

산화제 개폐밸브의 극저온 유동시험에서 채터링의 고찰

이중엽*, 한상엽**, 이수용***

A Study on the Chattering under Cryogenic Flow Test of a Oxidizer Shutoff Valve

JoongYoup Lee*, SangYeop Han**, SooYong Lee***

Abstract

The oxidizer shutoff valve of a gas generator controls the mass flow rate of the propellant of a rocket engine using pilot pressure and spring the force of the valve. The developing oxidizer shutoff valve can be shut off if the pilot pressure is removed from the actuator. Therefore, force balancing is necessary to analyze the characteristics of the forces with respect to the opening and closing of the valve in order to evaluate its performance. In light of this, the valve has been designed to adjust the control pressure required to open the poppet and to determine the working fluid pressure at which the valve starts to close. Under cryogenic flow test as a tests level of C.R.T(Control Random Test), the chattering phenomena occurred due to much leakage of a metal seat section. The pressure for chattering of the oxidizer valve is predicted at about 11 bar using force balancing analysis.

초 록

가스발생기용 산화제 개폐밸브는 파일럿 공압으로 포핏을 열고 스프링 힘에 의해 닫음으로써 로켓엔진의 추진제 유량을 제어한다. 현재 개발 중인 산화제 개폐밸브는 액추에이터에서 압력을 제거하면 닫히도록 설계되어 있다. 그러므로 밸브의 성능을 평가하기 위해 밸브가 열리고 닫히는 특성에 따라 힘 평형 상태를 분석할 필요가 있다. 밸브가 닫히기 시작하는 시점의 작동 유체의 압력을 결정하고, 포핏이 열리는 시점의 압력을 결정되어 힘평형이 설계되어 있다. 인증시험 수준에서의 극저온 유동 시험 하에서 채터링 현상은 금속 기밀부에서 다량의 누설이 발생했다. 힘평형 계산을 이용한 산화제 밸브의 채터링이 발생된 시점의 압력은 약 11 bar로 예측 된다.

키워드 : Oxidizer shutoff valve(산화제 개폐밸브), Chattering(채터링), Force balance (힘 평형), Leakage(누설)

접수일(2013년 8월 28일),
* 공급계통팀/leejy@kari.re.kr

수정일(1차 2013년 10월 18일),
** 공급계통팀/syhan@kari.re.kr

게재 확정일(2013년 11월 1일)
*** 발사체엔진실/sylee@kari.re.kr

1. 서 론

산화제 개폐밸브는 발사체 추진기관의 엔진공급계 구성품으로서 극저온 유체인 액체 산소의 차단과 개방을 목적으로 한다. 한국형발사체를 위해 개발 중인 액체로켓 엔진은 개방형 가스발생기 엔진이다. 가스발생기는 터보펌프의 터빈을 회전시켜 축회전력을 생성하고, 발생된 회전수와 회전력을 이용하여 각 펌프로 토크를 전달하는 방식을 이용한다. 회전체 펌프에서 토출된 추진제의 유동의 개폐를 통해 연소기의 점화와 연소를 유발한다. 정상상태의 주추력이 형성되면 밸브 자체의 요구도에 따라 비정상적으로 단힘을 막고 시퀀스의 신호에 의해 단힐 수 있도록 밸브의 역할을 수행하게 된다. 또한 극저온 추진제를 사용하는 밸브는 고압의 산화제를 안정하게 개폐할 수 있어야 하며, 밸브의 내부 및 외부누설이 엄격히 요하는 기술적 특징을 보인다.

그림 1은 본 논문에서 고찰하고자하는 산화제 개폐밸브의 개략도이다. 밸브구동용 파일럿압력은 파일럿 포트에 입력되고, 벨로우즈 액추에이터가 압축 되면서 로드(Rod)와 포핏(Poppet)이 그림의 위 방향으로 상승하게 된 후 포핏이 개방된다. 이때 밸브구동압력은 스프링 압력과 유체력을 더한 값보다 크다. 따라서 밸브의 포핏이 개방이 개방을 유지하게 되며 동시에 금속 재질의 시트가 닫히게 된다. 로드와 가이드는 밸브의 개폐를 위해 지속적으로 왕복운동하게 되는데, 이 때 일정한 가공공차를 두어 운동 마찰력을 최소화 하도록 한다. 평상시 금속 시트는 닫히기 전 상태이고, 포핏은 시트에 안착되어 있으므로 밸브의 입구와 출구는 폐쇄되어 있다. 따라서 밸브 출구측에서 비정상적인 압력이 발생되더라도 산화제 밸브의 드레인 포트를 통해 배출되도록 한다.

