

원격측정용 다기능 PCM 데이터 저장장치 개발

김대연^{*1)} · 김재민¹⁾ · 고광렬¹⁾ · 이상범¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 미사일연구원

Development of Multifunction PCM Recorder for Telemetry System

Daecheon Kim^{*1)} · Jaemin Kim¹⁾ · Kwang-Ryul Koh¹⁾ · Sang-Bum Lee¹⁾

¹⁾ Missile Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 30 June 2022 / Revised 10 February 2023 / Accepted 6 March 2023)

Abstract

PCM data is result of air-vehicle flight test, this data is distributed for each engineers to analyze its condition. Since line-of-sight between the air-vehicle and the ground receiver cannot always be secured, remote PCM data recording system was claimed to be required. In this paper multi-function PCM data recorder has been described. This PCM data recorder was intended to place on inside of flight object. It can record about two hours in 32 GB SD card with maximum 7 Mbps data rate. RS-422/485 and RJ-45 interface enhanced accessibility for users. 5 V and 1 A power consumption and 19.5 mm × 152.5 mm × 102.3 mm allow to connect with mobile PCM devices. It acquired more than 190-minutes data in 12-times flight test. Also, it achieved military standard environmental test MIL-STD-810G to prove its stability and solidness.

Key Words : Telemetry(원격측정장치), PCM(펄스코드변조), Recorder(저장장치), SoC(시스템 온 칩), Environmental Test(환경시험)

1. 서론

비행체 체계를 개발하기 위한 성능 시험 과정에서 개발자들은 원격측정장치(Telemetry, TLM)를 활용하여 데이터를 획득한다. 원격측정장치는 비행체 내부에 여러 센서 장치에서 오는 신호를 다중화하고 무선 신호로 변조하여 원격측정 데이터를 실시간으로 지상으로

전송한다¹⁾. 수신된 원격측정 데이터를 바탕으로 지상의 담당 엔지니어는 비행체 내부의 변화를 확인함으로써 비행체의 성능분석을 한다. 실시간으로 전달된 정보로 비행체의 이동 경로를 추적하여 돌발 상황에서도 신속한 분석을 가능케 하고, 나아가 비행체의 경로 이탈 등의 급박한 상황에서도 담당자가 대처할 수 있도록 정보를 제공한다. 무선전송을 통하여 데이터를 획득하기 위해서는 안정적으로 무선 통신이 가능해야 한다. 하지만 모든 비행시험에서 가시선(LOS: Line Of Sight)을 확보하기 어려운 경우가 많아 이를 극복하기

* Corresponding author, E-mail: dyk@add.re.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

위한 다양한 방법들이 제시되었다. 수백 msec 동안 다중경로나 송수신 가시선을 잃는 상황을 극복하기 위해 지연 프레임 시간 다이버시티(Delayed frame time diversity)와 RS 코드를 적용하여 효과적으로 깊은 페이딩을 극복하는 방법이 제안되었다^[2]. 또한 다수의 안테나를 사용하고, 시간지연 프레임을 활용하여 깊은 페이딩을 극복하는 시공간 다이버시티(Space-time Diversity)를 적용하는 방법도 제안되었다^[3]. 하지만 모든 장소에서 수신시스템을 구축하기에는 현실적인 어려움이 있어 항공기의 블랙박스와 같이 비행체 내부에 실려서 원격측정장치 데이터를 저장하는 원격측정용 PCM^[4](원격측정 데이터) 저장장치에 대한 필요성은 꾸준히 제기되어 왔다^[5].

해외 도입품을 사용하는 경우 제한된 탑재공간의 최적 활용에 제한이 있고 내장 소프트웨어를 편의에 맞게 수정하기 어려워 원격측정장치에서 얻은 데이터를 CF 메모리에 저장하는 방식으로 국산화하여 개발되었다^[6]. 원격측정장치가 PCM 데이터를 8 bit 단위로 쪼개어 저장장치에 보내면 이를 16 bit 단위로 변환하여 최소 저장 단위인 512 byte씩 묶어 CF 메모리에 저장하였다. 또한 MIL-STD-810F의 저온, 고온, 고도, 습도, 진동 및 충격시험을 거쳐 장치의 안정성을 높였고, 약 70여 회 이상의 비행시험에 적용하여 효용성을 확인하였다. 하지만 CF 메모리에 저장된 데이터를 USB 인터페이스를 통해 시리얼 통신으로 다운로드 하기 때문에 최대 Baud Rate가 115200 bps로 제한되어, PCM 데이터를 내려받고 배포하는 데 긴 시간이 소요되었다.

