技術論文

KSR-III 비행시험 원격측정시스템 운용 결과

이상래*, 이수진*, 김성완*, 이재득*

A Study on the Telemetry Results of KSR-III Flight Test

Sang-Rae Lee*, Soo-Jin Lee*, Sung-Wan Kim* and Jae-Deuk Lee*

ABSTRACT

Korea Sounding Rocket(KSR)-III onboard telemetry system has acquired various data from subsystems and sensors in the rocket, and radiated PCM/FM data using two S-band antennas during the flight. Simultaneously, it is necessary that the ground receiving systems track the rocket, and receive and decode telemetry data. Also post processed telemetry data are needed to be broadcasted on ethernet network in real time. Range safety display system displays flight trajectory using telemetry data in mission control center, and so flight manager makes a decision for flight termination from the trajectory. This paper describes operating technique about telemetry reception, the development for the realtime data processing system, and the results for telemetering reception on flight test. We telemetered, processed, and broadcasted numerous telemetry data during the flight test successfully.

초 록

과학로켓3호(KSR-III) 비행시험시에 탑재용 원격측정장치는 로켓의 서브시스템들의 실시간 상태 및 각종 센서 자료를 획득하여 무선으로 전파 통신을 하고 지상에서 로켓을 추적하면서 비행중인 원격측정 데이터를 실시간으로 획득하고 복원하는 것은 로켓의 비행을 분석하는데 필수적이다. 또한 실시간으로 자료처리된 원격측정자료들은 네트워크를 통해 임무통제센터로 보내져 로켓의 비행 궤도를 도시하고 동시에 비행통제원이 로켓의 비행종단 명령을 수행하기 위한 중요한 판단자료를 제공한다. 본 논문에서는 과학로켓3호 비행시험에 적합한 원격측정 수신과 관련된 운용기법 및 실시간 자료처리 시스템 개발에 관하여 기술하였으며 원격측정 수신결과를 분석하였다. 실제 비행시험시에 성공적으로 원격측정 수신 및 실시간 자료처리 임무를 완수하였다.

Key Words : KSR-III(과학로켓3호), Telemetry System(원격측정시스템), Flight Test(비행시험), Antenna Radiation Pattern(안테나 방사패턴)

1. 서 론

과학로켓3호(KSR-III)는 우리나라 최초의 액체 로켓으로써 오존, 지구자기장 등을 측정하는 과학측정시스템을 탑재하여 2002년 11월 28일 성공

적으로 발사되어 정상적인 궤도로 비행하면서 로켓의 각종 서브시스템의 자료를 획득하였다. 비행시험 시 비행 궤적의 확인은 스킨 추적에 의한 방법 또는 탑재된 트랜스폰더와 지상 레이더와의 펄스신호 통신을 하는 비콘 추적에 의한 방법에 의해서 로켓의 위치를 파악할 수 있다. 이와 더불어 로켓에 탑재된 관성항법장치의 원격측정 데이터를 실시간으로 지상에서 분석하여 도시함으로써 속도, 가속도, 위도, 경도 등 비행 궤적을 확인할 수 있다. 관성항법 원격측정 데이터는 로

† 2003년 1월 8일 접수 ~ 2003년 3월 7일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원, 우주발사체기술실
연락처, E-mail : sanglee@kari.re.kr
대전시 유성구 어은동 45번지

켓의 탑재 서브시스템인 추력 제어기, 엔진 제어기, 김발 제어기, 과학관측장치 및 각종 센서의 출력 데이터와 함께 원격측정장치에 의해 획득되어 지상으로 무선으로 송신된다[1]. 지상에서 수신된 PCM(Pulse Code Modulation) 원격측정신호는 관성항법 데이터를 비롯한 실시간으로 확인을 요하는 데이터를 추출해서 임무통제센터(Mission Control Center)로 네트워크상에서 방송(Broadcasting)되고 비행안전 시스템인 RSDS(Range Safety Display System)에서 비행 궤적을 디스플레이한다. 이렇게 실시간으로 추출된 원격측정 데이터는 지상의 레이더 추적 자료와 더불어 비행시험 시 로켓의 정상 및 비정상 상태를 판단하는 중요한 자료가 된다[2].

