

발사체 액체추진기관 구성품 시험요건 기준에 대한 고찰

임하영* · 한상엽* · 권오성* · 김병훈* · 고현석* · 조인현*

Considering Standards on Test Requirements for Units in Liquid-Propellant Propulsion System of Launch Vehicle

Ha-Young Lim* · SangYeop Han* · Oh-Sung Kwon* · Byung Hun Kim* ·
Hyeonseok Koh* · In-Hyun Cho**

ABSTRACT

Units assembled in the liquid-propellant propulsion system of launch vehicles should guarantee their on- and off-design performances under the various environments as well as at the various operation modes for the launch preparation and flight of launch vehicles. Units of liquid-propellant propulsion system can be installed in launch vehicle to insert satellite(s) into target orbit(s) only under the condition that all units must pass a series of tests to confirm whether those units perform normally as designed under the environment, which may be occurred in such stages of all development and operations as development, qualification, acceptance, assembly, pre-launch preparation, launch, and flight, and whether those units have been developed according to design requirements. Requirements for such tests have been already prepared in the advanced countries in launch vehicle systems based on experiences for decades. In Korea, where is now pursuing the development of KSLV-II, the research and development of launch vehicles using liquid-propellant propulsion system have been undergone during over 10 years. Hence test requirements for the development of units consisting of liquid-propellant propulsion system should be defined and Koreanized according to the domestic environment and circumstances and based on the experiences accumulated. In this paper requirements for the tests of units in liquid-propellant propulsion system, which can be feasible domestically, have been reviewed and defined.

초 록

위성발사체 액체추진기관 구성품은 발사체의 발사 준비 및 비행을 위해 다양한 작동 mode 및 다양한 환경에서 설계된 성능을 보장하여야 한다. 설계 요건을 충족하는 개발이 이루어졌는지 그리고 개발, 인증, 수락, 조립, 발사 전 시험, 발사 및 비행운용 등의 모든 개발/운용 단계에서 발생 가능한 환경에서 정상작동을 보장하는지를 확인하는 일련의 시험을 통과하여야 실제 목표 궤도에 위성을 투입하기 위한 발사체에 장착이 가능하다. 이러한 시험들에 대한 요건들은 이미 발사체 선진국에서는 수십 년의 경험을 바탕으로 그 기준을 마련하고 있다. 현재 한국형발사체 개발을 추진 중인 한국에서도 지난 10여 년간의 액체추진기관을 이용한 발사체 개발에 대한 연구/개발이 있어왔으며, 그 간의 경험을 바탕으로 국내 실정에 맞는 액체추진기관 구성품에 대한 시험요건 구축이 필요하다. 본 논문에서는 국내에서 설정 가능한 액체추진기관 구성품 시험요건에 대한 기준을 고찰하였다.

Key Words: Launch Vehicle(발사체), Liquid-Propellant Propulsion System(액체추진기관), Unit(구성품), Characteristics Test(특성시험), Environmental Test(환경시험)

* 한국항공우주연구원 발사체추진제어팀

† 교신저자, E-mail: hylim@kari.re.kr

현재 한국항공우주연구원에서 개발 중인 한국형발사체(KSLV-II)는 액체추진기관을 추력기관으로 1.5톤급 위성을 600~800 km 원궤도에 투입시키는 임무를 가진 3단형 발사체이다. 한국형발사체 개발 과정 동안 축적되는 기술과 자료들은 차후 한국에서 개발 상용될 발사체의 개발 과정 및 양산 공정의 기본 틀을 만드는 기초자료와 기초기술이 될 것으로 사료된다.

발사체 선진국에서는 발사체 개발 초기부터 현재까지 지속적인 기술 개발이 진행되고 있으며 그 과정에서 산출되는 자료와 개발되는 기술들은 다양한 형태로 database를 만들어 계속 발전시켜가고 있다. 현재까지 발사체의 위성 발사 서비스는 대부분 미국, 러시아, 유럽 등에서 수행되고 있으며, 이러한 발사체 선진국들은 발사체 개발 초기에 발사체시스템, 부시스템, 구성품, 하위 부품, 재료 등에 대한 기술(설계, 제작, 시험) 규격을 마련하여 차후 수많은 발사의 실패와 성공을 통하여 계속 발전시켜나가고 있다. 특히 미국의 경우 다양한 Military Standard [1~8]가 개발되어 있으며, 유럽은 ESA(European Space Agency)[9]에서 그 기준을 마련하고 있고 러시아는 GOST()에 발사체 및 다른 산업에 대한 전반적인 기준을 마련하고 있다.

