

한국형 화성 탐사 임무의 EDL 단계 통신 아키텍처 연구

박재익*, 안상일
*한국항공우주연구원

jpark@kari.re.kr, siahn@kari.re.kr

Analysis of Communication Architecture for the EDL Phase of Korean Mars Exploration Mission

Jae-ik Park*, Sang il Ahn
*Korea Aerospace Research Institute

요 약

본 연구에서는 한국형 화성 착륙 임무의 EDL(Entry, Descent, Landing) 구간에서의 통신 시스템 아키텍처를 분석하였다. RF 통신은 NASA의 검증된 문헌 데이터를 기반으로 분석하였으며, 광통신은 이론적 모델링을 통해 링크 버짓을 도출하여 총 7가지 중계 시나리오의 성능을 비교하였다. 분석 결과, 기존 UHF 기반 RF 중계 방식은 8 kbps로 제한되어 EDL 7분간 약 0.42 MB만 전송 가능한 반면, 광통신 중계 방식은 최대 256 MB의 대용량 데이터 전송이 가능하여 EDL 단계의 통신 병목을 해소할 수 있는 가장 유력한 대안으로 확인되었다.

I. 서론

화성 착륙 임무의 EDL 단계는 대기 진입부터 착륙까지 약 7분간 수행되며, 흔히 “7분의 공포”로 불리는 임무의 최대 임계 구간이다[1]. 지구-화성 간 통신 지연(4~24분)이 EDL 소요 시간보다 길기 때문에 지상시스템의 개입 없이 완전한 자율 제어로 수행되어야 한다. 따라서 EDL 단계에서 통신 시스템의 목적은 실시간 제어가 아닌 텔레메트리 전송에 국한되며, 착륙 실패 시 사고 원인 규명을 위한 유일한 정보원이 된다. 이러한 중요성으로 인해, 초기 임무 설계 단계에서부터 착륙선의 제약 조건을 고려한 최적의 통신 아키텍처를 선정하는 과정이 필수적으로 요구된다.

본 연구는 임무 설계 관점에서 한국형 화성 착륙선에 최적화된 통신 시스템 아키텍처를 분석한다. 기존의 화성 착륙 임무들은 Curiosity와 Perseverance 로버의 UHF 중계 통신[2], MSL의 X-band 직접 통신(DTE)[3] 등 다양한 방식을 채택해 왔다. 본 연구에서는 검증된 RF 통신과 광통신을 포함한 7가지 아키텍처를 정량적으로 비교 분석한다.

II. 본론

본 연구에서는 7가지 통신 시스템 구성을 분석하였다. 구성 A(X-band DTE), B(X-band Relay), C(Ka-band DTE), D(Ka-band Relay)는 RF 통신이며, 구성 E(Optical DTE), F(Optical Relay)는 광통신, 구성 G는 RF와 광통신을 결합한 하이브리드 방식이다. RF 파라미터는 NASA의 검증된 문헌에서 확인된 값을 사용하였으며, MSL X-band DTE는 15W 송신 출력에 0.5~32 kbps, UHF Relay는 EDL 중 8 kbps, 착륙 후 128 kbps이다[3][4].

광통신 파라미터는 LLCD(Lunar Laser Communication Demonstration) 모델을 기반으로 1550 nm 파장에 16-PPM 변조를 적용하였다[5]. RF 링크 버짓은 DSN Telecommunications Link Design Handbook을 참조하여 Friis 전송 방정식을 기반으로 수신 전력을 계산하였다[6]. 자유공간 손실은 $L_{FS} = 20 \cdot \log_{10}(4\pi df/c)$ [dB]로 계산되며, 여기서 d 는 거리, f 는 주파수, c 는 빛의 속도이다. 광통신 링크 버짓은 Aboagye & Chen(2021)의 모델을 사용하였으며, LLCD 실측값(622 Mbps, 지구-달 거리)과 비교하여 1% 미만의 오차로 검증되었다.

III. 분석 결과

3.1 데이터율 비교

RF Relay 구성(B, D)의 데이터율은 UHF 링크에 의해 결정되며, EDL 중 8 kbps로 고정되고 착륙 후 128 kbps로 증가한다. 이는 거리에 무관하게 일정한 값을 유지한다. 반면 DTE 구성(A, C, E)은 자유공간 손실의 영향으로 거리의 제곱에 반비례하여 데이터율이 감소한다. 이에 비해 광통신 Relay(F)와 RF Relay(B, D)는 궤도선과의 근거리 통신을 수행하므로, 지구-화성 간 거리에 상관없이 일정하고 높은 데이터 전송량을 유지할 수 있다.

표 1은 EDL 7분(420초) 동안 전송 가능한 데이터량을 Relay 구성에 대해 비교한 것이다. DTE 구성은 EDL 중 착륙선의 급격한 자세 변화로 인해 지구 방향 안테나 지향이 어려워 제외하였다.

표 1. EDL 구간 데이터 전송량 비교 (MB)

거리(AU)	B: X-Relay	D: Ka-Relay	F: Opt-Relay
0.37	0.42	0.42	255.9
1.0	0.42	0.42	255.9
1.5	0.42	0.42	255.9

표 2. 아키텍처 구성별 MCDA 평가 (1~5 점)

Evaluation Criteria (Weight)	B	D	F	G
Data Rate (30%)	2	2	5	4
TRL (20%)	5	4	3	3
Infrastructure (15%)	4	3	2	3
Scalability (10%)	3	4	5	5
Weighted Total	3.2	3.1	3.4	3.1

기존 RF Relay 방식은 전송 용량이 0.42 MB 에 불과하여 기본적인 텔레메트리 전송 수준에 그친다. 이에 반해, 광통신 Relay 는 최대 256 MB 의 대용량 전송이 가능하여 EDL 단계에서의 고해상도 영상 데이터 전송을 실현할 수 있다.

