

고공환경모사 시험설비 구축을 위한 개념설계

김상현* · 김용욱** · 이정호** · 유병일** · 조상연** · 오승협**

Concept Design of High Altitude Simulation Test Facility

Sang-Heon-Kim, Yong-Wook Kim, Jung-Ho Lee, Byung-Il Yu,
Sang-Yeon Cho, Seung-Hyub Oh

ABSTRACT

The propulsion system of KSLV-I second stage is engine with high expansion ratio and its starting altitude is high. To verify the performance of engine before the launch in the ground, high altitude test facility to simulate its operating condition is necessary.

This material is about the concept design of high altitude simulation test facility for second stage engine. And it will be the basis for the construction of test facility and the test of engine.

초 록

소형위성발사체(KSLV-I)의 2단에 적용되어질 엔진의 작동환경은 진공과 유사하다. 고고도에서 사용되는 로켓은 성능을 최대한 향상시키기 위해서 노즐의 팽창비가 상대적으로 크게 설계된다. 하지만 지상에서 연소시험을 수행할 경우 배압이 상대적으로 크기 때문에 노즐에서 박리(separation)가 발생하여, 실제 추력 값보다 작은 추력을 발생시키며 노즐에 극심한 진동을 유발하게 된다. 그러므로 정확한 추력을 예측할 수가 없으므로 고공 환경을 모사할 수 있는 시험설비를 이용하여 연소시험을 수행하는 것이 반드시 필요하다.

Key Words: Diffuser(디퓨저), TMS(추력측정시스템), Back Pressure(배압), Separation(박리)

1. 서 론

소형위성발사체(KSLV-I)의 2단에 적용되어질 2단용 엔진은(이하 엔진) 작동고도가 높으므로 배압(back pressure)이 진공의 환경과 유사하다. 고고도에서 사용되는 엔진은 성능을 최대한 향

상시키기 위해서 노즐의 팽창비가 상대적으로 크게 설계된다. 하지만 이러한 엔진을 지상에서 연소시험을 수행할 경우 배압이 상대적으로 크기 때문에 노즐에서 박리(separation)가 발생하여, 엔진의 실제 추력 값보다 작은 추력을 발생시키며 노즐에 극심한 진동을 유발하게 된다. 그러므로 정확한 추력을 예측할 수가 없으므로 고공 환경을 모사할 수 있는 시험설비를 이용하여 연소시험을 수행하는 것이 반드시 필요하다(1). 문헌에 따르면 고도에 따라 총 추력의 10~30%

* 한국항공우주연구원 추진기관체계그룹
연락처, E-mail: sangheon@kari.re.kr

** 한국항공우주연구원 추진기관체계그룹

정도 증가하게 된다(2). 따라서 엔진의 최종성능을 검증하기 위한 고공환경을 모사할 수 있는 시험설비를 구축하고자 한다.

본 논문에서는 시험설비 구축을 위한 요구조건을 도출하여 향후 고공환경모사시험설비 구축과 시험 수행 시 활용하고자 한다.

2. 고공환경모사시험설비

2.1 개요

국내에서 자체 개발하고 있는 KSLV-I의 2단용 엔진을 개발함에 있어 전체시스템에 대한 설계 타당성 검토와 작동시퀀스 및 조건에 따른 정상 작동 검사/시험을 위해서 시험설비가 필요하며 또한 고공 환경조건에서 전체 시스템의 성능이 제대로 발휘되는지를 본 시험설비를 통해서 구현하고자 한다.

이와 같은 목적을 위해 2단용 엔진의 고공환경 모사 시험설비 개발을 통해서 다음과 같은 효과를 얻고자한다.

- 1) 고공환경모사 시험설비의 시스템설계기술 개발 및 검증을 통한 설계기술 확보
- 2) 2단용 엔진 시험 및 검사기술 개발과 체계적 업무 수행을 통한 시험/검사 기술 확보
- 3) 시험설비 개발을 통한 시험관련 Know-How 축적 및 활용
- 4) 고공환경 모사 시험설비의 핵심 구성품인 디퓨저 설계기술 개발
- 5) 고압분사노즐과 더블 재킷을 이용한 혼합형 냉각시스템 설계기술 확보
- 6) 고공 환경에서의 추력성능 예측 기법과 고고도 시험설비의 운용기술의 확보

2.2 일반적인요구조건

- 1) 시험 설비는 고고도 비행용 엔진을 시험할 수 있는 용량 및 규격을 갖추고 발사 시나리오에 따라 시험을 수행할 수 있어야 한다.
- 2) 모든 설비는 시험 중 발생할 수 있는 폭발, 화재 등의 사고 발생시에 신속하고 안전한

대처가 가능하도록 적절한 안전설비를 갖추어야 한다.