본 논문은 KSR-III 비행시험시에 로켓을 정상적으로 추적하면서 양질의 무선 원격측정자료를 수신하여 실시간으로 데이터를 추출하기 위한 수신 운용 기법 및 자료처리 시스템에 대해서 기술하였다. 또한 원격측정 부호기의 동기신호와 관련한 비행시험 결과를 기술하였으며 비행거리에 따른 이론적인 수신기 SNR(신호대잡음비)과 실제 측정된 수신 SNR을 비교하였고 마지막으로 비행시험 시 발생한 로켓의 비행 자세와 원격측정용 탑재 안테나의 방사패턴에 의한 상관관계를 수신 SNR 변화로부터 확인하였다.

II. 본 론

2.1 원격측정자료 수신 운용 구성

KSR-III의 원격측정시스템은 Master/Slave 구조 특성을 갖는 RS-485 통신버스를 사용하여 분산식 데이터취득 방식으로 각종 비행성능 및 환경 데이터를 부호화기에서 취합하고 FM 변조시킨다[3]. 이렇게 PCM/FM 변조된 원격측정신호는 로켓의 S-밴드 안테나로부터 전방향(Omni-directional) 방사패턴 특성으로 전파되며 동시에 지상국은 로켓에서 방사되는 RF(Radio Frequency) 신호가 강한 쪽으로 추적하면서 원격측정데이터를 실시간으로 수신한다[4]. 그러므로 신뢰도 측면에서 독립적인 원격측정 추적시스템이 많을수록 비행시험 결과 데이터를 획득하는데 유리하다. KSR-III 비행시험 시 자동추적시스템을 3대 운용하였으며 헬리컬 안테나로 사람이 운용하는 매뉴얼 추적도 병행하였다. 운용된 자동추적시스템의 1대는 한국항공우주연구원에서 보유하고 있는 이동형 원격측정수신용 VAN으로 데이터를 수신하여 자료처리를 수행하였으며 나머

그림 1. 비행시험 시 원격측정 실시간 데이터 수신 운용도

지 2대는 고정형 형태의 지상국 추적시스템을 이용하였다. 네트워크를 통해서 임무통제센터로 방송되는 실시간 원격측정자료는 다음 그림1과 같이 한국항공우주연구원에서 설계, 제작한 자료처리시스템을 통해서 추출되고 전송된다.

원격측정 자료는 각 위치 별로 가능한 한 많은 포인터에서 저장을 실시하였으며 아날로그 마그네틱 테이프에는 수신기(Receiver) 출력 및 혼합기(Combiner) 출력을 저장하였고 디지털 레코더에는 각 추적시스템의 비트동기화기(Bit Synchronizer)의 출력을 저장하였다. 이와 별도로 독자적으로 개발한 자료처리시스템에서도 네트워크 전송의 기본업무 이외에 실시간 저장도 동시에 수행하도록 하였다. 자료처리시스템에 입력되는 신호는 2대의 추적시스템에서 출력되는 신호 중에서 양질의 신호를 받기 위한 비디오 선택기(Video Selector)를 거쳐서 입력된다.

KSR-III 과학로켓에는 레인징 시스템(Ranging system)을 도입하여 UHF 대역의 레인징용 수신기를 탑재하여 저가격으로 로켓의 궤적을 추적할 수 있는 추적 백업 시스템이 있다[5]. 이것은 한국항공우주연구원의 이동형 원격측정용 VAN과 함께 시스템이 구현되는 것으로써 지상에서 1.95kHz의 코드를 무선변조시켜 로켓으로 송신하면 로켓의 전자탑재부에서는 원격측정신호와 복조된 레인징 코드를 직접 혼합하여 지상으로 송신한다. 그러므로 일반적인 원격측정 수신만 수행하는 지상국은 상대적으로 저주파 신호인 레인징 신호를 제거하고 320kbps의 비트레이트를 갖는 원격측정신호만 추출하여 비트동기화기에 입력시켜 주어야 한다.

