

인공위성용 추진제/가압제 Fill/Drain 밸브 개발

김수겸*, 유명종**, 이균호***, 최준민****

Development of Propellant/Pressurant Fill/Drain Valve for Spacecraft

Su-Kyum Kim*, Myoung-Jong Yu**, Kyun-Ho Lee***, Joon-Min Choi****

Abstract

The KOMPSAT program is carrying out successfully in spite of the short domestic space development history, but there are still many difficulties in Koreanization of most core parts. Because the development of core parts is essential to participate in the advanced nations in space area based on the mid-long term national space program, KARI has carried out development of Fill/Drain valve for propellant/pressurant supply of satellite, which has high possibilities to be koreanized, with Hanwha Corp..

This paper summarizes overall processes of development including design, manufacturing and test, and finally 4 sets of modules were successfully made. Also the satisfaction of performance requirements are verified through acceptance tests.

초 록

짧은 국내 우주개발의 역사 속에서도 현재 다목적실용위성 개발사업을 성공적으로 수행하고 있으나 대부분의 핵심부품들에 대해서는 국산화 개발을 시도조차 하지 못하고 있는 실정이다. 중장기 국가우주개발 계획에 따라 향후 우주선진국으로의 진입을 위해서는 핵심부품 국산화 개발은 필수적으로 이루어져야하므로 한국항공우주연구원 다목적위성사업단에서는 (주)한화화과 더불어 상대적으로 국산화 접근의 가능성이 높은 추진제/가압제 공급용 Fill/Drain 밸브의 개발을 수행하였다.

본 논문에서는 설계, 제작 및 시험에 걸쳐 Fill/Drain 밸브 개발의 전 과정을 요약하였고, 이 과정을 통해 총 4세트의 개발모형을 국산화 하는데 성공하였으며 인수 시험을 통해 성능 요구조건을 충분히 만족함을 확인하였다.

키워드 : 추진시스템(propulsion subsystem), Fill/Drain 밸브(Fill/Drain valve), 밀봉(seal)
인수 시험(acceptance test)

1. 서 론

짧은 국내 우주개발의 역사 속에서도 지난 10

여 년간 수행된 다목적실용위성 개발사업을 통해 추력기(thruster chamber assembly)와 이중추력기 모듈(dual thruster module)과 같은 핵심적인

* 위성 열/추진그룹/skim@kari.re.kr
*** 위성 열/추진 그룹/khlee@kari.re.kr

** 위성 열/추진그룹/mjyu@kari.re.kr
**** 위성 열/추진그룹/jmchoi@kari.re.kr

추진시스템 부품에 대해서는 성공적으로 국산화를 이룩하였다. 그러나 수익성이 미미한 국내 우주산업의 특성상 대부분의 핵심부품들에 대해 국산화 개발은 시도조차 하지 못하고 있는 실정이다. 더욱이 선진국들의 전략부품에 대한 엄격한 수출 통제로 인해 해당부품들의 수입 또한 쉽지 않으므로 단순 분해 및 역설계를 통한 연구는 거의 어려운 실정이다. 따라서 기존의 다목적실용위성 개발에서 확보된 자료와 경험을 바탕으로 새로운 설계 및 제작, 시험의 수행을 통해 국산화 개발을 달성해야 한다. 중장기 국가우주개발 계획에 따라 향후 10개 우주선진국으로의 진입을 위해서는 핵심부품에 대한 국산화 개발은 필수적 이므로 한국항공우주연구원 다목적위성사업단에서는 (주)한화화과 더불어 상대적으로 국산화 접근의 가능성이 높은 추진제 및 가압제 공급용 Fill/Drain 밸브의 개발을 수행하였다. 이때 국산화 가능성의 여부 및 기술적 타당성을 검증하기 위해 실제 우주에서 사용할 수 있는 비행모델 (flight model, FM)급보다는 다소 요구조건이 완화된 개발모델(development model, DM)급으로 개발 요구조건을 설정하였다[1].

본 논문에서는 설계, 제작 및 시험에 걸쳐 Fill/Drain 밸브 개발의 전 과정을 요약하였고 이 과정을 통해 총 4세트의 개발모델을 국산화 하는데 성공하였으며 인수 시험을 통해 성능 요구조건을 충분히 만족함을 확인하였다[2].

