

한국형발사체 시스템통합시험용 실시간 시험 데이터 저장 시스템(DSS) 설계 및 개발

Design and Development of Real-Time Tests Data Storage System(DSS) for
System Integration Laboratory of KSLV-II Launch Vehicle

최경준*, 박용규, 선병찬
한국항공우주연구원

초 록

본 논문은 한국형발사체 시스템통합시험용 실시간 시험 데이터 저장 시스템(DSS)의 설계 및 개발에 대해 다루고 있다. 시스템통합시험에서는 한국형발사체의 항법유도제어 탑재장비의 비행성능과 안정성을 종합적으로 평가할 수 있도록 다양한 비행환경을 구현하여 실시간 시험을 수행한다. 시험 결과의 정확한 판단을 위해 항법유도제어 탑재장비의 동작을 개발자들이 실시간으로 모니터링하기 위한 주요 시험 파라미터를 전송하는 시스템과, 시험 종료 후 정밀한 분석을 위해 생성되는 모든 데이터를 저장하는 시스템이 요구된다. 이에, 시험 데이터를 저장/분배하기 위한 DSS를 설계 및 개발하여 실시간 시험에 적용하였다.

ABSTRACT

This paper deals with design and development of the real-time tests Data Storage System(DSS) for System Integration Laboratory of KSLV-II launch vehicle. The flight performance and stability of KSLV-II onboard GNC(Guidance, Navigation, and Control) avionics is verified by implementing various flight environmental conditions during System Integration Laboratory(SIL) tests. A system is requested to transmit the major test parameters for monitoring how the onboard GNC avionics is being controlled in real-time, and to store the whole test data for precisely analyzing after SIL tests for making better decision. Thus, DSS which is designed and developed were applied to SIL for storage and distribution of SIL test data.

Key Words : System Integration Laboratory(시스템통합시험), Launch Vehicle(발사체), Real-Time(실시간), SILSC(시스템통합시험 시뮬레이션코어), DSS(데이터 저장 시스템)

1. 서 론

한국형발사체(KSLV-II)가 목표하는 고도 700 km 태양동기궤도(SSO)에 실용위성을 정확하게 투입하려면 관성항법유도장치(INGU)/추력벡터제어유닛(TVCU)/롤 제어 유닛(RCU)/추력기 자세제어 유닛(TCU)/시퀀스 제어유닛(SCU)을 비롯한 다양한 전자 탑재장비들이 유도(Guidance), 항법(Navigation), 그리고 제어(Control) 알고리즘에 따라 유기적으로 동작해야 한다. 이러한 항법유도제어 시스템의 기능과 성능을 종합적으로 검증하기 위해서 TLYF (Test Like You Fly)⁽¹⁾ 시험 철학을 반영한 한국형발사체 시스템통합시험(SIL)용 시스템을 구축하고 있다.

시스템통합시험 설비는 시험 시 각 전자 탑재장비 개발자들이 장비의 동작 상태를 비롯하여 장비 간에 인터페이싱되는 각종 신호들을 실시간으로 모니터링 하는 기능과 시험 종료 후 정밀한 분석을 위해 시험 시 생성되는 모든 데이터를 저장하는 기능이 요구된다. 이러한 기능은 많은 리소스를 소모하므로 엄격한 실시간성을 요구하는 시스템통합시험용 시뮬레이션코어(SILSC)에⁽²⁾ 직접 구현하는 것은 바람직하지 않다. 이에, 시스템통합시험 주요 시험 파라미터를 전송하고 시험 데이터를 저장하는 시스템통합시험용 실시간 시험 데이터 저장 시스템(DSS)을 설계하고 개발하였으며 그 적용 결과를 본 논문에서 제시하고자 한다.

