

발사체 구성품 및 시스템의 공압시험

임하영* · 한상엽*

Pneumatic Test of Components and Systems of Launch Vehicle

Ha-Young Lim* · Sang-Yeop Han*

ABSTRACT

Various types of gases and propellants are used in launch vehicle. In order to fulfill the mission of the launch vehicle, the components and systems used in launch vehicle should ensure flawless operation in these environments. The pneumatic test is the test performed using compressed gas to prove requirements of the components and systems. This paper describes the requirements of the gas quality for pneumatic test, leak test method, and pneumatic test of the launch vehicle.

Key Words: Pneumatic Test(공압시험), Leak Test(기밀시험), Launch Vehicle(발사체)

1. 서 론

액체로켓 발사체를 구성하는 엔진, 밸브, 탱크 등의 추진계통 단품 및 시스템은 고압, 고온 및 극저온의 환경에서 작동을 한다. 이러한 구성품은 가장 기본적인 요구조건인 기밀(leak tightness) 뿐만 아니라 작동환경에서의 완벽한 기능을 수행해야 발사체의 성능을 보장할 수 있다. 이러한 기밀과 성능을 확인하기 위한 시험 중 압축가스를 이용한 시험을 공압시험(pneumatic test)이라고 한다. 본 논문에서는 액체로켓 발사체의 구성품과 시스템을 개발하면서 수행하는 공압시험에 대한 간략한 소개를 하고자 한다.

2. 공압시험용 가스

공압시험을 수행하기 위해 가장 기본적으로 요구하는 사항은 공압시험에 사용하는 가스의 품질이다. 액체로켓 발사체는 높은 압력과 극저온 환경에서 작동을 하며 액체산소와 같은 강력한 산화제를 사용하기 때문에 이것을 시험하는 가스는 수분, 오일 그리고 입자(particle)에 대해 까다로운 품질을 요구한다. 가스 내의 수분 함유량은 이슬점 온도로 파악할 수 있으며 발사체에서 요구하는 조건은 대기압에서 -55℃ 이하여야 한다[1]. 시험에 사용한 가스의 수분이 규정치 이상이면 시험 후 대상물에 수분이 잔류하고 있다가 극저온 환경에서 얼어서 부품의 오작동을 초래할 수 있다. 오일은 액체산소와 특정 조건에서 접촉하면 점화 또는 폭발을 초래할 수 있기 때문에 시험용 기체에 존재하는 오일이 시험 대

* 한국항공우주연구원 발사체추진제어팀

† 교신저자, E-mail: syhan@kari.re.kr

상물을 오염시키는 가능성을 배제하기 위해 1 norm.m³ 당 3.0 mg 이하를 요구한다. 입자는 부품의 오작동, 손상 또는 폭발 등을 가져올 수 있기 때문에 시험용 가스에 포함된 입자의 크기는 20 μm 이하여야 하고 무게는 1 norm.m³ 당 0.1 mg 이하여야 한다. 시험에 사용하는 가스의 품질은 공압시험 시작 전에 검사를 하여 요구조건을 만족한 것을 확인한 후 시험을 수행한다.

3. 공압시험의 종류

발사체 구성품의 공압시험은 구성품의 특성에 따라 시험 종류와 방법이 다르지만 기밀시험, 성능시험, 작동환경에서의 기밀 및 성능시험 등으로 구분할 수 있다. 작동 환경은 극저온 혹은 고온에서, 진동이 있는 상태에서 압력을 주면서 시험을 수행을 한다.

3.1 기밀시험

기밀시험은 공압 시험에서 가장 기본이 되는 시험으로 누설이 발생한 위치 또는 누설량을 알아내는 것이다. 누설량, 부품의 크기, 작동 환경 등에 따라 기밀시험을 하는 방법이 다르며, 기본적으로 시험을 수행하는 압력은 시험 대상물의 작동 압력으로 시험을 수행한다. 부품 개발에서 많이 사용하는 기밀시험 방법은 다음과 같다.

3.1.1 수조를 이용하는 방법

시험 대상물을 수조에 담근 후 시험 가스를 요구 압력까지 공급한 후 3분을 유지한다. 액체는 억제제(inhibitor)가 0.2~0.3% 이하의 무게비를 갖는 물을 8μm의 필터로 거른 다음 사용한다[2]. 기체 방울이 발생하는 것으로 누설을 확인할 수 있으며 $5 \cdot 10^{-2} l \cdot \mu\text{Hg}/s$ ($6.57 \cdot 10^{-5} \text{cm}^3/s$) 이상의 누설량을 확인할 수 있다[3].