본 논문에서 제안하는 원격측정용 다기능 PCM 저장장치는 기가비트 이더넷 통신 방식으로 사용자가 빠르게 데이터를 다운로드 할 수 있도록 구성하였으며, 메모리가 가득 차면 가장 오래된 PCM 파일 저장 공간부터 덮어쓰워 신규 파일을 저장하는 방식으로 메모리가 가득 차도 사용자가 수동으로 다시 저장 공간을 확보할 필요가 없도록 사용이 편리하게 설계하였다. 또한 외부의 장치로부터의 저장 및 외부 장치로 PCM 파일을 실시간으로 재생하는 기능을 구현하여 다양한 장비에서 활용도를 넓혔다.

2. 본 론

PCM 저장장치는 원격측정장치 메인 장치에 모듈 형태로 탈부착할 수 있도록 하여 실용성을 높였으며,

최종적으로 PCM 파일이 저장되는 SD 메모리 카드 또한 외부에서 쉽게 접근할 수 있도록 설계하였다. 저장장치의 제원은 Table 1에 정리하였고, 최종적으로 완성되어 비행체에 탑재된 저장장치는 Fig. 1과 같다.

Table 1. Size of PCM data recorder

제 원	값
Length (mm)	19.5
Width (mm)	152.5
Height (mm)	102.3
Weight (kg)	0.24

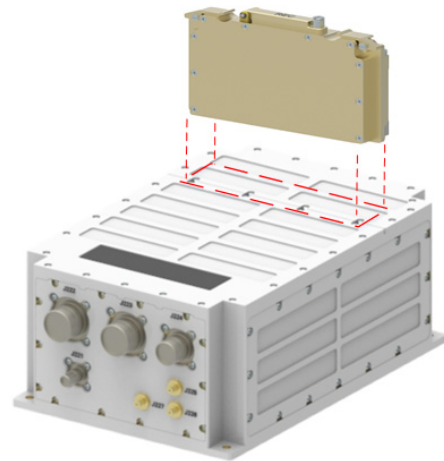


Fig. 1. PCM data recorder assembled in TLM

2.1 설계 요구규격 및 시스템 개요

PCM 저장장치는 크게 전원부, 제어부, SD 메모리, EXT_JIG로 나눌 수 있고, 저장장치의 설계 요구규격 및 설계 규격은 Table 2와 같다. PCM 데이터 저장장치는 원격측정장치 메인 모듈로부터 NRZ-L의 데이터를 최대 7 Mbps 속도로 받는다. PCM 저장장치의 저장 용량은 약 120분 저장할 수 있도록 하였으며, PCM 데이터 파일의 크기를 고려하여 약 32 GB 이상의 메모리 카드를 적용하였다. PCM 파일은 FAT32 방식으로 저장하게 하여 윈도우와 맥OS에서 읽고 쓰기가 가능하게 하였고, 무엇보다 안정성을 우선으로 설계하였다. 원격측정장치 메인 모듈과 저장장치는 RS-422/485 입력 인터페이스를 갖고, 저장장치의 출력은 RS-422/485와 RJ-45 인터페이스를 구현하여 사용자 편의성을

Table 2. Design requirement and design description

항목	설계 규격
전기적 인터페이스	RS-422/485
입력 데이터 전송방식	NRZ-L(Bit stream)
입력 데이터 전송률	최대 7 Mbps
최대 저장 시간	2시간(120분)
저장 용량	32 GB SD Card
데이터 출력 인터페이스	RS-422/485, RJ-45
데이터 출력 전송방식	NRZ-L, Ethernet(UDP/IP)
PCM 데이터 저장 방식	FAT32(File Allocation Table 32) 파일 시스템
운영체제	NEOS Ver 4.17(한컴 MDS)
데이터 시간 정보	Real Time Clock(RTC)
운용 전원	+5VDC 1 A 이하
전원 모니터링 기능	전원 OFF 시 자동으로 PCM 데이터 저장 종료

높였다. NEOS Ver4.17의 실시간 운영체제를 사용하여 저장장치 내부의 편의성을 고려하였다. 또한 이동식 저장장치의 특성을 고려하여 전력 소모를 5V/1A 이하로 작동하게 하였으며 시험 비행체의 전원이 비정상적으로 끊길 경우를 대비하여 공급전원이 꺼지면 전압이 강하하는 상태를 감지하여 자동으로 PCM 데이터 저장을 안전하게 종료할 수 있도록 설계하였다.