2. DSS 설계 및 개발

2.1 시스템통합시험(SIL) 장비 개요

액체과학로켓(KSR-III), 소형위성발사체(KSLV-I) 개발 시 축적된 경험과 다양한 해외 개발사례를 참고하여 Fig 1.과 같은 한국형 발사체에 적합한 시스템통합시험(SIL)용 시험 설비의 하드웨어 구조를 설계하여 제작하였다.⁽³⁾

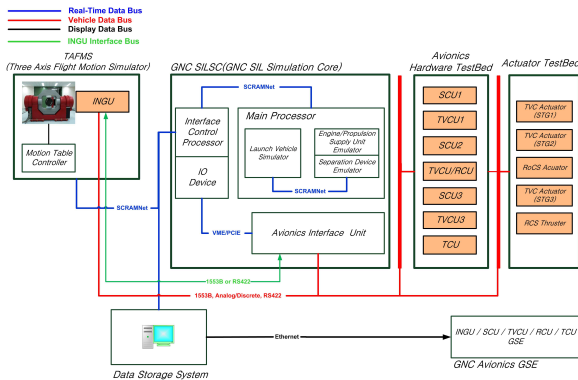


Fig 1. KSLV-II SIL hardware architecture

SIL 시험장비 하드웨어는 크게 시스템통합시험용 시뮬레이션 코어(SILSC), 데이터 저장 시스템(DSS), 3축 비행 모션 시뮬레이터(TAFMS : Three-Axis Flight Motion Simulator), 탑재 전자유닛 테스트베드(AHTB), 그리고 구동기 테스트 스탠드(ATS)로 구성된다. 그 중에서 DSS는 시스템 통합 시험 시 각 항법유도제어 전자 탑재장비별 개발자가 전자 탑재장비의 동작 상태를 비롯하여 인터페이싱되는 각종 신호들을 실시간으로 모니터링하기 위한 주요 시험 파라미터 전송 기능



Fig 2. SIL Simulation Core(SILSC) & DSS

및 시험 종료 후 정밀한 분석을 위해 시험 시 생성되는 모든 데이터를 저장하는 기능을 담당한다.

2.2 DSS 설계

2.2.1 DSS 핵심 기능 요구조건

SILSC는 비행환경을 실제와 가깝게 모사해야 하므로 엄격한 실시간성(hard real-time)과 정확성이 매우 중요하다. 이러한 요구조건을 만족하기 위해서 SILSC는 실시간 OS(Operating System)를 적용하여 GPS 시각에 동기화된 1 kHz 주기의 인터럽트(Interrupt)를 기반으로 시뮬레이션을 수행하도록 설계하였다. 따라서 DSS는 SILSC의 엄격한 실시간성에 영향을 주지 않으면서 1 kHz 주기로 생성되는 시험 데이터를 저장하고 주요 시험 파라미터를 각 전자 탑재장비 GSE로 전송하여야 한다. 이와 같은 DSS의 요구조건을 고려하여 핵심 기능 요구조건을 다음과 같이 설정하였고 시스템 설계 및 개발에 반영하였다.

- R1 : 엄격한 실시간(hard real-time) 저장
 - 1 kHz 주기의 시험데이터 저장
 - 시험데이터는 일관성(Consistency)을 유지해야 함
- R2 : 대용량 데이터 저장
 - 4000개 변수 데이터를 누락 없이 저장해야 함
 - 데이터는 최소 1200sec 이상 저장할 수 있어야 함
- R3 : 유연한 데이터 전송
 - 주요 시험 파라미터의 전송 주기와 데이터 형식은 가변적임
 - 주요 시험 파라미터는 시험별로 선택 가능해야 함

2.2.2 DSS 데이터 통신 설계

핵심기능 요구조건 R1과 R2를 위한 SILSC와 DSS간의 통신매체를 실시간 초고속 데이터 인터페이스[Reflective Memory network interface]인 SCRAMNet 인터페이스로 설계하였다. SCRAMNet 인터페이스는 연결되는 장비 간에 인터럽트 전송을 지원하므로, SILSC가 시뮬레이션 모델 실행이 완료되는 매 주기마다 DSS로 인터럽트를 전송하여 시험데이터의 일관성을 유지할 수 있도록 하였다.