2. 본 론

2.1 Fill/Drain 밸브

Fill/Drain 밸브는 인공위성의 추진계 부분에 장착되어 추진제와 가압 기체의 충전 및 배출을 담당하는 부품으로 각각 1개씩 총 2개가 모듈형태로 장착된다. 이러한 Fill/Drain 밸브는 그림 1에 나타나는 것처럼 기계식으로 작동되는 포핏 (poppet)이 연료공급 배관에 접속되는 방식으로 구성되고, 이때 밸브 하나로 대상 유체를 충전 또는 배출할 수 있는 구조를 갖고 있다. 또한 추

진제와 가압제의 누설을 방지하기 위해 3중 밀봉 시스템으로 구성됨으로써 만일의 누설사고에 대비할 수 있도록 되어 있다.

Fill/Drain 밸브는 배관과 포핏이 만나는 금속면 사이의 1차 밀봉(primary seal)의 형상에 따라 disk 또는 ball type의 2가지로 구분할 수 있다. 그림 2는 미국 OEAA사에서 제작한 밸브의 단면형상으로서 disk type의 밀봉을 사용하고 있으며, 그림 3은 ball을 이용해 밀봉하는 미국 Vacco 및 Moog사의 밸브 단면형상을 보여주고 있다. 다목적실용위성 1호에서는 그림 2와 같은 disk type의 밀봉 방식의 밸브가, 2호에서는 그림 3과 같이 ball을 이용한 밀봉 방식의 밸브가 각각 사용되었다[3-5].

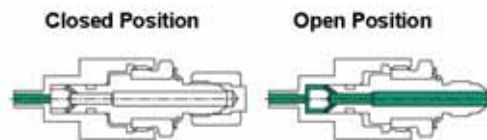


그림 1. Operating Configuration of Fill/Drain Valve

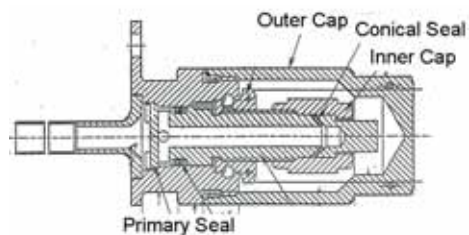


그림 2. Fill/Drain Valve using Disk Type Primary Seal

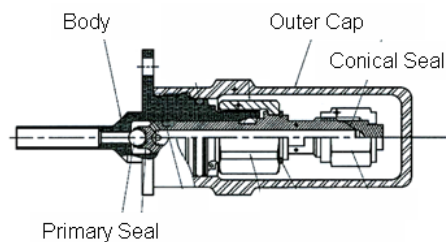


그림 3. Fill/Drain Valve using Ball Type Primary Seal

2.2 Fill/Drain 밸브의 설계

2.2.1 내부 구조 및 형상 설계

그림 4는 다목적실용위성 2호에서 사용된 미국 Vacco 사의 밸브로 ball을 이용한 밀봉방식



그림 4. Configuration of KOMPSAT-2 Fill/Drain Valve

을 사용하고 있으며, 수많은 우주개발 프로그램에 사용됨으로써 성능이 검증된 부품이다. 이 밸브를 기본 모델로 항우연/(주)한화에서는 그림 5와 같이 크게 body, ball & stem, outer-cap의 세부분으로 구성되는 Fill/Drain 밸브를 공동으로 국산화 개발하였다. 이때 stem에는 adjust nut, conical seal과 함께 tube cap assembly가 연결되어 있으며 밀봉(sealing)은 ball, o-ring, outer-cap의 3중 장치로 엄격하게 이루어지도록 설계하였다.

