

## 技術論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.39.1.69

심우주 통신 시스템에서 대용량 Telemetry 데이터 전송을 위한  
Deferred NAK Mode 시뮬레이터 구현

홍희진\*, 이주병\*, 윤동원\*, 현광민\*\*

Implementation of Deferred NAK Mode Simulator for Large-Volume  
Telemetry Data Transmission in Deep Space Communication Systems

Heejin Hong\*, Jubyoung Lee\*, Dongweon Yoon\* and Kwangmin Hyun\*\*

## ABSTRACT

As part of its space development program, Korea has a plan for the launch of a lunar orbiter and a lunar lander. To enable the transmission of lunar information based on multimedia, it is necessary to construct a communication system that is capable of transmitting large-volume telemetry data. The CCSDS standard recommends the deferred NAK mode as ARQ scheme for reliable long-distance deep-space communication systems. In this paper, we implement a space communication system simulator in the deferred NAK mode using models of the lunar orbiter, the earth station, and the space environment. The simulator employs modulation techniques and turbo coding schemes for transmitting large-volume telemetry data. We analyze the transmission performance of telemetry data through the simulation.

## 초 록

우리나라는 우주 개발의 일환으로 달 탐사를 위한 달 탐사선과 달 착륙선의 발사를 계획하고 있다. 향후 멀티미디어 기반의 달 탐사 정보를 전송하기 위해서는 대용량 Telemetry 데이터를 전송하기 위한 통신 시스템을 구축하는 것이 필요하다. CCSDS 표준에서는 신뢰성 있는 원거리 심우주 통신 시스템을 위한 ARQ 기법으로 Deferred NAK mode를 권고하고 있다. 본 논문에서는 달 탐사선과 지상국 및 우주 환경 모델을 반영하여 Deferred NAK mode 통신 시스템 시뮬레이터를 구현하며, 시뮬레이터에는 대용량 Telemetry 데이터를 전송하기에 적합한 변조 방식과 터보 부호화 기법을 사용한다. 시뮬레이션을 통해 Telemetry 데이터의 전송 성능을 분석한다.

**Key Words** : Deferred NAK mode, Telemetry data, Deep space communication(심우주 통신), Throughput(전송률)

## 1. 서 론

† 2010년 7월 2일 접수 ~ 2010년 12월 24일 심사완료

\* 정희원, 한양대학교 융합전자공학부

교신저자, Email : dwyoon@hanyang.ac.kr

서울시 성동구 행당동 한양대학교 융합전자공학부

\*\* 정희원, 강릉원주대학교 정보통신공학과

현재 미국, 러시아, 일본 등의 선진국들은 이미 달 탐사를 통해 우주 기술 개발의 경쟁력을 갖추고 있다. 우리나라도 2008년을 우주개발 원년으로 선포하여 2020년에 달 탐사선 발사 및 2025년에 달 착륙선 발사 계획을 세우며 우주 기

술 개발에 박차를 가하고 있다[1]. 우리나라가 달 탐사 임무를 성공적으로 달성하기 위해서는 신뢰성 있는 통신 시스템이 구축되어야 하며 특히 향후 멀티미디어 데이터 수요를 충족시켜줄 수 있는 대용량 Telemetry 데이터 전송을 위한 통신 시스템을 구축해야 할 필요가 있다. 국제 우주 통신 권고 규격인 CCSDS (The Consultative Committee for Space Data Systems)에서 권고하는 심우주 통신을 위한 프로토콜 중 원거리 데이터 전송에 적합한 ARQ (Automatic Repeat Request) 기법인 Deferred NAK (Negative Acknowledgments) mode 는 지상국에서 보다 신뢰성 있는 데이터를 수신할 수 있도록 한다. 대용량 데이터 전송을 위해서는 Deferred NAK mode와 함께 스펙트럼 효율이 높은 고차 변조 방식과 채널 부호화 방식과 같은 신호처리 기법을 필요로 한다[2].