3단형 발사체인 한국형발사체의 시스템통합시험은 약 2000개의 변수가 사용될 것으로 예상되므로 시스템의 성능 확인을 위하여 시험 변수 개수를 그 두 배인 4000개로 정하였다. SCRAMNet 인터페이스는 210 MB/sec의 통신 대역폭(bandwidth)을 제공하여

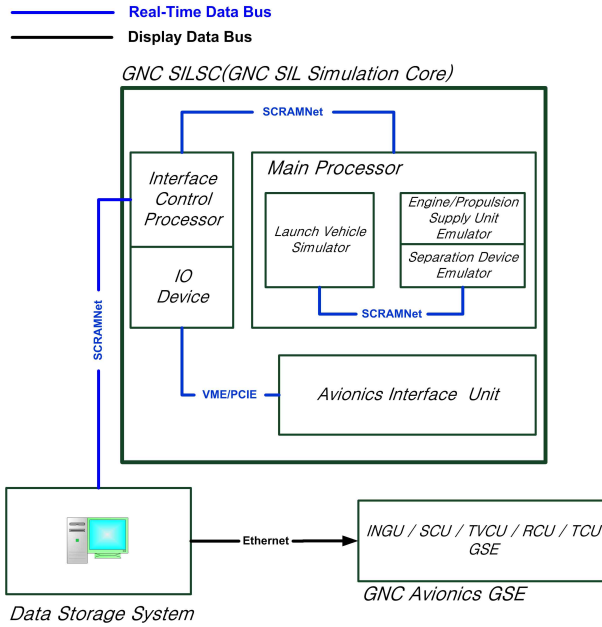


Fig 3. Interfaces among SILSC, DSS and GSE

double형 4000개 변수 기준으로 약 30.5 MB/sec의 대역폭이 필요한 DSS에 적절하다고 판단된다. 한편, 핵심 기능 요구조건 R3은 실시간성을 요구하지는 않으므로 DSS와 GNC Avionics GSE(Ground Support Equipment)간의 통신매체를 이더넷(Ethernet) 인터페이스로 설계하였다.

2.2.3 DSS 데이터 처리 개발

핵심기능 요구조건 R2와 R3을 위한 DSS 설계를 Fig 4.와 같이 수행 하였다. DSS는 SILSC로부터 인터럽트를 수신하면 SCRAMNet을 통해 공유된 데이터의 유실 방지와 일관성을 유지하기 위하여 로컬 메모리(Local Memory)에 데이터를 즉시 복사한 뒤 CPU 유휴 시간에 데이터를 관리가 용이한 데이터베이스에 저장하고 주요 시험 파라미터를 각 전자 탑재장비 GSE로 전송하여야 한다. 이를 위하여 “Data Receiving”, “Database Saving”, 그리고 “Data Sending”의 3개의 쓰레드(Thread)와 쓰레드간의 데이터 공유를 위한 2개의 서클러 큐(Circular Queue)로 구성하여 설계하였다. 작업의 우선순위는 “로컬 메모리로 데이터 복사”, “데이터베이스에 데이터 저장”, 그리고 “주요 시험 파라미터 전송” 순서이며, 각각의 쓰레드는 작업의 우선순위에 따라 CPU 점유 우선순위를 정하였다.