그림 1에서 밸브가 완전히 열리거나 완전히 닫히지 않은 중간 상태에 이르면 입구측으로 입력된 유체가 금속 시트를 통해 드레인 포트에 역류하여 모두 배출하게 된다. 이것은 그림 1의 개폐밸브가 갖는 특징이며 설계 및 제작면에서

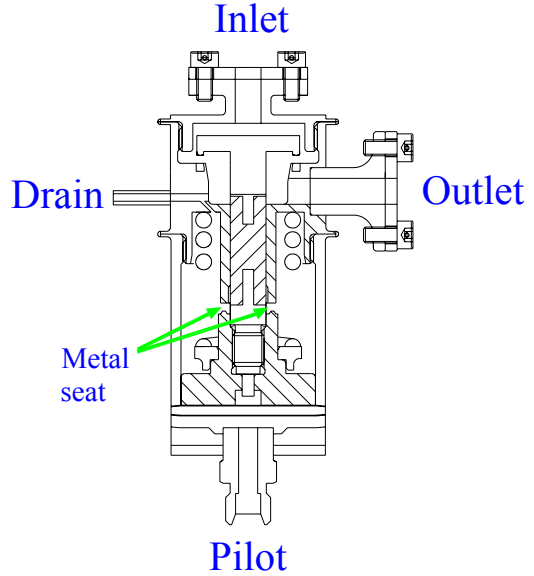


그림 1. 산화제 개폐밸브 형상

주요 설계인자가 된다. 그림 1의 산화제용 밸브는 평상시 단힘 구조로 되어 있으며, 단힘은 스프링 힘에 의해 닫혀 있게 된다. 밸브 전단에 압력이 존재한다면 포핏의 단면적 만큼 힘이 더해져 닫혀 있다.

밸브의 개방을 위해 파일럿 압력이 필요하며, 닫히기 위해서는 파일럿 압력의 반드시 제거되어야만 한다. 즉, 정격압력으로 산화제의 유동이 발생되었을 때 파일럿 압력을 제거하면 밸브는 힘평형 상태가 바뀌는 압력구간에서 닫히게 된다.

밸브는 완전 기밀구조가 아니므로 입구와 출구는 허용하는 요구도 범위 내에서 일정한 누설량을 보여야 한다. 만약 스프링 힘에 대한 설계시, 적절한 여유를 포함하여 제작하지 못한다면 낮은 입구압력으로도 출구측과 드레인 포트를 통해 누설이 발생될 것이다. 밸브구동압력에 의해 완전히 개방되었다면 입구측을 통해 출구측으로 유동이 형성되고 동시에 금속기밀부는 닫히게 되며 허용 누설 범위 안에서 드레인 포트를 통해 극저온 유체가 일부 배출된다.

본 논문에서는 조립시험 단계에서 시제품 밸브를 대기압 액체질소에 담그고 헬륨가압 방법을

이용하여 금속 기밀부에서 발생된 누설 결과를 검토하였다. 진동 시험을 수행한 시제품 밸브의 경우, 기밀부의 손상이 존재했을 것으로 판단되며, 추가 기밀시험 시 진동시험 전보다 더 많은 누설량 결과를 보였다. 그러나 원내 극저온 상사 수류시험 장치를 이용한 기밀 확인 시험에서는 동종의 밸브의 경우, 금속 기밀부의 누설을 확인하지 못했다. 이에 정상 및 비정상 극저온유체를 이용한 수류시험에서는 금속 기밀부에서 누설압력이 형성됨을 최종 확인했고, 채터링의 발생 원인임을 밝히고자 했다. 비정상 수류시험에서는 정상 수류시험 후반에 발생했던 파일럿 압력과 드레인 부의 과도 압력 증가에 대한 원인을 또한 찾고자 했다. 또한 조립시험단계와 극저온 수류 시험에서 발생된 금속기밀부의 누설량은 시제품 밸브의 개발에서 주요 인자임을 확인했고, 수류 시험 당시 드레인 포트에 형성된 누설 압력은 험평형 계산을 통해 예측했다.

2. 본 론

2.1 조립시험 단계의 밸브 누설량 확인 시험

표 1부터 표 2까지는 그림 1의 밸브를 제작 후 조립시험수준에서 수행한 누설량 측정 결과이다. 시험방법은 대기압의 액체질소를 이용하여 해당 시제품 밸브를 담그고 밸브 내부로는 기준 압력의 헬륨을 입력하여 출구측의 누설량을 측정하는 정량화 방법(Aquarium method)을 이용하였다. 비록 누설량 본래 요구도는 상온 기밀 시고압 공기를 이용하고, 극저온 누설 시험 시 사용유체인 액체산소를 실제로 입력하여 시험을 수행하도록 되어 있으나, 조립시험 단계에서는 원하는 유량과 압력을 생산하는 시험설비가 없다. 따라서 극저온 시제품 밸브는 상온 및 극저온기밀 시험의 경우, 상온의 공압 요구도에 의거하여 시험기체를 달리 한 헬륨을 이용했다. 특히 헬륨과 액체질소를 이용한 조립시험에서 헬륨을 대신하여 기체산소를 가압하여 사용할 경우, 가압과 동시에 액체 상태로 정제되므로 발생된 누설량을 파악하기 까다롭다. 사용 기체가 헬륨인 관계로 실

표 1. 진동시험 전 시제품 밸브의 극저온 누설 시험 결과

Type #1	Pilot [bar]	Inlet press. [bar]	Requirements @ Air [Acc/s]	Results (aquarium ; LN2 + He) [Acc/s]
Metal seat on metal	80	125	10	16.67
	70	75	10	14.16
	80	75	10	5.83

표 2. 진동시험 후 시제품 밸브의 극저온 기밀시험 결과 (조립시험)

Type #1	Pilot [bar]	Inlet press. [bar]	Requirements @ Air [Acc/s]	Results (aquarium ; LN2 + He) [Acc/s]
Metal seat on metal	80	125	10 cc/s	overflow

제 유체인 액체산소 상태 하에서 가압하는 경우보다 더 많은 부피 누설 결과를 초래할 것이다.

