추진제 탱크 가압용 솔레노이드 밸브 개발 시험

김병훈*† · 고현석* · 권오성* · 한상엽*

The Solenoid Valve Development Tests for Propellant Tank Pressurization System

Byung-Hun Kim*† · Hyeonseok Koh* · Oh-Sung Kwon* · Sangyeop Han*

ABSTRACT

The actuation and leakage tests of solenoid valve for propellant tank pressurization system have been conducted. The response time of solenoid valve manufactured is satisfactory to perform requirement. However, leakage was found at the upper part seat of relief valve inside solenoid valve. Solenoid valve was disassembled in order to discover leakage causes. We found out that the upper seat of relief valve was damaged. Through this study, the development possibility of propellant tank pressurization solenoid valve was confirmed.

초 록

추진제 탱크 가압 시스템 적용을 위한 솔레노이드 밸브를 제작하여 작동시험 및 기밀시험을 수행하였다. 시험 결과 제작된 모든 밸브에서 작동 시간은 밸브 성능 요구 조건을 만족하고 있다. 그러나 기밀시험 결과 솔레노이드 밸브 내부에서 일부 누설이 있는 것을 발견하였다. 솔레노이드 밸브 분해를 통해 누설은 용접에 의한 Seat면의 손상이 주요 원인이라는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 추진제 탱크 가압용 솔레노이드 밸브 개발 가능성을 확인하였다.

Key Words: Solenoid Valve(솔레노이드 밸브), Pressurization System(가압 시스템), Pressurant(가압제), Leak Test(기밀시험)

1. 서 론

액체 추진기관에서는 추진제 탱크에 저장되어 있는 추진제를 엔진에 공급하여, 엔진에서 추진제 연소를 통해 생성된 고온 고압의 연소가스를 노즐을 통해 배출함으로써 원하는 추력을 얻게 된다. 이와 같이 추진제 탱크에 저장되어 있는 추진제를 엔진에 공급하기 위해서는 추진제 탱크를 설계 조건에 맞추어 가압하여 추진제를 엔진부에 공급할 수 있어야 한다.

일반적으로 액체 산소와 같이 극저온 추진제를 사용하는 액체 추진기관에서는 발사체 시스템의 무게를 줄이기 위해 가압제를 저장하는 고압의

* 한국항공우주연구원
† 교신저자, E-mail: bhk@kari.re.kr

탱크를 극저온 추진제 탱크 내부에 배치하여 가압제 탱크의 부피를 줄이는 방법을 사용한다. 이때 극저온 고압 상태로 저장된 가압제는 필터, 감압 모듈, 열 교환기, 디퓨져 등을 통해 추진제 탱크로 공급되어 추진제가 탱크에서 배출되는 동안 추진제 탱크 압력을 설계 조건에 맞게 유지한다.

추진제 탱크 가압 시스템에서 극저온 고압으로 저장되어 있는 가압제를 추진제 탱크에 공급하기 위해서는 가압제 공급을 제어할 수 있는 밸브가 필요하며, 이러한 것 중 가장 일반적인 것이 솔레노이드 밸브이다. 솔레노이드 밸브를 이용한 탱크 가압제어 시스템은 Saturn IC 연료 탱크 가압 시스템, Ariane 5 LOX 탱크 가압 시스템 및 KSLV-I 1단 탱크 가압 시스템에서 성공적으로 사용되었다. 특히 몇 개의 솔레노이드 밸브를 병렬로 연결하여 가압 제어 시스템을 구성할 경우 특정 밸브 오작동에 의한 전체 가압 시스템의 손상을 방지할 수 있어 신뢰성을 높일 수 있는 것으로 알려져 있다[1,2].

본 연구에서는 솔레노이드 밸브를 이용한 추진제 탱크 가압 시스템에 필요한 솔레노이드 밸브를 제작하여 밸브의 작동 시험 및 기밀시험 결과를 정리하였다.

2. 솔레노이드 밸브 규격 및 형상

Figure 1 및 Table 1은 현재 개발하고 있는 솔레노이드 밸브 형상 및 규격을 보여준다. 솔레노 밸브의 작동 압력 범위는 20 ~ 230bar로 가압제가 충전되어 있는 탱크 압력 범위를 만족하도록 설계되었다. 밸브의 작동 온도는 70 ~ 300K이며, 유량 계수는 2.0 정도이다.

초기에 솔레노이드 밸브는 Fig. 1에서 보는 것과 같이 메인 스프링과 Pilot Cavity 압력에 의해 닫혀 있다. 솔레노이드에 전기가 공급되며, 자화된 Armature가 Rod를 밀어 orifice 1을 막고, 이때 Pilot Cavity에 있던 압력이 orifice 2를 통해 빠져나가면서 메인 밸브가 이동하면서 유로가 개방되는 구조이다. 밸브가 닫히는 경우는 이와 반대의 과정을 거치게 된다.