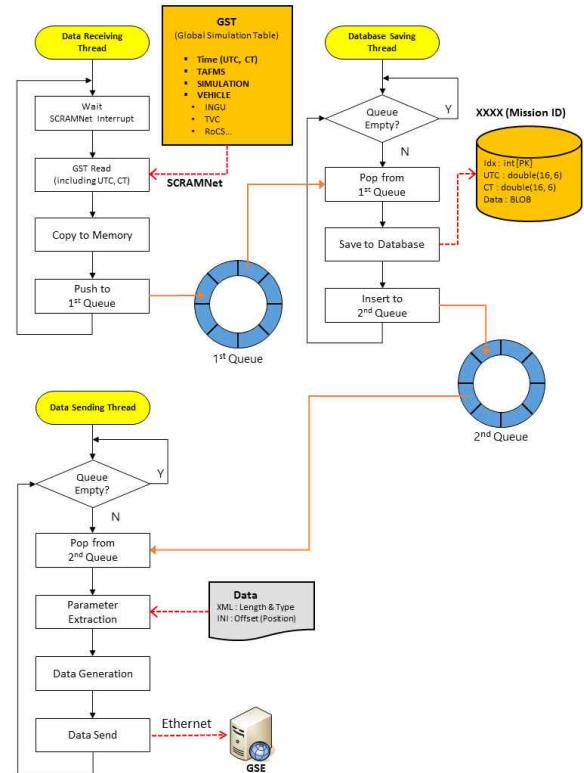


Fig 4. The design of DSS

설계한 DSS의 각 쓰레드 별 동작을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 SCRAMNet을 통하여 SILSC가 송신한 인터럽트를 DSS의 “Data Receiving” 쓰레드가 수신하면 시험 데이터가 저장되어 있는 구조체(Structure)의 크기만큼 SCRAMNet에서 데이터를 복사하여 로컬 메모리에 저장한다. 이때, 구조체에는 Time-stamping 정보로 이용 가능한 UTC(Universal Time Coordinated)와 CT(Countdown Time : UTC-H0)가 포함되어 있다. UTC와 CT는 GSE에서 그래프(Graph) 형태로 데이터를 모니터링 할 경우 X축의 좌표 값으로 이용되며 데이터 분석 시 기준 시간이 된다. 메모리에 저장된 데이터는 “Data Saving” 쓰레드와의 공유 메모리(Shared Memory)인 첫 번째 서클러 큐에 저장(Push)된다. “Data Receiving” 쓰레드는 쓰레드의 가장 높은 우선순위(Priority)인 “THREAD_PRIORITY_TIME_CRITICAL”로 설정하였다.

“Database Saving” 쓰레드는 첫 번째 큐에 저장된 데이터가 있는지 확인하여 큐에 데이터가 존재하는 경우 데이터를 큐로부터 로드(Pop)하고

데이터가 존재하지 않는 경우 데이터 존재여부 확인을 계속 수행한다. 로드한 데이터는 먼저 데이터베이스(MySQL)에 BLOB(Binary Large Object) 형태로 저장하고 “Packet Sending” 쓰레드와 데이터를 공유하기 위한 2번째 큐에 데이터를 저장한다.

“Packet Sending” 쓰레드는 두 번째 큐에 저장된 데이터가 있는지 확인하여 큐에 데이터가 존재하는 경우 큐로부터 데이터를 로드하고 데이터가 존재하지 않는 경우 확인 작업을 계속 수행한다. 로드한 데이터는 구조체 설정파일과 데이터 설정 파일을 참조하여 주요 파라미터를 추출하게 된다. 추출된 파라미터는 다음절에 기술된 프로토콜에 맞추어 이더넷 멀티캐스트로 전송된다.

2.2.4 DSS 통신 프로토콜(Protocol) 설계

SILSC에서 연산된 데이터들을 GNC Avionics GSE로 전송하기 위해서는 통신 프로토콜이 필요하다. SIL에서는 프로세서 모의시험(PILS), 실시간 모의시험(HILS), 그리고 시스템 통합시험(SIL) 기반의 다양한 시험 시나리오를 계획하고 있으므로, 각 단계별 및 각 시나리오 별로 GSE로 송신해야 할 주요 파라미터의 종류와 개수가 달라 질 것으로 예상된다. SIL 프로토콜은 전달해야 할 주요 파라미터의 종류와 개수가 변경되는 상황에서도 프로토콜의 변경 없이 유연하게 대처할 수 있도록 구조를 Fig 5.와 같이 설계하였다.

SIL Header	UTC	CT	Param 1	...	Param n
22 Bytes	8 Bytes	8 Bytes	3~10 Bytes		3~10 Bytes