- 3) 모든 설비는 설계변경, 장비의 추가, 대체 및 호환성 등을 충분히 고려하여 설계/제작/설치되어야 한다.
- 4) 모든 설계, 제작, 설치는 적정한 사양 및 기준(KS, MIL 규격 등)에 근거하여야 하며 그 근거를 문서로 밝혀 두어야 한다.
- 5) 모든 장비, 부품, S/W에 대한 사용 및 수리 매뉴얼은 사용자가 이해하기 쉽게 작성하여야 한다.
- 6) 주요 부품에 대하여 고장 및 비상시에 대비하여 동일 사양에 있어 최소 1개 이상의 spare part를 갖추어야 한다.
- 7) 설비용 센서의 정확도는 $\pm 0.5\%$ (F.S.) 이내이어야 하며 sensing의 sampling rate는 0.1kHz 미만으로 한다.
- 8) 설비용 게이지류는 정확도 $\pm 1.0\%$ (F.S.) 이내이어야 하며 oilless type을 사용해야 한다.
- 9) 설비에 사용되는 모든 부품이 현장에 입고되면 상태 및 성능을 담당자 입회하에 검사한다.
- 10) 모든 유공압 부품 및 배관은 설계 압력에 맞게 강도/기밀시험을 거쳐야 하며, 강도/기밀 시험 절차 및 구간을 서면으로 제출하여 담당자의 승인을 얻어야 한다.
- 11) 형상관리를 위해 각 부품 및 시스템에 대한 CAD 관리체계를 마련해야하며 2차원 및 3차원(Pro-E) 도면을 작성해야 한다.
- 12) 대기오염, 수질오염, 소음, 진동, 악취 등으로 환경피해 발생 및 인근주민이나 통행인에게 불편이 없도록 대기환경보전법, 수질환경보전법, 소음·진동규제법, 폐기물관리법, 오수·분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률 등 관계법령 및 설계서에 의거 발생 오염물질 종류와 예상량, 처리방법, 처리 시행자 등이 포함된 환경오염 방지 계획을 수립하고 이를 준수해야 한다.
- 13) 인허가에 따른 제반 수속 및 제출 서류는 관련 법규 및 해당관청의 요구사항, 구매자의 지시에 따라 행하여야 한다.
- 14) 주요 시스템에 대해 판매자 해당 장비 또는

시설의 검증시험(Acceptance Test)을 수행해야 한다. 검증시험은 사전에 완성된 검증시험 절차서 및 합불 판정 기준에 의하여 실시되어야 하며 이 경우 구매자가 지정한 검사원이 입회하는 것을 원칙으로 하며 검사원의 서면 승인을 득하여야 한다.

- 15) 모든 설계, 제작, 설치, 완제품은 반드시 적정 Spec. 및 표준 (ASME, ISO, JIS, MIL-spec, KS 규격 등)에 근거하여야 하며 그 근거를 밝혀 두어야 한다.
- 16) 모든 필요한 소프트웨어는 사용자가 알기 쉬운 매뉴얼이 첨부되어야 하며 국문 또는 영문으로 작성되어야 한다.
- 17) Figure 1은 인도의 우주발사체 PSLV의 3단의 고공환경 모사시험설비의 개념도이다(1).

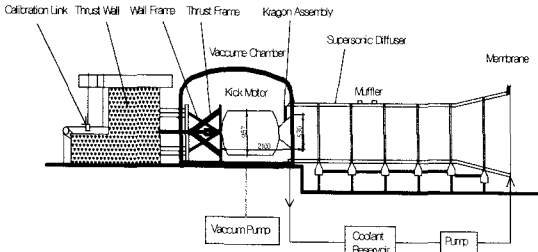


Fig. 1 Concept Design for HASTF of PSLV

- 18) 시험설비의 구성과 Lay-out은 Fig. 2와 Fig. 3 과 같다.

