

발사체 추진 시스템의 기밀시험

임하영*, 한상엽**, 이무근***

Leak Test for Propulsion System of Launch Vehicle

Ha-Young Lim*, Sang-Yeop Han**, Moo-Keun Yi***

Abstract

There is close correlation between the reliability of the launch vehicle and the leakage of the propellants or gases from the launch vehicle. This paper describes the definition of the leak rate to determine the quantity of the leakage and introduce the unit conversion of the leak rate. The main parameters for the leak rate were considered. The requirements for the gaseous for the leak test of launch vehicle and various leak test methods were introduced. Leak test method and procedure used in space launch vehicle were briefly described.

초 록

발사체의 신뢰성과 추진제 또는 가스의 누설은 매우 밀접한 상관관계를 갖는다. 본 논 문에서는 누설에 대한 정성적인 분석을 위한 누설량의 정의와 각 단위계의 변환 관계를 소개하였다. 또한 누설량에 영향을 미치는 인자를 분석하였다. 발사체 기밀시험에 사용하 는 가스의 품질 요구조건과 발사체 또는 부품의 기밀을 확인하기 위한 여러 가지 시험 방 법을 소개하였다. 아울러 발사체의 추진시스템에 대한 기밀시험에서 사용된 방법과 절차를 간략히 기술하였다.

키워드: Leak Test(기밀시험), Leak Rate(누설량), Launch Vehicle(발사체), Propulsion System (추진시스템)

1. 서

액체로켓 발사체를 구성하는 엔진, 밸브, 탱크 등의 추진계통 단품 및 시스템은 저압 또는 고 압의 환경에서 작동을 한다. 이들은 산화제, 연 료, 그리고 헬륨과 같은 가압가스가 제품 밖으 로 하나도 새어나가지 않게 하면 가장 이상적이

나 실제 상황에서는 완벽한 기밀이란 존재하지 않으며 설계자가 상황에 맞게 누설의 요구조건 을 결정한다. 누설은 압력 차이에 의하여 유체 가 틈새를 통하여 압력이 높은 곳에서 낮은 곳 으로 이동하는 현상이다. 의도하지 않은 추진제 의 누설로 인해 발사체가 폭발하거나 임무를 완 수할 수 없는 등의 커다란 문제가 발생할 수 있 으므로 누설을 제거하는 것은 발사체 개발에 있

접수일(2012년 9월 14일), 수정일(1차 : 2012년 10월 19일, 2차 : 2012년 10월 31일, 계재 확정일 : 2012년 11월 1일)

^{*} 발사체추진제어팀/hylim@kari.re.kr

^{**} 발사체추진제어팀/syhan@kari.re.kr



어서 매우 기본적이며 중요한 업무이다. 본 논 문에서는 누설의 정의와 누설을 검사하는 방법 과 나로호 발사체의 기밀시험 방법과 절차를 간 략히 소개한다.

2. 누설량의 정의 및 시험가스 요구조건

2.1 누설량의 정의

누설은 압력차에 의해 발생하기 때문에 시험하고자 하는 대상물의 내부 압력이 외부보다 높거나 낮으면 발생한다. 후자의 경우는 주로 극저온 유체를 저장하는 진공 단열 탱크 등의 경우에서 볼 수 있으며 발사체 부품에서 대부분은 전자의 경우이므로 본 논문에서는 내부의 압력이 외부보다 높은 경우에 대해서만 고려한다.

누설량(leak rate)은 사용하는 가스의 종류, 압력 차이 및 온도의 함수이며, 부피 V를 갖는 시험대상물에 대하여 정량적으로 다음과 같이 정의한다[1].

$$Q_l = V \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t} \tag{1}$$

여기에서 $\frac{\Delta p}{\Delta t}$ 는 시간에 대한 압력의 압력 변화이다. 일반적으로 사용하는 누설량의 단위와 단위별 변환은 아래 표와 같다.

표 1 여러 가지 단위에 대한 누설량 변환표[1]

	$mbar \cdot l/s$	$Torr \cdot l/s$	$Pa \cdot m^3/s$	cm^3/s^*
$mbar \cdot l/s$	1	0.75	0.1	0.99
$Torr \cdot l/s$	1.33	1	0.133	1.32
$Pa \cdot m^3/s$	10	7.5	1	~10
cm^3/s^*	1.01	0.76	0.101	1

 $^{^*}$ STP - standard temperature and pressure (0 $^\circ\!\!\!\!\!\!\!\mathrm{C}$, 1 atm)

누설량은 동력(power)의 차원을 갖으므로 와 트 (W) 혹은 $1\mu Hgl/sec$ 등으로도 표기할 수 있으며, 이것들의 변환 관계는 다음과 같다[2].

$$1 W = 1 Pa m^3 / s = 7.5 \cdot 10^3 \mu Hg l / s$$

= 7.5 mm Hg l / s

누설량의 정도에 따라 아래와 같이 시스템을 분류한다[1].

