

액체로켓엔진용 연소기 산화제 개폐밸브 성능 특성

정대성^{a,*} · 홍문근^{a,b} · 한상엽^b

Performance Characteristics of a Main Oxidizer Shutoff Valve for Liquid Rocket Engines

Daeseong Jeong^{a,*} · Moongeun Hong^{a,b} · Sangyeop Han^b^aAerospace System Engineering, University of Science and Technology, Korea^bLauncher Propulsion Control Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea*Corresponding author. E-mail: jds1986@ust.ac.kr

ABSTRACT

A main oxidizer shutoff valve controls the supply of the oxidizer flow into the combustion chamber of a liquid rocket engine. This shutoff valve also carries out the pre-chilling of oxidizer supply lines by permitting recycling flow for stable transient start of the engine. In the present paper, the flow tests for the recycling line of the valve were conducted in order to evaluate the cooling performance of the main oxidizer shutoff valve. In addition, cryogenic life-cycle tests were performed with an assumption of the increase of spring constant with increasing valve operating times due to ductile-brittle transition effects.

초 록

액체 추진 로켓 엔진에서 연소실로 향하는 산화제 공급은 연소기 산화제 개폐밸브에 의해서 제어된다. 산화제의 안정적인 공급을 위하여 밸브가 열려있을 때의 유량조건을 만족해야 할 뿐만 아니라, 산화제 공급라인의 예냉을 위해 밸브가 닫혀있을 때에도 요구되는 유량조건을 만족해야 한다. 본 연구에서는 연소기 산화제 개폐밸브의 재순환 유량특성을 확인하기 위한 시험을 수행하였고, 밸브 내부에 작용하는 힘평형 관계식을 이용하여 극저온 수명시험 이후 스프링 상수가 변화하는 경향을 확인하였다.

Key Words: MOV(산화제개폐밸브), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진), Recycling Flow Rate(재순환 유량), Force Balance(힘평형), Spring Constant(스프링상수)

1. 서 론

액체 추진 로켓 엔진(Liquid propellant rocket engine)은 추진제 탱크로부터 연소실로 공급되는 액체 추진제를 사용하며, 연소실에서 추진제가 반응하여 형성되는 고온의 가스를 초음속 노즐을 통하여 고속으로 방출함으로써 필

요한 추력을 얻는다. 액체 로켓 엔진은 추진제를 연소실로 공급하기 위해 가압식(Pressure-fed cycle), 가스발생기식(Gas-generator cycle), 다단 연소식(Staged combustion cycle), 팽창식(Expander cycle) 등의 추진제 공급시스템을 필요로 하며, 이러한 공급시스템의 구성품에는 여러 가지 정밀 밸브가 포함된다. 이 중 연소기 산화제 개폐밸브(MOV, Main Oxidizer shut-off Valve)는 연소실로의 산화제를 공급 및 제어하며, 고진동, 고압, 극저온의 극한 환경에서도 유량성능, 기밀성능, 적절한 응답속도 및 압력손실 등을 만족하는지가 중요한 설계 변수이다. 밸브의 형상은 일반적으로 버터플라이 형(Butterfly), 볼밸브 형(Ball), 포핏 형(Poppet), 벤추리 형(Venturi), 게이트 형(Gate) 등으로 구분된다. 이 중 포핏 형의 밸브는 밸브 내부 운동방향이 구동부와 일직선을 이루고 있어 상대적으로 간단하며 고유량, 고압의 극저온 밸브에 적절하다[1, 2]. 한국형발사체에 적용되는 산화제 개폐밸브는 헬륨 구동압력을 이용하여 밸브 개방 후 구동압력 없이도 운용유체 압력만으로 밸브 개폐가 가능한 자체유지타입(Self-sustainable) 포핏 형 밸브이다[3].

