

심우주 탐사를 위한 통신 중계 서비스: 우주 통신 중계 네트워킹 개념의 진화

구철희*, 김형신^o

Communication Relay Service for Deep Space Exploration: Evolution of Space Communication Relay Networking Concept

Cheol Hea Koo*, Hyungshin Kim^o

요 약

심우주 탐사선이 획득한 관측 데이터를 지상국에 송신하는 과정에는 특히 효율성과 신뢰성이 요구된다. 화성 표면 탐사 로버의 데이터를 지구에 송신하기 위해서는 화성 궤도선이 통신 중계 역할을 수행해 주어야 하며, 달 뒷면 탐사를 위해서 달 궤도 통신 중계선이 요구되는 시대가 열렸다. 최근 지연 허용 네트워크 기술은 긴 통신 지연, 높은 비트 에러율을 가지고 있으며 통신 중단이 빈번한 심우주 탐사 임무에 적용 가능한 통신 중계 기술로 기대를 모으고 있다. 반면 국제 우주 기관으로부터 우주 통신 서비스 기술로 사용되어왔던 우주 패킷 프로토콜 표준 역시 여전히 활용되고 있으며 근 미래에 다른 기술로 완전히 대체가 되지 않을 것이다. 본 논문에서는 심우주 탐사에서 우주 패킷 프로토콜 표준 및 지연 허용 네트워크 표준을 포함한 통신 중계 기능을 고찰하고 통신 중계 기능 구현을 위해 기존 우주 패킷 프로토콜 링크 기술에서 지연 허용 네트워크 기술로 점진적으로 옮겨가는 방법을 제안한다.

Key Words : deep space exploration, space packet protocol, delay-tolerant networking, bundle protocol, Korea pathfinder lunar orbiter

ABSTRACT

Efficiency and reliability are the key element of data transmission between deep space explorer and ground station. Mars orbiters have the responsibility of relaying the data from rovers on Martian surface in order to forward them to ground station. Also lunar communication relay orbiter is necessary when a lunar lander lands and explorers on the far side of the Moon since there is no direct visual connectivity from Earth. Recently delay-tolerant networking technology is considered as a adaptable way to enable communication relay potentially in the environment of long haul delay, high bit error rate and intermittent connectivity in deep space missions. Space packet protocol standard is retained as a configuration of space communications and will not be replaced completely by another technology in near future as well as it is being used by international space agencies as deep space communications services. In this paper, authors review the technology of communication relay in deep space missions carried out so far with respect to the space packet protocol standard and the delay-tolerant networking technology, and propose a way to mitigate an impact that happens when the communication relay technology moves to delay-tolerant networking from the historical space link communication standard.

* First Author : Korea Aerospace Research Institute, chkoo@kari.re.kr, 정희원

^o Corresponding Author : Chungnam University Department of Computer, hyungshin@cnu.ac.kr, 정희원

논문번호 : 201909-192-A-RN, Received September 9, 2019; Revised October 15, 2019; Accepted October 15, 2019

I. 서 론

심우주를 탐사하고 있는 우주선의 상태를 지상국의 관제사가 파악하기 위해서는 우주선의 상태 데이터를 전송하고 있는 텔레메트리 전파 신호가 성공적으로 지상국의 안테나에 수신되어야 한다. 따라서 텔레메트리 데이터의 손실 가능성은 통제가 가능한 상황 이내로 최대한 억제되어야 한다. 특히 달 착륙선 또는 화성 착륙선 로버의 경우 통신에 할애할 수 있는 시스템 자원 할당이 매우 제한되어 있기 때문에 달 또는 화성 궤도를 돌고 있는 궤도선이 통신 중계 역할을 수행해 주어야 한다.

지상국에서 심우주 탐사선에 전송하는 원격명령과 같은 포워드 링크(forward link)의 경우 지상국에서는 송신 전력을 크게 키울 수 있기 때문에 심우주 탐사선에 충분한 크기의 신호를 전달할 수 있다.

반면 심우주 탐사선이 지상국으로 전송하는 텔레메트리와 같은 리턴 링크(return link)의 경우에는 충분한 통신 대역폭을 얻는 것이 쉽지 않다. 특히 지구와 0.4 ~ 2.7 AU (astronomical unit, 1 AU는 약 1억 5천만 km) 거리를 두고 태양 주위를 공전하는 화성 표면에서 활동하는 화성 로버의 경우 적지만 화성 대기가 존재하고 로버의 특성상 통신 기능에 할당할 수 있는 시스템 자원이 충분하지 않기 때문에 궤도선의 중계 기능을 이용하지 않으면 정상적인 임무 수행이 불가능하다^[1].

1996년에 발사된 Mars Global Surveyor로부터 시

작하여 Odyssey, Mars Express, Mars Reconnaissance Orbiter까지 수행된 화성 궤도선은 모두 과학 임무를 수행하는 궤도선이자 화성 로버의 데이터를 지구로 전송하는 통신 중계선의 역할도 수행하였다.

지금까지 여러 차례 달 궤도선 및 착륙선 탐사가 수행되었지만 2018년 중국이 달 착륙에 성공한 창어-4(Chang'e-4)는 세계 우주기관에 적지않은 파장을 일으켰다. 그 이유는 이전 달탐사 임무에 없던 달 통신 중계 전용 위성 궤차오(Queqiao)를 통해 그동안 지구에서 볼수 없었기 때문에 달 착륙 임무에 한번도 시도하지 않았던 달 뒷면에 창어-4가 성공적으로 착륙하였기 때문이다.