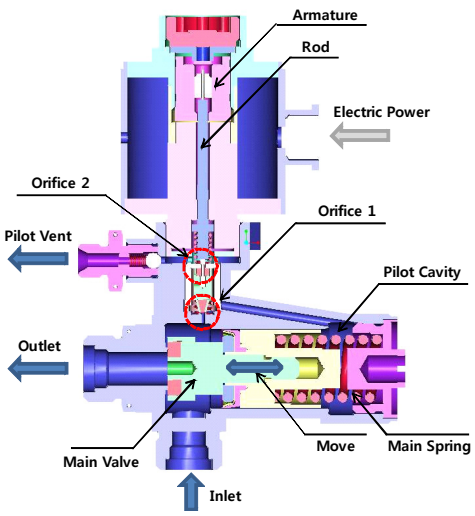

Fig. 1 Solenoid Valve Section View

Table 1 Design Specification

항목	규격
입, 출구 크기	12mm
초기 상태	N.C
운용 압력	20 ~ 230bar
운용 온도	70 ~ 300K
유량 계수 (Cv)	2.0 내외
반응 시간	0.25sec 이내
정격 전압	28±4Volt

3. 시험 결과

3.1 솔레노이드 밸브 작동 시간

솔레노이드 밸브 개발에 있어 솔레노이드에 전기적 신호를 인가 후 밸브의 반응 특성을 확인하는 것은 매우 중요하다.

제작된 솔레노이드 밸브의 작동 및 반응 특성을 확인하기 위해 시험 장치를 Fig. 2와 같이 구성하였다. 시험에서 밸브의 작동 시간은 솔레노이드 밸브에 전기 신호가 인가 된 후 밸브 후단 압력센서의 신호가 변하는 시간까지로 정의하였으며, 밸브의 작동시간 솔레노이드 밸브를 5회 작동시킨 후 마지막 3회의 평균 시간을 사용하

였다.

Figure 3은 제작된 솔레노이드 밸브의 작동 시간 측정 결과를 보여준다. 시험 압력은 최대 120bar까지로 추후 시험 설비를 보강하여 운용 압력인 230bar 시험을 수행할 계획이다. 시험 압력 범위에서 솔레노이드 밸브의 작동 시간은 모두 요구 규격인 0.25sec 이내를 만족하고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 밸브의 작동 시간은 솔레노이드 밸브 전단에 작용하는 압력 20bar 이하에서 급격히 변하는 것을 확인할 수 있다. 특히 On Time의 경우 솔레노이드 밸브의 설계 압력 이하인 약 8bar에서 밸브의 작동 시간이 0.25sec를 넘어 더욱 낮은 압력에서 밸브가 열리지 않는 것을 확인하였다. 이러한 시험을 통해 제작된 솔레노이드 밸브는 정상적으로 설계 제작된 것을 확인하였다.

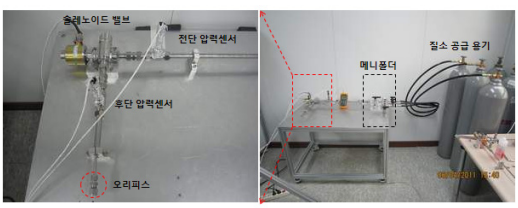

Fig. 2 Solenoid Valve On/Off Test Setup

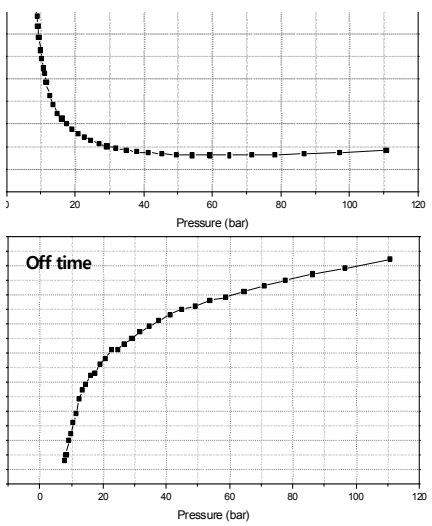

Fig. 3 Solenoid Valve On/Off Time

3.2 기밀시험

제작된 솔레노이드 밸브의 누설 량 및 누설 위치를 확인하는 것은 본 밸브 제작의 핵심 목표 중에 하나이다. 이를 통해 추후 설계 변경 필요성 및 개선 사항을 확인할 수 있기 때문이다. 본 솔레노이드 밸브는 극저온에 사용할 수 있는 용도로 개발되고 있다. 그러나 현재 단계에서는 우선 상온에서 밸브의 누설 위치 및 누설 량을 확인할 수 있도록 하였다.