표 1의 경우와 같이 시제품밸브에 대한 극저온 기밀시험 결과에서 누설량을 보이고 있음을 알 수 있다. 실제 인증시험 요구 조건은 기대되는 최대 작동압력(MEOP) 기준으로 입구 및 파일럿 측으로 가압하는 것이 요구조건이다. 본문에서 제시하지 못했지만 같은 종의 다른 시제품 밸브에 대해 동일한 조건으로 누설량 검사를 수행해본 결과, 표 1의 누설량 정도는 타 시제품 밸브보다 약 3배 정도 크게 누설이 있음을 확인했다. 표 1의 파일럿 압력 70 bar인 작동압력을 기준으로 그 값을 변경하면서 시험을 수행했고, 해당 예측 값보다 많은 누설량이 발생함을 알 수 있다. 결국 표 1의 파일럿 압력 80 bar(세 번째

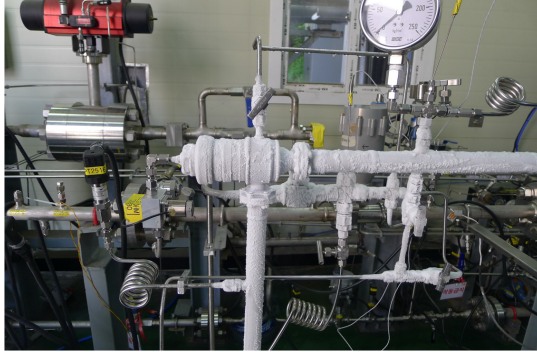


그림 2. 시험설비에 장착 된 산화제 개폐밸브

단계)처럼 수회 작동을 수행한 결과, 금속 기밀부의 기밀 상태가 이전 수준으로 회복하는 것을 알 수 있다. 그러나 입구 압력은 인증시험 요구 압력보다 낮은 상태로 가압기밀 시험을 수행한 결과이므로 신뢰할 수 없다.

조립 후 최초의 극저온 기밀시험에서부터 시험 대상체인 밸브의 경우, 문제가 있음을 단적으로 알 수 있다. 단지 진동시험 후 금속 기밀부의 극저온 누설량은 표 2와 같이 측정불가 수준으로 증가하여 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 진동시험 당시, 금속 기밀부가 진동시험으로 추가 손상 되었을 것으로 판단되며, 앞서 시행한 방법과 재차 밸브의 개폐를 반복하여 누설량 정도를 파악했으나 그 양이 감소하지 않았다[1].

2.2 액체산소를 이용한 소량 냉각 기밀시험

앞서 제시한 헬륨을 이용한 조립시험은 밸브가 액체질소에 완전히 잠긴 상태에서 밸브의 작동 및 기밀 확인 시험을 수행했다. 당시 시험에서는 액체질소를 이용하여 해당 비점까지 밸브를 담근 후 냉각하고, 헬륨을 이용하여 밸브내부로 입력하여 누설량을 측정하는 방법을 이용했기 때문에 실제 시스템에 장착 된 환경과는 상이하다. 따라서 그림 2와 같이 실제 엔진부 내부와 유사하게 해당밸브와 배관은 대기 중으로 노출되도록 하고, 액체산소를 밸브 내부로 유동을 발생시켜 밸브의 누설 부위만을 택하여 누설량을 확인토록 했다[2].

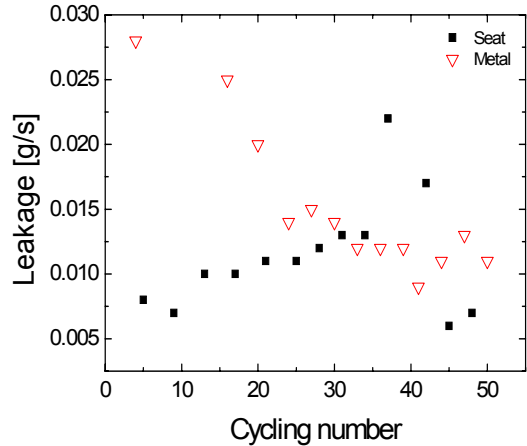


그림 3. 산화제 개폐밸브의 액체산소를 이용한 Seat 및 금속 기밀부 누설량 시험결과
(누설량 요구도 ; LOx 기준 0.07 g/s 이하)

표 1과 표 2에서 제시한 조립시험 단계의 극저온 누설시험에서는 누설량 요구조건이 밸브를 주변 대기에 노출시켜 획득 한 값이다. 그림 3은 적은 유량의 액체산소를 이용하여 밸브 냉각 된 상태에서 발생 된 누설량 결과이다. 시험 유체의 소비를 최소화하기 위해 최소 유량으로 시제품 밸브를 냉각하고 동일 압력으로 가압하여 원하는 부위 누설량을 측정함으로써 조립시험 단계의 접근방법과 차이가 있다. 조립시험 단계에서는 오직 헬륨을 이용하고 부피 유량에 대한 누설량을 확인할 수밖에 없었으나(표 1, 표 2), 그림 2와 같이 실제 밸브 내부의 액체산소 입력하여 요구 조건 대비 누설량 결과를 확인(그림 3)할 수 있으므로 밸브측면에서 열충격 조건 및 결과가 다를 것이다.