발사체 선진국에서 현재까지 발전시켜온 각종 기술 규격은 현재 진행하는 한국형발사체 개발에 다양하고 효과적인 자료로 활용될 수 있다. 하지만 발사체 선진국에서 채택하고 있는 기술 규격은 각각의 발사장 및 개발 국가의 현실과 환경에 맞추어 개선되고 발전된 것으로 그 기술 규격을 그대로 한국형발사체 개발에 적용한다는 것은 한국형발사체가 발사될 나로우주센터의 환경이나 각종 구성품, 부품 등이 개발될 한국의 상황 및 환경과 맞지 않을 수 있다. 따라서 각종 부품 및 구성품, 부시스템, 발사체시스템 등의 한국화 개발을 위해서는 한국의 환경 및 상황 그리고 나로우주센터의 환경 및 상황에 맞춘 기술 규격 또한 국산화가 이루어져야 할 것이다. 이러한 기술 규격의 국산화는 한국형발사체 개발 초기에 그 기틀이 마련되어 한국형발사체 개

발 과정 동안 개선되고 발전되어 나가야 할 것이다. 기술 규격의 국산화를 위해서는 현재 발사체 선진국에서 기준으로 활용하는 기술 규격에 한국의 실정과 환경을 접목 시켜 발전시켜나갈 수가 있다.

본 논문에서는 발사체 선진국에서 기준으로 활용하는 기술 규격을 바탕으로 국내의 발사체 개발 초기에 선행되어 개발되어야 할 액체추진기관의 각 구성품에 대한 설계, 제작, 시험 규격 중 각 구성품 개발 과정에서 가장 많은 시간이 소요되는 시험에 대한 규격에 대하여 고찰해 보고자 한다.

한국형발사체는 현재 1단에 펌프식 300톤급(75톤급 4기 클러스터링), 2단에 펌프식 75톤급, 그리고 3단에 펌프식 7톤급으로 구성될 예정이다. 이러한 한국형발사체의 액체추진기관을 구성하는 구성품 개발을 위해서는 개발 과정에서 단독시험 및 각종 부시스템 및 시스템 개발 과정에서의 조립시험을 수행하면서 설계 수정 등을 수반하는 다회의 개발 과정을 거치게 된다. 이러한 과정에서 다양한 종류의 시험이 수행되며, 이는 크게 구성품을 개발하면서 수행되는 개발시험, 구성품 개발의 최종 완료를 위한 인증시험, 그리고 개발 완료 후 부시스템에 조립되기 전의 수락시험으로 나눌 수 있다. 현재 개발시험은 각종 구성품을 제작하는 산업체에서, 인증 및 수락시험은 현재 한국항공우주연구원에서 계획 중인 추진공급계 시험설비 (PUTF, Propulsion Unit Test Facility)에서 수행될 예정이다.

본 논문에서는 기본적으로 발사체에 적용되는 액체추진기관의 기본 구성 및 그 구성품에 대한 소개와 이러한 구성품 개발에서 수행되는 개발/인증/수락시험 종류 등이 정리되어져 있다.

2. 위성발사체 액체추진기관 구성

지구 주위의 각종 궤도에 위성을 운반하는 일반적인 발사체는 1개의 추진기관으로 이루어진 단을 1개 사용하는 단단(單段) 발사체 (SSTO, Sing-Stage To Orbit) 또는 단을 2개 이상 병렬 또는 직렬로 연결하여 사용하는 다단(多段) 발사

Table 4. Category and functions of sub-systems in liquid-propellant propulsion system of launch vehicles (Control System)

소분류	역 할
밸브 구동부	- 추진기관을 구성하는 모든 유공압 밸브로 구동제를 공급하여 밸브 개폐 구동
밸브 퍼지부	- 극저온용 밸브 stem부가 빙결되는 것을 방지하기 위해 상온(고온) 건조기체를 밸브 stem부로 퍼지 공급
열차단부	- 온보드 전자장비 및 작동기기의 정상 운용환경 유지를 위해 극저온 추진제 및 가압제의 저장부 및 유동부 주위에 형성되는 극저온원의 전파를 차단
열제어부	- 열차단부를 통과한 극저온 환경으로 인한 온보드 내부의 결빙을 방지하기 위해 온보드 내부의 습기 제어 및 극저온 환경 대류전파를 제어하기 위해 상온(고온) 건조기체를 온보드 내부로 퍼지 공급
제어기	- 추진기관을 구성하는 유공압 구성품의 작동을 제어