본 연구에서는 먼저 Telemetry 달 탐사 데이터 전송을 위한 통신 시스템을 모델링한다. 달 탐사선과 지상국 및 우주 환경을 모델링한 후 이를 기반으로 한 Deferred NAK mode 시뮬레이터를 구현한다. 변조 방식으로 OQPSK (Offset Quadrature Phase Shift Keying), 8PSK (Phase Shift Keying), 4+12 APSK (Amplitude and Phase Shift Keying), 4+12+16 APSK 변조 방식을 적용하며, 채널 부호화 기법으로 1/2, 1/3, 1/4, 1/6 부호율의 터보 부호화 기법을 적용한다. 시뮬레이터를 통해 변조 방식 및 터보 부호화 기법의 부호율에 따른 전송 성능을 도출하고 분석한다.

## II. 본 론

### 2.1 통신 시스템 모델

#### 2.1.1. 우주 환경 모델

달 탐사 Telemetry 데이터를 전송하는 송신단은 달 탐사선으로, 수신단은 지상국으로 가정하여 실제 달 탐사에 사용되는 국외의 예를 바탕으로 기준모델을 설정한다. 지상국 안테나의 경우 실제 NASA (National Aeronautics and Space Administration)에서 심우주 통신을 위해 사용하는 S, X 대역의 DSS-24 (Deep Space Station 24) 와 Ka 대역의 DSS-25를 바탕으로 크기가 직경 34m의 파라볼라 안테나로 가정한다. 달 탐사선은 지상국과 같은 대규모의 냉각기를 설치하기 어려우므로, 달 탐사선의 잡음 온도는 NASA의

권고에 의거하여 500K로 가정한다[3]. 달 탐사선의 전력은 20W, 안테나 크기는 0.5m로 가정한다. 달 탐사선과 지상국 링크에서 손실 요소로는 약 38만Km의 원거리로 인한 자유공간손실, 대기 감쇠, 전리층 손실, 강우 감쇠, 달 전속 밀도 손실, 안테나 회로 손실, 지향 손실 등이 있다. 국외 심우주 통신에서 사용하는 주요 주파수인 S, X, Ka 대역을 고려하여, 표 1에 S, X, Ka 주파수 대역별로 Telemetry 데이터 전송을 위한 기준모델의 세부사항을 나타내었다[4].

표 1. Telemetry 데이터 전송 환경 기준모델

구 분	단위	S 대역	X 대역	Ka 대역
거리	km	384403		
전송 주파수	MHz	2295	8420	32000
송신전력	W	20.0		
	dBW	13.0		
송신안테나직경	m	0.5		
송신안테나효율		0.7		
송신안테나 회로손실	dB	0.6	0.4	0.25
송신 지향 손실	dB	$3.2 \times 10^{-6}$	$4.4 \times 10^{-5}$	$6.4 \times 10^{-4}$
자유 공간 손실	dB	211.3	222.6	234.2
대기 감쇠	dB	0.033	0.039	0.154
전리층 손실	dB	0.2		
강우 감쇠	dB	0.0	1.0	19.2
달전속밀도손실	dB	5.34	5.4	3.96
수신안테나직경	m	34		
수신안테나효율		0.7		
수신지향성안테나 이득	dBi	56.7	68.0	79.6
수신안테나 회로손실	dB	0.6	0.4	0.25
수신 지향 손실	dB	0.003	0.044	0.639
등가시스템 잡음 온도	K	34.0	31.9	44.9
탐사선 잡음 온도	K	500		

2.1.2 변조 방식 및 채널 부호화 기법

CCSDS에서는 4Mbps 미만의 중속 Telemetry 데이터 전송을 위해 BPSK (Binary Phase Shift Keying), QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), OQPSK 변조 방식을 권고 하고 있으며, 고속 데이터 전송을 위해 표 2에 나타난 것 같은 APSK 계열의 고차 변조 방식을 고려하고 있다. 달 탐사선 - 지상국 링크에서 대용량 Telemetry 데이터를 전송하기 위한 변조 방식은 고속 전송을 고려한 고차 변조 방식뿐만 아니라 송신단의 전력 운용과 원거리 채널 환경을 고려하여 보다 성능이 좋은 변조 방식도 겸하여 사용해야 한다. 따라서 본 연구에서는 4+12 APSK, 4+12+16 APSK의 고차 변조 방식 및 OQPSK, 8PSK 변조 방식을 적용하여 성능을 비교 분석하였다[5],[6].