이처럼 심우주 탐사선 임무를 통신 중계 위성이 지원하게 되면서 새로운 우주 통신 네트워크 기술 시장이 형성되고 있고 태양계 인터넷(SSI : Solar System Internetwork) 기술과 만나 높은 시너지 효과를 만들어 낼 것으로 기대되고 있다. 본 논문에서는 현재까지 수행되었던 이전 심우주탐사 중계 임무를 고찰하고 이에 따른 분석 결과를 바탕으로 태양계 인터넷과 우주 패킷 프로토콜 표준 기술을 접목할 수 있는 심우주 탐사 통신 중계 시스템을 제안한다.

II. 화성 궤도선과 통신 중계

화성은 지구와 대략 빛의 속도로 3분에서 22분 정도 걸리는 거리에 위치하고 있기 때문에 화성 표면에서 지구로의 통신은 기술적 난관과 높은 비용 문제를

표 1. 화성 탐사 미션 및 화성 궤도 통신 중계선
Table 1. Mars exploration missions and Mars comm. relay orbiters

Program	Mission	Forward link comm. bands	Return link comm. bands	Relay comm. bands	Protocol	Mars rovers
Mars Global Surveyor (NASA)	1996-2006	X-band	X-band Ka-band (exp.)	UHF	bent-pipe	Phoenix (2008-2010) Spirit (2004-2010) Opportunity (2004-2018)
Odyssey (NASA)	2001-	X-band	X-band	UHF	Proximity-1 bent-pipe	Phoenix (2008-2010) Spirit (2004-2010) Opportunity (2004-2018) Curiosity (2012-)
Mars Express (ESA)	2003-	S-band X-band	S-band X-band	UHF	Proximity-1	Beagle-2 (2003) Spirit (2004-2010) Opportunity (2004-2018) Curiosity (2012-)
Mars Reconnaissance Orbiter (NASA)	2006-	X-band	X-band Ka-band	UHF	Proximity-1 Playback CFDP	Phoenix (2008-2010) Curiosity (2012-)

수반하고 있다. 이와 같은 기술적, 비용적 문제는 화성 궤도선을 통신 중계선으로 이용함으로써 어느 정도 완화가 가능하다. 따라서 표 1과 같이 정리된 화성 궤도선들은 화성 표면 탐사 로버를 위한 통신 중계 임무를 부가적으로 부여받았다.

2.1 Mars Global Surveyor (MGS)

MGS는 미 NASA가 1996년 발사한 화성 궤도선으로 2006년 연락이 끊기면서 임무가 종료되었다. MGS는 초정밀 카메라와 고도계를 탑재하고 화성 전역을 맵핑하는 임무를 수행함과 동시에 후속 화성 궤도선 또는 화성 로버에 통신 중계 기능을 제공하였다. MGS의 중계 기능은 단순한 형태였는데 별도의 중계 프로토콜없이 UHF 대역을 통해 화성 표면 로버로부터 데이터를 받아 자신의 탑재체 중 하나인 Mars Orbiter Camera 내부 버퍼에 임시 보관한 후 X-band 송신기를 이용해 지상에 전송하였다. 심지어 MGS는 Proximity-1 프로토콜도 탑재하지 않았다²⁾.

2.2 Odyssey

Odyssey부터 Proximity-1 프로토콜³⁾이 화성 표면 로버와 화성 궤도 중계선 사이의 통신을 위해 사용되었다. Odyssey는 사중회선 UHF 안테나(quadrifilar helix UHF antenna)를 사용해 화성 표면의 로버와 Proximity-1 프로토콜을 이용해 통신하였다⁴⁾.

2.3 Mars Express

Mars Express는 유럽항공우주국(European Space Agency, ESA)이 Beagle-2 화성 로버(UK 제작)의 통신 중계를 지원하기 위해 발사한 화성 궤도선인데 Beagle-2는 화성 착륙 과정에서 파괴되면서 실제 통신 중계는 NASA 화성 로버 미션만을 수행하게 되었다. Mars Express는 Proximity-1 프로토콜을 지원한다⁵⁾.

2.4 Mars Reconnaissance Orbiter (MRO)

MRO는 화성 표면 과학 관측을 위한 정찰 위성인데 Proximity-1 프로토콜을 통해 화성 표면 로버에게 통신 중계 기능을 제공하였다. 기본적으로 MRO의 통신 중계 방식은 실시간 중계가 아니라 개루프 저장 중계(open loop recording relay 또는 canister mode) 방식이었다. MRO는 심우주파일전송프로토콜(CCSDS File Delivery Protocol, CFDP)⁶⁾을 화성에서 사용한 첫 탐사선이다⁷⁾. 관련 문건을 보면 MRO는 화성 표면 로버의 데이터를 자체 내부 버퍼 및 저장장치에 저장하고 그 후 CFDP 프로토콜을 사용하여

지상국에 전송한다.

III. 달 궤도선과 통신 중계

지구에서 달의 round trip times (RTTs)는 2.5 초밖에 걸리지 않기 때문에 통신 중계 기능이 반드시 요구되는 것은 아니었다. 반면 달은 레이저 통신과 같은 신통신 기술을 시험하기에 적당한 거리에 위치하고 있기 때문에 신기술 시험의 장으로서 역할을 수행하고 있었다. 그 예로 미 NASA 에임즈연구소(Ames Research Center, ARC)가 2013년 발사한 LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Experiment Explorer)는 달 대기 먼지 측정의 임무 외에 지구와 달간 레이저 광학 통신기술 시험을 위한 LLCD (Lunar Laser Communication Demonstrator) 탑재체를 탑재하였다⁸⁾.