3. 액체추진기관 구성품 시험 종류

발사체 액체추진기관을 구성하는 구성품은 액체추진기관 요구조건을 만족하는 설계 요건을 기초로 개념설계, 상세설계, 제작, 개발시험을 통하여 개발되며, 개발을 최종적으로 완료하기 위해서는 인증시험을 통과하여야 한다. 인증시험을 통과한 개발품은 부시스템 및 시스템 시험을 위해 수락시험이 수행된 후 조립이 이루어진다. 각 구성품의 개발과정은 최종 인증시험 전에 상세설계 수정 및 제작, 개발시험을 수차례 반복하여 수행하게 된다. 구성품 개발 및 시스템 조립/검정 완료를 위해 수행되는 개발시험, 인증시험, 수락시험에는 크게 특성시험과 환경시험으로 나눌 수 있다.

3.1 특성시험

구성품 개발을 위한 특성시험은 작동 및 기본 조립품의 가공상태, 조립상태, 작동규격, 유동규격 등을 확인하기 위한 시험으로 아래와 같은 시험이 포함 된다:

- 기능 시험
- 기밀 시험
- 강도/파괴 시험
- 수명 시험

3.2 환경시험

구성품 개발을 위한 환경시험은 시스템에 조립된 구성품이 시험을 위해 노출되는 모든 환경

에서 그 작동성의 보장을 확인하기 위한 시험이며, 조립환경, 이송환경, 시험장 환경, 보관환경, 조립동 환경, 발사대 환경, 발사준비환경, 발사환경, 비행환경, 비행종료환경, 비상환경 등에서 발생 가능한 모든 환경을 대표하는 요건을 만족하는 확인을 위한 시험으로 아래와 같은 시험이 포함 된다:

- 충격 시험
- 진동 시험
- 음향 시험
- 가속도 시험
- 열주기 시험
- 열진공 시험
- 기후시험: 습기/모래/먼지/강우/염분/폭발환경
- 전자기파 적합성(EMC) 시험

4. 액체추진기관 구성품 시험 방안

3장에서 소개된 액체추진기관 구성품에 대한 개발/인증/수락시험이 수행되면서 시험결과 정확도는 시험장비, 시험자, 시험에 활용되는 센서 정확도에 따라 달라질 수가 있다. 이상에서 소개된 모든 시험에서 시험결과의 신뢰도를 확보하기 위해서는 시험장비 및 시험에 활용되는 센서의 오차범위에 대한 규제가 있어야 하며, 이러한 오차를 관리함으로써 시험결과에 대한 신뢰도를 높일 수 있다. 일반적으로 참고문헌 [6]에 각 측정치 및 시험 요구조건에 대한 허용오차가 소개되어 있으며, 한국형발사체용 액체추진기관 구성품을 개발하는 과정에서 참고문헌 [6]에 소개된 허용오차 범위는 국내의 환경 및 국내에 설치되는 시험설비의 특성에 따라서 그리고 개발/인증/수락시험이 과정에서 도출되는 시험결과에 따라 조정되어 국내의 액체추진기관 구성품 시험 기준으로 정리될 수 있다.

또한 액체추진기관 구성품의 개발/인증/수락 시험 과정에서 수행되어야 하는 시험 종류 및 방법은 특수한 상황 및 일정, 비용 등을 감안하여 발사체 액체추진기관 구성품 개발계획에 반영하여 활용되어야 한다. 특히 앞의 3장에서 소개된 모든 특성시험과 환경시험이 모든 액체추진기관 구성품에 대해 수행되어야 하는 것은 아니며, Table 5에서와 같은 조건표에 따라서 각 구성품 특성에 맞추어 수행되어야 한다.[6,7]