PCM 저장장치의 하드웨어 블록도는 Fig. 2에 도시하였다. Intel FPGA Cyclone V를 사용하여 프로그래밍 가능한 FPGA와 ARM CPU(Cortex A-9)를 적용하였다. FPGA는 RS-422/485 트랜시버, ADC, 필터 등을 구현하였다. FPGA에 탑재하는 펌웨어는 QSPI EEPROM (Quad Serial Peripheral Interface Nor Flash)에 저장이 되고, PCM 파일 저장 시 참고되는 기준 시간은 RTC (Real-Time Clock)를 사용하였다. RTC의 백업 배터리로 Lithium Coin battery를 사용하였으며, 환경시험 규격을 맞추기 위해 동작 온도가 -40 °C에서 +85 °C 이상인 부품 소자를 적용하였다. RTC의 동작범위는 2.2 V ~ 5.5 V로, RTC 백업 배터리는 주기적으로 체크하도록 하였다. Cortex-A9 CPU의 메인 메모리로는 1 GB DDR3 메모리를 적용하였다. 비행체가 비상 상황이나

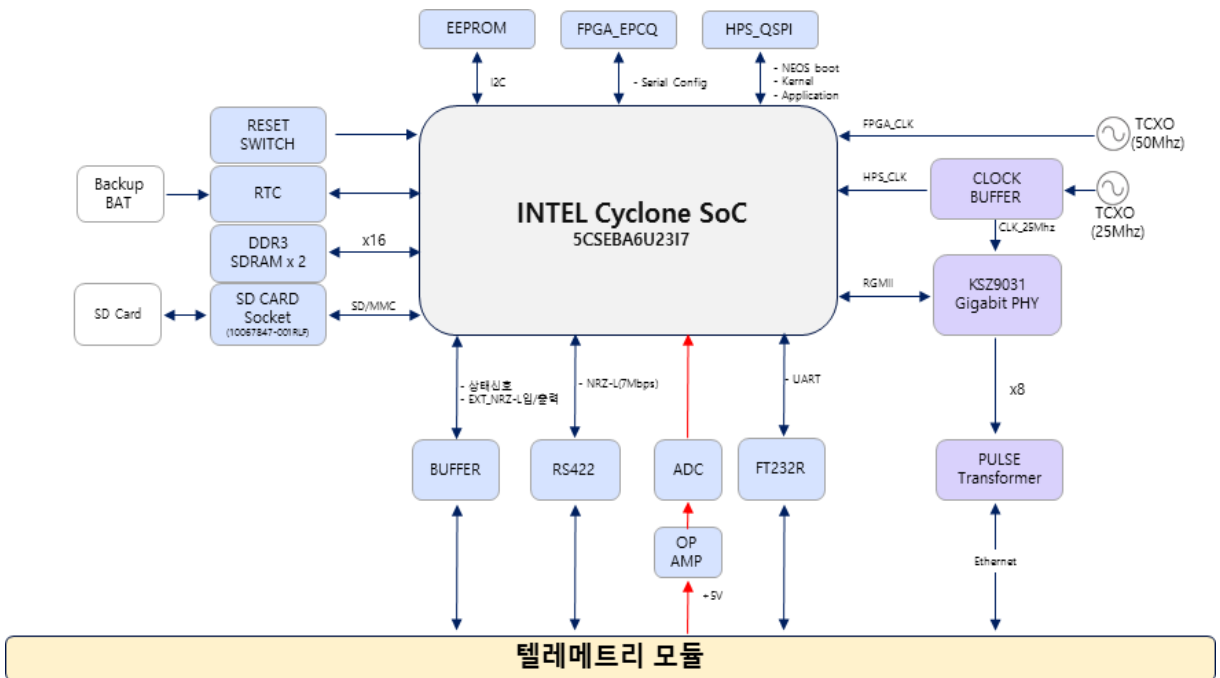


Fig. 2. Block diagram of multifunction PCM data recorder

돌발 상황에 직면하여 원격측정장치 메인 모듈로부터 전원을 공급받지 못하는 상황을 대비하여 ADC가 전원을 관찰하게 하여 저장장치의 전원이 해제되면 ADC로 모니터링된 전압의 강하 추이를 보고 자동으로 파일 저장종료 신호를 생성한다. 그리고 저장된 PCM 데이터를 고속으로 사용자에게 출력할 수 있도록 Gigabit Ethernet 인터페이스를 적용하였다. 이때 FPGA와 HPS(Hardware Processor Subsystem)에 사용되는 클락은 TCXO(Temperature Compensated Crystal Oscillator)로 -30 °C에서 +70 °C의 동작범위를 갖는다. 원격측정장치 메인 모듈과 PCM 저장장치 사이의 전압 차를 해소하기 위하여 Buffer를 삽입하였다. 원격측정장치 메인 모듈로부터 명령어를 입력하기 위하여 FT232R을 사용하여 UART(Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) 인터페이스가 가능하게 하였다.