한국형발사체용 연소기 산화제 개폐밸브는 Fig. 1과 같이 내부의 스프링 탄성력(F_s), 유체력(F_h), 공압력(F_a), 마찰력(F_f), 시트부 복원력(F_c)의 상호작용에 의하여 작동하며, 앞선 연구에서와 같이 내부 힘평형 관계식을 이용하여 밸브의 작동특성을 예측하고 평가하는 것이 필요하다[1]. 본 연구에서는 연소기 산화제 개폐밸브에 대하여 내부 힘평형 관계식을 통해 열림/닫힘 압력을 예측하고, 극저온 수명시험을 통하여 얻어진 결과와 비교하였다. 또한 얻어진 시험결과를 바탕으로 수명시험 이후 밸브 내부의 마찰력 및 스프링 상수값이 변화하는 경향을 확인하였다.

한편, 극저온 유체가 상온의 배관에 흐르게 되면 배관이 충분히 낮은 온도로 냉각될 때까지 이상유동(Two-phase flow) 상태에서 상당한 압력과 유동의 진동이 발생한다[4]. 따라서, 극저온 산화제를 사용하는 액체로켓 엔진의 안정적인

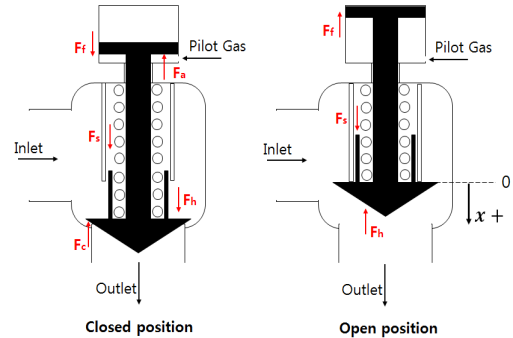


Fig. 1 Operating mechanism of a main oxidizer shut-off valve. The valve stroke and direction are denoted by x .

시동 점화를 위해서는 연소기 산화제 개폐밸브 및 배관이 충분히 냉각되어 있어야 한다. 한국형 발사체의 경우, 산화제 개폐밸브의 주유로가 닫혀있을 때 개폐밸브의 재순환 유로를 통과한 산화제가 탱크로 흘러 순환하면서 산화제 공급시스템을 냉각한다. 본 연구에서는 산화제 공급라인의 예냉을 위하여 요구되는 산화제 개폐밸브의 재순환 유량특성을 만족하는지 시험을 통하여 확인하였다.

먼저 2장에서는 시험 설비 및 재순환 유량시험 및 극저온 수명시험 방법에 대해 소개하도록 하며, 3장에서는 재순환 유량 시험 결과 및 극저온 수명시험 결과에 대한 평가 내용에 대해 다루도록 한다.

2. 시험 설비 및 시험 방법

2.1 시험 설비

Fig. 2와 3에 연소기 산화제 개폐밸브의 극저온 시험을 위한 시험 장치 및 개략도를 나타내었다. 산화제 개폐밸브 전단의 공압밸브(AV_{in})를 개폐하여 액체질소를 산화제 개폐밸브 전단에 공급할 수 있도록 하였고, 산화제 개폐밸브 후단의 공압밸브(AV_{out})를 개폐하여 재순환 흐름 및 주유로 흐름을 제어하도록 하였다. Industria F2805 솔레노이드 밸브(SV)를 통하여 구동부에 220 bar의 기체 헬륨을 공급, 제거할

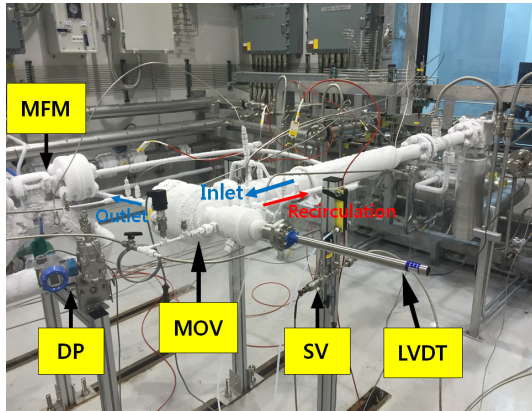


Fig. 2 Experimental setup for the cryogenic test of main oxidizer shut-off valve.