- $Q_l < 10^{-6} \, mbar \cdot l/s$: 매우 기밀이 잘된 우수한 시스텍
- $Q_l < 10^{-5} \, mbar \cdot l/s$: 기밀이 어느 정도 유지되는 시스템
 - $Q_l < 10^{-4} mbar \cdot l/s$: 누설이 있는 시스템

Zenit 발사체를 개발한 우크라이나의 Yuzhnove SDO에서는 추진계통에 사용되는 솔 레노이드밸브, 산화제 충전/배출밸브, 산화제 벤 트밸브에 대하여 헬륨-공기 혼합기체를 이용하여 작동압력을 가한 상태에서 1.36 • 10⁻⁵cm³/s 이하 의 누설량을 요구한다[2]. 이 누설조건은 위에서 설명한 기밀이 어느 정도 유지되는 시스템으로 분류할 수 있다. 로켓 발사체는 대부분 이 정도 의 누설요구 조건을 갖으며, 전자산업 및 핵융합 장치 등은 10⁻⁹~10⁻¹¹cm³/s 정도의 허용 누설값을 요구한다. 10⁻⁵cm³/s의 누설량은 1 atm, 1cc의 기 체가 누설을 통해 진공으로 배출되는데 약 하루 가 걸리는 정도의 누설량이며, 10⁻¹⁰cm³/s는 약 240년이 소요되는 누설량을 의미한다.

누설량이 $10^5 \text{cm}^3/\text{sec}$ 이상인 경우 누설량을 압력차에 의한 함수로 하면 Poiseuille 방정식에 의거 다음과 같이 정의한다[3].

$$Q_{l} = \frac{\pi \cdot D^{4} \cdot (P_{1}^{2} - P_{2}^{2})}{256 \cdot \eta \cdot L} \tag{2}$$

위 식에서 볼 수 있듯이 동일한 형상과 압력 조건에서 누설량은 기체의 점성에 반비례하므로 같은 조건에서 헬륨에 비해 공기는 1.08, 질소는 1.18, 수소는 2.23배의 누설량을 갖는다.

누설량이 $10^7 \text{cm}^3/\text{sec}$ 이하로 매우 누설량이 작은 경우엔 누설량은 Knudsen 방정식에 의거 다음과 같이 정의한다[3].



$$Q_{l} = \frac{1}{6} \left[\frac{2\pi RT}{M} \right]^{1/2} \frac{D^{3}}{L} (P_{1} - P_{2}) \tag{3} \label{eq:Ql}$$

여기에서

 η = 기체의 점성(bar.sec)

L= 크랙의 길이(cm)

 P_1 = 크랙 한 쪽의 절대압력(bar)

 P_2 = 크랙 다른 쪽의 절대압력(bar)

D= 이론 홀 지름(cm)

M= 가스 분자량

R= 이상기체상수(J.mol-1.K-1)

T= 절대온도(K)

2.2 시험에 사용하는 가스 품질 요구조건

액체로켓 발사체는 높은 압력과 극저온 환경에서 작동을 하며 액체산소와 같은 산화제를 사용하기 때문에 이것을 시험하는 가스는 까다로운 규격을 요구한다. 발사체에서 요구하는 중요한품질 요건은 수분, 오일 그리고 입자 (particle)이다.

시험에 사용한 가스에 수분이 있으면 극저온 환경에서 얼어서 부품의 오작동 또는 배관을 막 아 치명적인 결과를 초래할 수 있다. 가스의 수 분 함유량은 이슬점 온도로 파악할 수 있으며 나 로호 발사체에서는 대기압에서 -55℃ 이하를 요 구한다[5].

오일은 액체산소와 특정 조건에서 접촉하면 점화 또는 폭발을 초래할 수 있기 때문에 오일의 무게에 대한 요구조건이 있다.

입자는 부품의 오작동, 손상 또는 폭발 등을 가져올 수 있기 때문에 이에 대해서도 엄격한 조 건을 요구한다. 아래 표 2는 발사체의 시험 및 운용에 필요한 가스의 품질 요구조건이다.

표 2 시험용 가스의 품질 요구조건[5]

요구 항목	단 위	허용 기준
입자 무게	mg/nom.m³ (০)ই})	0.1
입자 크기	입자 크기 µ(이하)	
오일	mg/nom.m³ (০)ট})	3.0
이슬점온도	$^{\circ}\mathbb{C}$	-55

3. 기밀시험 방법

기밀시험은 하드웨어 또는 시스템에서 누설이 발생한 위치 또는 누설량을 알아내는 것이다. 누 설량, 하드웨어의 크기, 작동 환경 등에 따라 기 밀시험을 하는 방법이 다르며, 기본적으로 시험 을 수행하는 압력은 시험 대상물의 작동 압력으로 시험을 수행한다. 일반적으로 많이 사용하는 기밀시험 방법은 다음과 같다.