그러나 이를 위해서는 EDL 단계의 급격한 감속과 진동 환경에서도 광통신 링크의 지향 정밀도를 유지할 수 있는 강인한 PAT(Pointing, Acquisition, Tracking) 기술 확보가 선행되어야 한다. 특히 진입 및 감속 구간에서 탐사선이 경험하는 고중력(수십 g) 환경 하에서 μ rad(마이크로라디안) 수준의 좁은 레이저 빔폭을 유지하기 위해서는 고정밀 PAT 시스템이 필수적이다.

또한, 대기 진입 초기 발생하는 약 90 초간의 플라즈마 블랙아웃 구간에서는 RF 와 광통신 모두 통신 두절이 예상되므로, 이를 제외한 실제 유효 통신 시간은 420 초보다 단축됨을 고려해야 한다.

3.2 다기준 의사결정 분석(MCDA)

MCDA(Multi-Criteria Decision Analysis) 평가 결과, 데이터율(30%), TRL(20%), 복잡도(15%), 인프라(15%), 비용/위험(10%), 확장성(10%)의 가중치를 적용한 MCDA 평가 결과, 광통신 Relay(F) 아키텍처가 종합 점수 3.4 점으로 최상위 평가를 받았다. 그러나 이는 주로 데이터 전송률과 미래 확장성 항목에서의 고득점에 기인한 결과이다. 반면, 기술 성숙도(TRL)와 지상 수신 인프라의 가용성 측면에서는 X-band Relay(B)가 우위를 점하고 있어, 리스크 관리가 중요한 단기 임무에는 보다 현실적인 대안으로 평가된다.

한편, 하이브리드 방식(G)은 시스템 복잡도 증가로 인해 정량적 평가 점수는 낮았으나, 임무 보증 관점에서는 재고할 가치가 충분하다. 필수적인 상태 정보는 신뢰성이 검증된 UHF 로 전송하고, 고용량 영상 데이터는 광통신으로 전송하는 이원화 전략은 단일 통신 링크 실패에 따른 임무 실패 위험을 획기적으로 경감시킨다. 따라서 대형급 탐사 임무에서는 시스템 복잡도 증가를 감수하더라도 해당 아키텍처가 채택될 타당성이 높다.

IV. 결 론

본 연구에서는 한국형 화성 착륙 임무의 EDL 단계에서 발생하는 통신 제약을 분석하고, 이를 극복하기 위한 최적의 아키텍처를 제안하였다. 분석 결과, 기존 UHF 기반 RF 중계 방식은 전송 속도가 8 kbps 로 제한되어 EDL 구간 동안 약 0.42 MB 의 데이터만 전송 가능하므로, 고장 진단을 위한 블랙박스 데이터 등 대용량 정보 전송에 구조적인 한계가 있음을 확인하였다.

반면, 광통신 중계 방식은 RF 대비 수백 배 이상의 성능 향상을 통해 최대 256 MB 의 데이터 전송이 가능하며, EDL 단계의 통신 병목을 해소할 수 있는 가장 유력한 대안으로 분석되었다.

한국의 첫 화성 착륙 임무에서는 기술 성숙도(TRL)가 확보된 X-band 중계(구성 B)가 가장 현실적인 선택지이며, 이는 국내 KDSA 와 NASA DSN 간의 상호운용성을 기반으로 안정적인 추적 커버리지를 확보하는 데에도 유리하다.

그러나 장기적으로 미래 임무의 고용량 데이터 요구 조건을 충족하기 위해서는 광통신 중계 기술의 도입이 필수적이다. 이를 위해 EDL 의 고동적 환경에 특화된 정밀 PAT 기술 개발과, RF/광통신을 상호 보완적으로 운용하는 하이브리드 전략에 대한 지속적인 후속 연구가 요구된다.

본 연구의 결과는 향후 한국형 화성 EDL 임무의 통신 시스템 기본 설계 및 핵심 요구조건 도출을 위한 중요한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 우주항공청 2025 스페이스 챌린지 사업(RS-2025-17182973)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] R. D. Braun and R. M. Manning, "Mars exploration entry, descent, and landing challenges," J. Spacecraft and Rockets, vol. 44, no. 2, pp. 310-323, Mar. 2007.
- [2] C. D. Edwards et al., "The Electra proximity link payload for Mars relay telecommunications," Proc. 54th IAC, Bremen, Germany, Oct. 2003.
- [3] J. Taylor, D. K. Lee, and S. Shambayati, "Mars Reconnaissance Orbiter Telecommunications," DESCANSO Design and Performance Summary Series, Article 12, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA, Sep. 2006.
- [4] Jet Propulsion Laboratory, "Mars 2020 Perseverance Launch Press Kit," NASA, 2020. [Online]. Available: https://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits/mars_2020/download/mars_2020_pres_kit.pdf.
- [5] E. D. Aboagye and S.-P. Chen, "Deep space optical communications downlink simulation with varying PPM order," Optical and Quantum Electronics, vol. 53, no. 10, Oct. 2021.
- [6] Jet Propulsion Laboratory, *Deep Space Network Telecommunications Link Design Handbook (810-005)*, Rev. E, Pasadena, CA, 2019.
- [7] D. M. Cornwell, "NASA's optical communications program for 2015 and beyond," in *Proc. SPIE*, vol. 8971, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI, Feb. 2014, Art. no. 897104.