2.2 전원부

PCM 저장장치는 5 V 전원을 원격측정장치 메인 모듈에서 전달받아 저장장치 내부에서 1.1 V ~ 3.3 V로 변환 과정을 거쳐 내부 전원을 공급한다. 각각의 DC-DC 컨버터와 레귤레이터 블록다이어그램은 Fig. 3에 표현하였다. EXT_JIG는 외부 장비에서 오는 PCM 파일을 저장하거나 재생할 때 사용하며, 원격측정장치로부터 전원공급을 받지 않아도 사용이 가능하도록 별도로 외부로부터 직류 전원 공급이 가능케 하였다. 피드스루 캐패시터(Feedthrough Capacitor)를 이용하여 고주파 노이즈를 제거하고, DC-DC 컨버터를 이용하여 원하는 전압으로 낮춰준 후 안정적인 전원공급을 위하여 레귤레이터를 추가하였다. PCM 저장장치의 전원이 두절되려고 하면 사전에 저장종료 명령을 내리기 위하여 OP-Amp와 ADC를 사용하여 전압을 모니터링 하였다.

2.3 Encoder/EXT_JIG

원격측정장치 인코더(TLM Encoder)는 메인 모듈에서 데이터를 코드화하고 영상을 압축하는 역할을 수행한다. 원격측정 인코더와 PCM 저장장치는 RS-422/485로 연동하였으며 PCM 저장장치에 전원이 인가되어 저장할 준비가 되면 TLM 인코더에 REC_TLM_DATA_P/N 신호를 보내 저장 준비가 됨을 알린다. 원격측정장치 인코더는 PCM 저장장치가 준비됨을 알고 Ack 신호로 TLM_REC_DATA_P/N을 보낸다. 원격측정장치 Encoder는 Ack 신호 전송 후 TLM_REC_FRAME_P/N을 이용

하여 NRZ-L 데이터를 보낸다. 이때 데이터의 전송속도는 최대 7 Mbps이다.

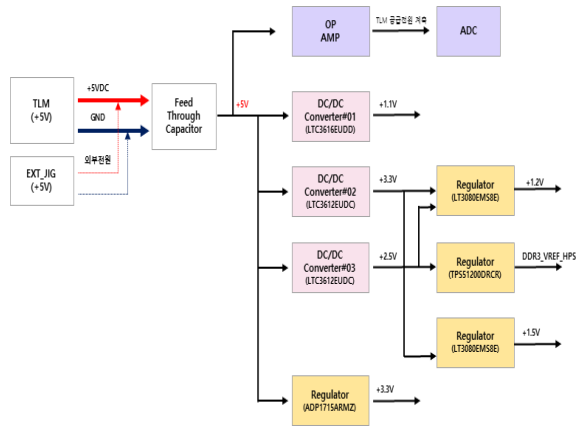


Fig. 3. Power distribution of multifunction PCM data recorder

원격측정 데이터가 원격측정장치 메인 모듈이 아닌 외부의 EXT-JIG를 이용해 수신기로부터 전달이 된다면, EXT_BIT_DATA/CLK_INPUT을 통하여 NRZ-L 데이터 및 클럭(CLOCK)이 전송이 된다. 같은 방법으로 저장된 데이터를 재생할 때 Fig. 4와 같이 EXT_NRZ_DATA/CLK_OUTPUT을 통하여 데이터와 클럭을 전송한다. 사용자의 편의성을 높이고자 원격계측 수신소와 인터페이스를 맞추어, 어느 수신소에서도 저장장치로 획득한 PCM 데이터를 저장하고 재생할 수 있도록 하였다.

