

한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터 개발을 위한 테스트베드 설계 및 구축

윤원주*

Design and Implementation of a Testbed for the Development of KSLV-II Onboard Equipment Simulator

Won-Ju Yoon*

Abstract

This paper describes a testbed that was designed and implemented for the development of KSLV-II onboard equipment simulator. It used the CPCI-based industrial hardware system for scalability and the QNX real-time operating system for reliability and real-time simulation. In addition, a real-time application under QNX for function simulations of the KSLV-I PDU was developed and it was verified through interface experiments with KSLV-I upper-stage test equipment. The implemented simulator testbed will be used to verify the development feasibility in the design and development phase of a real KSLV-II onboard equipment simulator.

초 록

본 논문에서는 한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터의 개발을 위해 설계하고 구축한 테스트베드에 대해 기술한다. 시뮬레이터 테스트베드는 범용성 및 확장성을 위해 CPCI 기반 산업용 하드웨어 시스템을 활용하여 설계하였고, 높은 시스템 안정성 제공 및 실시간 모사 기능 처리를 위해 실시간 운영체제인 QNX를 탑재하였다. 또한 나로호의 탑재장비 중 PDU의 기능을 모사하는 QNX용 실시간 모사 프로그램을 개발하였고, 나로호 상단부 점검 장비와의 인터페이스 시험을 통해 시뮬레이터 테스트베드의 기능을 점검하였다. 구축된 시뮬레이터 테스트베드는 향후 실제 한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터의 설계 및 개발 단계에서 개발 실현가능성 검증에 활용될 것이다.

키워드 : 한국형발사체(KSLV-II), 탑재장비 시뮬레이터(onboard equipment simulator), 시뮬레이터 테스트베드(simulator testbed), CPCI 버스(CPCI bus), 실시간 운영체제(real-time operating system)

1. 서 론

탑재장비 발사관제시스템은 발사캠페인 기간 동안 우주발사체에 탑재된 전자장비들의 상태를 점검하고 발사 운용을 위한 총괄 제어를 수행하는 시스템이다 [1]. 이러한 탑재장비 발사관제시스템을 개발하고 검증을 수행하기 위해서는 피제어대상인 탑재장비들과의 인터페이스를 통한 시험이 필요한데, 실제 탑재장비들을 이용하여 개발 및 검증을 하기에는 여러 제약사항들로 인해 많은 어려움이 발생한다. 따라서 우주발사체에 탑재되는 실제 전자장비 없이도 탑재장비 발사관제시스템의 개발 및 검증을 가능하게 하기 위해서 탑재장비들의 기능 및 인터페이스를 모사해주는 탑재장비 시뮬레이터의 개발이 필요하다. 또한 개발된 탑재장비 시뮬레이터는 우주발사체의 발사 운용 단계에서 실기체 없이 운용자들이 탑재장비 발사관제시스템을 이용한 발사 운용 연습을 수행하기 위해서 사용된다.

본 논문에서는 한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터의 효율적인 개발을 위해서 설계 및 구축한 테스트베드에 관하여 기술한다. 한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터 테스트베드의 구축 목적은 다음과 같다.

- 시뮬레이터의 개발 방향성 설정 및 실현가능성 검증을 위한 테스트베드 구축
- 구축된 테스트베드를 활용하여 시뮬레이터 개념설계 수행
- 향후 시뮬레이터 예비설계 및 상세설계에서도 활용

2. 시뮬레이터 테스트베드 설계

2.1 CPCI 기반 하드웨어 시스템

한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터 테스트베드는 범용성 및 확장성이 높은 하드웨어 시스템을 활용함으로써 다양한 형태의 시뮬레이터 개념설계를 테스트해볼 수 있도록 설계하였다. 항공우주 산업 전반에 널리 사용되고 있는 VME(VERSA Module Eurocard) 버스 및 CPCI

(CompactPCI) 버스 기반 하드웨어 시스템은 그러한 범용성 및 확장성 관련 요구조건을 만족시킨다. 표 1은 VME 및 CPCI 버스의 대표적인 특징을 비교한 것을 보여준다.