Fig 5. SIL data protocol

- SIL Header : 프로토콜의 버전정보, 오류검출, 및 데이터 정보 등이 기록된 영역임.
- UTC : 주요 파라미터들이 SILSC 에서 연산된 절대적인 시간. 이 값은 1970년 1월 1일부터 초로 계산한 IEEE 규약을 따름.
- CT : 시뮬레이션의 카운트다운 시간. 이 값은 UTC-H0과 같으며 H0 값은 시뮬레이션 시작 전에 정의됨.
- Param : 주요 파라미터들이 저장되어 있는 영역임. 2 bytes의 ID와 1~8 bytes의 가변적 크기의 데이터 영역으로 구성됨.

```
<?xml version="1.0" ?>
<SIL_Data>
  <DEFAULT>
    <General Group="NGU" DESC="NGU_accd_xb" ID="0" Value="0" Type="1" Format="1" Length="1" />
  </DEFAULT>
  <ELEMENT>
    <General Group="NGU" DESC="NGU_status" ID="1" Format="0" Length="2" />
  </ELEMENT>
  <ELEMENT>
    <General Group="NGU" DESC="NGU_t_time" ID="2" Format="2" Length="4" />
  </ELEMENT>
  <ELEMENT>
    <General Group="NGU" DESC="NGU_Nav_time" ID="3" Format="2" Length="4" />
  </ELEMENT>
  ... 중략
  <ELEMENT>
    <General Group="NGU" DESC="NGU_accd_xb" ID="11" Format="2" Length="4" />
  </ELEMENT>
  <ELEMENT>
    <General Group="NGU" DESC="NGU_accd_yb" ID="12" Format="2" Length="4" />
  </ELEMENT>
  <ELEMENT>
    <General Group="NGU" DESC="NGU_accd_zb" ID="13" Format="2" Length="4" />
  </ELEMENT>
  <ELEMENT>
    <General Group="NGU" DESC="NGU_DO16_01_n0" ID="14" Type="0" Format="0" Length="2" />
  </ELEMENT>
</SIL_Data>
```

Fig 6. Data Definition File

주요 파라미터를 ID 별로 GSE에 전송할 경우 전송 효율이 떨어지게 되므로 시뮬레이션 연산 시간 프레임(1 ms)마다 주요 파라미터를 한꺼번에 전송한다. 한 개의 파라미터의 크기는 3~10 bytes이며 2 bytes의 ID와 1~8 bytes의 가변적 크기의 데이터 영역으로 구성되어 있다. 데이터 영역에서 지원하는 데이터 형식은 unsigned char (1 byte), char (1 byte), short(2 bytes), unsigned short(2 bytes), unsigned int(4 bytes), int(4 bytes), float(4 bytes), double(8 bytes)이다. 이러한 구조의 데이터를 송/수신하기 위해서는 각각의 ID별로 데이터 형식을 정의한 파일이 필요하므로 Fig 6.과 같이 XML(eXtensible Markup Language) 형식으로 설정파일을 설계하였다.

3. DSS 검증

개발된 DSS가 핵심 기능 요구조건을 만족하는지 검증하기 위하여 SILSC에서 시뮬레이션 모델을 구동하여 시험을 수행하였다.

3.1 시험데이터 저장 성능 검증

DSS의 저장 성능을 검증하기 위하여 총 4000 개의 변수를 byte형[type]부터 double형까지 혼합된 데이터 형으로 정의하여 1 kHz 주기로 시뮬레이션 코어(SILSC)에서 연산을 수행하였고, 연산이 종료되면 DSS로 인터럽트를 발생하여 지정된 변수들이 데이터베이스에 저장되도록 하였다.