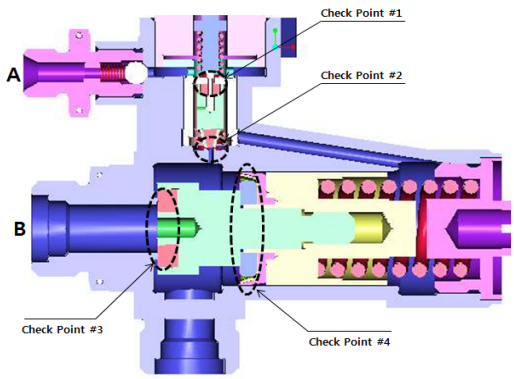

Fig. 4 Solenoid Valve Leak Test Check Point

Figure 4는 제작된 솔레노이드 밸브의 누설 가능 위치 즉 솔레노이드 밸브 내에서 구동 부분을 보여준다.

솔레노이드 밸브의 누설 량은 누설되는 위치에 따라 그림에서 보는 것과 같이 A, B에 튜브를 연결하여 다른 한쪽 끝을 수조에 담근 후 누설되는 가스를 비이커로 포집하는 방식을 사용하였다.

기밀시험 결과 check point #2, 3, 4에서는 제작된 모든 밸브에서 누설이 없거나 누설 량이 매우 작은 것을 확인하였다. 그러나 check point #1에서는 제작된 5개의 밸브 중 2개에서 누설 량이 설계규격 0.5cm^3/sec를 넘는 것을 확인하였다. 특히 Fig. 5에서 보는 것과 같이 고압 보다는 저압에서 누설 량 크게 나타났다. 고압에서 밸브 누설 량이 감소하는 이유는 밸브 구조 상 고압에서 Seat를 밀어주는 힘이 증가하기 때문이다.

Check point #1에서 누설 원인을 확인하기 위해 제작된 밸브를 분해하여 seat면을 확대경을 이용하여 분석하였다. 확인 결과 check point #1에서 누설 원인은 Fig. 6에서와 같이 seat면이 손상되었기 때문이다. 이러한 Seat면의 손상은 밸브 조립 과정 시 용접에 의한 과도한 열이 Seat면으로 전달되었기 때문이다.

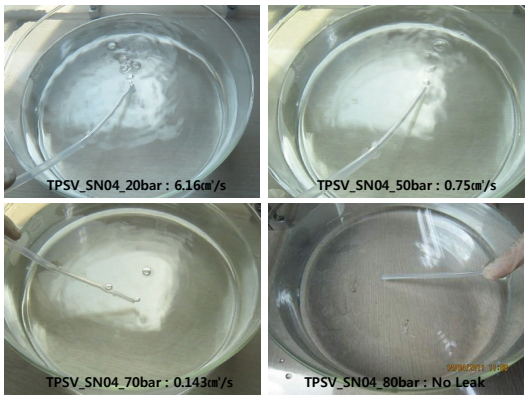

Fig. 5 Leak Test Result (@Check Point #1)

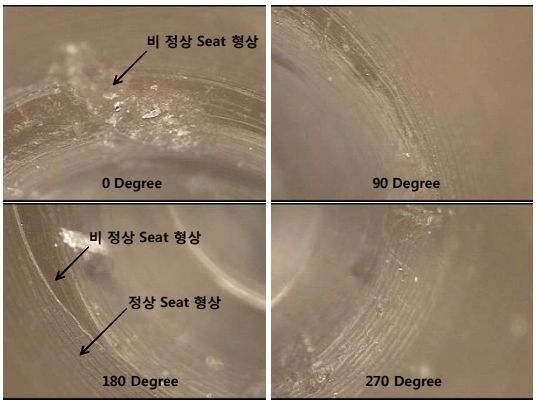

Fig. 6 Enlarge View of Seat Face

4. 결 론

추진제 탱크 가압용 시스템에 필요한 솔레노이드 밸브의 시제품을 제작하여 밸브 작동 시험 및 기밀시험을 수행하였다. 시제품 시험 결과 밸브의 작동 시간은 성능 요구 조건 만족하고 있다. 또한 밸브 누설 량은 대부분의 위치에서 규격을 만족하고 있지만 일부 위치에서 규격을 벗어나는 누설이 발견되었다. 제작된 솔레노이드 밸브 분해 결과 이러한 누설은 용접 과정에서 밸브 면의 손상이 주요 원인인 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 탱크 가압 시스템에 필요한 고압 솔레노이드 밸브의 개발 가능성을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. Gabriel Dussollier, Alain Teissier, "Ariane 5 main stage oxygen tank pressurization", AIAA 93-1969
2. Saturn V launch vehicle flight evaluation report AS-508 apollo 13 mission, MPR-SAT-FE-70-2, 1970