표 1. VME vs. CPCI 버스 특징 비교

VME	CPCI
multi-processor boards support	single-processor board only
up to 21 slots	up to 8 slots (extensible)
415 pins in a 6U VME board (2.54 mm pin spacing)	565 pins in a 6U CPCI board (2.0 mm pin spacing)
high cost	relatively low cost

VME 버스는 가혹한 환경 조건에서 주로 운용되는 장비에 활용되기에 국방 혹은 항공우주 분야의 탑재장비에서 주로 사용된다. 최대 21개의 보드 슬롯을 제공하여 확장성이 매우 높고, 다중 프로세서 보드를 동시에 탑재하여 효율적인 다중 프로세싱이 가능한 장점이 있지만, 장비 가격이 고가가 되는 단점이 있다. 이에 반해 CPCI 버스는 일반적인 컴퓨터 시스템에 사용되는 PCI 버스를 기반으로 하여 산업용 폼팩터 형태로 수정한 것으로 하나의 프로세서 보드만을 탑재할 수 있는 제약점이 있지만, 오랜 기간 동안 컴퓨터 시스템에서 사용되어왔기 때문에 개발 관련 자원이 풍부하고 장비 가격이 상대적으로 낮아서 가격대성능비가 높은 장비 구축이 가능하다. 또한 CPCI의 기본적인 버스 데이터 전송률이 VME보다 높기 때문에 high throughput I/O가 요구되는 장비에 적합한 특징을 가지고 있다.

탑재장비 시뮬레이터는 지상에서 운용되는 지상 지원 장비이기 때문에 우주발사체 탑재장비와 달리 운용 환경이 그리 가혹하지 않다. 따라서 장비가격이 상대적으로 낮고 소프트웨어 개발이 용이한 CPCI 버스 기반 하드웨어 시스템을 사용하여 테스트베드를 구축하도록 설계하였다.

한국형발사체 이전의 나로호 발사체의 탑재장비들은 외부 인터페이스로 RS-422 시리얼 통신 인터페이스와 DIO(Discrete Input/Output) 및 AO(Analog Output) 신호 인터페이스 등을 탑재하였다. 한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터 테스트베드는 나로호 탑재장비에 준하여 동일한 외부 인터페이스를 지원하도록 설계하였다.

2.2 실시간 운영체제

나로호를 위해 개발된 상단부 탑재장비 시뮬레이터는 National Instruments사의 PXI(PCI eXtensions for Instrumentation) 하드웨어와 Windows 운영체제 기반 LabView 소프트웨어가 사용되었는데, 실시간 기능모사 작업을 처리함에 있어서 타이밍적인 제약점이 존재하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터에는 실시간 운영체제를 탑재하고 그를 기반으로 실시간 기능모사 프로그램을 개발하는 것이 필요하며, 이를 테스트해보기 위해 테스트베드에도 실시간 운영체제를 탑재하였다. 또한 실시간 운영체제는 범용 운영체제에 비해 높은 시스템 신뢰성을 제공하기 때문에 실시간 운영체제를 탑재하는 것은 한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터 장비의 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

전세계 상용 실시간 운영체제 시장에는 수많은 실시간 운영체제들이 존재하는데, 대표적인 경성 실시간 운영체제로 VxWorks와 QNX 등이 있다. 두 실시간 운영체제 모두 오랜 시간에 걸쳐 적용되어 성능 및 안정성을 검증받았으며, 항공우주분야에서 널리 사용되고 있다. 그 중에서 QNX의 경우 상업적인 제품 개발을 위해 사용하지 않을 경우 무상으로 사용할 수 있는 비상업용 라이선스(non-commercial license)를 제공하고 있기 때문에 비용을 들이지 않고 탑재장비 시뮬레이터 테스트베드에 QNX를 탑재하여 실시간 운영체제를 시험적으로 평가해 볼 수 있다. 이러한 이유로 QNX를 테스트베드에 탑재할 실시간 운영체제로 선정하였다. 또한 QNX와 VxWorks는 POSIX(Portable Operating System Interface) 표준을 만족하는 실시간 운영체제이기 때문에 시스템 의존적인 일부 라이브러리를 제외하고는

POSIX 표준 라이브러리가 사용되므로 QNX 기반 실시간 응용프로그램 개발 기술은 VxWorks 기반 실시간 응용프로그램 개발에도 활용 가능하다.