1.95kHz의 레인징신호와 320kHz의 원격측정신호가 합쳐진 상태에서 비트동기화기와 그 다음단인 자료처리시스템으로 입력되면 링크마진 측

면에서 레인징신호가 없을 때보다 약 5dB 정도의 수신감도가 떨어지는 것을 확인하였다. 즉, 수신감도가 낮은 합성신호가 입력될 때는 비트동기화기에서 단일 원격측정신호가 입력될 때보다 완벽하게 데이터와 클럭을 복원하지 못하여 데이터 에러가 나타난다.

레인징신호를 제거하기 위해 1단의 수동형 CR 고역통과필터를 제작하여 수신기 뒷단에 추가하였다. 필터의 -3dB Cutoff 주파수(fc)는 20kHz로 설정하여 2kHz 근처의 레인징 입력신호에서는 약 10배 감쇠가 되도록 출력신호를 유도하였으며 320kHz 원격측정신호는 입력신호의 진폭이 대부분 통과되도록 하였다. 제작된 필터를 각 주파수 대역별로 실험을 하였으며 결과는 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있었다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi CR} \quad (1)$$

f_c: -3dB cutoff frequency

그림 2. 고역통과필터 회로

그림 3. 고역통과필터 시뮬레이션

2.2 실시간 자료처리 시스템 및 네트워크 전송

실시간 자료처리 시스템은 그림1에서 보듯이 수신되는 시리얼 원격측정 PCM(Pulse Code Modulation) 부호를 해독하여 모든 측정항목을 채널별 데이터로 추출하고 동시에 임무통제센터(Mission Control Center)에서 실시간으로 필요로 하는 데이터를 UDP(User Datagram Protocol) 패킷으로 Ethernet 상에 방송하는 역할을 한다.

비디오 선택기를 통과한 320kbps의 PCM 부

그림 4. 실시간자료처리부 구성도

호는 실시간 자료처리를 위해서 National Instrument사의 PCMCIA 카드를 이용하여 Bi-φ의 입력신호를 NRZ-L 코드로 변환한 후 시리얼 비트스트림으로부터 원격측정 동기신호인 0xEB90을 찾는다. 일단 동기신호를 찾으면 탑재(Onboard) 원격측정 부호기에서 구성한 포맷대로 복원하고 그 다음에 동기신호에 따라오는 Minor ID 및 Major ID를 참조하여 원하는 측정항목을 추출한다. 이렇게 추출된 항목별 자료는 텍스트나 그래프 형식으로 화면에 도시된다. 프로그램은 Visual C++ 6.0 언어로 구현하였으며 Microsoft Windows XP 상에서 수행되도록 구현하였다. 이러한 실시간자료처리부의 구성도를 그림4에 나타냈으며 표1에서는 자료처리 할 측정항목인 총 271항목으로써 분야별로 정리하였다.

표 1. 자료처리할 원격측정항목

내 용	항목수	종 류
원격측정관련	15	동기신호, ID, 전원 등
과학탐재관련	47	오존, 지구자기장 등
엔진관련	25	엔진압력, 온도 등
김발구동관련	16	전원, 범위, 압력 등
추력기관련	24	전원, 압력, 상태 등
비행종단관련	3	전원, FTS 상태 등
관성항법관련	17	INS, 이벤트신호 등
각종센서	124	스트레인, 온도, 진동 등
합계	271	

임무통제센터는 비행시험시에 로켓의 궤적을 정확히 알아야 하고 비정상 경로로 진입할 경우 비행종단 명령을 내려야 한다. 이를 위해서 자료처리 시스템으로부터 실시간으로 비행궤도 원격측정 데이터를 네트워크를 통해서 받아야 하고 한국항공우주연구원에서 개발한 비행안전 디스플레이 시스템인 RSDS(Range Safety Display System)에서 이러한 원격측정 자료를 후 처리 및 재가공하여 로켓의 현 비행경로와 예상 탄착점을 동시에 도시함으로써 비행종단 통제원은 비행종단 여부를 신속히 판단할 수 있도록 유도한다[2].