저장 성능 검증 시험은 1200초(20분) 동안 진행되었고, 시험 진행시간 동안 SILSC의 연산 결과를 실시간으로 DSS에서 수신하여 데이터베

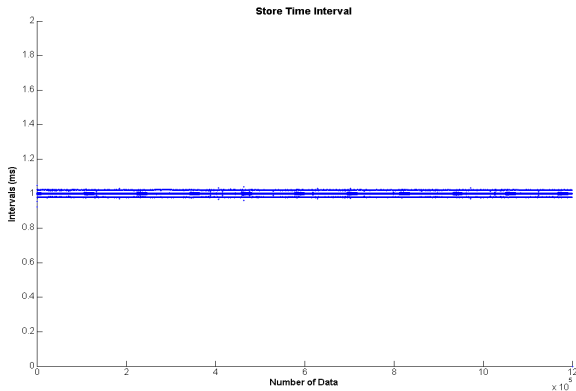


Fig 7. Data store time interval in DSS

이므로 저장하였다. DSS 저장 무결성 및 실시간 성능 검증을 위하여 시뮬레이션 코어에 장착된 타이밍 보드에서 UTC를 읽어 DSS에 저장한 다음, DSS에 저장된 UTC 값의 차이를 계산하여 실시간 검증을 수행 하였다. 따라서 실시간 검증을 위한 측정 환경에서는 SILSC가 타이밍 보드로부터 UTC 값을 읽어오는 연산 처리시간의 변동성으로 인하여 오차가 존재하게 된다. DSS에 저장된 현재/이전 시각정보(UTC)를 차분하여 얻은 결과는 Fig 7.과 같으며 최대 1.026 ms, 최소 0.975 ms, 분산 0.0000021 ms², 표준편차 0.00145 ms, RMS (Root Mean Square) 1.000001 ms이었다. 수차례 시험을 수행한 바 4000개 변수 데이터 모두 1200sec 동안 데이터 누락 현상이 발생하지 않았고 저장된 데이터를 분석한 결과 시험데이터의 일관성도 유지하고 있었다. 따라서 DSS가 핵심 요구 조건 R1, R2를 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 시험데이터 전송 기능 검증

DSS의 전송 기능 검증을 위하여 발사체 6자유도 시뮬레이션 프로그램을 SILSC에서 구동하여 시험을 수행하였다. 이 시험은 3.1절 시험을 포함하는 것으로 DSS가 최종적으로 시스템통합 시험(SIL) 및 실시간 모의시험(HILS) 적용에 적합한지 그 여부를 판별할 수 있다.

전송기능 검증시험에서는 시뮬레이션 모델의 입출력 변수 257개를 주요 파라미터로 선정하여 주요 파라미터를 이더넷 멀티캐스트(Multicast)로 전송하였다. 이때 전송된 주요 파라미터는 종류에 따라 전송하는 주기를 다르게 하였고 그 결과를 별도 제작된 전자 탑재장비 GSE를 모사하는 PC

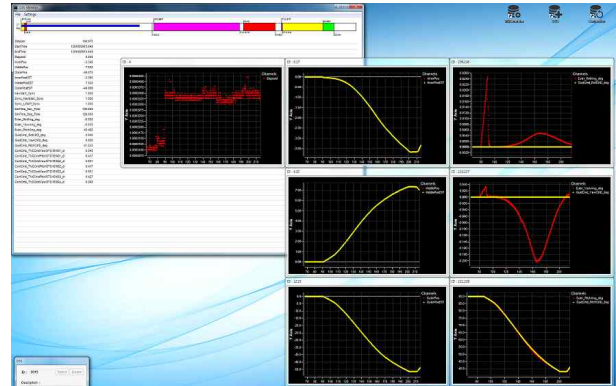


Fig 8. Major parameter monitoring

에서확인 하였다. DSS의 시험데이터 전송 기능 시험 화면은 Fig 8.과 같다.

전송기능 검증시험결과 DSS가 주요 파라미터의 전송주기와 형식을 가변적으로 할 수 있었고, 모사한 전자 탑재장비 GSE에서 주요 파라미터를 선택적으로 모니터링 할 수 있었다. 따라서 DSS가 핵심 요구 조건 R3를 만족하고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 한국형발사체 시스템통합시험용 설비의 주요 시스템 중 하나인 데이터 저장 시스템(DSS)의 설계/개발과 검증에 대해 다루었다. 개발된 DSS에 대한 검증시험을 통해 실시간 저장, 대용량 데이터 저장, 그리고 유연한 데이터 전송 기능이 만족하는 것을 보였다. 개발된 DSS를 한국형발사체 시스템 통합시험 시 주요 파라미터 모니터링과 사후 분석을 위한 데이터 저장 용도로 활용할 예정이다.

참고문헌

- (1) Victor D. Mora 3 , "Crew Exploration Vehicle(CEV) Avionics Integration Laboratory(CAIL) Independent Analysis", Feb., 2009, NASA TM-2009-215569
- (2) 최경준, 박용규, 오충석, 선병찬, 노웅래, "한국형발사체 시스템통합시험용 시뮬레이션코어(SILSC) 개발 및 검증", 한국항공우주학회 추계학술 발표회, 2014. 11, pp.1307~1310
- (3) 박용규, 오충석, 선병찬, 노웅래, "발사체 시스템 통합시험(SIL) 설비 구축 개념설계", 제 12회 우주발사체기술 심포지움, 2013. 2. 28.