시제품 밸브의 누설량 제한 조건은 가압 압력 대비 누설량의 제한은 0.07 g/s 이하이다. 그림 3과 같이 밸브의 50회 수명시험 도중에 지속적으로 누설량을 파악해 본 결과, 포핏 시트부와 금속 기밀부에 대한 누설량 결과는 요구 누설량 조건을 모두 만족하는 것을 알 수 있다. 표 2를 보면 진동 시험 후 금속 기밀부에서 다량의 누설이 발생되는 것을 알 수 있으나, 이와 대조적으로 그림 2에서는 시제품 밸브를 대기중으로 노출하

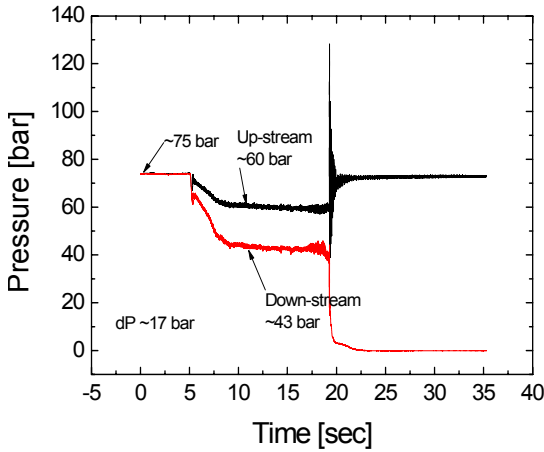


그림 4. 밸브 전/후단 압력

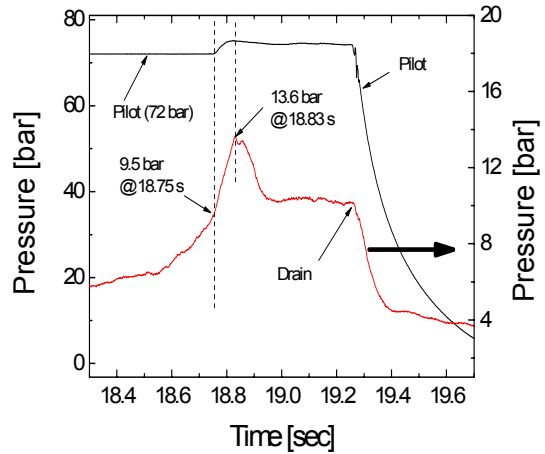


그림 5. 금속 기밀부 누설에 의한 파일럿 압력 변화

고 액체산소의 내부유동을 발생시켜 밸브를 냉각시켜 시험한 결과, 수명시험 횟수가 증가하더라도 요구 조건을 모두 만족하는 것을 알 수 있다 (그림 3). 결국 그림 3에서와 같이 기밀부의 누설량 결과는 요구도에서 제시하는 0.07 g/s의 10% 수준의 누설이 발생됨을 확인 할 수 있다. 이것은 조립시험과 극저온 수류시험에서 시제품 밸브에 대한 극저온으로 노출되는 차이에서 기인되면 재료 측면에서 열적 수축률이 다르기 때문에 발생하는 요인으로 사료 된다. 그러나 표 1과 표 2의 누설량 결과는 액체산소 대신 헬륨을 이용한 시험결과이므로, 과거의 극저온 누설량 결과를 이용하여 그 크기를 파악할 수 있는 단순한 단계이다[3].

2.3 정상 수류시험

앞서 언급한 수명시험을 마친 동일 시제품의 밸브를 이용하여 극저온 정상 수류시험을 수행했으며, 그 결과는 그림 4와 같다. 액체산소인 관계로 초기상태는 기체 상태이고 그 이후, 액상으로 상이 변한 상태로 유동이 진행 되는 것을 알 수 있다. 이때 상변화는 거의 없으므로 밸브의 전단과 후단에 발생하는 압력차가 일정하게 유지됨을 알 수 있다. 당시의 압력차는 약 17 bar이다. 닫힘과 동시에 밸브의 전단에는 수격이 존재하고, 수격의 크기는 실제 엔진 시스템의 배관

길이 및 형상이 상이한 관계로 그 크기는 본 논문에서 고려 대상은 아니다.

그림 5는 금속 기밀면의 누설이 발생함에 따라 누설압력에 의하여 밸브 포핏의 비정상 작동으로 인해 파일럿 압력이 불필요하게 압축되면서 상승하는 것을 볼 수 있다. 비정상 상태는 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 유동이 정지 되는 약 18초에 발생했으나, 이 때 채터링 등의 특이 현상은 발생되지 않았다.