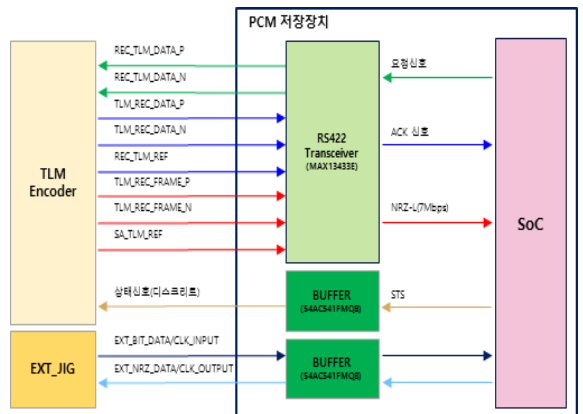


Fig. 4. Recoding procedure of multifunction PCM data recorder

2.4 PCM 저장장치 FPGA 구성도

PCM 저장장치는 ARM 기반의 HPS 및 LOGIC이 내장된 SoC FPGA(Cyclone V)를 사용함으로써, 시스템 전력과 비용 및 PCB(Printed Circuit Board) 공간을 효율적으로 사용하였다. 앞 절에서 언급한 PCM 저장장치의 FPGA 내부 구성도를 Fig. 5에 자세히 표현하였다. NRZ-L 입력 데이터는 입력 PCM 데이터 전처리로직(Logic)과 버퍼(Buffer)를 거쳐 FPGA 로직으로 입력되면 HPS를 거쳐 SD CARD(저장장치)에 저장된다. NRZ-L 데이터 출력은 반대의 경로를 통해 전달된다. HPS의 CPU는 Cortex-A9가 사용되었고, OS로는 한컴 MDS인 NEOS Ver4.17이 사용되었다. Cortex-A9와 NEOS를 이용하여 SD/MMC, Ethernet, GPIIP 인터페이스와 I2C, controller, DDR3 controller, QSPI controller, UART controller 구성이 가능하였다. PCM 저장장치의 소프트웨어 레이어 구성도는 Fig. 6에 표현하였다.

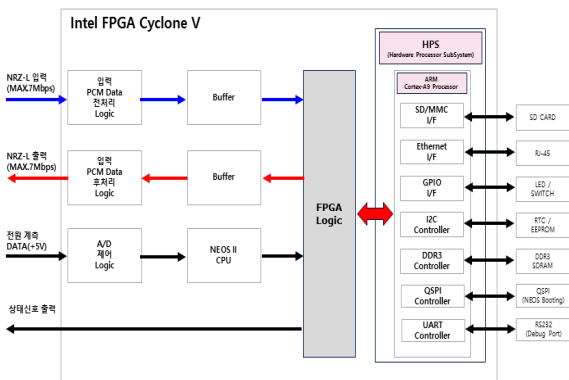


Fig. 5. FPGA of multifunction PCM data recorder

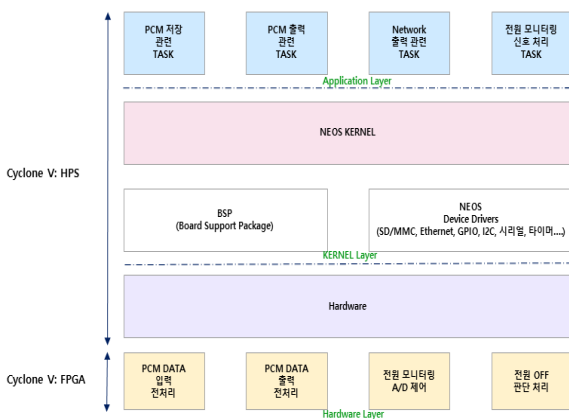


Fig. 6. Software layer of multifunction PCM recorder

2.5 파일 프리포맷 및 기능 운용방안

PCM 저장장치 내 SD CARD 32 Gbyte 내의 저장과 일명은 1번부터 160번까지로 생성되도록 하여 파일 1개당 용량을 190 Mbyte로 제한하였다. 원격측정장치 데이터를 분할하지 않으면 데이터 전체가 덮어쓰워지면서 직전에 저장된 전체 데이터가 유실될 가능성이 크고, 데이터를 너무 작게 분할할 경우 저장장치에 저장되는 파일의 수가 많아져 사용자가 다수의 파일을 다운로드하고 병합해야 하므로 사용성이 불편해진다. 파일 1개당 용량 190 Mbyte로 결정은 다음 수식을 따라 결정하였다.

$$FS = \left(\frac{E[X] + \sigma}{R} \right) / k,$$

where, $R = \frac{\text{PCM 데이터}}{\text{영상 + PCM 데이터}}$

여기서 X는 PCM 데이터 파일의 크기, FS는 PCM 저장장치에서 영상과 PCM이 통합된 데이터가 분할 저장되는 파일의 단위 크기, E[X]는 실제 저장된 PCM 파일 크기의 평균, σ 는 PCM 파일 크기의 표준편차이다. R은 PCM 저장장치에서 저장되는 영상과 PCM 데이터에 대한 PCM 데이터의 비율이다. k는 저장장치에서 통합된 데이터를 몇 개로 나누어 저장할지 사용자가 결정하는 상수이다. 기존의 비행체 점검과정으로 획득한 PCM 데이터를 바탕으로 위 계산식을 적용하였고, 얻은 평균값 E[X]는 150 MB, σ 는 40이었으며, k는 4로 적용하였다.