신뢰성 있는 데이터 전송을 위해 CCSDS Experimental Specification은 채널 부호화 기법으로 터보 부호화 기법을 고려하고 있다. 그림 1은 CCSDS에서 고려하는 구속장 5인 터보 부호화기를 나타낸다. 콘볼루션 부호기가 병렬 연결된 형태로 구성되어 있으며, puncturing을 통해 1/2, 1/3, 1/4, 1/6의 부호율을 선택하여 부호화한다[7].

터보 부호의 복호화는 반복 복호를 사용하여 연관정을 하며, 연관정의 통계적인 측정은 로그우도비(LLR: Log-Likelihood Ratio)값을 이용한다. 반복 복호 횟수를 늘릴수록 비트 오류 성능은 더욱 좋지만 복잡한 복호화 과정과 반복 시간으로 인해 처리 시간이 길어진다.

표 2. CCSDS Experimental Specification에서 고려되는 변조 방식 및 채널 부호화 기법

	Modulation	Channel coding
CCSDS Experimental Specification	4+12 APSK, 4+12+16 APSK, 4+12+16+20+28 APSK	Turbo code

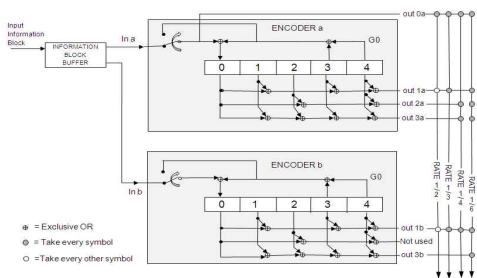


그림 1. 구속장=5인 터보 부호기

2.1.3. Deferred NAK mode

CCSDS에서는 심우주 통신을 위한 프로토콜로써 Immediate NAK mode, Prompted NAK mode, Asynchronous NAK mode, Deferred NAK mode와 같은 ARQ 기법을 권고하고 있다. 이 중 Deferred NAK mode는 다른 ARQ 기법과 달리 패킷의 전송이 일괄적으로 이루어지므로 링크의 연결이 잘 끊기는 달과 지구와 같은 원거리 링크에 효과적인 기법이다[2],[8].

그림 2는 Deferred NAK mode의 전송 방식을 보여준다. Meta는 파일에 대한 정보가 실린 Meta data, TM은 Telemetry, 괄호 안의 번호는 해당 패킷 번호를 의미한다. 또한, ACK는 Acknowledgments, NACK는 Negative Acknowledgments를 의미한다. 송신단에서 패킷을 모두 전송한 후 EOF (End Of File)를 전송하면 수신단에서 EOF에 대한 ACK 신호를 전송하고 복수의 NAK 신호들에 대해 재전송을 요구한다. 수신단에서 패킷을 모두 수신하면 FIN 신호를 전송한다. 채널 상태에 따라 패킷의 사이즈를 조정함으로써 데이터를 효율적으로 전송할 수 있다. 채널 상태가 좋으면, 패킷 사이즈를 크게 하여 전송 지연 시간을 줄이고 채널 상태가 나쁘면, 패킷 사이즈를 작게 하여 데이터의 손실을 줄일 수 있다.

패킷의 오류 여부를 검출하기 위해 순환 중복 검사(CRC: Cyclic Redundancy Check) 기법을 사용한다. 송신단은 각 패킷마다 CRC 오류 검출 비트를 추가하고 수신단에서는 송신단과 동일한 CRC 생성 다항식을 통해 패킷의 오류 여부를 검출한다. 수신단에서는 오류가 있는 패킷 정보를 저장하고 있으며 버퍼단위로 일괄적인 재전송을 요구한다.