그림 5는 파일럿 압력과 금속기밀부의 압력을 같은 시간 영역에서 확인 한 결과이다. 그림 1의 개략도를 보면, 개방신호에 따라 파일럿 압력이 입력되고, 밸브가 개방되면 포핏과 로드가 이동하면서 포핏이 개방된다. 이 때 유동이 발생됨과 동시에 금속 기밀부가 밀착되어 기밀을 유지한다. 조립시험단계(표 1, 표 2)에서의 인증시험은 그림 5에서와 같이 시제품 밸브의 개방을 위한 파일럿 압력이 약 71 bar로 설정되어 있다. 시험 중 금속 기밀부의 누설로 인해 내측 벨로우즈의 압력이 상승하면서 원치 않는 불균형적인 힘평형이 형성된다. 이것은 밸브가 개방상태로 유지하지 못하고 오히려 밸브가 닫힘 쪽으로 이동하는 것을 의미하는 것이다. 이 때 파일럿 압력은 71 bar로 유지하지 못하고 오히려 입력 된 파일럿 압력보다 높은 압력인 약 75 bar로 상승함을 알 수 있다.

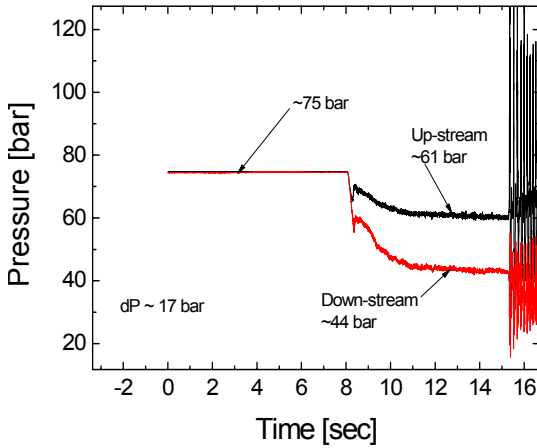


그림 6. 밸브 전/후단 압력차 (2차 수류시험)

금속 기밀부의 누설로 인하여 입출구에만 형성 되어야 할 유동 압력이 벨로우즈 내부(그림 1)로 입력되면서 압력이 상승 되었을 것이다. 현재의 시제품에서는 밸브의 포핏의 이동거리를 측정할 수 있는 장치가 없으므로 그 거리를 정확히 파악할 수 없다[4].

2.4 비정상 수류시험

정상 수류시험 조건과 동일하도록 같은 액체산소를 이용하며, 초기 가압하는 압력조건도 유사하다. 시험은 정상 수류시험 후 바로 이어서 비정상 수류시험을 수행했다. 배관 및 밸브는 이미 정상 수류시험을 수행한 관계로 생각되어 있다.

그림 6과 같이 정상 수류시험과 동일한 약 75 bar를 유지하다가 액상의 액체산소가 유입되면서 일정하게 압력차를 발생하는 것을 알 수 있다. 시제품 밸브에 대한 수류시험이 시작 된지 약 15 초 후부터 밸브가 급격하게 열고 닫음을 반복하는 채터링 현상을 보였다. 고압과 고유량의 조건 하에서 채터링이 발생했기 때문에 밸브와 그 주변 배관은 급격한 소음과 진동을 일으켰다. 수류시험을 위해 별도의 진동센서를 장착하여 측정하지 못했기 때문에 그 크기를 정량적으로 알 수 없었다. 또한 채터링에 따른 진동은 연결 부품들의 진동에 의한 풀림 현상을 초래했다[5].

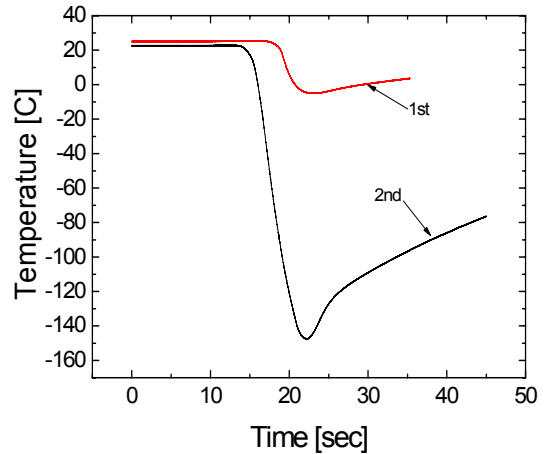


그림 7. 밸브 드레인 포트의 액체산소 누설량에 따른 온도 분포 ; 1차 및 2차 수류시험 비교

그림 7은 1차 및 2차 수류시험 당시, 금속 기밀부로 누설 된 유체의 온도를 측정 한 것이다. 1차 수류시험에서는 채터링 발생되기 전 상태와 동일하게 금속 기밀부의 누설이 없음을 유체 온도를 통해 알 수 있다. 이와 대조적으로 2차 비정상 수류시험 결과의 경우, 초기에는 상온 상태를 유지하다가 채터링이 발생하는 시점부터 급격히 온도가 하강함을 알 수 있다. 이것은 1차 정상 수류시험의 결과와 달리, 시제품 밸브의 채터링으로 인하여 유동부의 고압에 해당하는 액체산소가 드레인 포트를 통해 다량으로 배출되었을 것으로 판단된다. 즉, 금속 기밀부의 기밀이 파괴되고 순간 벨로우즈의 내부의 압력이 급격히 상승하면서 시제품 밸브의 힌평형이 불균형을 일으키면서 채터링이 발생 했을 것이다.