3.1 수조를 이용하는 방법

시험 대상물을 수조에 담근 후 시험 가스를 요구 압력까지 공급한 후 3분을 유지한다. 기체 방울이 발생하는 것으로 누설을 확인할 수 있으며 $5\cdot 10^{-2}\,\mu Hg\,l/s$ 이상의 누설량을 확인할 수 있다[6].

3.2 Dip tube 또는 마우스피스 방법

이 방법은 솔레노이드밸브, 리듀서(레귤레이터) 등과 같이 내부 공간이 액체와 직접 닿으면 안되는 물건을 시험할 때 사용한다. 시험대상물 출구에 고무 튜브를 연결하고 이것을 액체가 담겨진통에 담근다. 액체는 에틸알콜을 사용하여 시험중 외부로부터 습기가 시험대상물로 유입되지 않도록 한다. 규정된 압력을 공급한 상태에서 고무튜브 출구를 통해 기체 방울이 발생하는 것으로누설을 확인할 수 있다. 고무 튜브의 내경은 4~6mm, 길이는 600mm 정도의 것을 사용하며액체에 잠기는 튜브의 깊이는 10mm를 넘지 않는 것이 좋다[5]. 이 방법으로는 1 $\mu Hg \, l/s$ 이상의 누설량을 확인할 수 있다.

그림 1의 방법 1은 가스 방울의 개수와 시간을 측정하여 누설량을 확인하며, 방법 2와 3은 보다 정확한 누설량을 확인할 수 있다.

3.3 비눗방울 방법

누설이 발생하는 위치를 확인하고자 하는 부 위에 비눗물을 칠한 다음 요구 압력을 공급한다. 비눗방울이 발생하는 것으로 누설 위치를 확인할



수 있다. 이 방법은 $5 \cdot 10^{-1} \mu Hg \ l/s$ 이상의 누설량을 확인할 수 있다. 비눗물은 중성 비눗물을 사용하며 시험을 끝낸 후 알콜을 적신 천으로 비눗물을 닦아 낸다[5]. 이 방법은 온도가 낮은 극저온 시스템에서는 비눗물이 얼기 때문에 사용이곤란한 단점이 있다.

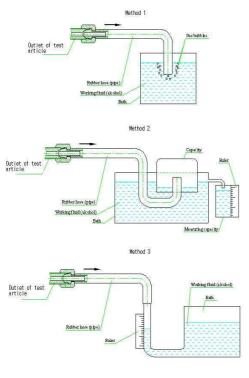


그림 1 Dip tube 방법[5]

3.4 압력 저하를 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 $1 \cdot 10^{-1} \mu Hg \ l/s$ 이상의 누설량을 확인할 수 있다[6]. 이 방법은 누설의 정도는 파악할 수 있으나 누설의 위치를 파악할 수는 없다.

3.5 탐지 가스를 이용하는 방법

하드웨어에 탐지 가스(tracer gas)를 공급한 상 태에서 mass spectrometer를 이용하여 누설을 확 인한다. 이 방법은 $1.36 \cdot 10^{-7} cm^3/s$ 이상의 누설 량을 확인할 수 있다[6]. 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 그림 2의 왼쪽 그림과 같이 확 인을 할 수 있으며, 전체 누설량을 측정할 때에 는 오른쪽 그림처럼 시험대상물을 통 안에 넣고 헬륨을 공급한 상태에서 탐지기를 이용하여 누설 량을 측정한다.

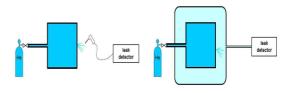


그림 2 탐지 가스를 이용한 기밀 시험법; 왼쪽은 누설 위치를 파악할 수 있는 sniffer 방법, 오른쪽은 총누설량을 알 수 있는 방법[1]

헬륨을 탐지 가스로 사용하는 이유는 다음과 같은 특성을 가지고 있기 때문이다[1].

- 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.

이외에도 헬륨은 비등점이 매우 낮기 때문에 극저온을 사용하는 시스템에서 액체 수소와 접촉 을 하여도 액화가 되지 않기 때문에 액체수소를 추진제로 사용하는 발사체 기밀시험에 많이 사용 하다.

헬륨 누설 탐지기는 매우 정밀한 측정기로서 내부에 calibrated leak라고 하는 일정한 누설을 발생시키는 작은 헬륨 탱크가 장착되어 있어서 시스템 작동 시 매번 자체 보정을 수행한다. 아 울러 sniffer probe를 사용하기 위해서는 이것을 보정하기 위한 calibrated leak 도 있어야 하며, 이것을 sniffer에 연결하여 시스템을 보정한 후에 사용한다.