3. 시뮬레이터 테스트베드 구축

그림 1은 PCI 버스 기반 하드웨어 시스템 설계에 따라 구축된 한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터 테스트베드의 하드웨어 시스템 사진을 보여준다. 표준 3U 사이즈의 PCI 샷시에 다음의 보드들이 탑재되었으며, 구축된 테스트베드 하드웨어 시스템에는 최신 버전의 QNX Neutrino 6.5 실시간 운영체제를 설치하였다.

- Intel Core i7 프로세서 보드 (TP863/392)
- 4채널 RS-422 통신 보드 (TCP463-11R)
- DIO 보드 (PXI-6527)
- AO 보드 (PXI-6704)

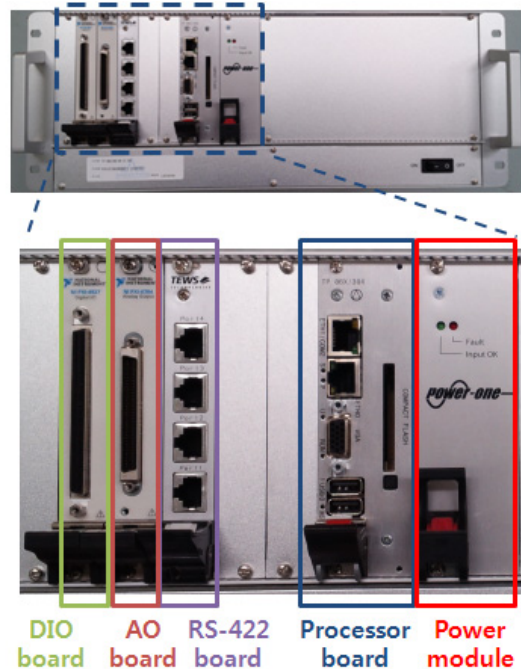


그림 1. 구축된 탑재장비 시뮬레이터 테스트베드 하드웨어

범용 하드웨어 시스템 및 실시간 운영체제 기반 테스트베드를 활용하여 한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터 개발의 실현가능성을 평가하고 향후 이를 바탕으로 개념설계를 수행하기 위해서 나로호 상단부 탑재장비 중 하나인 PDU(Power Distribution Unit)의 기능 및 외부 인터페이스를 모사하는 실시간 응용프로그램을 개발하는 것을 테스트베드 구축의 최종 목표로 설정하였다.

나로호 상단부 탑재장비 PDU는 각 탑재장비들에게 전원을 분배해주는 장비로 외부 인터페이스로 RS-422 시리얼 통신 인터페이스와 DI 및 AO 신호 인터페이스를 지원하며, 이들 인터페이스를 통해 발사관제시스템과 연결되어 다음과 같은 기능을 수행한다.

- RS-422 시리얼 통신 인터페이스
 - 주기적으로 PDU 상태 정보 전송
 - 각 탑재장비 전원 ON/OFF 명령 처리
- DI / AO 신호 인터페이스
 - 외부 전원 ON/OFF 명령 처리
 - 배터리 전원 ON/OFF 명령 처리
 - 페어링 분리장치 ARM/SAFE 명령 처리
 - 킥모터 점화장치 ARM/SAFE 명령 처리
 - 페이로드 분리장치 ARM/SAFE 명령 처리

나로호 상단부 PDU는 RS-422 시리얼 통신 인터페이스를 통해 주기적으로 발사관제시스템에 전원 관련 상태 정보를 전송하며, 발사관제시스템으로부터 각 탑재장비들의 전원 ON/OFF 명령을 수신하여 처리한다. 또한 발사관제시스템으로부터 DI 인터페이스를 통한 펄스 신호를 수신하여 외부 전원 및 배터리 전원 ON/OFF 명령 처리와 페어링 분리장치, 킥모터 점화장치, 페이로드 분리장치 ARM/SAFE 명령 처리를 수행하고 그에 대한 응답을 AO 인터페이스를 통해 발사관제시스템에 보낸다.