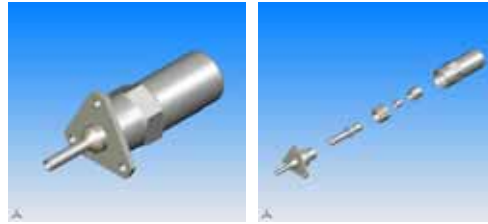


그림 5. Schematic of Fill/Drain Valve Development Model

표 1. Specification of Fill/Drain Valve

| | DM | FM |
|--------------------------|--|--|
| Service Fluid | N ₂ H ₄ (or DIW), GN ₂ , GHe | N ₂ H ₄ , GN ₂ , GHe |
| Inlet size, inch | 1/4 | 1/4 |
| Line size, outlet, inch | 1/4 X 0.020 | 1/4 X 0.016 |
| Operating Pressure, psig | 0 ~ 400 | 0 ~ 400 |
| Proof Pressure, psig | 600 500(outer cap) | 1000 750(outer cap) |
| Burst pressure, psig | 800 | 1600 |
| Rated Flow Rate | 5lb/min DIW 0.005lb/min GHe | 10lb/min N ₂ H ₄ 0.01lb/min GHe |
| Pressure Drop, psig | 32 at rated DIW flow 2 at rated GHe flow | 16 at rated N ₂ H ₄ flow 1 at rated GHe flow |
| Max Weight, lbm | 1.0 | 0.60 |
| Body Material | 304L | 304L |
| Leakage | not exceeding 1X10 ⁻³ scc/sec GHe at operating pressure not exceeding 1X10 ⁻⁵ scc/sec GHe at operating pressure (outer cap) | not exceeding 1X10 ⁻⁶ scc/sec GHe at operating pressure not exceeding 1X10 ⁻⁶ scc/sec GHe at operating pressure (outer cap) |
| Cycle life | 30 opening and closing cycles | 150 opening and closing cycles |

2.2.2 설계 및 성능 요구 사항

Fill/Drain 밸브의 요구조건을 개발모델급과 비행모델급으로 나누어 표 1에 제시하였다. 밸브는 표 1의 작동압력(operating pressure) 범위에서 요구되는 밀봉기능을 유지하여야 하며 600psig의 내압력(proof pressure)에 노출된 후에도 성능 요구조건을 만족해야 한다. 마찬가지로 outer cap도 검증압력인 500psig에서 성능 요구조건을 만족시켜야 한다. 또한 표 1에서 제시된 유량 조건에서 최대 압력 강하치를 초과하지 않아야 한다.

누설시험의 경우 포뿔이 닫힌 상태에서 밸브 출구부가 대기압부터 표 1의 작동압까지 가압되었을 때 밸브 외부로의 누설이 1×10^{-3} scc/sec GHe를 초과하지 않아야 하며, 외부 캡까지 가압될 경우에는 1×10^{-5} scc/sec GHe를 초과하지 않아야 한다. 청정도 검증시험은 IPA(Isopropyl Alcohol, TT-I-735A) 혹은 DIW(De-Ionized, distilled and filtered Water)를 공급유체로 사용하여 밸브를 통과시킨 후 샘플을 채취하여 요구조건에 상응하는지를 분석해야 한다. 또한 포뿔이 최소 30회의 개폐 사이클을 거친 후에도 성능 요구조건을 만족시켜야 한다. 밸브는 포뿔을 포함하여 수작업에 의해 유로 개폐가 가능하여야 하고 하우징, 3중 밀봉장치, 설치 접속부(mounting provisions)로 구성되어야 하며, 유체의 유출입 및 밸브 설치 접속 조건에 맞게 설계, 제작, 조립되어야 한다. 밸브의 최대 중량은 표 1에 나타나있으며 DIW, IPA, 질소, 헬륨 등의 시험용 유체와 재질 호환성을 가져야 한다[3,6].

2.3 Fill/Drain 밸브의 제작 및 시험

2.3.1 밸브 제작 및 조립

표 1의 성능 요구조건들을 만족하도록 설계를 마친 Fill/Drain 밸브에는 추진제에 의한 부식 및 산화 방지를 위해 텅스텐 카바이드, STS 15-5 PH, 티타늄 재질, NITRONIC 60, SUS 304L 등이 사용되었으며, 이렇게 만들어진 실제 제품들은 그림 6과 같다. 그림 7은 제작된 총 8개의 밸브

를 보여주고 있고, 이를 각각 2개의 밸브를 사용해 모듈화함으로써 최종적으로 완성된 총 4세트의 모듈이 그림 8에 나타나 있다.



그림 6. Fill/Drain Valve Components and Configuration



그림 7. Final Valve Assembly Configuration



그림 8. Configuration of Developed Fill/Drain Valve Module

2.3.2 인수 시험 및 결과 분석

인수 시험은 설계된 Fill/Drain 밸브의 성능 검사와 검수통과를 검증하기 위해 수행된다. 시험 결과는 표 1에 제시된 성능 요구조건을 만족해야 하며, 밸브의 시험과정에서 inner cap, outer cap, seal 등의 연결부위를 체결 및 분리할 때에는 규정된 토크와 토크 핸들링을 공통적으로 적용하여야 한다.