비용 문제 때문에 통신 중계 위성의 지원이 없었던 달은 2018년 중국 CNSA/CAST가 창어-4 미션 지원을 위한 통신 중계 위성인 궤차오를 달궤도에 띄우면서 새로운 전기를 맞게 되었다. 궤차오 위성을 통해 지금까지 탐험을 하지 못했던 달 뒷면에 대한 탐사 임무가 가능해졌기 때문이다. 425 kg인 궤차오 위성⁹⁾은 달 Halo 궤도를 돌면서 X-band를 통해 달 표면의 창어-4 착륙선 및 로버와 지구 사이의 통신 중계를 수행하였다. 궤차오와 지구 사이의 통신은 S-band로 수행하였다.

IV. 태양계 인터넷

4.1 역사

정확히 언제 태양계 인터넷 (Solar System Internetwork, SSI) 기술의 태동이 시작되었는지는 불명확하다. 하지만 그 기술은 2005년 Hartley 2라는 소행성을 탐사하기 위해 발사한 EPOXI (Extrasolar Planet Observation and Deep Impact Extended Investigation)라는 심우주 탐사선에서 수행된 DINET (Deep Impact DTN Experiment) 실험을 통해서 세상에 처음 알려졌다¹⁰⁾.

IRTF (Internet Research Task Force)는 1998년 IPNRG (Interplanetary Internet Research Group)를 발족시켰고 이는 2002년 DTNRG (Delay Tolerant Networking Research Group)의 전신이 되었다. 이때부터 NASA의 지원을 받는 CalTech (California Institute of Technology, 캘리포니아 공과대학)의 제트추진연구소(Jet Propulsion Laboratory, JPL)는 지연 허용 네트워크 (Delay-/Disruption-Tolerant

Networking, DTN) 기술의 체계화 및 구현에 착수하였으며 그 최초의 결실은 2005년 EPOXI 탐사선에 DINET 실험의 방법으로 구체화되었다. 이 실험에는 NASA JPL이 개발한 ION (Interplanetary Overlay Network)^[11]이라는 DTN 프로토콜 소프트웨어(오픈 소스)가 사용되었다^[12].

2008년 NASA 고다드우주비행센터 (Goddard Space Flight Center, GSFC)는 다른 기관과 합작으로 Cisco의 IRIS (Internet Routing in Space) 장비를 Intelsat 14에 탑재하여 IP 중계 실험을 우주 공간상에서 수행하였다. Cisco IRIS는 UK-DMC 위성들에서 사용된 바 있는 탑재체였지만 이 실험은 저궤도에서 수행된 것이었고 Intelsat 14는 정지궤도 위성이었다.

현재도 국제우주정거장(International Space Stations, ISS)에서는 DTN 기술 활용이 이뤄지고 있는데 ISS에서 DTN 기술을 이용한 통신 시험은 2009년 통신 지연 상황에서 번들 프로토콜의 성능을 시험하면서부터 시작되었다^{[13][14]}.

2010년 NASA GSFC는 EO-1 (Earth Observing Mission 1) 임무 중에 DTN 시험을 수행하였다. 어떤 DTN 소프트웨어를 사용했는지는 불명확하나 GSFC 자체적으로 개발한 BP (Bundle Protocol) 및 LTP (Licklider Transmission Protocol) 소프트웨어를 사용한 것으로 보인다. EO-1은 원래 지구 표면에 대한 다중 파장대 관측이 목적이었으나 원래 계획했던 임무

수명을 초과하게 되자 DTN과 같은 신기술을 시험하는 테스트 베드로서 활용되었다^[15].

2013년 LADEE의 LLCD 광통신 탑재체 상에서 DTN 중계 기능이 수행되었다. BP/LTP 계층을 통한 다중 노드를 경유하는 달 통신 중계 시나리오 상에서 CFDP를 이용한 파일 전송 시험이 수행된 것이다^[8]. 그림 1에는 DTN 및 통신 중계와 관련한 우주 미션들이 묘사되어 있다.

4.2 DTN 활용 및 대표적 어플리케이션

DTN 통신은 BP^[16]를 통한 번들링/네트워크 계층과 LTP^[17]를 통한 전송계층으로 크게 구분된다. LTP는 번들 패킷을 하위 물리 계층을 통해서 다른 DTN 노드에 전달하는 기능을 수행하며 이 역할을 수행하는 계층을 융합 계층(Convergence Layer, CL)이라고 부른다. CL에는 LTPCL 외에도 필요에 따라 TCPCL, UDPCL 등이 사용되기도 한다^[18].

BP 계층은 응용 계층 (Application Layer)에서 발생된 패킷을 번들링 기술을 통해 전달될 수 있도록 주소를 부여하고 저장 및 전달 (Store and Forward, S&F) 기능을 부여한다. 그림 2에는 DTN 프로토콜 스택과 End-to-End 전송 메커니즘이 묘사되어 있다.