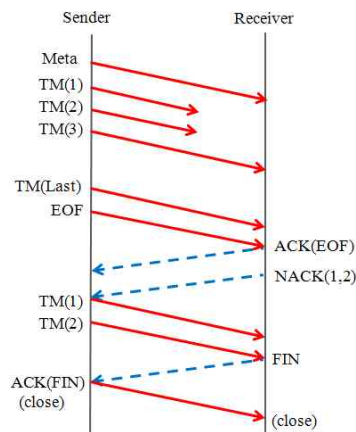


그림 2. Deferred NAK mode

### 2.2 시뮬레이터 구현 및 성능 분석

앞 절에서 고려한 통신 시스템 모델을 바탕으로 달 탐사를 위한 통신 시스템 시뮬레이터를 구현한다. 그림 3은 시뮬레이터의 동작 구조를 나타낸다. 텍스트 파일을 통해 시스템 파라미터를 설정하며 스크립트 파일을 통해 시뮬레이터 블록에 파라미터가 적용된다. 최상위 블록에 적용되는 파라미터 인자는 변조 방식, 터보 부호화의 부호율, 패킷 사이즈, 데이터 사이즈가 있다. 송신단, 수신단 블록에 적용되는 파라미터 인자는 송신 전력, 안테나 사이즈, 안테나 효율, 안테나 이득, 안테나 회로 손실, 안테나 지향 손실, 시스템 잡음이 있다. 또한 채널 블록에 적용되는 파라미터 인자는 우주 환경의 손실 요소인 자유공간손실, 대기 감쇠, 전리층 손실, 강우 감쇠, 달 전속 밀도 손실, 안테나 회로 손실, 지향 손실 등이 있다. 시뮬레이터의 내부 기능 블록은 필요한 파라미터를 읽어 지정된 시뮬레이션을 수행한다.

시뮬레이터는 그림 4와 같이 송신단, 채널, 수신단으로 구성되며, 프로토콜 계층은 점선으로 구분하였다. 물리계층에서 변복조 방식, 데이터 링크계층에서 채널 부호화 및 복호화, 전송계층에서 ARQ 기법을 사용한다. 시뮬레이터의 ARQ Processor는 Deferred NAK mode를 수행한다.

그림 5, 6은 송신단과 수신단의 내부 블록을 나타낸다. 각 블록은 미리 설정된 파라미터와 연동되어 시뮬레이션이 수행된다. 송신단은 데이터 생성 블록, CRC 부호화 블록, 터보 부호화 블록, 변조 블록 및 NAK 신호를 수신하는 블록으로 구성된다. 수신단은 버퍼 블록과 복호화와 복조를 수행하는 블록 및 CRC 복호화를 통해 NAK 패킷을 송신하는 블록으로 구성된다.