우선 도면상의 치수, 표기, 재료 등의 모든 조건을 육안검사 및 측정검사를 통하여 외부 상태 검사를 수행해야 하며, 이때 모든 사항이 도면과 일치하여야 한다. 중량은 연료가 주입되지 않은 건조 상태에서 측정되어야 하며, 0.001kg 스케일에서 측정하여야 한다. 그리고 밸브의 중량은 0.454kg(1.0lb)을 초과하지 말아야 한다. 중량측정을 위한 장비는 그림 9에 나타나 있다. 내압력 검증시험을 위해 그림 10에 제시된 시험장비를 사용하여 내압력 검증시험과 누설시험을 수행하였다(그림 11, 12). 마지막으로 밸브의 청정도 시험은 DIW를 작동유체로 이용하고, automatic particle counter를 통해 청정도를 측정하였다. 밸브 조립체는 양방향에 대하여 모두 DIW를 주입하는데, 역방향을 먼저 순방향에 나중 실시하며, 측정은 순방향 주입에 대해서만 실시한다. 또한 청정도의 검증을 위하여 백라이트 검사를 실시한다.

인수 시험은 먼저 육안검사 및 측정검사를 통해 형상, 표기 및 오염, 균열과 같은 표면상태를 확인하였으며, 그 결과는 모두 양호하였다. 중량은 허용 중량의 반인 약 0.220kg(0.48lb)이 측정되었다. 비행모델급의 중량 허용 범위는 0.272kg(0.6lb)로 중량 요구조건을 충분히 만족함을 알 수 있다. 내압력 검증시험에서는 inner cap, outer cap, main seat 등을 규정된 토크로 조인 후 가압시험을 수행하였으며, 시험결과는 표 2에 나타난 것과 같이 양호한 것으로 확인되었다. 하지만 누설시험 결과 main seat에서 허용 한계치를 초과하는 누설이 측정되었는데 원인을 분석한 결과 배관부의 포핏과의 접촉면이 재질 등의 문제로 정밀하게 가공되지 않아 1차

밀봉이 완전하게 이루어지지 않은 것으로 판명되었다. 이를 해결하기 위해 접촉면의 표면처리 작업을 수행함으로써 이를 보완하였고 표면처리 후에는 양호한 결과를 나타내었다. 인수시험 결과는 표 2에 정리되어 있다.

4. 결 론

현재 국산화 개발을 완료한 인공위성 연료 주입용 Fill/Drain 밸브는 비록 비행모델급보다 완화된 개발모델급 성능 요구조건을 만족하였지만, 이를 통해 비행모델용 밸브도 충분히 국산화 가능성이 높다고 판단되며, 기술적으로도 접근이 용이함을 확인할 수 있었다. 또한 이러한 개발경험은 다른 비국산화 품목의 국산화에 대해서도 활용될 예정이다.

향후 비행모델용 Fill/Drain 밸브를 개발하기 위해서는 더 정밀한 가공/측정 기술과 성능평가시험이 필요하며, 동시에 추진제에 적합한 소재 개발 및 제작 타당성에 대한 깊은 연구가 수행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. 김정수, 이균호, 한조영, 장기원, 최진철, “저궤도 관측위성용 구조 및 열 개발 모델 추진 시스템의 설계 및 제작”, 한국항공우주학회지, 제31권, 제8호, 2003, pp.115-124
2. (주)한화 추진제 주입용 서비스 밸브 모듈 End Item Data Package, 2004
3. KOMPSAT-2 Equipment Specification, Fill/Drain Valve, Propulsion System Standard Component, 2001
4. <http://www.moog.com>
5. <http://www.vacco.com>
6. 다목적 실용위성 2호 추진계 개발(V) 제 5차년도 연차 보고서, 2004

표 2. Result of Fill/Drain Valve Test

| | DM spec | Result |
|-------------------------|---|---|
| Service Fluid | N ₂ H ₄ (or DIW), GN ₂ , GHe | N ₂ H ₄ , GN ₂ , GHe |
| Inlet size, inch | 1/4 | ≈1/4 |
| Line size, outlet, inch | 1/4 X 0.020 | ≈1/4 X 0.020 |
| Burst pressure, psig | 800 | 800 |
| Rated Flow Rate | 5lb/min DIW, 0.005lb/min GHe | O.K |
| Pressure Drop, psig | 32 at rated DIW flow, 2 at rated GHe flow | O.K |
| Max Weight, lbm | 1.0 | ≈0.48 |
| Body Material | 304L | 304L |
| Leakage | not exceeding 1X10 ⁻³ scc/sec GHe at operating pressure(w/o outer cap) not exceeding 1X10 ⁻⁵ scc/sec GHe at operating pressure(with outer cap) | O.K |
| Cycle life | 30 opening and closing cycles | O.K |



그림 9. Measuring Valve Weight



그림 10. Pressure Test Equipment



그림 11. Pressure Test



그림 12. Leakage Test Equipment