4.2.1 CFDP

CFDP는 통신 엔터티(entity) 간에 파일 전송 방식



그림 1. DTN 및 통신 중계 우주 미션 현황
Fig. 1. History and current status of DTN and comm. relay in space missions

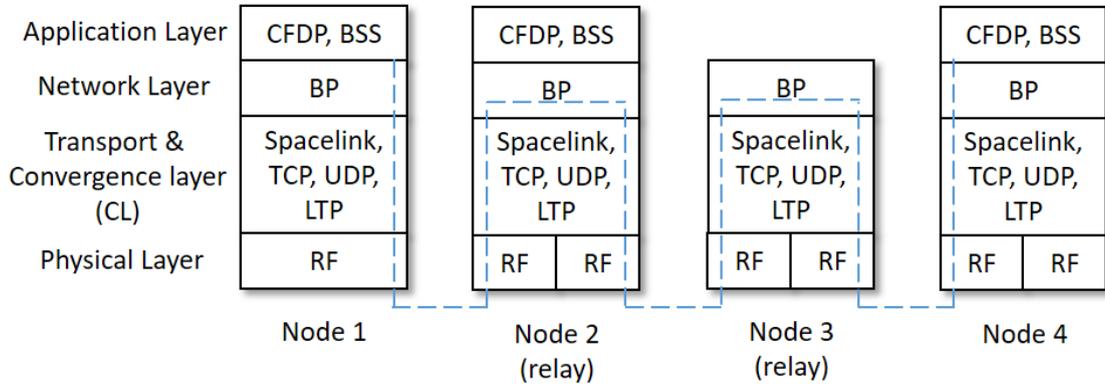


그림 2. DTN 프로토콜 스택 및 전송 메커니즘
Fig. 2. DTN protocol stack and end-to-end transfer mechanism

표준화를 위해 우주데이터 시스템 자문 위원회 (Consultative Committee for Space Data Systems, CCSDS)에서 제정한 파일 전송 프로토콜 표준이다. CFDP 표준은 사용자가 전송하고자 원하는 파일을 읽어 상대방에 전송하는 일련의 과정을 정의하고 있으며 본 저자도 CFDP 표준 개정을 위한 CCSDS CFDP 워킹그룹에 참여하고 있다. CFDP는 비신뢰 모드(class-1 unreliable mode)와 신뢰 모드(class-2 reliable mode) 2가지 운용 모드가 있는데 DTN과 같이 BP/LTP 상에서 동작하는 CFDP 운용에는 class-1 모드가 사용되며 패킷 손실 시 재전송과 같은 오류처리는 LTP가 담당한다.

4.2.2 BSS

번들 스트리밍 서비스 (Bundle Streaming Service, BSS)는 DTN 프로토콜(BP/LTP) 기능을 통해 주로 동영상 등의 데이터를 스트리밍하는 어플리케이션이다¹⁹⁾. BSS 개발자는 BSS 자체는 우주 통신 환경에서 당장 적용가능한 활용처가 없지만 DTN의 네트워크 라우팅 성능을 가늠하는 유능한 도구로 사용될 수 있는 점에서 잠재력이 있다고 부연하고 있다. 광통신 기술이 비약적으로 발전한 미래에는 화성의 일상을 담은 라이브 캠을 스트리밍 서비스를 통해 지구에서 볼 수 있게 될 것이다.

4.2.3 AMS

DTN의 비동기 메시지 서비스 (Asynchronous Message Service, AMS)는 독립적이거나 분리되어 있는 어플리케이션 또는 노드간에 정보 교환을 위해서 간단한 메시지 교환 기능을 제공한다²⁰⁾. AMS를 이용하여 기존 위성의 원격명령 (Telecommand, TC)/원격

측정 (Telemetry, TM) 기능을 대신할 수 있다²¹⁾.

4.2.4 AMP

DTN의 비동기 관리 프로토콜 (Asynchronous Management Protocol, AMP)은 원격에서 동작하고 있는 DTN 기능을 제어하는 수단을 제공한다²²⁾. 예를 들면 컨택 계획 (contact plan), 데이터 전송 속도, 데이터 전송 경로 등의 설정이 원격으로 가능해진다. DTN이 기술적으로 높은 완성도가 있는 네트워크 소프트웨어로 자리매김하기 위해서는 반드시 필요한 기능이라고 볼 수 있다.

V. 지구-달간 확장가능 DTN 통신 중계 구조 개념 제안

이 절에서는 달 주변 통신환경 (cislunar communication environment)에서 DTN의 활용 방안 및 잠재 가능성을 짚어보고 국제 우주기관(space agency)간 상호호환 측면에서 확장가능(scalable)하면서 우수한 DTN-비 DTN간 통신 중계 개념을 제안한다.

5.1 달 우주 환경 DTN 통신 프로토콜 시험

2016년부터 한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute, ETRI)에서는 한국항공우주연구원(Korea Aerospace Research Institute, KARI) 주관으로 개발중인 한국 시험용 달 궤도선 (Korea Pathfinder Lunar Orbiter, KPLO) 임무의 일환으로 DTN 탑재체 (DTN Payload, DTNPL)를 개발하고 있다²³⁾. DTNPL은 NASA JPL에서 개발한 ION DTN 소프트웨어를 달 주변 우주 궤도 환경에서 구동할 수 있도록 실장하고 지상국 및 지상 로버

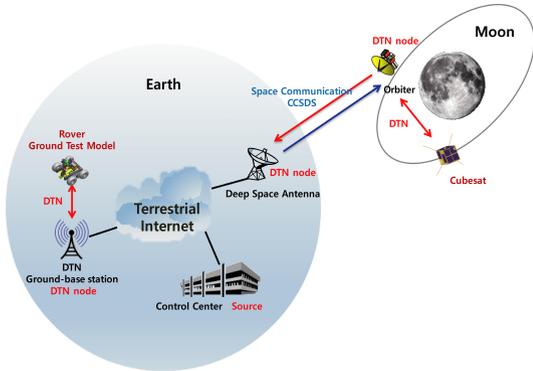


그림 3. 시험용 달 궤도선을 이용한 우주인터넷 시험 개념도
Fig. 3. Test concept of space internet using KPL0(image credit : ETRI)

모사 장치와 DTN 통신을 연동 시험하는 임무를 수행할 예정이다. 그림 3은 시험용 달 궤도선을 이용한 우주인터넷 시험 개념도를 보여준다.

