경쟁할지,

그리고 향후 국가 달 탐사 임무에서 해당 기술을 어떻게 적용해 나갈지에 대한 중장기적 고려가 필요하다.

만약 아르테미스 임무 참여가 가능하다면, 우리에게 좋은 기회가 될 것이라고 판단된다. 루나넷 및 DTN 심우주통신망 활용, 더 나아가 국제 심우주통신망 구축에 기여할 수 있는 기술력을 배양할 수 있을 것이다. 이는 기회이기도 하고, 위기이기도 하다. 우주기술 선진국을 필두로 심우주통신 기술 실현에 대한 국제적 기대수준이 많이 올라간 상태에서, 한국이 중장기적으로 달성할 기술적 포지션을 전략적으로 잡아나가야 할 것으로 생각된다. 끝으로, 국제 우주기관들이 참여하고 있는 다자간상호운영자문그룹(Interagency Operations Advisory Group)에서 구상하고 있는 루나넷의 형상을 [그림 3]에 소개하면서 본론을 마무리하겠다.



[그림3] 루나넷 서비스 아키텍처[19]

3. 맺음말

지금까지 심우주통신 프로토콜 관련 여러 전·후 사항을, 비전문가도 이해할 수 있도록 가능한 쉽게 기술했다. 심우주통신 프로토콜이 현재에 이르기까지 변화된 이유, 최근 주된 기술로 논의되고 있는 DTN 프로토콜, 그리고 앞으로 도래할 아르테미스 시대의 루나넷까지 개괄적으로 전망해 봤다. 여전히 레거시 우주통신 기술은 DTN 통신 프로토콜 서비스의 저수준 계층에서 중요한 역할로 동작한다. 향후 심우주탐사를 위해 레거시 우주통신 프로토콜이 통합우주데이터링크프로토콜 (Unified Space Data Link Protocol)[20]로 통합될 조짐을 보이는 것도 앞으로 유념할 부분으로 보

인다. 이와 더불어, 심우주통신망의 일부로 참여하고 그 이점을 누리기 위해선, 우리나라 자체의 심우주통신망 기술을 동일한 수준으로 끌어올려야 한다.

또한, 이와 관련한 주파수 확보 및 보호, 소프트웨어 프로토콜 외적인 RF 송수신기, 안테나 설계, 우주항행 및 자세 제어 기술, 전력원 확보 등에 관한 연구도 동시에 추진돼야 한다. 마지막으로, 지금까지 기술한 심우주통신 프로토콜에 대한 개괄적 요약이 관련 연구 분야의 학술적 대중화에 기여했으면 하는 바람으로 글을 마친다.

※ 본 연구의 내용은 기고자의 개인적 의견일 뿐이며, 기관 입장을 대변하는 것이 아님을 밝혀둔다.

[참고문헌]

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Interplanetary_Internet
- [2] Kyung-Rak Lee, Jin-Ho Jo, Byoung-Sun Lee, Sinae Ji(2022). An Overview of Architecture and Applications of Delay Tolerant Network for Korea Pathfinder Lunar Orbiter. <https://doi.org/10.1109/APCC55198.2022.9943687>
- [3] https://en.wikipedia.org/wiki/Delay-tolerant_networking
- [4] 구철회, 김형신(2019). 심우주 탐사를 위한 통신 중계 서비스: 우주 통신 중계 네트워킹 개념의 진화. <https://doi.org/10.7840/kics.2019.44.12.2199>
- [5] M. Ramadas, S. Burleigh, S. Farrell(2008). Licklider Transmission Protocol – Specification. <https://datatracker.ietf.org/doc/rfc5326/>
- [6] https://en.wikipedia.org/wiki/Routing_in_delay-tolerant_networking
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/World_Radiocommunication_Conference
- [8] Aizaz U. Chaudhry, Halim Yanikomeroglu(2021). Laser inter-satellite links in a starlink constellation: A classification and analysis. <https://arxiv.org/pdf/2103.00056>
- [9] Cheol Hea Koo, Scott C. Burleigh(2022). Structural considerations for generating and handling LTP report segments from an interoperability testing. <https://doi.org/10.7840/kics.2022.47.12.2065>
- [10] Felix Walter, Marius Feldmann, Juan A. Fraire, Scott Burleigh(2024). The Architectural Refinement of μ D3TN: Toward a Software-Defined DTN Protocol Stack. <https://arxiv.org/pdf/2407.17166>
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Artemis_program
- [12] <https://en.wikipedia.org/wiki/LunaNet>
- [13] NASA(2020). LunaNet Concept of Operations and Architecture
- [14] <https://en.wikipedia.org/wiki/Queqiao-1>
- [15] <https://en.wikipedia.org/wiki/Queqiao-2>
- [16] <https://tempo.gsfc.nasa.gov/projects/LCRNS>
- [17] https://www.esa.int/Applications/Connectivity_and_Secure_Communications/Moonlight
- [18] IOAG(2022). The Future Mars Communications Architecture. IOAG report.

- [19] IOAG(2022). The Future Lunar Communications Architecture. IOAG report.
- [20] CCSDS(2020). Overview of the Unified Space Data Link Protocol.
<https://public.ccsds.org/Pubs/700x1g1.pdf>

※ 출처: TTA 저널 제216호