앞서 언급했듯이 시제품 밸브의 금속 기밀부에 대한 누설은 조립시험단계의 결과인 표 1과 표 2를 통해 확인 할 수 있다. 1차 정상 수류시험 당시에는 밸브의 냉각이 충분히 이루어지지 못한 관계로 드레인 포트로의 누설을 어느 정도는 차단할 수 있었으나, 2차 비정상 수류시험에서는 밸브의 냉각이 충분히 이루어졌고 동시에 밸브의 구동 파트 등의 냉각으로 금속 기밀면이 완전히 밀착되지 못했을 것이다. 이것은 밸브의 각기 다른 재료들이 극저온상태로 노출되면서 재

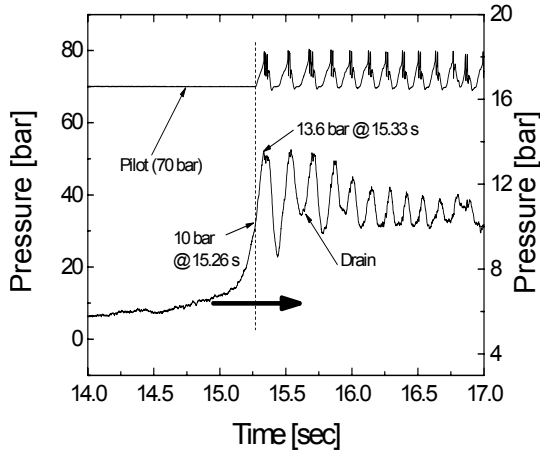


그림 8. 밸브구동압과 드레인 포트의 누설압에 대한 결과(2차 수류시험)

료 마다의 미소 변형으로 인해 기밀유지를 방해할 수 있다.

다른 원인으로는 스프링의 힘을 지목할 수 있다. 스프링 상수는 힘평형에서 가장 중요하게 작용하는 인자이다. 스프링 힘은 액추에이터 힘과 유동력 등에 의해 균형을 이루고 있어야 한다. 그러나 밸브의 포핏이 완전히 열림 상태로 유지하도록 액추에이터 힘의 여유가 충분히 확보되어야 했으나 그렇지 못했기 때문에 채터링의 원인이 될 수 있다. 즉, 스프링 힘이 극저온 상태로 노출되면서 스프링의 1차 압축 힘이 상온 상태보다 더 커졌기 때문에 채터링이 발생 할 수 있다.

또 다른 원인으로는 금속 기밀부의 문제다. 조립시험(표 1, 표 2) 단계에서 헬륨을 이용 시, 금속 기밀부의 문제점을 확인 할 수 있다. 시제품 밸브에 대한 수락시험의 종류는 액체산소와 헬륨을 이용하여 극저온 기밀시험을 수행하는 절차 등의 수행 항목은 없다. 그러나 실제 액체로켓 엔진에 대한 시스템 시험을 수행할 경우, 수락시험 단계에서 발견하지 못한 채터링 등의 현상이 충분히 재연 될 소지가 있다.

그림 8은 비정상 수류시험에서 드레인 포트의 누설압력과 파일럿 압력의 관계를 나타낸 것이다. 1차 정상 수류시험에서는 볼 수 없었던 채터링 현상이 발생했고, 드레인 포트에 누설 된 압

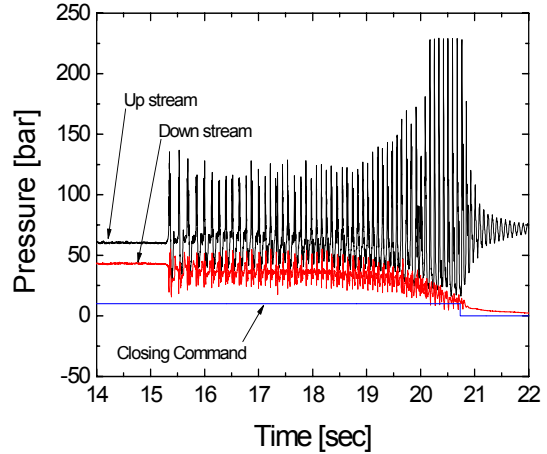


그림 9. 밸브 개폐에 따른 밸브 전/후단 압력 변화

력과 포핏과 플런저가 이동과 동시에 압축 된 파일럿 압력의 거동 주파수가 서로 일치했다. 특히 채터링이 발생된 상황을 제외하고 그림 5의 압력 추세는 그림 8과 유사한 특성을 보인다. 즉, 1차 정상수류시험에서 파일럿 압력의 상승과 동시에 드레인 포트의 압력은 약 9.5 bar이며, 2차 비정상수류시험에서는 포트 압력은 약 10 bar로 유사하다. 따라서 금속 기밀부의 누설 시 발생 된 압력은 약 10 bar임을 가늠할 수 있으며, 대상체인 시제품 밸브의 힘평형에 대한 불균형에 따라 채터링의 문제를 야기 시켰을 것이다. 만약 드레인 포트의 직경이 충분히 컸다면, 금속 기밀부의 발생 된 압력을 충분히 배출 할 수 있으며, 이는 채터링 발생을 제거할 수 있는 주요 방법 중에 하나가 될 것이다[6].