3.1.2 Dip tube 또는 마우스피스 방법

이 방법은 솔레노이드밸브, 리듀서(레귤레이

터) 등과 같이 내부 공간이 액체와 직접 닿으면 안되는 물건을 시험할 때 사용한다. 시험대상물 출구에 고무 튜브를 연결하고 이것을 액체가 담겨진 통에 담근다. 액체는 정제된 알콜을 사용하여 시험 중 외부로부터 습기가 시험대상물로 유입되지 않도록 한다. 규정된 압력을 공급한 상태에서 고무 튜브 출구를 통해 기체 방울이 발생하는 것으로 누설을 확인할 수 있다. 고무 튜브의 내경은 4~6mm, 길이는 600mm 정도의 것을 사용하며 액체에 잠기는 튜브의 깊이는 10mm를 넘지 않는 것이 좋다[1] 이 방법으로는 $1 l \cdot \mu\text{Hg}/s$ ($1.36 \cdot 10^{-3} \text{cm}^3/s$) 이상의 누설량을 확인할 수 있다.

3.1.3 비눗방울 방법

누설이 발생하는 위치를 확인하고자 하는 부위에 비눗물을 칠한 다음 요구 압력을 공급한다. 비눗 방울이 발생하는 것으로 누설 위치를 확인할 수 있다. 이 방법은 $5 \cdot 10^{-1} l \cdot \mu\text{Hg}/s$ ($6.57 \cdot 10^{-4} \text{cm}^3/s$) 이상의 누설량을 확인할 수 있다. 비눗물은 중성 비눗물(neutral soap)을 사용하며 시험을 끝낸 후 알콜을 적신 천으로 비눗물을 닦아 낸다[1]. 이 방법은 온도가 낮은 극저온 시스템에서는 비눗물이 얼기 때문에 사용이 곤란한 단점이 있다.

3.1.4 압력 저하(pressure decay)를 통한 방법

시험 대상물에 압력을 가한 다음 시험 시작할 때의 압력을 측정하고 정해진 시간 후의 압력을 측정하여 압력 저하를 확인하여 누설 여부를 판단한다. 이 방법은 $1 \cdot 10^{-1} l \cdot \mu\text{Hg}/s$ ($1.36 \cdot 10^{-2} \text{cm}^3/s$) 이상의 누설량을 확인할 수 있다[3]. 이 방법은 누설의 정도는 파악할 수 있으나 누설의 위치를 파악할 수는 없다.

3.1.5 탐지 가스를 이용하는 방법

하드웨어에 탐지 가스(tracer gas)를 공급한 상태에서 mass spectrometer를 이용하여 누설을 확인한다. 이 방법은 $1.36 \cdot 10^{-7} \text{cm}^3/s$ 이상의 누설량을 확인할 수 있다[3]. 탐지 가스는 헬륨을

가장 많이 사용하며 이러한 누설 탐지 장치를 헬륨 누설 탐지기(helium leak detector)라 부른다. 누설 위치를 파악할 때에는 sniffer라고 부르는 탐침을 이용하여 아래 왼쪽 그림과 같이 확인을 할 수 있으며, 전체 누설량을 측정할 때에는 아래 오른쪽 그림처럼 시험대상물을 통 안에 넣고 헬륨을 공급한 상태에서 탐지기를 이용하여 누설량을 측정한다. 헬륨을 탐지 가스로 사용하는 이유는 다음과 같은 특성을 가지고 있기 때문이다[4].

- 대기 중에 매우 희박하다.
- 잔류 가스의 mass spectrum이 모호하지 않다.
- 화학적 및 물리적으로 불활성이며 폭발성이 없다.
- 펌프를 이용하여 쉽게 제거할 수 있으며 시험 대상물을 오염시키지 않는다.

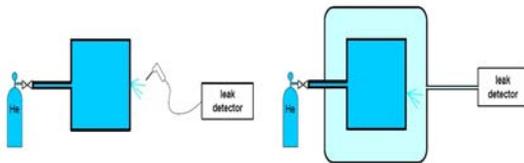


Fig. 1 탐지 가스를 이용한 기밀 시험법; 왼쪽은 누설 위치를 파악할 수 있는 sniffer 방법, 오른쪽은 총누설량을 알 수 있는 방법[4]