2013년 LADEE에서 DTN 통신 시험이 수행된 후 거의 10년 지나서 달 궤도 우주 환경에서 DTN 통신 시험이 수행되는 것이기 때문에 임무적 가치가 높다. 미 NASA와 KARI는 ETRI와 같이 DTNPL의 원활한 미션 수행을 위해 긴밀히 협조하고 있다.

5.2 달 우주 환경 DTN을 이용한 통신 중계

DTN 통신 기술은 심우주 탐사 자원의 지구와 통신 문제를 중계선을 이용해서 해결하기 위한 주요 해결책 중 하나로 부상하고 있다. 하지만 DTN 기술이 있기 전에 우주 통신에 사용되어 왔던 기술들이 있음을 상기할 필요가 있다. 그 일례로 CCSDS 원격측정/원

격명령 표준^[24]과 ESA ECSS (European Cooperation for Space Standardization) 원격명령/원격측정 표준^[25]을 들 수 있다.

DTN이 우주 통신 중계 기술로서 세계 표준으로 정착하기 위해서는 기존 단순 패킷 기반의 우주 링크(spacelink) 프로토콜을 이용하여 설계되고 있는 우주선 통신 시스템 개발이 DTN에 기반한 단계로 넘어가는 과도기를 거쳐야 한다.

그 과도기는 쉽지 않은 여정이 될 것이다. 단기적으로 보면 당장 DTN 통신 표준을 채택하면서 얻는 이점은 크지 않으면서 개발 리스크는 높아지기 때문이다. 참고로 최근 20년간 가장 활발히 우주 탐사가 수행되고 있는 화성의 경우라 할지라도 화성 표면의 관측 데이터가 지구 지상국에 도착하는 과정에 DTN 중계 개념은 적용되지 않고 있다^[26]. 이 경우 논리적으로 타당한 접근은 DTN 프로토콜 및 DTN 탑재체 하드웨어의 기술적 완성도가 충분히 높아질 때까지 기다리는 것이다. 그림 4에는 달 주변 환경 및 지구-달간 통신을 위해 DTN 기술을 채택하여 구성 가능한 통신 중계 개념을 보여주고 있다.

5.3 DTN을 이용한 통신 중계의 점진적 채택

DTN 기술은 우주 통신, 특히 통신 중계 우주 자원의 구축 및 활용에 있어 혁신을 가져올 잠재성이 충분하다. 그리고 DTN 기술을 연구하면서 얻을 수 있는 기술 선도성 및 시장 경제성 확보 등의 가치도 기대할 수 있다. 하지만 DTN은 일부 우주기관의 적극적 돌파로 국제 표준화될 수 있는 성격이 아니고 점진적으로 기존 CCSDS 및 ESA ECSS 통신 표준을 따르고

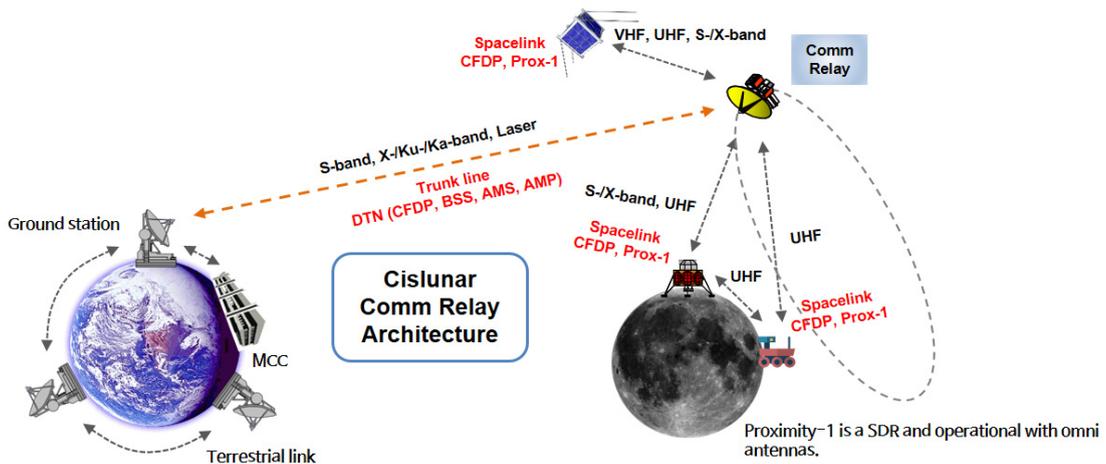


그림 4. 달 주변 환경과 지구-달간 통신 중계 개념도
Fig. 4. Conceptual diagram of cislunar comm. and Earth-Moon comm. relay

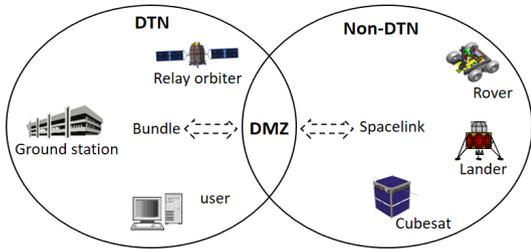


그림 5. DTN 및 비 DTN 영역 간 비무장지대를 경유한 접속 개념도
 Fig. 5. Conceptual diagram of interface between DTN and non-DTN through DMZ

있는 우주기관을 점진적으로 포용하는 정책으로 접근하여야 한다.