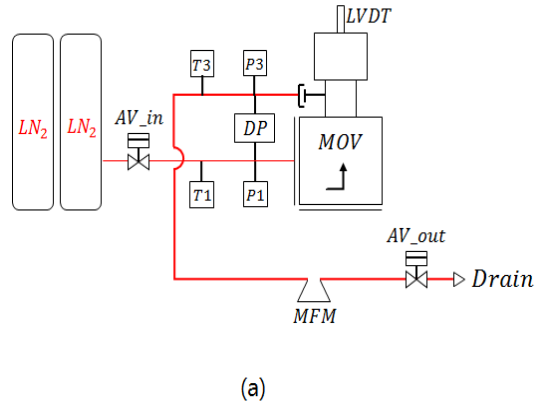
수 있도록 하였다. SV와 구동부 사이의 거리는 실제 한국형발사체 75톤급 엔진과 동일한 조건이 되도록 1.1 m로 구성하였다.

재순환 유량을 측정하기 위하여 최대 15600 kg/h까지의 유량측정이 가능하고 극저온 유체 적용 시 오차범위가 ±0.35%인 Micro Motion CMF100M 질량유량계(MFM, Mass Flow Meter)와 Micro Motion 1700C 트랜스미터(Transmeter)를 사용하였다. 6.89 bar의 차압측정범위를 가지고 오차범위가 ±0.05%인 Honeywell STD830 차압센서(DP)을 사용하여 밸브 전단과 재순환 라인 간의 차압을 측정하였다. 300 bar까지 측정 가능하고, 오차범위 ±0.25%인 Keller PA-23SY 압력센서를 사용하여 각각 MOV 전단(P1), 후단(P2), 재순환라인(P3), 구동부에서의 압력(P4)을 측정하였다. 온도센서는 Sentech Sen-310 RTD 센서를 사용하였고, 각각 MOV 전단(T1), 후단(T2), 재순환라인에서의 온도(T3)를 측정하였다. 75 mm까지 측정할 수 있고, 오차범위가 ±0.5%인 RDP Group ACT3000A Linear Variable Differential Transformer를 이용하여 밸브 개도를 측정하였다. 각 센서를 통해 측정된 데이터는 10~1000 Hz로 DAQ에 기록되도록 하였다.

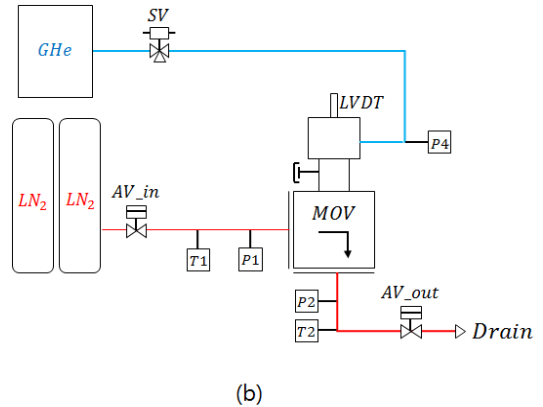
2.2 시험 방법

2.2.1 재순환 유량 측정 시험

산화제 개폐밸브가 닫힌 상태에서 밸브 전단



(a)



(b)

Fig. 3 Schematics of test apparatus for the main oxidizer shut-off valve (a) recirculation flow and (b) main flow (red line: LN₂, blue line: GHe).

과 후단의 공압밸브(AV_in/AV_out)를 열어 산화제 개폐밸브의 재순환 냉각라인으로 액체질소를 공급하였다. 이 때, 재순환 포트 출구(T3)에서 운용유체 온도가 103 K 이하로 낮아지고, 온도가 안정화 되면 밸브 및 배관이 충분히 냉각되었다고 판단하였다. 액체질소 탱크의 ullage 압력을 조절하여 산화제 개폐밸브 입구 압력(P1)이 10 bar가 되도록 액체질소를 공급하였다. 그리고 재순환 냉각라인으로 흐르는 질량 유량을 측정하였고 산화제 개폐밸브 입구측과 재순환 냉각라인 사이의 차압을 측정하여 유량 계수를 계산하였다.