시뮬레이터 테스트베드 상에서 개발된 실시간 모사 프로그램은 상기 나로호 상단부 PDU의 기능 및 인터페이스를 동일하게 모사하도록 구현되었다. QNX 실시간 운영체제 상에서의 실시간 응용프로그램의 개발은 기본적으로 C 언어를 사용

하였고, 사용자 인터페이스를 위해서 QNX에 내장되어 있는 GUI 개발을 위한 Photon 라이브러리 및 제공되는 Photon Application Builder 틀을 활용하였다. 시뮬레이터 테스트베드에서 사용된 입출력 인터페이스 보드 중에서 RS-422 시리얼 통신 보드는 제조사에서 QNX용 장치 드라이버를 제공하였기 때문에 쉽게 제어 코드를 작성할 수 있었으나, DIO 보드 및 AO 보드의 경우 제조사에서 QNX용 장치 드라이버를 제공하지 않았기 때문에 이를 이용한 제어 코드를 개발하기 위해서는 자체적인 소프트웨어의 개발이 필요하였다. 시뮬레이터 테스트베드의 하드웨어는 CPCI 버스 기반이기 때문에 QNX 상에서의 PCI 장치 접근 및 제어 관련 기술 자료와 DIO 보드 및 AO 보드의 관련 기술 자료를 참조하여 해당 입출력 제어를 위한 코드를 작성하였다 [2].

실시간 PDU 모사 프로그램은 크게 ①통신 처리 쓰레드(RS-422 시리얼 통신 관련 작업 처리 담당) ②신호 처리 쓰레드(DI 및 AO 신호 관련 작업 처리 담당)로 구성된다. 통신 처리 쓰레드는 1ms 주기로 33바이트 크기로 구성된 PDU 상태 정보 프레임을 RS-422 시리얼 통신 인터페이스를 통해 전송한다. 또한, PDU 상태 정보 프레임을 전송하고 난 이후 RS-422 통신 인터페이스를 통해 수신된 명령어 패킷이 없는지를 확인하고, 명령어 패킷이 수신된 경우 이를 분석하여 해당되는 탑재장비의 전원 ON/OFF 상태를 변경시키고 이후의 PDU 상태 정보 프레임에 이 정보를 반영시킨다.

신호 처리 쓰레드는 DI 신호의 변화를 감지하여 명령어 신호 펄스가 발생하였는지를 확인한다. 총 18개의 DI 신호 라인에 각각의 명령어가 할당되고, 해당 신호 라인에 500ms 이상의 펄스 신호가 감지되면 할당된 명령을 수신한 것으로 판단한다. 명령어 펄스 수신을 확인하면 해당 명령을 적절히 처리하고 이후의 PDU 상태 정보 프레임에 해당 정보를 반영시킨다.

그림 2는 개발 완료된 실시간 PDU 모사 프로그램의 실행 화면이다. 화면 왼쪽 부분(SSPC x)은 RS-422 시리얼 통신 인터페이스를 통해 제어되는 각 탑재장비의 전원 ON/OFF 상태를 보여

주며, 사용자가 원하는 각 탑재장비의 전원 출력 전류 값을 강제로 설정할 수 있는 기능을 제공한다. 화면 오른쪽에는 DI 인터페이스를 통해 제어 되는 페어링 분리장치, 키크모터 점화장치, 페이로드 분리장치 등의 ARM/SAFE 상태와 외부 전원 및 배터리 전원 ON/OFF 상태를 보여준다.