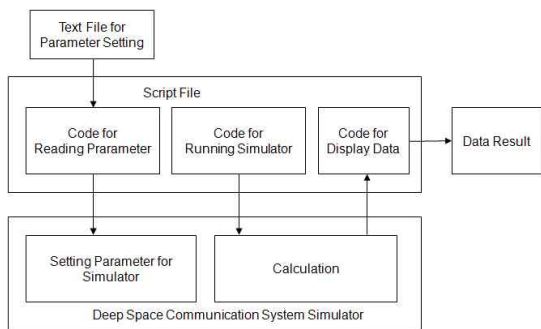


그림 3. 시뮬레이터 동작 구조

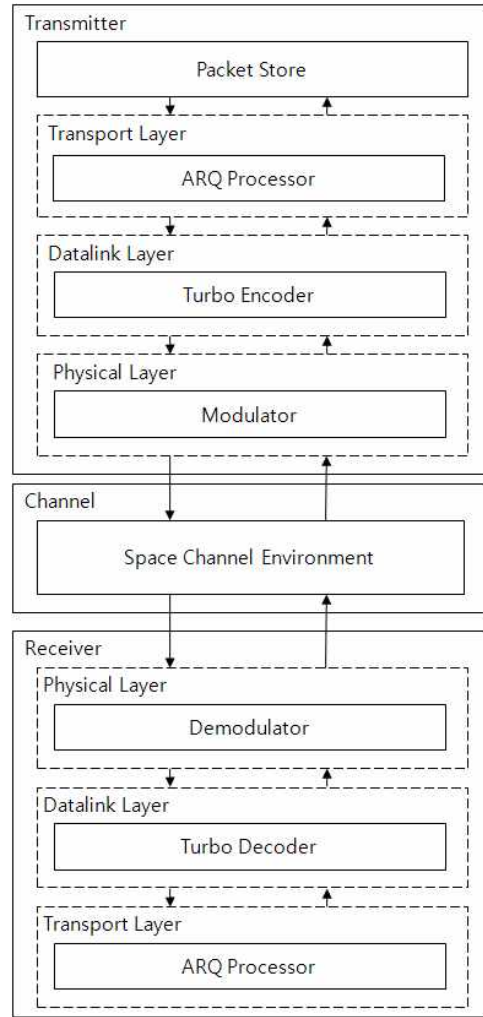


그림 4. 시뮬레이터 구성도

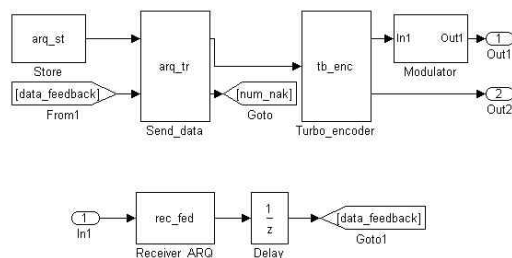


그림 5. 송신단 내부 블록

시뮬레이터의 데이터 전송 성능을 알아보기 위해 모의 실험을 수행하였다. 전송 데이터는 10Mbyte, 패킷 사이즈는 1Kbyte로 하였다. 데이터 전송 속도는 50Mbps, 지구와 달 사이의 거리를 고려한 전파 지연은 1.28초로 가정한다.

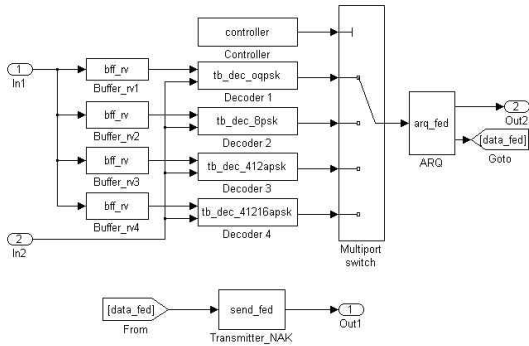


그림 6. 수신단 내부 블록

표 3. 시뮬레이션 구동 환경

구분	단위	값
전송 데이터	Mbytes	10
패킷 사이즈	bytes	1024
전송 속도	Mbps	50
전파 지연	s	1.28
반복 복호화 횟수		5
CRC 생성 다항식		$G(x) = x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$

APSK 변조 방식에서 링(ring) 비율은 부호율에 따라 변하는데[9], 본 논문에서는 CCSDS에서 권고하고 있는 터보 부호율에 맞추어 [10]에서 제시된 링 비율을 고려한다. 터보 부호의 반복 복호화 횟수는 반복 성능의 변화가 크지 않은 5회로 가정한다. 표 3에 시뮬레이션 구동 환경을 나타내었다.

전송 성능을 나타내는 Effective Throughput은 식 (1)과 같이 정의한다. 이 때,  $P_{loss}$ 는 손실 확률을 나타내며 식 (2)와 같이 정의한다.  $E_b/N_0$  값이 높을수록 BER (Bit Error Rate)이 작으므로  $P_{loss}$ 는 작아진다. 신호처리 시간은 전파 지연 시간에 비해 미미하므로 지연 시간으로 반영하지 않는다. 전송 데이터의 단위는 [bits], 지연 시간은 [s], 전송 속도는 [bits/s]를 사용한다[11].