그림 9는 시제품 밸브의 채터링에 의한 밸브 전단과 후단의 압력 변화다. 닫힘 명령 후, 일정 시간지연을 보이며 밸브가 닫히게 되는데, 이때 수격을 동반함을 알 수 있다. 수격의 강도는 시험시간 동안 압력센서가 측정할 수 있는 최대 강도로 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

2.5 물을 이용한 채터링 재연시험

앞서 언급했듯이 액체산소를 이용한 수류시험에서 금속 기밀부를 통해 발생 된 누설압력이 약

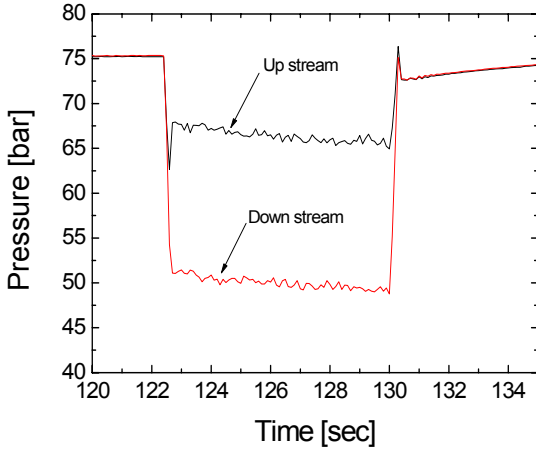


그림 10. 물을 이용한 시험당시 밸브 전/후단 압력 변화

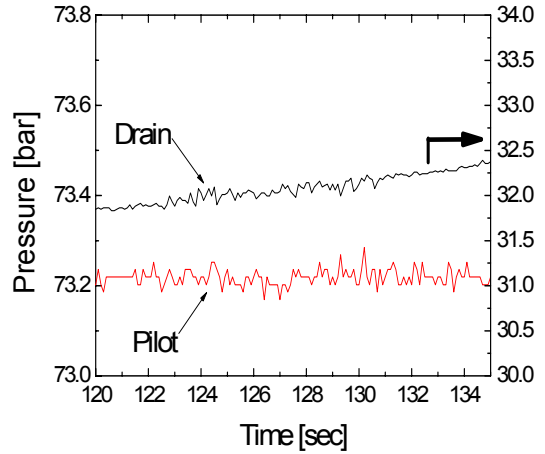


그림 11. 드레인부 누설압력 및 파일럿 압력 비교 보여준다.

10 bar 일 경우 채터링이 발생되었다. 이는 그림 5와 그림 8을 통해 확인 할 수 있다. 액체산소를 이용한 비정상 수류시험 과정이 문제를 일으킬 수 있으므로 안전을 고려하여 재연시험은 물을 이용했다. 비록 물은 액체산소처럼 온도에 따라 밸브 재료에 대한 수축률의 미소 변화를 야기 시킬 수 없기 때문에 누설상태의 압력 조건과 유사하도록 드레인 포트에 역으로 압력을 입력하여 그 결과를 확인해 보았다[7].

논문에서 제시하지 않았지만 금속 기밀부인 드레인 포트에 액체산소를 이용한 누설시험 당시 누설 압력인 10 bar를 입력했다. 시제품 밸브에 대한 유동시험 시 시작 압력도 모두 동일하게 하여 유동을 발생시켰다. 채터링 등의 특이 사항은 재연되지 않았다. 따라서 그림 10과 그림 11에서와 같이 30 bar 이상의 압력을 드레인 포트에 입력하여 파일럿 압력변화나 또는 유동시험 시 채터링 현상 등의 변화를 확인하도록 했다.

그림 11에서와 같이 드레인 포트의 입력 압력을 30 bar에서 32 bar 까지 상승시킨 결과, 액체산소를 이용한 수류시험에서 발생된 유동시험 결과와 다른 결과를 보였다. 즉, 파일럿 측의 압력에서는 변화가 없었다. 이것은 상온 상태의 물을 이용한 재연시험은 극저온 수류시험과 같은 상황을 재연하기에 한계가 있음을 단적으로

2.6 힘평형

그림 1에서 제시된 시제품 밸브의 힘평형식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$F_{p-p} = F_{h-p} + F_s + F_b + F_f + F_{dist} \quad (1)$$

여기서,

F_{p-p} : Force of Pilot Pressure

F_{h-p} : Force of hydraulic Pressure

F_s : Force of Spring

F_b : Force of Bellows

F_{f-f} : Force of Flow

F_{dist} : Force of Disturbance

식 (1)에서와 같이 밸브가 개방되어 유동이 발생하기 위해 힘균형식이 양수이어야 한다. 즉, 파일럿의 힘을 발생시키는 피스톤부의 면적과 작용하는 압력의 곱은 식 (1)의 왼쪽 항 보다 크거나 같아야 개방상태를 유지할 수 있다. 그러나 극저온밸브의 특성 상 온도에 따른 포핏의 로드와 가이드에서 발생할 수 있는 마찰력등이 식(1)의 외란으로 작용할 수 있다. 즉, 극저온과 상온