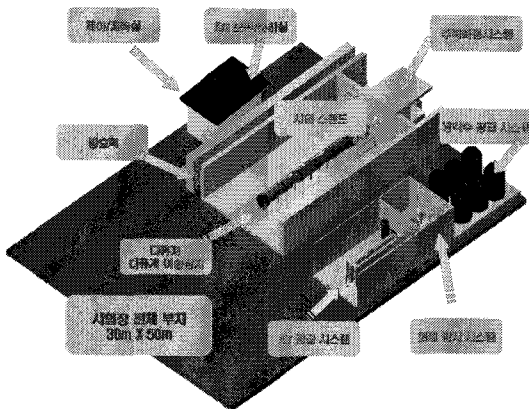


Fig. 2 Lay-out of HASTF for KSLV-I

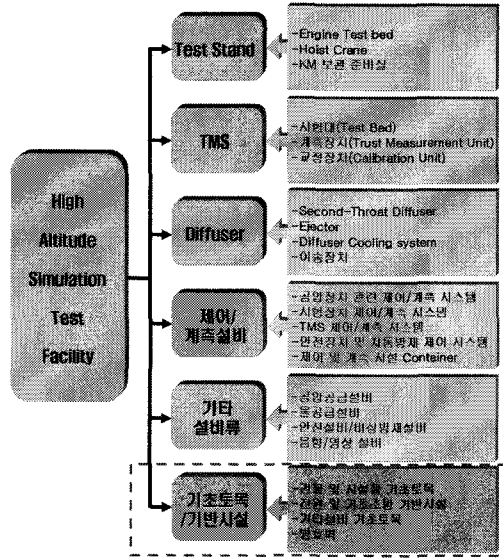


Fig. 3 Composition of HASTF

2.3 시험설비 성능요구조건

2.3.1 일반성능요구조건

- 가) 고공환경 모사시험설비는 엔진의 추력 및 압력 범위에 대해서 엔진작동시간에 걸쳐 실험 가능해야 하며, 시험횟수 최소 10회를 견딜 수 있게 견고해야 한다.
- 나) 고공환경모사 시험설비는 시험에 관계되는 모든 행위를 제어/계측시스템을 통해 제어할 수 있어야 한다.
- 다) 고공환경모사 시험설비는 엔진의 폭발 등의 사고 발생시에도 신속하고 안전한 대처가 가능하도록 적절한 안전 설비를 갖추어야 한다.
- 라) 고공환경모사 시험설비는 발사 시나리오를 만족할 수 있는 능력을 갖추어야 한다.
- 마) 고공환경모사 시험설비는 겨울철을 비롯한 4계절 항시 시험 가능해야 한다.

2.3.2 각 장비별 성능요구조건

2.3.2.1 시험스탠드

- ① 엔진이 장착되는 시험설비 의미한다.
- ② 엔진의 이동 및 수평장착이 가능하며, 수직/수평으로 장착자세 변경을 보장해야 한다.

Subsonic Diffuser로의 연속적인 연소가스의 이동이 가능하여야 한다.

- ③ 디퓨저의 냉각은 물을 이용하여 냉각하며, 열응력을 충분히 견딜 수 있게 냉각수를 공급해야 한다.
- ④ 디퓨저의 장착용 치구는 추력측정시스템(TMS)과 엔진의 수평축을 맞추기 위해 2축으로 움직여야 한다.
- ⑤ 디퓨저의 개념 구성도는 Fig. 6과 같다.

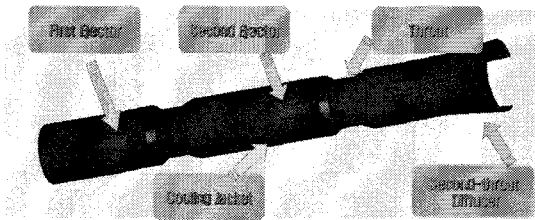


Fig. 6 Concept Design of Diffuser

2.3.2.4 제어계측시스템

- ① 개념 구성도는 Fig. 7과 같다.

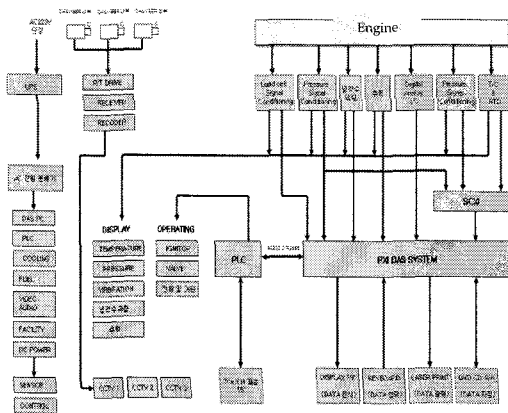


Fig. 7 Concept Composition of Control & Measurement System

- ② 연소시험장의 모든 부분을 감시 및 통제가 가능하여야 하며 연소시험의 전 과정을 원격 제어 가능하도록 설계되어야 한다.
- ③ 현지 사정상 독립 건물에 설치가 어려우므로 일반 상용 Container House 내부에 모든 설비가 장착되어야 한다.