이외에도 헬륨은 비등점이 매우 낮기 때문에 극저온을 사용하는 시스템에서 액체 수소와 접촉을 하여도 액화가 되지 않기 때문에 액체수소를 추진제로 사용하는 발사체 기밀시험에 많이 사용된다. 헬륨 누설 탐지기는 매우 민감한 장치이기 때문에 사용하고자 하는 공간에 헬륨이 잔류하고 있으면 측정 오차가 발생한다. 때문에 시험에 사용한 헬륨은 배관을 이용해 건물 밖으로 배출을 시켜야한다. 실내에서 헬륨을 배출하였을 경우 헬륨은 분자량이 작아 대부분 천정을 통해 배출되지만 미량의 헬륨이 벽에 장기간 달라붙어 있는 경우가 있다. 따라서 의도하지 않게 헬륨을 실내에 누출시켰을 경우엔 강제 환기를 시켜서 실내의 헬륨 농도를 낮추어야 헬륨 누설 탐지기를 제대로 사용할 수 있다. 아울러 시험장

지에서 헬륨의 압력을 조절하는 레귤레이터도 압력을 조절하면서 헬륨이 밖으로 배출되지 않는 제품을 사용해야 한다.

3.2 성능시험

발사체를 구성하는 공압 밸브, 벤트 밸브, 솔레노이드 밸브, 필터, 체크 밸브, 레귤레이터 등은 각기 기능과 작동 환경이 다르기 때문에 구성품의 특성에 맞는 성능시험을 수행한다. 예를 산화제 탱크 벤트릴리프 밸브는 상온에서의 배출 시험을 수행하여 최소 배출 유량과 최대 배출 유량을 확인하며, 극저온에서의 배출시험을 통해 기체 질소와 기체 산소의 배출 유량을 확인한다. 성능시험은 구성품에 따라 매우 다양하기 때문에 더 이상 자세한 설명은 생략한다.

4. 발사체 시스템의 공압시험

발사체 시스템의 공압시험은 기밀확인, 밸브의 작동 상태 확인, 그리고 각종 센서의 작동 확인 등이 포함되는 종합적인 시험이다. 발사체에는 이를 점검하기 위한 많은 점검 포트와 추진제와 가스를 공급하기 위한 많은 인터페이스가 있다. 발사체 공압시험설비는 이러한 점검 포트와 인터페이스에서 요구하는 압력으로 가스를 공급한다. 공압시험은 한번에 여러 가지를 점검하는 작업이기 때문에 모든 인터페이스에 가스를 공급하는 플렉시블 호스를 연결하여 수행한다. 발사대에서 공급되는 가스의 종류와 압력과 동일하게 가스를 공급하며, 추진제 탱크는 부피가 크므로 헬륨과 공기를 혼합하여 공급한다. KSLV-1 1단의 경우 산화제 시스템을 0.2MPa의 압력으로 기밀시험을 할 때 먼저 헬륨을 0.045MPa까지 채운 다음 공기를 0.19MPa까지 채운 후 헬륨을 0.2MPa까지 채운다. 연료 시스템은 0.035MPa까지 헬륨을 채우고 0.14MPa까지 공기를 채운 다음 헬륨을 0.18MPa까지 충전한다. 시험대상물의 부피가 크기 때문에 처음 헬륨을 주입하는 위치와 나중에 주입하는 위치를 다르게 하여 탱크 내에 헬륨과 공기가 충분히 섞이도록 한다. 발사

체 내에 헬륨/공기 압력이 있는 상태에서 연료부와 산화제부를 각각 헬륨 누설 탐지기를 이용하여 누설 여부를 확인한다. 시스템의 공압시험에서 압력이 가해진 상태에서 발사체에 장착된 밸브를 작동시켜서 작동 여부와 기밀 여부를 확인하고 압력 센서가 정확한 값을 지시하는지 확인하는 작업이 포함된다.



Fig. 2 Pneumatic Test Facility for Launch Vehicle

공압시험이 종료되면 탱크 내의 헬륨/공기 혼합기체를 실외로 배출시킨 다음 탱크 아래쪽에 위치한 주입구를 통해 질소 가스를 30 분 간 퍼지를 수행하여 탱크 내에 공기와 헬륨을 제거한다.

5. 결 론

공압시험에 사용하는 가스의 품질에 대하여 소개하였으며, 공압시험에서 많은 부분을 차지하는 기밀시험의 종류에 대하여 살펴보았다. 마지막으로 발사체 시스템의 공압시험 방법에 대하여 간략한 소개를 하였다.

참 고 문 헌

1. A-103 Compressed Gases Supply System Technical Requirement, KARI, 2008
2. Yu. Ivanchikova, et al., Technical specification - Valves of liquid propulsion system for subsystem of oxidizer supply and pressurization subsystem, Yuzhnoye SDO, 2008
3. V. N. Kuchkin, et al., Report on work performed on subject B1 part B under contract No. KARI-00-14, NIIchimMash, 2000.
4. K. Zapfe, Leak detection, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany, 2007