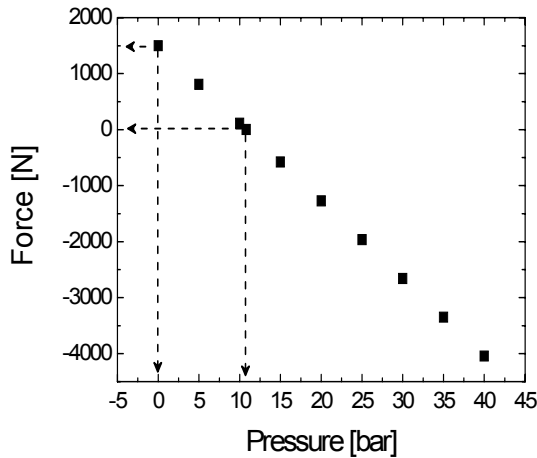


그림 12. 금속 기밀부의 압력작용에 대한 힘평형 결과

에서는 마찰력등이 상이할 수 있고, 제작공정상 가공공차에서 발생하는 요인 등이 모두 외란 요소이다. 또한 본 시제품 밸브는 금속 기밀부가 존재하므로 기밀부를 통한 누설 또한 주요 외란 요소로 작용 할 것이다. 이러한 문제점을 제거코자 파일럿 측의 힘평형 설계 시 외란을 고려하여 설계하는 것이 중요하며, 그 힘에 대한 설계 인자는 여러 가지 시제품에 대한 설계 및 제작, 시험을 통해 확보 할 수 있을 것이다.

그림 12는 식 (1)에서 외란압력에 따라 발생된 힘균형 결과를 예측 한 것이다. 파일럿 압력에 의해 밸브 포핏의 개방 시, 스프링과 내부 벨로우즈의 최대 압축힘이 작용하고 더불어 유동력도 작용한다. 밸브에 작용하는 유동력이 무시할 정도로 작다면 결국, 금속 기밀부의 누설량이 밸브의 채터링 발생의 원인으로 주요하게 작용됨을 알 수 있다. 즉, 그림 12에서처럼 금속 기밀부 내측의 압력이 11 bar 이상으로 존재한다면 음의 힘이 작용하므로 밸브는 닫히는 방향으로 움직이게 된다.

그림 12의 해석결과처럼 임계 힘이 발생된 지점이 약 11 bar인 것을 감안한다면 시험결과에서 확보 된 그림 5와 그림 8의 채터링이 발생된 시점의 압력과 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 파일럿 압력이 지속적으로 지지하고 있으므로 드

레인 포트를 통해 일부 기화 된 압력이 소멸된다면 다시 양의 힘으로 변하게 되어 밸브는 다시 개방된다. 충분히 확보되지 못한 힘의 임계점에서 밸브 운용 시, 본 시제품 밸브와 같이 충분히 채터링이 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서 파일럿 압력을 충분히 크게 하거나 또는, 금속기밀부의 누설 발생량을 최소화하도록 가공공차를 관리할 수 있다면 원치 않는 채터링을 발생하지 않을 것이다. 전자는 단품의 무게를 증가시키게 되며, 후자는 가공공정의 단계를 증가시켜 제작단가를 상승시킬 수 있는 단점의 소지가 있다.

3. 결 론

조립시험 단계에서 시제품 밸브를 대기압 액체질소에 담그고 헬륨가압 방법을 이용하여 금속 기밀부에서 누설을 확인하였다. 진동 시험 결과, 밸브의 기밀부를 손상으로 진동시험 전보다 시험 후가 대량의 누설결과를 보였다.

상사 수류시험 설비를 이용한 극저온 정적 수류시험에서는 밸브에 대한 금속 기밀부의 누설을 확인하지 못했다.

비정상 액체산소를 이용한 수류시험에서 금속 기밀부의 누설로 인해 원치 않는 외란압력이 형성되어 채터링이 발생했다. 극저온 수류시험 당시, 드레인 포트로 형성 된 압력은 약 10 bar 이며, 힘평형 계산을 통해 예측 된 압력은 11 bar 이다.

참 고 문 헌

1. 이중엽, "가스발생기 산화제 개폐밸브의 극저온 유동시험, ART-Ijy-13-008 DM, 2013, pp.1-24.
2. 이중엽, 이수용, "75톤 연소기용 연료개폐밸브의 특성에 대한 고찰", 항공우주기술, 제11권, 제1호, 2012, pp.84-90.
3. 이중엽, 허환일, "가스발생기 연료개폐밸브의 동적 거동", 한국추진공학회지, 제14권, 제4호, 2010, pp.1-9.

4. 전재형, 홍문근, 김현준, 이수용, "산화제 개폐 밸브의 힘평형에 관한 연구", 한국항공우주학회지, 제37권, 제8호, 2009, pp. 812~818.
5. 홍문근, 이수용, "산화제 개폐밸브의 힘평형", 한국추진공학회 춘계학술대회, 2008, pp. 14~17.
6. 이중엽, 이수용, "솔레노이드 밸브의 고유유량 계수에 대한 실험과 성능예측", 항공우주기술지, 제10권, 제1호, pp.70-78.
7. 이중엽, "75톤급 연소기연료용 개폐밸브의 고유유량계수 실험", KARI-ARP-TM-2011-004, pp.1-25.