Table 5. Characteristics/Environmental tests

구성품	특성시험		검수		기밀		강도		파괴			
	D	Q	A	D	Q	A	D	Q	A	D	Q	A
배관/벨로우즈/필터/체결류	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
공압밸브류/열교환기/사이폰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
솔/래칭/체크/릴리프밸브	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
파이로밸브/레플레이터	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
오리피스	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
단열재	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
외류방지장치/슬로싱방지배플	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
디퓨저/탱크류/피팅/브라켓	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
센서류/제어기	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
구성품	특성시험		기능		유량		충격		수명			
	D	Q	A	D	Q	A	D	Q	A	D	Q	A
배관/벨로우즈/필터/체결류	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
공압밸브류	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
솔/래칭/체크/릴리프밸브	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
파이로밸브/레플레이터	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
오리피스/열교환기/사이폰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
단열재/외류 방지 장치	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
슬로싱 방지 배플	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
디퓨저/탱크류/피팅/브라켓	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
센서류/제어기	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
구성품	환경시험		기후		진동		충격		가속도			
	D	Q	A	D	Q	A	D	Q	A	D	Q	A
배관/벨로우즈/필터/체결류	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
공압밸브류/단열재	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
솔/래칭/체크/릴리프밸브	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
파이로밸브/레플레이터	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
오리피스/열교환기/사이폰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
외류방지장치/슬로싱방지배플	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
디퓨저/탱크류	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
센서류/제어기/피팅/브라켓	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
구성품	환경시험		음향		열주기		열진공		EMC			
	D	Q	A	D	Q	A	D	Q	A	D	Q	A
배관/벨로우즈/필터/열교환기										0	0	
공압밸브류/오리피스/사이폰										0	0	
솔/래칭/체크/릴리프밸브										0	0	
파이로밸브/레플레이터										0	0	
단열재/외류방지장치										0	0	
슬로싱방지배플/디퓨저										0	0	
센서류/제어기	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
피팅/브라켓/체결류/탱크류										0	0	

* D: 개발시험, Q: 인증시험, A: 수락시험

5. 결 론

발사체 액체추진기관 구성품은 발사체의 발사 준비 및 비행을 위해 다양한 작동 mode 및 환경에서 설계된 성능을 보장하여야 한다. 설계 요건을 충족하는 개발이 이루어졌는지 그리고 개

발, 인증, 수락, 조립, 발사 전 시험, 발사 및 비행운용 등의 모든 개발/운용 단계에서 발생 가능한 환경에서 정상작동을 보장하는지를 확인하는 시험을 통과하여야 탑재물을 목표궤도에 투입하기 위한 발사체에 장착이 가능하다. 본 논문에서는 이러한 발사체 액체추진기관 구성품을 개발에서부터 발사체에 장착되어 비행까지 그 성능 및 작동 신뢰성을 확인하고 보장하기 위해 필요한 시험들이 발사체 액체추진기관 소개와 함께 정리되었다. 본 논문에 소개된 일련의 시험 종류와 시험방법들은 발사체선진국 기준에 준한 구성품 요구조건을 현재의 국내 실정에 맞게 정리하기 위한 것이며 현재 진행 중인 한국형발사체 개발 및 운용 과정을 통하여 국내의 현실과 환경에 맞게 개선되고 보완되어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. U.S. Dept. of Defense, "Military Handbook: Design, Construction, and Testing Requirements for One of a Kind Space Equipment," DOD-HDBK-343, 1986.
2. U.S. Dept. of Defense, "Handbook: Test Requirements for Launch, Upper- Stage, and Space Vehicles - Vol.I: Baselines," MIL-HDBK-340A, 1999.
3. U.S. Department of Defense, "Handbook: Test Requirements for Launch, Upper-Stage, and Space Vehicles - Vol.II: Application Guidelines," MIL-HDBK-340A, 1985.
4. U.S. Dept. of Defense, "Test Method Standard: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests," MIL-STD-810, 2000.
5. U.S. Dept. of Defense, "Military Standard: Standard General Requirements for Safe Design and Operation of Pressurized Missile and Space Systems," MIL-STD-1522A, 1984.
6. U.S. Dept. of Defense, "Military Standard:

- Test Requirements for Launch, Upper-Stage, and Space Vehicles," MIL-STD-1540C, 1994.
7. U.S. Dept. of Defense, "Standard Practice: Product Verification Requirements for Launch, Upper Stage, and Space Vehicles," MIL-STD-1540D, 1999.
 8. U.S. Dept. of Defense, "Military Standard: Electromagnetic Compatibility Requirements for Space Systems," MIL-STD-1541A, 1987.
 9. D. Moreau, et al., "Test Requirements Specification for Space Equipment," ESA PSS-01-802, European Space Agency, 1993.