2.2.2 극저온 수명시험

2.2.1 결과 동일한 방법으로 산화제 개폐밸브

및 배관이 충분히 냉각된 것을 확인한 후, 밸브의 On/Off 작동을 총 50회 반복하였다. 액체질소 저장량의 제약으로 인해 1차 20회, 2차 30회로 나누어 극저온 수명시험을 수행하였으며, 1차 시험과 2차 시험 사이에 12시간 이상의 시간 간격이 있었다. 산화제 개폐밸브가 열릴 때와 닫힐 때 측정된 압력 및 밸브 개도 정보를 이용하여 힘평형 해석을 수행하였다.

3. 시험 결과

3.1 재순환 유량 계수

일반적으로 유공압 구성품에서 일정 차압이 걸렸을 때, 흐르는 유량을 나타내기 위해 유량계수(C_v)를 사용한다. C_v 값이 크다는 것은 같은 차압 조건에서 더 많은 유량을 흘릴 수 있다는 것을 의미한다. 본 논문에서는 C_v 값을 1 bar의 차압이 걸렸을 때, 1시간 동안 흐르는 물의 부피 유량(m^3)으로 정의하고, Eq. 1과 같이 나타내었다.

$$C_v = Q \times \sqrt{\frac{\rho/\rho_w}{\Delta p}} = \frac{\dot{m}}{\rho} \times \sqrt{\frac{\rho/\rho_w}{\Delta p}} \quad (1)$$

$Q [m^3/h]$: Volume flow rate per hour.

$\dot{m} [kg/h]$: Mass flow rate per hour.

$\rho [kg/m^3]$: Density of working fluid.

$\rho_w [kg/m^3]$: Standard density of water.

$\Delta p [bar]$: Differential pressure between inlet and recirculation flow.

여기서 ρ 는 시험을 통해 재순환 라인에서 측정된 온도와 압력($T_3 = 82 \text{ K}$, $P_3 = 8 \text{ bar}$)에서 액체질소 밀도인 787.379 kg/m^3 , ρ_w 는 20°C에서의 물의 밀도인 998.21 kg/m^3 을 적용하여 계산하였다. 시험을 통해 측정된 질량유량과 차압을 Eq. 1에 적용하여 유량계수를 계산한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. C_v 값의 uncertainty는 $\pm 1.752\%$ 이다.

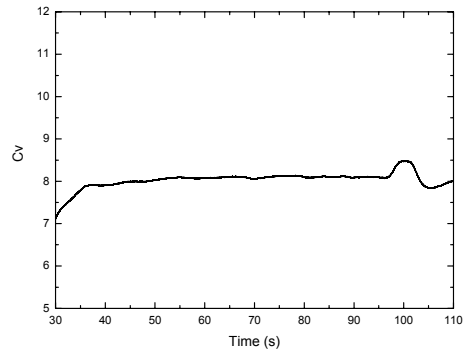


Fig. 4 Flow coefficient of recirculation line.

유량 및 차압 데이터가 안정적이라고 판단되는 50 ~ 90 s 사이의 C_v 값을 살펴보면 약 8.1의 값을 보인다. 이는 한국형발사체 75톤급 엔진의 전체 예냉 시스템에서 산화제 개폐밸브에 할당된 유량계수에 다소 부족한 값으로써 전체 예냉 시스템의 다른 구성품들이 부족한 유량계수를 보상할 수 없는 경우에 재순환 예냉 유로의 설계 개선을 통하여 산화제 개폐밸브의 재순환 유량을 증가시켜야 할 것이다[5].