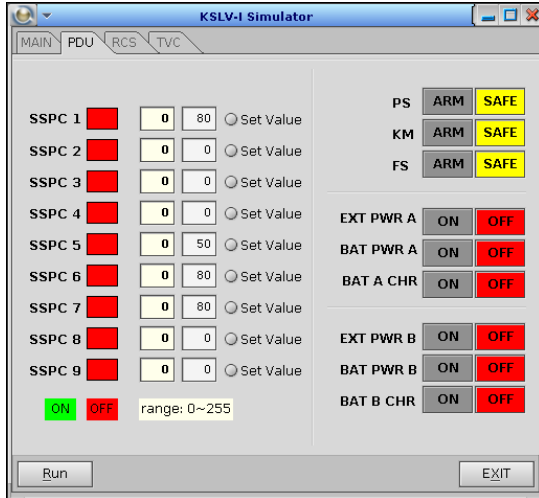


그림 2. 실시간 PDU 모사 프로그램 실행 화면

4. 시뮬레이터 테스트베드와 나로호 점검 장비 간 연동 시험

한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터 테스트베드의 나로호 상단부 PDU 모사 기능을 검증하기 위해 나로호 상단부 점검장비와 인터페이스하여 연동 시험을 수행하였다. 나로호 상단부 점검장비는 상단부 탑재장비들의 상태 및 기능을 점검하여 탑재장비의 건전성을 확인하기 위해 개발된 장비로 나로호 상단부 탑재장비 시뮬레이터와 유사하게 National Instruments사의 PXI 하드웨어와 Windows 운영체제 기반 LabView 소프트웨어를 사용하여 개발되었다 [3].

그림 3은 시험을 위해 시뮬레이터 테스트베드와 점검장비 간에 외부 인터페이스를 연결하여 구성한 시험환경을 도식화한 것이며, 그림 4는

실제 시험환경을 보여준다. DIO 및 AIO 신호 인터페이스는 터미널 블록들을 통해 연결되었고, RS-422 통신 인터페이스는 DB9 커넥터를 통해 직접 연결되었다.

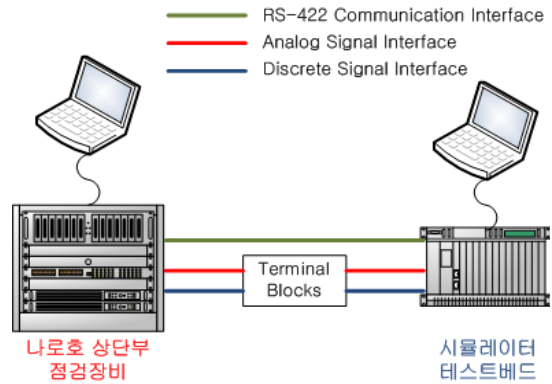
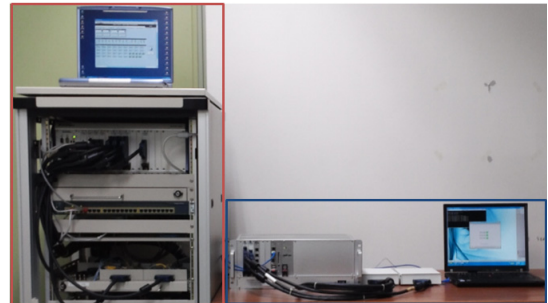


그림 3. 테스트베드 및 점검장비 연동 시험 환경 구성도



나로호 상단부 점검장비 시뮬레이터 테스트베드

그림 4. 테스트베드 및 점검장비 연동 시험 환경 사진

4.1 RS-422 통신 인터페이스 연동 시험

먼저 시뮬레이터 테스트베드가 주기적으로 PDU 상태 정보 프레임을 RS-422 시리얼 통신 인터페이스를 통해 정상적으로 전송하는지를 점검장비를 통해 확인하였다. 나로호 상단부 탑재장비 시뮬레이터의 경우 하드웨어 성능 제약과 범용 Windows 운영체제 및 LabView 소프트웨어 사용 등의 원인으로 인해 최대 40ms 주기로

PDU 상태 정보 프레임을 전송할 수 있었던 반면, 시뮬레이터 테스트베드는 최신 고성능 하드웨어를 사용하고 QNX 실시간 운영체제를 탑재함으로써 거의 오차 없이 1ms 주기로 PDU 상태 정보 프레임을 RS-422 통신 인터페이스를 통해 전송하는 것을 시험을 통해 확인할 수 있었다.

다음으로 점검장비에서 RS-422 시리얼 통신 인터페이스를 통해 각 탑재장비의 전원을 ON/OFF 하는 명령을 전송하는 시험을 수행하였다. 그림 5는 점검장비에서 일부 탑재장비의 전원을 ON시키도록 명령한 이후의 결과 화면을 보여준다. 화면의 중간 부분(RS-422 command)의 9개 탑재 장비 중에 임의로 6개 장비의 전원을 ON(녹색) 시킨 이후, 화면 하단 부분(RS-422 monitor)에서 시뮬레이터 테스트베드로부터 수신한 PDU 상태 정보 프레임에서 해당 장비의 전류 값이 증가하였고 해당 SSPCx 값이 ON 상태로 변환 것을 확인할 수 있었다. 그림 6은 점검장비에서 명령을 보낸 이후의 시뮬레이터 테스트베드 화면을 보여준다. 화면 왼쪽 부분에 명령을 받은 6개 탑재장비의 전원이 정상적으로 켜졌음을 확인할 수 있었다.