원격측정자료 중에서 실시간으로 확인을 요하는 데이터는 표 2에서 보듯이 총 52bytes 가

그림 5. 비행시험시 실시간 자료처리 화면

표 2. 실시간 자료전송요구 데이터내역

내 용	항목수/ 바이트수	종 류
이벤트관련	4/4	TVC중단, 1단엔진종류 등
비행계적관련	19/43	위도, 경도, 속도, 가속도 등
비행종단관련	3/3	FTS 전원 및 상태
엔진관련	2/2	고주파 엔진 챔버 압력
계	28항목/ 52bytes	52bytes x 8bits/byte x 50 Hz = 20.8 kbits/sec

50Hz 단위로 방송되므로 20.8kbits/sec 의 원격 측정자료자료를 RSDS로 전송하였으며 그 내용은 로켓의 비행 위치, 비행 속도와 관련된 관성항법 장치의 출력 데이터, 로켓에서 수행되는 이벤트, 엔진의 연소상태 및 비행종단시스템(Flight Termination System)의 상태 등이다. 원격측정자료 중에서 관성항법 자료는 원격측정 동기신호인 0xEB90 와는 별도의 관성항법자료 동기신호, 0x7E81 가 있으며 각각의 동기신호는 비동기(Asynchronous) 적으로 발생되기 때문에 실시간 자료처리 시스템은 원격측정 동기신호를 먼저 찾고 난 후에 한번 더 관성항법 동기신호를 찾아야 하지만 128바이트 관성항법 데이터 프레임의 각종 비행관련 자료를 획득할 수 있다. 이와 동시에 추출된 관성항법자료는 실시간으로 CRC 체크를 수행하여 정상적인 데이터만을 환산하고 그 후 Ethernet 상에 방송을 실시한다.

그림 5는 KSR-III 비행시험에서 수행하였던 자료처리 화면이며 이륙 후 45초 경과한 후 모습을 나타낸다. 엔진 공급계중 산화제와 연료 라인의 압력센서의 값과 비행종단시스템의 상태를 위의 그래프를 통해서 확인할 수 있다. 화면상단의 도

그림 6. 데이터 셋 포맷, Sample 크기 = 1

구모음줄 좌측에 Net 아이콘이 눌러진 상태로써 현재 실시간 네트워크 전송자료를 추출하고 UDP 패킷으로 구성된 후 50Hz의 주파수로 Ethernet 상에 방송하고 있음을 의미한다. 동시에 우측하단의 상태표시줄에서 원격측정자료로부터 획득한 관성항법장치의 INS 프레임의 카운터 값과 CRC 에러 개수를 나타나게 하였다.

실시간으로 전송되는 원격측정 자료 포맷구조는 앞서 언급한 바와같이 인터넷 표준 트랜스포트 프로토콜인 UDP를 사용하는데 표3과 같이 데이터 패킷의 EOM(Ethernet Output Module) 헤더와 데이터 셋(Set) 으로 구성된다. EOM 헤더는 패킷에 포함되어 있는 자료의 개수, 출력간격(Output Rate) 등의 정보를 담고 있는 부분이다. 데이터 셋은 각 자료의 위치와 값을 담고 있는 부분으로써 그림 6에서는 하나의 예를 나타낸 것으로서 Sample 개수가 1이고, 자료 개수가 3인 경우이다. 각 자료의 Offset은 Tag1의 처음부터 실제 자료가 위치한 곳까지의 거리 값이다. 데이터 셋의 각 Element의 크기는 4 바이트로 정해져 있다.