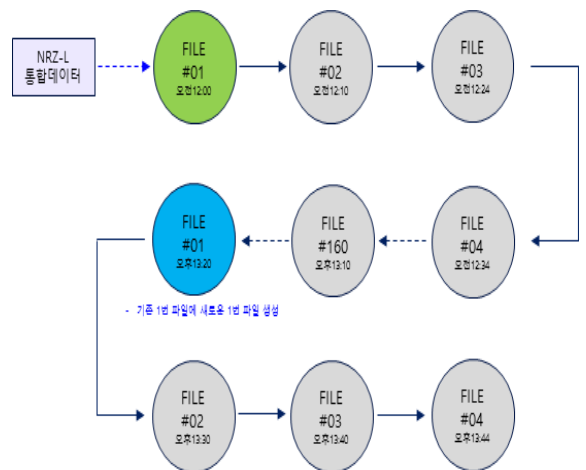


Fig. 7. Recording file format

Fig. 7과 같이 160번째 파일이 저장이 완료되면 다시 첫 번째 파일부터 순차적으로 덮어씌우는 방식으로 저장하도록 하였다. 또한 저장파일에 시간 정보 기록하여 저장 시작과 종료 시점을 구분케 하였다. 저장 시간은 앞선 2.1절에 기술된 RTC를 이용한다.

2.6 운용모드

PCM 저장장치가 지상 수신소와 연동하기 위한 운용모드는 Fig. 8에 표현하였다. 체계 점검과정에 획득된 데이터는 궁극적으로 지상 수신소와 연동되어 데이터를 재생하거나 비행시험을 통해 획득된 데이터는 담당자들에게 배포된다. 즉 최종 사용자는 지상 수신소가 되며 담당자들은 각각의 PC로 저장된 데이터를 확인한다. 지상 수신소와 PCM 저장장치는 EXT_JIG를 통하여 DATA와 CLK을 보내고, 사용자는 이더넷 인터페이스를 통하여 데이터를 받고 UART 인터페이스를 통해 명령을 보낸다. PCM 저장장치의 사용자 운용 개념도는 Fig. 9에 표현하였다. PCM 저장장치가 저장할 준비가 되면 사용자(User)는 NEOS 콘솔(Command Console) 창을 통해 저장, 재생, 전송, 삭제 등의 명령어를 보내고, PCM 저장장치는 이 명령에 따라 데이터를 저장, 재생, 출력 및 삭제 한다.

2.7 External Jig

PCM 저장장치를 단독으로 점검하거나 지상 자료처리 시스템과 연동하기 위하여 EXT_JIG 모듈을 설계하였다. 탑재 비행 중 저장장치로 저장한 데이터를 지상

자료처리 장치로 제공하기 위해 데이터 출력(데이터/클럭) 하고 반대역으로 지상 자료처리 장치의 비트싱크 출력(데이터/클럭)을 입력받아 저장할 수 있도록 NRZ 데이터 입/출력을 위한 BNC 포트가 장착되었다. 또한, 외부 직류 전원 장치를 통해 전원공급이 가능하도록 설계하였다. NRZ-L 신호를 전달받기 위하여 입력단에는 RS-422/485 트랜시버를, 출력단에는 버퍼를 삽입하였다. RJ-45 및 UART 인터페이스, RTC 배터리 체크, LED 및 자체점검 단자를 삽입하여 편의성을 높였다. EXT_JIG는 Fig. 10에 표현하였다.