3.2 극저온 수명시험 결과

3.2.1 밸브가 열릴 때

밸브의 작동 특성과 관련된 주요 압력정보를 다음과 같이 정의한다.

p_o : 밸브가 열리기 시작하는 시점의 구동압

p_h : 운용유체 압력

p_{hc} : 구동압이 없는 상태에서 밸브가 닫히기 시작하는 운용유체 압력(밸브 닫힘압력)

Fig. 1에서와 같이 구동압에 의해 구동부에 작용하는 힘을 F_a , 운용 유체에 의해 포핏에 작용하는 힘을 F_h , 시트에 의한 반발력을 F_c , 스프링 힘을 F_s , 밸브 구동부에 작용하는 마찰력을 F_f 라 하면 밸브가 닫혔을 때의 밸부 구동부에 작용하는 힘은 Eq. 2와 같다.

$$F = F_a + F_c - F_h - F_s - F_f \quad (2)$$

구동부에 공급된 압력으로 F_a 가 증가하면, 포핏은 조금씩 밀려 올라가게 되며 $F = 0$ 이 되는 순간 포핏이 시트에서 분리되고, 시트에 의한 반발력 F_c 가 없어진다. 따라서, 이 순간에 작용하는 힘평형 식은 Eq. 3과 같다.

$$F_a = F_h + F_s + F_f \quad (3)$$

열림압력 p_o 에 대하여 Eq. 4와 같이 정리할 수 있다.

$$p_o \approx \frac{p_h A_{ho} + k_s l_1 + F_f}{A_a} \quad (4)$$

$A_{ho} [mm^2]$: Effective area pressurized by working fluid when valve is closed (7402.38 mm^2).

$A_a [mm^2]$: Effective area pressurized by pilot pressure (3042.66 mm^2).

$k_s [N/mm]$: Spring constant.

$l_1 [mm]$: Compressed length from the free length of the spring when valve is closed.

측정된 운용압력 p_h 와 스프링 상수(k_s) 99.8 N/mm , 자유길이에서 줄어든 스프링 길이(l_1) 29.9 mm 및 시험에 의해 얻어진 마찰력(F_f) 1100 N 을 Eq. 4에 적용하면 밸브의 열림압력 p_o 를 계산할 수 있다.

전체형 등[1]은 극저온 상태에서 피스톤 - 포핏 형태의 밸브의 횡수에 따른 마찰력의 경향을 보여주었으며, 극저온 상태에서 밸브를 50회 반복작동 하였을 때의 마찰력의 변화는 미비하였다. 따라서, 유사한 구조를 가지는 본 논문의 산화제 개폐밸브에서도 극저온 상태에서 밸브의 50회 작동 동안 마찰력 F_f 를 일정하다고 가정하기로 하고, 이전의 시험에서 동일한 모델의 밸브를 사용하여 구해진 값인 1100 N 을 사용하였다 [6].

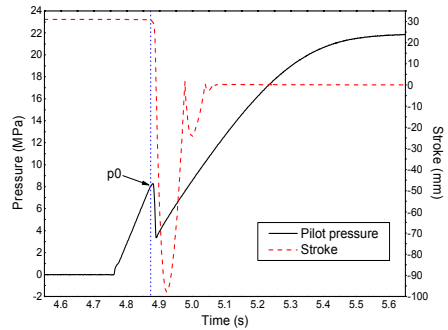


Fig. 5 Evolutions of pilot pressure and valve stroke.

Fig. 5에 밸브 열림 작동 시의 구동부 압력 및 밸브 개도를 나타내었다. 포핏이 시트에서 분리되어 밸브가 열리는 시점을 LVDT 개도가 0.4 mm 감소하였을 때라고 판단하여 그 순간의 구동압을 열림압력(p_o)으로 정의하였다. Fig. 6에 총 50회의 수명시험 동안 k_s 가 일정하다고 가정하고 힘평형 관계식을 이용하여 계산한 열림압력(Po_Cal)과 실제 측정된 열림압력(Po_Ex)을 비교하여 나타내었다.

시험 결과 구동부(P4)에서 측정된 p_o 값(Po_Ex)과 Eq. 4를 이용하여 계산된 p_o 값(Po_Cal)이 유사하게 나타나며 오차값 = 실험값 - 힘평형 공식을 이용해 계산한 값이라고 하였을 때 $-0.2 \sim 0.25 MPa$ 가량의 오차가 생기는 것을 확인할 수 있다. 또한, 계산값 대비 실제 구동부 압력은 산화제 개폐밸브를 50회 작동하는 동안 0.5 MPa 가량 서서히 증가하는 경향을 보인다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향의 원인을 스프링 상수의 변화로 판단하였으며, 실험으로 측정된 p_o 값(Po_Ex)과 Eq. 4를 이용하여 밸브 열림 시의 스프링 상수를 계산하여보면 Fig. 7과 같이 50회 작동하는 동안 전체적으로 증가하는 경향을 보인다.