그림 3 Helium Calibrated Leak

4. 발사체 추진시스템의 기밀시험

발사체의 추진시스템은 엔진, 추진제 탱크, 추진제 가압시스템, 추진제 충전/배출 시스템 등으로 구성이 된다. 발사체의 기밀은 연소시험 혹은 발사 전에 수행하는 공압시험(pneumatic test)을 수행하는 과정 중에 확인한다. 나로우주센터에는 발사체의 공압시험을 위한 압축가스 공급시스템이 구축되어 있으며 이 시스템은 발사대에 있는 엄비리컬 장치를 모사하는 수동체결장치를 통해 발사체의 하부를 통해 가스 배관이 연결이 된다. 발사체의 몸통에는 각종 점검 포트가 있으며 여기는 플렉시블 호스를 통해 압축가스 공급시스템과 연결된다.

수동체결장치를 통해 18개, 플렉시블 호스를 통해 48개가 그림 4, 5와 같이 연결이 되어 시험 조건에 따라 공기, 질소 그리고 헬륨을 공급한다. 발사체를 연결하기 전 압축가스 공급시스템 자체의 기밀은 압력저하법 그리고 비눗방울법을 이용하여 확인한다. 작동 압력에서 10분간 압력 저하가 없는 것을 누설이 없는 것으로 판단하며 누설이 있으면 연결부에 대하여 비눗방울법을 이용하여 누설부위를 찾아 누설을 제거한다. 이러한 방법으로 압축가스 공급시스템에 대한 기밀을 확인하였어도 미세한 누설은 확인이 안 되기 때문에 마지막으로 헬륨 누설 탐지기에 sniffer를 연결하여 누설부위를 찾아 누설을 제거한다. 압축가스 공급시스템의 기밀이 중요한 이유는 시험장치에

서 헬륨 누설이 발생하면 발사체 공압시험 중에 발사체에서의 누설을 탐지하기 어렵기 때문이다.



그림 4 발사체에 연결된 플렉시블 호스





그림 5 발사체와 수동체결장치(산화제부)

발사체와 수동체결장치와의 기밀은 압력저하 법과 dip tube 방법으로 확인하며, 누설 조건이 큰 곳에서는 dip tube 방법 후에 로타미터를 이 용하여 누설의 양을 정확히 확인한다. 발사체와 플렉시블 호스와의 기밀은 작동 압력을 가한 상 태에서 5분간 압력 저하가 없는 것을 기준으로 한다.

산화제 탱크와 엔진의 산화제부에 대한 기밀은 산화제 탱크에 공기와 헬륨을 충전한 후에 압력 저하법과 헬륨 누설 탐지기의 sniffer를 사용하여 확인한다. 산화제부에 대한 시험이 끝나면

항공우주기술 제11권 제2호

연료 탱크와 엔진의 연료부에 대한 기밀시험도 비슷한 절차로 수행한다. 추진제 탱크는 크기가 크기 때문에 헬륨을 100%로 채워 시험을 하면 비경제적이기 때문에 헬륨의 농도를 10~15% 정도로 하여 시험을 수행한다. 발사체는 크기가 크므로 한 대의 헬륨 누설 탐지기로 전체를 시험하기 어려우므로 두 대를 운용하고, 시험대상물의 압력이 떨어지면 sniffer를 이용하여 누설부위를 찾아내어 누설을 제거한다.

5. 결 론

누설량의 정의와 누설량에 영향을 미치는 인자를 살펴보았다. 발사체의 누설시험을 하기 위한 가스의 품질조건, 발사체 분야에서 많이 사용하는 기밀시험 방법과 나로호 발사체의 추진시스템에 대한 기밀시험 방법과 절차를 살펴보았다.

참 고 문 헌

- K. Zapfe, Leak detection, Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany, 2007
- Yu. Ivanchikova, et al., Technical specification - Valves of liquid propulsion system for subsystem of oxidizer supply and pressurization subsystem, Yuzhnoye SDO, 2008
- 3. Jean-Pierre DeLuca, Helium-High Cost, Limited Supply: The Facts and Solutions for Leak Testing, 2008 May/June, Gases & Instrumentation
- Caesar Mak, et al., Hydrogen-Helium leak Detection at Elevated Pressure and Low Temperatures, AIAA Journal Vol. 47, No. 5, May 2009
- KA-103 Compressed Gases Supply System Technical Requirement, KARI, 2008
- 6. V. N. Kuchkin, et al., Report on work

performed on subject B1 part B under contract No. KARI-00-14, NIIchimMash, 2000