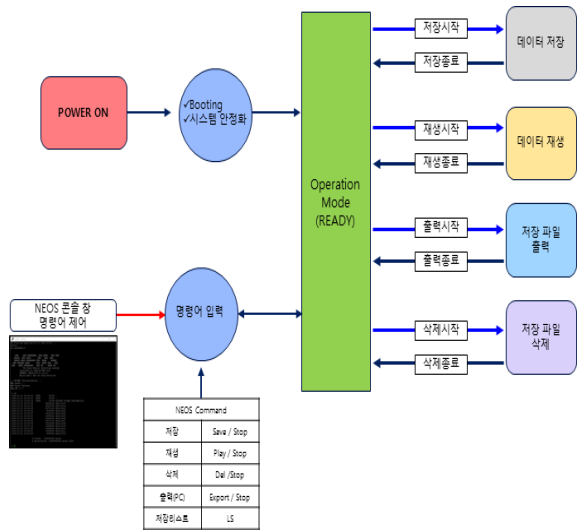


Fig. 9. User operation for multifunction PCM recoder

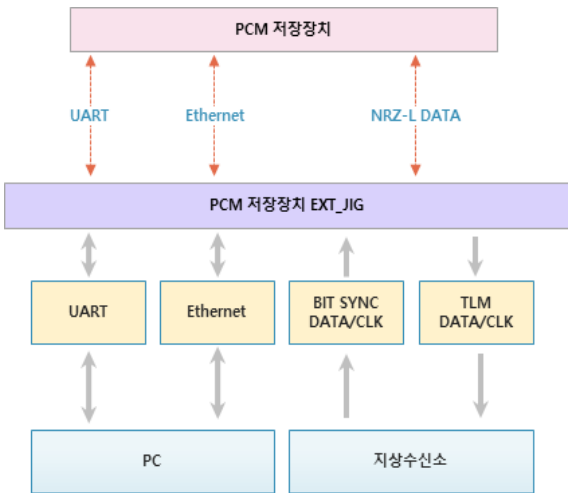


Fig. 8. Multifunction PCM recorder operation

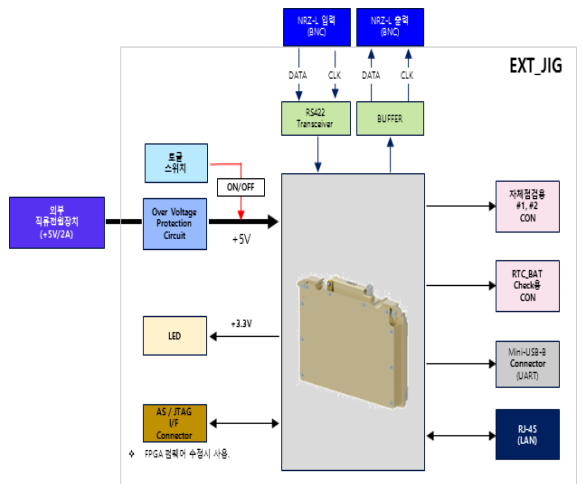


Fig. 10. External jig of multifunction PCM recoder

3. 환경시험

PCM 저장장치는 범용성을 높이기 위하여 군용 규격인 MIL-STD-810G^[6]를 만족하도록 설계하였다. 시험 비용과 시간의 제한으로 MIL-STD-810G 규격으로 저온, 고온 저장시험, 저온 고온 운용시험, 고도, 습도, 진동, 충격시험을 실시하였다. 환경시험 동안 PCM 저장장치는 원격측정장치 모듈과 연동하여 실제 PCM 데이터를 저장하고, 저장된 데이터를 재생하는 시험을 시행하였다. 각각의 시험에서 저장한 데이터를 PCM 데이터 뷰어 프로그램의 CRC 오류 확인 기능을 통해 데이터가 손실 없이 정상적으로 저장되었음을 확인하였다. 저장되었던 데이터와 영상 캡처 화면을 Fig. 11 과 Fig. 12에 나타내었다.