$$Effective\ Throughput = (1 - P_{loss}) \cdot \frac{전송\ 데이터}{지연\ 시간} \cdot \frac{1}{전송\ 속도} \quad (1)$$

$$P_{loss} = 1 - \frac{수신\ 패킷}{전송\ 패킷} \quad (2)$$

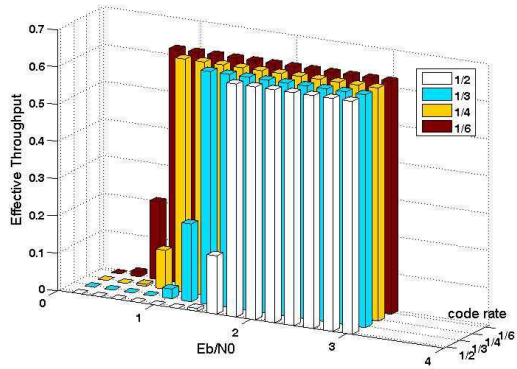


그림 7. OQPSK의 Effective Throughput

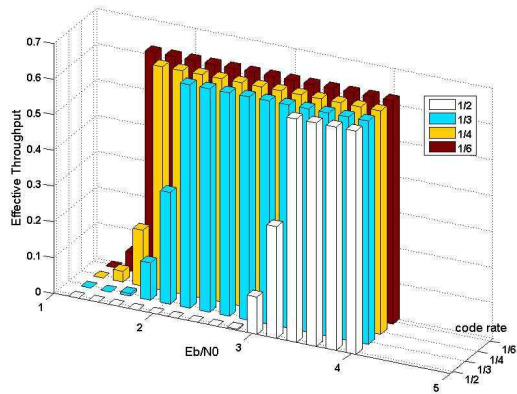


그림 8. 8PSK의 Effective Throughput

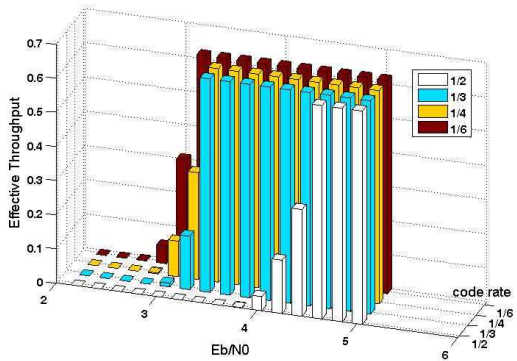


그림 9. 4+12 APSK의 Effective Throughput

그림 7부터 그림 10까지에는 각각 OQPSK, 8PSK, 4+12 APSK, 4+12+16 APSK의 부호율에 따른 Effective Throughput을 나타내었다. 설정된 시뮬레이션 구동 환경에 따른 최대 Effective Throughput은 0.625이며, Effective Throughput이 0.625보다 낮으면 해당  $E_b/N_0$ 에서의 전송 속도 효율이 62.5% 미만이라는 것을 의미한다.

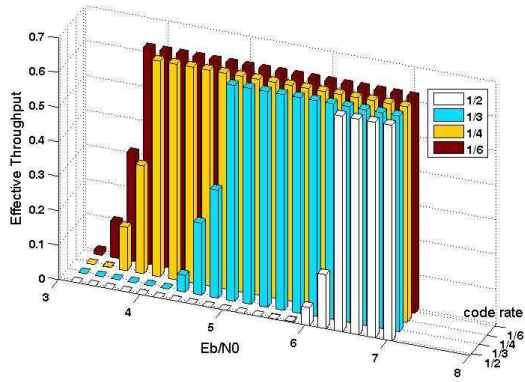


그림 10. 4+12+16 APSK의 Effective Throughput

각 변조방식에서 부호율 마다 일정  $E_b/N_0$ 부터 최대 전송률인 0.625 값을 갖는다. OQPSK와 8PSK는 고차 변조 방식인 4+12 APSK, 4+12+16 APSK보다 낮은  $E_b/N_0$ 에서 최대 전송률을 갖는다. 또한 각 변조방식에서 부호율이 낮을수록 낮은  $E_b/N_0$ 에서 최대 전송률을 갖는다. 본 시뮬레이션 결과를 통해 채널 상태에 따라 변조 방식 및 부호율에 따른 대용량 Telemetry 데이터의 Effective Throughput을 확인할 수 있다.