즉 그림 5와 같이 DTN과 비 DTN 영역을 구분하고 중간에 두 영역간 통신 브리징을 지원하는 비무장지대 (DTN-non DTN Demilitarized zone, DMZ)와

같은 개념을 도입할 필요가 있다.

이 DTN-비 DTN 간 DMZ는 두 영역간 서로 호환되지 않는 프로토콜을 연결하도록 접속 규격을 제공하게 되고 이 과정에서 우주링크 기반의 데이터는 DTN의 번들링 계층과 호환되도록 처리되어 DTN을 사용하고 있는 지상국 및 유저에게 탐사 자료가 전달될 수 있도록 중개(broker)된다. DTN 지상국으로부터 심우주탐사선에 전달되는 명령 및 제어 신호 데이터는 비 DTN 장치가 이 데이터를 해석할 수 있도록 번들 패킷으로부터 추출된 후 우주링크로 변환되어 비 DTN 장치에 전달된다. DMZ는 이 과정에서 중개 역할을 수행한다.

이 구조는 DTN-비 DTN 영역간에 호환성을 제공하는 것 이외에 DTN을 지상에서 사용자 데이터 경로를 단순화시키는 효과가 있다. 비 DTN 만으로 구성된 우주 통신만으로는 그림 6과 같이 심우주탐사선이

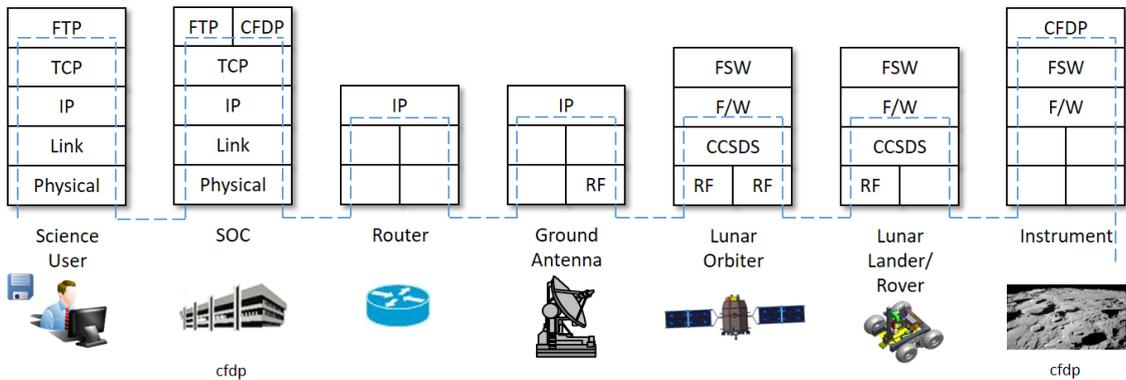


그림 6. 우주링크와 CFDP를 이용한 전통적 심우주탐사 데이터 전달 개념도
 Fig. 6. Historical deep space measurement data transfer diagram using CFDP over spacelink

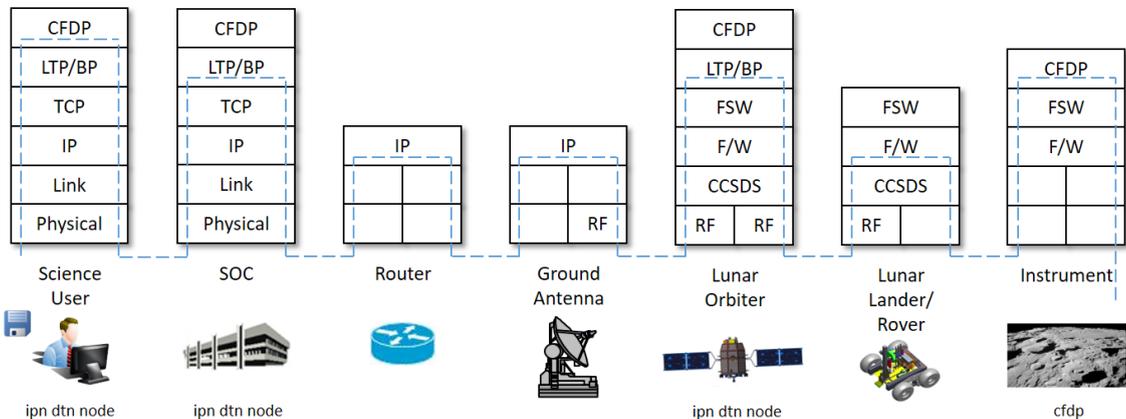


그림 7. DTN과 CFDP를 이용한 진보된 심우주탐사 데이터 전달 개념도
 Fig. 7. Enhanced deep space measurement data transfer diagram using CFDP over DTN

측정한 임무 데이터가 지구의 사용자에게 도달하기까지 여러 소프트웨어 계층이 사용되어야 했으므로 데이터 전달 경로가 복잡했지만 DTN 통신을 통신 중계 경로로 이용하면 그림 7과 같이 지상의 사용자는 우주 통신 중계선과 마찬가지로 동일한 DTN 소프트웨어를 사용하여 심우주탐사선이 수집한 데이터를 바로 받아볼 수 있게 된다.