1) 기본 요구 조건

여기에서는 시험 설비의 Control System, Data Acquisition and Instrumentation 등에 관하여 기본이 되는 요구조건들은 포괄적으로 설명한다. 이에 따르는 기본 원칙은 다음과 같다.

- 소프트웨어는 Source Program이 주어져야 하는 것은 물론, 그 Source Program을 수정하기 용이하도록 Line-By-Line 혹은 Section-By-Section으로 설명이 주어져야 한다.
- 매뉴얼을 포함한 모든 문서는 사용자가 쉽게 Step-By-Step으로 이해할 수 있어야 하며 반드시 관련된 사진, 그림, 도면 컴퓨터 모니터의 상태 등이 포함되어야 한다.
- PC Base System으로 구성해야 한다.
 - PC는 기능별로 Control, Measuring, High Freq. Measuring, Back-up, 사무용 등으로 구성되며 LAN으로 연결되어야 한다.
 - 적용 PC는 IBM 호환 PC로 Pentium IV 3GHz 이상의 CPU, 1G 이상 RAM 성능을 가져야 한다
 - Monitor는 인식성을 고려하여 19" LCD이상 이어야 한다.
 - A/D, D/A Board 및 관련 장비는 NI(National Instrument) 제품 또는 그에 준하는 성능을 가진 제품이어야 한다.
 - 데이터 저장은 내장형 HDD(저장용량 100GB 이상) 및 외장형 데이터 저장장치를 이용하며 모든 PC는 별도의 외장형 저장장치를 갖추어야 한다.
 - 데이터 출력력을 위하여 Printer(Laser B&W 1대, Color Inkjet 1대)를 갖추어야 한다.
- 이상상황 발생 시 적절한 대처가 가능하도록 상황등 또는 방송 등으로 시험장 전체에 경고 메시지를 전송할 수 있어야 한다.
- PC Monitor와는 별도로 수동 조작 Console 및 Digital Indicator를 System P&ID에 맞게 배치하여 조작성 및 인식성을 높일 수 있는 Mosaic Panel 설치해야한다.

2) 제어 시스템

모든 제어 시스템은 수동/자동 안전 시스템을 수반하여야 하며 특히 설계점을 벗어날 경우 자동 안전 시스템의 작동으로 사람은 물론 설비의 안전이 보장되어야 한다. 모든 입력 상태 및 작동상태는 CRT에 나타나 가시적으로 모니터 할 수 있어야 한다. 제어시스템은 PLC 시스템을 통해 제어하고, control room에서 제어시스템을 제어하는 것을 원칙으로 한다.

3) Measuring System or Data Acquisition System

- 모든 성능시험은 소프트웨어로 데이터 처리되어 엔진의 성능을 표현하는 각 Parameter들의 관계 데이터를 산출하는 것이 기본 목표이다. 따라서 그래프의 질적인 면과 사용자가 파악하기 쉽게 그려내는 것은 매우 중요하며 소프트웨어는 이러한 기능을 만족시켜야 한다.
- 개념 구성도는 Fig. 8과 같다

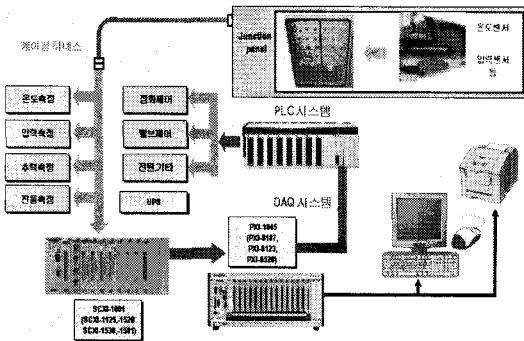


Fig. 8 Concept Composition of Data Acquisition System

- 적용 소프트웨어의 그래프 Format은 추후 변경이 용이하여야 한다.
- 모든 측정 및 데이터 처리 시스템은 다른 장비와 마찬가지로 추후의 보다 많은 측정 및 데이터 처리, 확충, 교체, 대체, 호환성 등을 충분히 고려하여야 한다.
- 장비의 모든 상태가 항시 Control Room에서 모니터 되어야 한다. 주요 계측 Parameter는 다음과 같다.
 - 압력(Pressure), 온도(Temperature)
 - 진동(Vibration), 추력(Thrust)