이러한 시험 결과를 통해 구축된 시뮬레이터 테스트베드가 나로호 상단부 PDU의 RS-422 시리얼 통신 인터페이스를 실시간으로 정확히 모사함을 확인할 수 있었다.

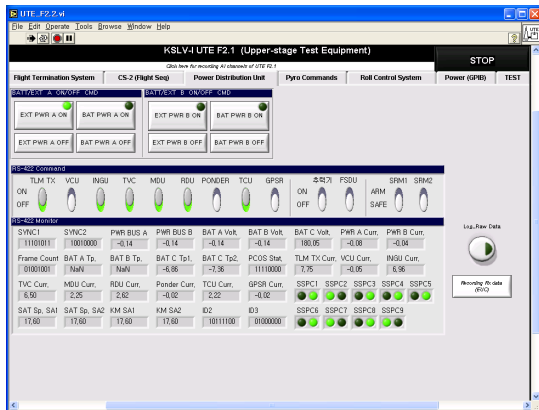


그림 5. RS-422 시리얼 통신 연동 시험 (점검장비 화면)

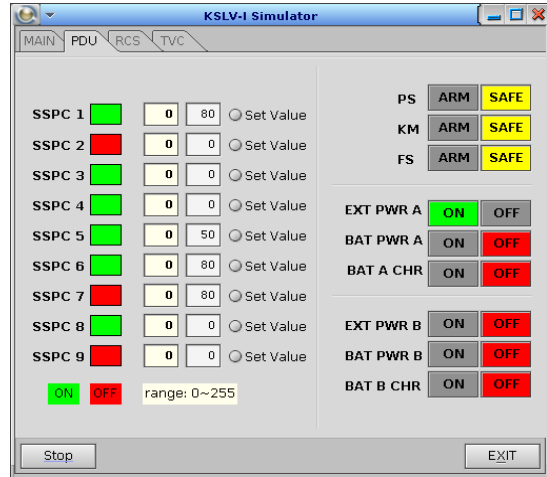


그림 6. RS-422 시리얼 통신 연동 시험 (테스트베드 화면)

4.2 DIO/AIO 신호 인터페이스 연동 시험

나로호 상단부 PDU는 DI 신호 인터페이스를 통해 페이로드 분리장치(PS), 키크모터 점화장치(KM), 페어링 분리장치(FS) 관련 ARM/SAFE 명령을 수신하면 해당 장치의 상태를 변화시키고 그 결과를 AO 신호 인터페이스를 통해 내보낸다. 시험에서는 점검장비를 통해 키크모터 분리장치 및 페이로드 분리장치로 ARM 명령을 전송시킨 이후 시뮬레이터 테스트베드에서 해당 명령을 DI 인터페이스를 통해 수신하여 AO 인터페이스로 명령 수행 결과 값을 정상적으로 출력하는지를 확인하였다.

그림 7은 점검장비에서 키크모터 점화장치 ARM 명령과 페이로드 분리장치 ARM 명령을 전송한 이후의 상태 화면을 보여준다. ARM 명령을 수신한 시뮬레이터 테스트베드는 해당하는 장치의 AO 값을 정해진 전류 값으로 출력하였으며, 변환된 전류 값을 수신한 점검장비는 PDU를 통해 해당 장비의 ARM 명령이 정상적으로 수행된 것을 확인하고 이를 화면에 나타내었다. 점검장비는 명령 결과 관련 입력 전류 값을 저항을 거쳐서 전압 값으로 측정하며, 그림 7의 화면에서 ARM 명령 이후에 해당 AI 인터페이스에서 측정

된 전압 값이 미리 계산된 값(6.7V)으로 측정됨으로써 ARM 명령이 정상적으로 실행된 것을 확인할 수 있었다. 그림 8은 시뮬레이터 테스트베드에서 키크모터 점화장치 ARM 명령 및 페이로드 분리장치 ARM 명령을 정상적으로 수신한 것들 화면(우측상단)에 보여준다.