이 DMZ는 하나의 DTN 프록시(proxy) 인터페이스 서비스로서 DTN 프로토콜 모뎀 소프트웨어 (DTN protocol software suite)의 소프트웨어 일부 또는 플러그인(plug-in) 형태로 구현이 가능할 것으로 생각되며 이 서비스를 사용함으로써 우주 패킷 링크 표준만을 사용하고 있는 비-DTN 영역의 심우주탐사선은 설계 변경없이 DTN 노드에 접속하여 DTN custody & forward 중계 기능을 사용할 수 있게 될 것으로 생각되며, 만약 중계위성의 DTN 중계 기능에 문제가 발생할 경우 DMZ를 우회하여 중계위성이 지상국에 송신하거나 직접 지상국과 저속으로 통신을 수행하면 임무 수행이 가능하기 때문에 어느 정도 백업 계획의 수립도 가능하다. 이 개념을 적용하면 그림 8과 같이 우주와 지상국간 DTN 노드 및 비 DTN 노드 사이의 이기종 우주 통신 프로토콜 간의 협력 접속이 가능하게 된다.

현재 2024년 1차, 2028년 2차로 구축될 달궤도 우주정거장(Gateway)이 화성 유인탐사를 대비한 핵심 기술의 시험 및 우주탐사 교두보로 사용될 예정이다. 이때 달 중계 위성(Lunar Relay Satellite, LRS) 2기가 게이트웨이와 지상국간 통신 중계를 지원할 계획으로 있다. 아직까지는 LRS 중계위성의 개괄적 개념설계

내용까지만 발표^[27]된 상황이나 CCSDS 커뮤니티에 따르면 LRS 및 게이트웨이 플랫폼 구축에 DTN 기술이 탑재될 것으로 예상되고 있으며 향후 달 표면 탐사 미션에서 본 논문에서 제안한 개념이 채택될 수 있도록 관련 연구를 진행할 예정이다.

VI. 결 론

지연 허용 네트워크(DTN) 기술은 다양한 분야에 적용될 수 있는 잠재성을 가지고 있다. 예를 들어 지진, 화재, 폭우 등 심각한 자연재해에 의해 통신 기간망이 본래 기능을 제공하지 못할 때 임시 재난 데이터 통신망으로 활용가능하고 군용 전술 인터넷을 위한 NCW (Network Centric Warfare)의 근간 통신 개념으로도 적용가능하다.

우주통신 분야에서 DTN은 지구-심우주탐사선간 통신 중계 분야에 적용 가능한 유망 기술로 기대를 모으고 있다. 그러나 당분간 이전에 사용해 왔던 비 DTN 우주 패킷 통신 프로토콜과의 공존을 모색할 필요가 있다고 판단된다. 본 논문에서 고찰한 바와 같이 DTN 영역과 비 DTN 영역 사이의 공존 방안 및 DTN 기술의 점진적인 도입이 향후 DTN의 국제화 및 대중화에 긍정적으로 기여할 것으로 판단되고 DTN 통신 기술 채택에 관한 세계 우주 기관의 거부감도 낮아질 것으로 기대한다. 이를 위해서 본 논문에서는 DTN-비 DTN 영역간 DMZ 개념, 그리고 DTN 접속을 위한 우주 패킷 링크 프록시 개념 및 필요성을 언급하였으며 이를 통해 당분간 양립할 수밖에 없는 이기종 통신 표준이 융합하거나 각자의 단점을 보완할 수 있을 것으로 기대한다. 앞으로 이 개념의 실험실 수준 검증을 위한 후속 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] C. D. Edwards, "Relay communications for Mars exploration," *Int. J. Satellite Commun. and Netw.*, vol. 25, no. 2, pp. 111-145, 2007.
- [2] J. Taylor, K. M. Cheung, and C. J. Wong, *Mars global surveyor (MGS) telecommunications* (2001), Retrieved Sep. 3, 2019 from <https://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/summary.html>
- [3] CCSDS, "Proximity-1 Space Link Protocol - Rationale, Architecture, and Scenarios - Informational Report," CCSDS 210.0-G-2.

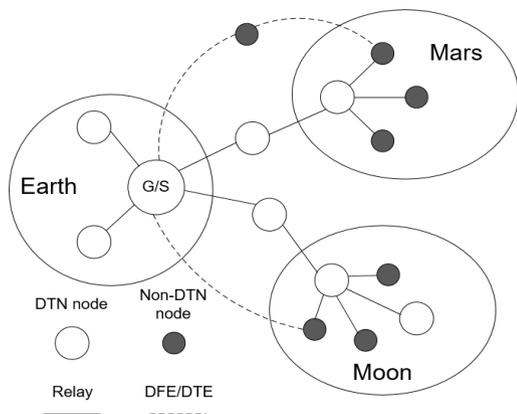


그림 8. DTN과 비 DTN 우주 노드간 협력 접속 개념도
Fig. 8. Collaborative connection scheme between DTN and non-DTN nodes on Space