표 3. 데이터 패킷의 EOM 헤더

항목	종류	크기 (byte)
자료개수(Number of Tags)	Integer	4
Sample 개수(Number of Samples)	Integer	4
출력간격(Output Rate)	Integer	4
Node Name of EOM	Character	32
Test Name	Character	12
Stream Name	Character	11x16

2.3 비행시험 결과 및 분석

KSR-III 액체 과학로켓의 총 비행시험 시간은 원격측정 동기자료(Sync pattern)에 의하여 카운터다운 0초 시점부터 로켓이 수면에 탄착하기 전까지 232.764초이다. 이 시간은 원격측정 자료에 매 프레임 동기마다 IRIG 타임 Tag에 의한 것으로서 그림 7에 표준시간으로 나타내었다. 그림 7은 원격측정 프레임 16비트 동기신호(0xEB90)를 10

그림 7. 전체 비행구간 TLM Sync pattern

그림 8. 3초~11초사이의 TLM Sync pattern

그림 9. 비행시간으로 부터 예측되는 수신 SNR 변화

그림 10. 측정된 수신 SNR(50초~100초)

진수로 환산한 값인 60304를 비행구간에 걸쳐 나타내었다.

전체 비행구간동안 원격측정 프레임은 186,211개를 받았으며 이 중에 동기에러가 생긴 개수는 119프레임이다. 동기에러율은 약 0.064% 로써 상

당히 양질의 원격측정 자료를 획득하였다. 동기 에러 시간대에서 받은 원격측정 데이터는 믿을 수 없기 때문에 무시하면 된다. 동기에러는 대부분 초기 비행인 3초에서 11초 사이에서 발생하였으며 이를 확대하면 다음 그림8과 같다. 이 시간대에서의 SNR(Signal to Noise Ratio, 신호대잡음비)를 분석하면 최소 30dB 이상의 수치는 나오기 때문에 지상국에서 신호를 수신할 수 있는 최소 마진에 충분하지만 다른 시간대의 비행구간과는 달리 SNR이 흔들리는 주파수가 훨씬 높은 것을 알 수 있다.

이것은 이륙(Liftoff)후부터 11초후인 고도 약 750m 까지에서 발생할 수 있는 로켓의 외부 지형환경에 의한 다경로(Multipath) 에러로 추정된다. 비행거리가 증가함으로써 이륙 전 최초의 수신 SNR이 비행시간이 경과함에 따라 감소한다. 이것을 예측하기 위해서 거리손실에 의한 SNR비의 감소 변화량을 시뮬레이션하였다. 두 지점간의 상대적인 거리손실은 다음 식(2)와 같으며 $d1$ 거리를 이륙전의 발사지점이라고 하고 $d2$ 거리를 비행시간에 따른 거리라 가정하였다. 여기서 비행거리는 Slant Range를 의미한다. 계산결과를 도시하면 다음 그림 9와 같으며 이것은 비행함으로써 생길 수 있는 손실 중에 거리에 따른 손실만을 가정하고 예측한 변화량을 나타낸다.

$$20 \log_{10} \frac{4\pi d1}{\lambda} - 20 \log_{10} \frac{4\pi d2}{\lambda} = 20 \log_{10} \frac{d1}{d2} \quad (2)$$

실제 비행시험 시에 수신 SNR을 전 구간에 걸쳐 측정하였으며 측정된 자료로부터 비행시간 대별로 높은 쪽의 SNR를 따라가면 예측한 수신 SNR 변화와 거의 일치함을 알 수 있다. 가끔씩 생기는 SNR의 순간적인 감소변화는 로켓의 순간 움직임에 따라 발생할 수 있는 원격측정용 송신 안테나의 방사패턴 특성 때문이다. 이러한 탑재 안테나 방사패턴에도 불구하고 최소한의 신호 수신 SNR를 유지하기 때문에 원격측정 자료를 획득하여 자료처리를 하는데에 문제는 없다.