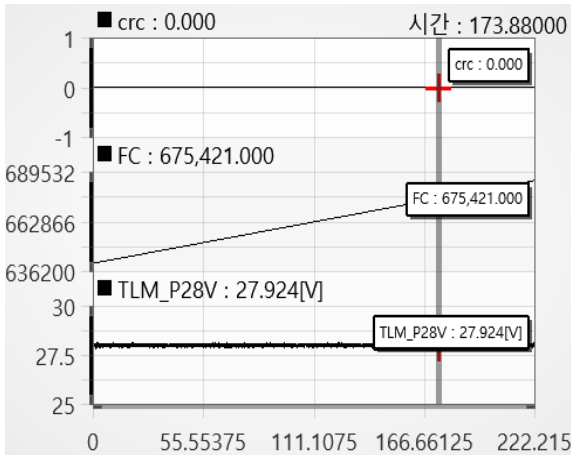


Fig. 11. Restored data after environmental test



Fig. 12. Restored video after environmental test

4. 결론

원격측정장치 장착하여 PCM 데이터를 받아 저장하는 다기능 소형 PCM 저장장치 모듈을 개발하였다. 300 g 이하의 무게로 제작하여 이동성을 높였고, 최대 7 Mbps의 속도로 2시간 이상 저장이 가능하도록 설계하였다. SoC를 사용하여 전력 및 공간에 효율적으로 설계하였고, RS-422/485, RJ-45 및 UART 등 다양한 인터페이스를 삽입하여 사용자의 편의성을 높였다. 저장된 PCM 데이터는 SD CARD만 빼내어 데이터를 옮기거나, EXT_JIG를 사용하여 PC에 연결하여 재생하거나 데이터를 획득하고, 삭제를 할 수 있도록 하였다. PCM 저장장치는 MIL-STD-810G의 군용 환경시험을 만족하였고 12회의 비행시험 중 190분 이상의 데이터 획득하여 완성도와 신뢰도를 확인하였다. 비행시험으로 획득한 데이터는 Fig. 13에 나타내었다. 기존 저장장치와 비교하면 고속의 PCM 데이터를 대용량으로 저장할 수 있으며 저장, 재생, 외부장치 인터페이스 등 다양한 운용 기능이 추가되었다. 새롭게 개발된 PCM 저장장치는 향후 신규 군용 비행체 개발시험에 적용하여 활용성이 기대되며 상용화도 가능하여 의미가 크다고 볼 수 있다. 저장장치와의 사양 비교는 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Comparison of PCM data recorder

	다기능 PCM 저장장치	PCM Data Recorder ^[1]
크기 (mm) (L×W×H)	19.5×152.5×102.3	30×110×100
무게 (kg)	0.24	0.3
형태	장착형(소형)	장착형(소형)
저장매체	SD Card(32 Gb)	CF(2 Gb)
입력 데이터	PCM(7 Mbps)	PCM(500 kbps)
운용 기능	저장, 재생, 지상 연동	저장
환경시험	MIL-STD-810G	MIL-STD-810E ^[7]
입/출력 인터페이스	LAN, USB	USB

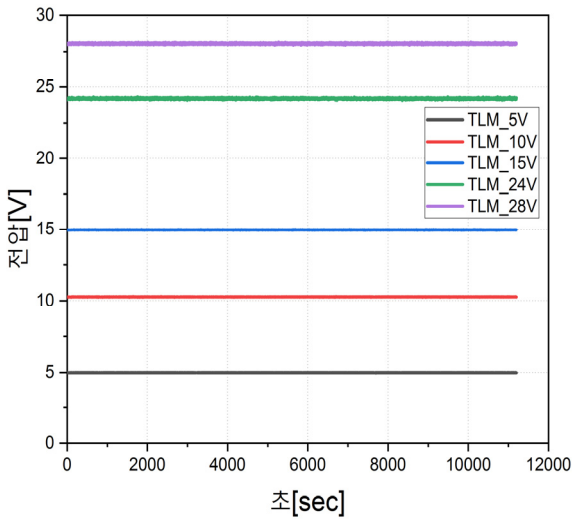


Fig. 13. TLM data extracted from 12 flight tests

References

- [1] K. Koh, S. Lee, H. Lee and W. Kim, "Development of PCM Data Recorder for Telemetry System," Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 14, No. 4, pp. 607-614, 2011.
- [2] K. Koh and W. Woo, "Performance Analysis of Telemetry Method using Delayed Frame Time Diversity(DFTD) and Reed-Solomon Code," Journal of the Korea Institute of Communication and Information Sciences, Vol. 37, No. 7A, pp. 503-511, 2012.
- [3] J. Kim, "Overcoming Two-ray Propagation Loss of Parabolic Trajectory Air-vehicles via Received Signal Strength Prediction in Maritime Environments," Journal of the Korea Institute of Communication and Information Sciences, Vol. 42, No. 7, pp. 1306-1315, 2017.
- [4] Telemetry Group Range Commanders Council, IRIG Standard 106-17, Secretariat Range Commanders Council, White, Jul, 2017.
- [5] J. Kang and M. Rhee, "A Study on the Airborne PCM Telemetry System," the Journal of Korean Institute of Communication and Information Sciences, Vol. 8, No. 1, pp. 1-11, 1983.
- [6] DOD, MIL-STD-810G Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, pp. 500.5-1-528-18, 2008.
- [7] DOD, MIL-STD-810F Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, pp. 500.4-520.2, 2000.