- Measuring System에서 받아들이는 데이터들은 수신 및 신호처리 과정에서 상호 간섭 (Interference) 및 교란(Noise)을 최소화 할 수 있도록 적절한 보호 장치를 갖추어야 한다.
- 모든 Sensor들은 어떠한 상태에서도 교정 소프트웨어에 의해 자동으로 교정되어 데이터 값들의 신뢰성이 보장되어야 한다.
- 모든 값들은 Analog/Digital 겸용으로 처리될 수 있어야 한다.
- 모든 Sensor들의 사용방법, 특성, Uncertainty 등에 관한 메뉴얼과 그 Sensor들에 따르는 모든 소프트웨어의 메뉴얼이 제공되어야 한다.
- 읽고자 하는 값들은 기억장치에 모두 기록되어야 하며 CRT와 Printer로서 값들을 볼 수 있고 또한 양질의 Graphic Output을 CRT와 Printer로 볼 수 있어야 한다.

2.3.2.5 공기공급시스템(Air Supply System)

① Air 공급시스템의 구성은 다음과 같다.

- Compressor
- Dryer
- Manifold
- Storage Vessel
- High Pressure Cut/Off Valve
- Dome Loaded Regulator
- Pneumatic Actuator Valve
- Tubing

- ② 고공환경모사 고도를 높이기 위한 Ejector에 Air를 저장 공급하기 위한 시스템을 말한다.
- ③ Air 저장탱크 용량은 시험시간 70초 기준으로 시험에 지장 없을 정도 규모로 갖추어야 한다.
- ④ Air의 압력은 시험요구조건에 부합되게 유지되어야 한다.
- ⑤ Air 공급시스템의 배관은 시험요구조건에 맞는 압력을 고려하여 제작·설치되어야 한다.

2.3.2.7 안전설비

- ① 소화 설비
 - 시험장에서 연소시험 중 발생 가능한 시험 대상물의 화재 또는 다른 원인에 의해 발생하는

- 각종 화재를 감지하고 전파를 방지하며 궁극적으로는 안전하게 소화할 수 있는 설비를 말한다.
 - 수동 및 자동으로 소화설비 작동 가능할 것
 - 화재 감지 센서 사용하여 화재 발생을 인지한 경우 알람 등을 이용하여 화재 발생을 경고하고 동시에 소화 설비가 작동하도록 설계되어야 한다.
 - 화재 감지 센서에서 화재를 인지하지 못한 경우에도 소화 설비를 작동시킬 수 있도록 수동 스위치를 갖추어야 하며 수동 작동 스위치는 제어 / 계측실 등에 반드시 설치되어야 하며 오동작을 막을 수 있는 별도의 장치가 필요하다.
 - 소화 설비는 살수 설비를 기본으로 갖추어야 한다.
 - Test Stand
 - 엔진 주위 집중 소화 설비 설치 할 것
 - 시험요원 작업구역에 개인용 소화설비 갖추어 초기 화재 진압 가능하도록 할 것
 - 시험장 주변
 - 연소시험 중 발생한 화재가 주변으로 확산되는 것을 방지하기 위함
- ② 시험요원 안전 설비
- 작업 구역 및 계단 미끄럼 방지 시설
 - 휴대용 가스 마스크 및 산소마스크
 - 각 작업 구역마다 개인용 소화 장구(Portable 소화기) 설치 할 것
 - 각 작업 구역마다 개인용 안전장구 및 내화 장

- 구 보관을 위한 Cabinet 설치
- 각 작업 구역마다 긴급 알람 버튼 설치하여 비상상황 발생시 시험장 전체에 알릴 수 있도록 할 것

3. 결 론

이상에서 KSLV-I 2단 추진기관의 고공환경에서의 작동특성을 구현하기위한 고공환경모사시험설비를 구축하기 위한 요구조건을 도출하였다. 도출되어진 요구조건을 토대로 시험설비를 구축한다면 보다 완벽한 시험설비가 구현될 것이며 시험 진행에 많이 도움이 되리라 판단한다. 또한 로켓을 시험하기위한 설비 구축 시에도 이용가능하리라 판단한다. 그러나 상세설계를 진행하면서 요구조건들을 좀 더 수정이 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. K. Annamalai, K. Visvanathan, 1998, "Evaluation of the performance of supersonic exhaust diffuser using scaled down models," ETF. Vol. 17, Issue 3, pp. 217~229.
2. Lee, J. H., Oh, J. Y. and Park, I. S., 2004, "A Study of Simplified Test Rig for High Altitude Simulation", KIMST, Vol. 7, No. 4, pp. 133~137.