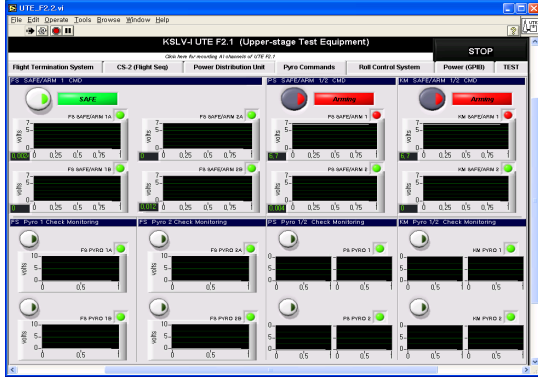


그림 7. DIO/AIO 신호 연동 시험 (점검장비 화면)

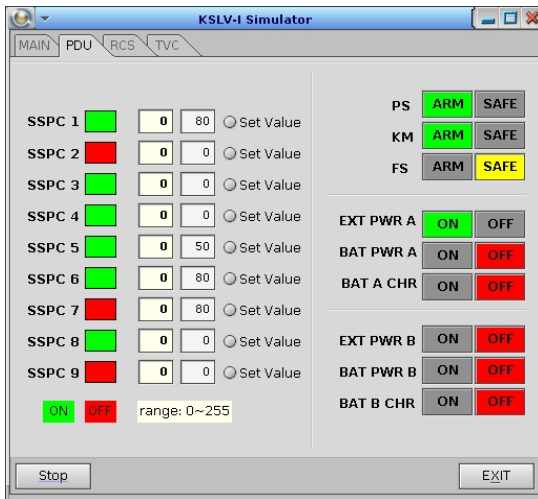


그림 8. DIO/AIO 신호 연동 시험 (테스트베드 화면)

시험에서 구축된 시뮬레이터 테스트베드가 나로호 상단부 PDU의 DI 신호 인터페이스를 통한 명령 수신과 AO 신호 인터페이스를 통한 명령 처리 결과 전류 값 출력을 정확히 모사함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터의 효율적인 개발을 위해서 설계 및 구축한 테스트베드에 관하여 기술하였다. 시뮬레이터 테스트베드는 범용성 및 확장성이 높은 CPCI 버스 기반 하드웨어와 실시간 기능모사 요구조건을 만족시키기 위한 QNX 실시간 운영체제를 활용하였고, 나로호 상단부 PDU의 기능을 모사하는 실시간 응용프로그램을 개발하여 구축 완료하였다. 구축된 시뮬레이터 테스트베드의 기능 검증을 위해 나로호 상단부 점검장비와의 연동 시험을 수행함으로써 PDU의 RS-422 시리얼 통신 인터페이스와 DI 및 AO 신호 인터페이스 기능 모사가 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다.

현재 설계가 진행 중인 한국형발사체의 탑재장비는 나로호의 탑재장비와 비교해서 지상장비와의 인터페이스가 더욱 다양해질 수 있으며, 향후 개발될 한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터의 기능 또한 탑재장비의 입출력 인터페이스를 단순 모사하는 나로호 상단부 탑재장비 시뮬레이터에 비해 확장될 가능성이 있다. 구축된 테스트베드는 향후 실제 한국형발사체 탑재장비 시뮬레이터의 설계 및 개발 단계에서 비교 모델로서 참조되고 개발 실현가능성 검증을 위한 테스트 플랫폼으로 활용될 것이다.

참 고 문 헌

1. 서진호, 윤원주, 김광수, 이수진, 정의승, “나로호 상단 발사관제시스템 개발 및 발사운용 결과”, 항공우주기술, 제11권, 제1호, 2011, pp. 135-144
2. 윤원주, “QNX 상에서 PCI 장치 제어를 위한 소프트웨어 개발”, 한국항공우주연구원 TM, KARI-SYT-TM-2012-033, 2012
3. 김광수, 이수진, 정의승, 박정주, “KSLV-I 상단부 시험장비(UTE) 설계 및 개발”, 항공우주기술, 제6권, 제2호, 2007, pp. 171-179