- Green BOOK, Tech. Rep., 2013.
- [4] A. Makovsky, A. Barbieri, and R. Tung, *Odyssey Telecommunications*(2002), Retrieved Sep. 3, 2019 from <https://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/summary.html>
- [5] Wikipedia, *Mars Express*(2019), Retrieved Sep. 3, 2019 from https://en.wikipedia.org/wiki/Mars_Express
- [6] CCSDS, “*CCSDS File Delivery Protocol (CFDP) - Draft Recommended Standard*,” CCSDS 727. 0-P-4.1. Pink BOOK, Tech. Rep., 2014.
- [7] J. Taylor, D. K. Lee and S. Shambayati, *Mars Reconnaissance Orbiter Telecommunications* (2006), Retrieved Sep. 3, 2019 from <https://descanso.jpl.nasa.gov/DPSummary/summary.html>
- [8] D. Israel and D. Cornwell, *LLCD Disruption Tolerant Networking Demonstrations over LLCD’s Optical Links*(2014), Retrieved Sep. 3, 2019 from <http://ipnsig.org/wp-content/uploads/2014/02/LLCD-DTN-Demonstration-IPN-SIG-Final.pdf>
- [9] Gunter’s Space page, *Queqiao* (Chang’e 4 Relay, CE 4 Relay), Retrieved Sep. 3, 2019 from https://space.skyrocket.de/doc_sdat/change-4-relay.htm
- [10] J. B. Schoolcraft, S. C. Burleigh, R. M. Jones, E. J. Wyatt, and J. L. Torgerson, “The deep impact network experiments - concept, motivation and results,” in *Proc. SpaceOps 2010 Conf.*, 2010.
- [11] NASA, *ION-DTN*(2019), Retrieved Sep. 3, 2019 from <https://sourceforge.net/projects/ion-dtn/>
- [12] S. C. Burleigh, *First Look at the Deep Impact DTN Experiment (DINET)*(2009), Retrieved Sep. 3, 2019 from http://flightsoftware.jhuapl.edu/files/FSW09_Vaughns.ppt
- [13] A. Jenkins, S. Kuzminsky, K. Gifford, R. Pitts, and K. Nichols, “Delay/disruption-tolerant networking: Flight test results from the International Space Station,” in *Proc. 2010 IEEE Aerospace Conf.*, IEEE, Piscataway, NJ, USA: 2010.
- [14] A. G. Voyiatzis, “A survey of delay- and disruption-tolerant networking applications,” *J. Internet Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 331-344, 2012.
- [15] F. A. Davis, J. K. Marquart, and G. Menke, “Benefits of delay tolerant networking for earth science mission,” in *Proc. 2012 IEEE Aerospace Conf.*, 2012.
- [16] K. Scott, S. Burleigh, et al., “*RFC 5050: Bundle Protocol Specification*,” IRTF DTN Research Group, 2007. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc5050>
- [17] M. Ramadas, S. Burleigh, and S. Farrell, “*RFC 5326, Licklider Transmission Protocol Specification*,” IRTF DTN Research Group, 2008. [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc5326>
- [18] R. Wang, X. Wu, T. Wang, X. Liu, and L. Zhou, “TCP convergence layer-based operation of DTN for long-delay cislunar communications,” *J. IEEE Systems*, vol. 4, no. 3, pp. 385-395, 2010.
- [19] S. A. Lenas, S. C. Burleigh, and V. Tsaoussidis, “Bundle streaming service; Design, implementation and performance evaluation,” *Trans. Emerging Telecommun. Technol.*, vol. 26., no. 5, pp. 905-917, 2015.
- [20] S. C. Burleigh, “Space flight middleware; Remote AMS over DTN for Delay- Tolerant messaging,” in *Proc. Infotech@Aerospace*, p. 1626, 2011.
- [21] K. R. Lee, J. H. Jo, B. S. Lee, and J. W. Kim, “Design of tele-commanding system using asynchronous message service based on delay tolerant network for space communication,” in *Proc. 2017 Int. Conf. Inf. and Commun. Technol. Convergence (ICTC)*, IEEE, 2017. (in Korean)
- [22] E. Birrane, *Asynchronous Management Protocol*(2019), Retrieved Sept., 3, 2019 from <https://datatracker.ietf.org/doc/draft-birrane-dtn-amp/>
- [23] J. H. Jo, S. A. Ji, B. S. Lee, and J. Y. Ahn, “Development of space internet technology for korea lunar exploration,” *J. Electronics and Telecommun. Trends*, vol. 32, no. 3, pp. 116-

127, 2017. (in Korean)

- [24] CCSDS, "Space Packet Protocol - Recommendation for Space Data System Standards," CCSDS 133.0-B-1. Blue Book, Tech. Rep., 2003.
- [25] ESA, *ECSS-E-ST-70-41C - Telemetry and telecommand packet utilization*(2016), Retrieved Sep. 3, 2019 from <https://ecss.nl/standard/ecss-e-st-70-41c-space-engineering-telemetry-and-telecommand-packet-utilization-15-april-2016/>
- [26] R. E. Gladden, G. J. Kazz, S. C. Burleigh, D. Wenkert, and C. D. Edwards, "Implementing next-generation relay services at mars in an international relay network," *J. Space Operations: Inspiring Humankind's Future*. Springer, Cham, pp. 3-23, 2019.
- [27] J. Gal-Edd, C. C. Fatig, and R. Miller, "Evolution of the lunar network," in *Proc. 2008 IEEE Aerospace Conf.*, Big Sky, MT, USA, Mar. 2008.

구 철 희 (Cheol Hea Koo)



1997년 2월 : 충남대학교 전자공학과 졸업
1999년 2월 : 충남대학교 의용전자공학 석사
2019년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 박사과정 수료
2002년 3월~현재 : 한국항공우주연구원 선임연구원

<관심분야> 내장형 소프트웨어, 위성 통신, 심우주 통신, CFDP, 우주인터넷

[ORCID:0000-0002-7180-1476]

김 형 신 (Hyungshin Kim)



1990년 2월 : KAIST 컴퓨터과 학과 졸업
1990년 2월 : 영국 Surrey 대학 위성통신공학 석사
2003년 2월 : KAIST 컴퓨터과 학과 박사
2004년 3월~현재 : 충남대학교 컴퓨터공학과 교수

<관심분야> 위성전장계, 저에너지 컴퓨팅, 내장형 소프트웨어

[ORCID:0000-0001-9615-1644]