### III. 결 론

본 논문에서는 달 탐사 Telemetry 데이터를 전송하기 위한 달 탐사선과 지상국 및 우주 통신 환경 모델을 이용하여 대용량 데이터를 전송하기 위한 변조 방식과 터보 부호화 기법을 기반으로 Deferred NAK mode 시뮬레이터를 구현하였다. 변조 방식은 OQPSK, 8PSK, 4+12 APSK, 4+12+16 APSK를 적용하였으며, 터보 부호화 기법의 부호율은 1/2, 1/3, 1/4, 1/6을 적용하였다. Deferred NAK mode 시뮬레이터를 통해 일정 패킷 사이즈에서 변조 방식마다 부호율에 따른 전송 성능을 도출하였으며 시뮬레이션 결과로 채널 상태에 따른 대용량 Telemetry 데이터의 Effective Throughput을 확인할 수 있었다. 본 시뮬레이터는 MATLAB SIMULINK 기반으로 구현되어, 파라미터 변화를 통해 송신단, 수신단, 채널 환경 설정과 구동 환경을 유연하게 변경할 수 있도록 구성되어 있으며, 앞으로 달 탐사를 위한 다양한 심우주 통신 시스템 성능 도출을 위하여 활용 가능할 것이다. 이를 바탕으로 향후 채널 상태에 따른 최적의 패킷 사이즈를 도출하는 연구를 수행할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 한국연구재단을 통해 교육과학기술부의 우주기초원천기술개발 사업(NSL, National Space Lab)으로부터 지원받아 수행되었습니다 (2010-0015083).

### 참고문헌

- 1) 이상률, "우리나라 달 탐사의 기술 개발 방향", KSAS 매거진 3권 1호, 한국항공우주학회, pp. 51-57, 2009년.
- 2) "Report Concerning Space Data System Standards: CCSDS File Delivery Protocol (CFDP)-PART 1: Introduction and Overview", Green book CCSDS 720.1-G-3, Apr. 2007.
- 3) A. Kwok, "34-m and 70-m Command", Document no. 810-005, Rev. C, Jet Propulsion Laboratory, NASA, June 2010.
- 4) 이우주, 현광민, 조경국, 윤동원, "Design and Performance Analysis of Downlink in Space Communications System for Lunar Exploration", 한국우주과학회지 27권 1호, pp. 51-57, 2010년.
- 5) "Radio Frequency and Modulation Systems-Part 1: Earth Stations and Spacecraft. Recommendation for Space Data System Standards", Blue Book CCSDS 401.0-B, Dec. 2007.
- 6) "Research and Development for Space Data System Standards: Flexible Serially Concatenated Convolutional Turbo Codes With Near-Shannon Bound Performance For Telemetry Applications", Orange book CCSDS 131.2-O-1, Sep. 2007.
- 7) "Report Concerning Space Data System Standards: TM Synchronization and Channel Coding-Summary of Concept and Rationale", Green Book CCSDS 130.1-G-1, Issue 1, June 2006.
- 8) Daniel C. Lee and Wonseok Baek, "Expected File-Delivery Time of Deferred NAK ARQ in CCSDS File-Delivery Protocol", IEEE Transactions on Communication, vol.52, no.8, Aug. 2004.
- 9) "Digital video broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding

and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications (DVB-S2)", European Telecommunications Standards Institute EN 302 307 v1.2.1.

10) Jaeyoon Lee, Dongweon Yoon, and Wooju Lee, "Adaptive Coding and Modulation Scheme for Ka Band Space Communications",

Journal of Astronomy and Space Sciences, vol.27, no.2, June 2010.

11) Tomaso de Cola, Harald Ernst, and Mario Marchese, "Performance analysis of CCSDS File Delivery Protocol and erasure coding techniques in deep space environments", ScienceDirect, Computer Networks 51 pp. 4032-4049, May 2007.