또한 비행상승 중에 로켓이 롤(Roll) 방향으로 3회 회전하였는데 이륙 후 약 50초에서 100초 사이에서 발생하였다. 이 시점에서 수신 SNR비가 로켓의 회전에 따라 그림10과 같이 변화가 있었으며 이것의 원인은 원격측정용 S-밴드 탑재안테나의 방사패턴으로부터 확인할 수 있다[1]. S-밴드중 2.2~2.3GHz 대역을 사용하였으며 이 대역은 국제적으로 발사체, 위성 혹은 과학관측용

그림 11. 원격측정용 S-밴드 탑재 안테나의 롤 패턴(수직)

그림 12. 원격측정용 S-밴드 탑재 안테나의 롤 패턴(수평)

로켓의 텔레메트리용으로 보유하고 있는 대역이다[6].

그림 11과 12는 로켓과 같은 지름의 1m 도체 원통의 표면에 제작한 Low profile 원격측정용 S-밴드 안테나 2소자를 실제 장착 위치에 탑재하여 롤 방향으로 방사패턴을 측정한 결과를 나타낸다[1]. 그림 11은 탑재안테나의 수직편파를 측정한 것이고 그림 12는 수평편파를 측정한 것으로서 실제 지상 수신국의 안테나는 원형편파로 수신하기 때문에 롤 방향의 전체 방사패턴은 두 개의 그림을 합성하여 고려하여야 한다. 두 개의 그림을 합성하면 그림 12의 우측과 좌측에서 Null 점이 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 롤 방향의 안테나 방사패턴은 크게 180도 간격으로 Null

영역이 존재하기 때문에 한바퀴 회전하면 두 번의 Null 영역과 두 번의 좋은 빔 패턴이 존재한다. 실제 KSR-III 비행시험시에 3회의 로켓 회전이 이루어졌으며 이러한 비행자세로부터 지상의 수신국은 6번의 Null 영역을 경험하였을 것으로 예상할 수 있으며, 이것은 그림10의 비행시험 수신 SNR 중 확대부분의 측정결과에서 확인할 수 있다.

III. 결 론

KSR-III 액체 과학로켓의 비행시험시에 지상국에서는 양질의 원격측정 자료를 수신하여 실시간으로 자료처리를 수행하였고 임무통제센터에서 필요로 하는 데이터를 네트워크상에 전송하였다. 원격측정 자료로부터 로켓의 비행경로를 실시간으로 확인하여 비상시 생길 수 있는 종단명령의 중요한 판단 근거를 제공하였다. 이를 위해 원격측정 실시간 자료처리 시스템을 개발하였으며 실제 비행시험시에 성공적으로 활용하였다. 비행시험 후에는 원격측정 수신기에서 측정된 SNR을 이론적인 수치와 비교하였고 일부구간에서 발생한 SNR 변동 현상을 로켓의 비행자세와 탑재안테나 빔 패턴의 상관관계로부터 분석하였다.

참고문헌

1. 채연석 외, "3단형 과학로켓 개발연구(IV)", 한국항공우주연구원, 2001
2. 김주년, 고정환, 이재득, 박정주, "KSR-III 비행안전 시스템 구현", 한국항공우주학회지, 제30권 제1호, 2002, pp.147-154
3. 이상래, 이수진, 이재득, "RS-485 버스를 이용한 KSR-III 데이터 취득시스템 개발", 한국항공우주학회지, 제29권 제7호, 2001, pp.103-111
4. 김성완, 이수진, 이재득, "3단형 과학관측로켓용 RF 서브시스템 개발", 한국항공우주학회지, 제29권 제8호, 2001, pp.134-141
5. 채연석 외, "3단형 과학로켓 개발연구(III)", 한국항공우주연구원, 2000
6. "Telemetry Standards", IRIG Standard 106-01, Telemetry Group, Range Commander Council, 2001