일반적으로 Carbon steel 계열 소재는 극저온에서 ductile-brittle transition을 일으킨다고 알려져 있으며, 일정 온도 영역에서 impact strength가 급격히 감소한다[4,7]. 사용된 스프링 소재가 오스테나이트계 탄소강 계열이므로 103 K에서 스프링 소재가 상당히 brittle해진 상태에서 스프

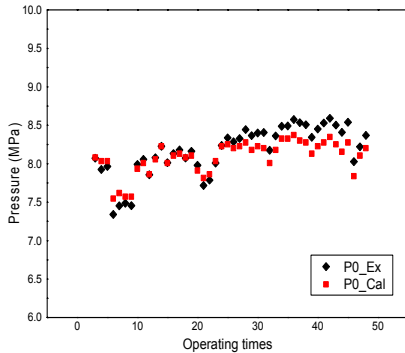


Fig. 6 Comparison of measured p_o with calculated values.

링이 최대 압축길이의 1%까지 과도하게 압축되었기 때문에 밸브의 반복 작동 중에 스프링 내부에 전위가 형성되고 쌓이면서 k_s 가 증가하는 것으로 생각된다. 이러한 경우 더 높은 구동압력에서 밸브가 열리게 되므로 밸브의 열리는 시점이 늦어지게 되어 엔진의 안정적인 시동에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.

또한, Fig. 7에서 21회에 k_s 값이 떨어졌다가 이후부터 다시 증가하는 모습을 보이는데, 이는 시간 및 액체질소 저장량의 제약으로 인해 극저온 시험을 1, 2차에 걸쳐 나누어 진행하면서 생기는 현상으로 판단된다. 스프링이 1차 시험 후에 극저온에서 상온까지 12시간 이상 서서히 온도가 올라가면서 약 200 K의 열을 얻었고, 이러한 과정이 재료의 열처리 과정과 유사하게 작용하여 내부에 쌓인 전위가 풀리는 것으로 추정된다[7].

3.2.2 밸브가 닫힐 때

밸브가 열린 상태에서 닫히기 시작할 때의 힘평형 관계식은 Eq. 5와 같다.

$$F_h = F_s - F_f \quad (5)$$

Eq. 5를 밸브가 닫힐 때의 운용압력 p_{hc} 에 대해 정리하면, Eq. 6과 같다.

$$p_{hc} = \frac{F_s - F_f}{A_{hc}} \simeq \frac{k_s(l_1 + stroke) - F_f}{A_{hc}} \quad (6)$$

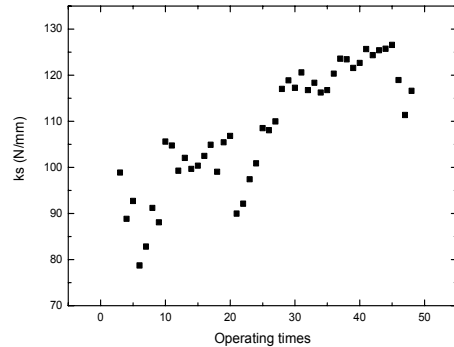


Fig. 7 Calculated spring constant using measured p_o from the cryogenic life-cycle test.

$A_{hc} [mm^2]$: Effective area pressurized by working fluid when valve is open (3369.55 mm^2).

스프링 상수(k_s) 99.8 N/mm , 자유길이에서 줄어든 스프링 길이(l_1) 29.9 mm 및 밸브 행정(stroke) 30.5 mm 를 Eq. 6에 적용하면 밸브의 닫힘 압력 p_{hc} 는 대략 1.46 MPa로 계산할 수 있다.

Fig. 8과 9에 각각 21번째 수명시험과 48번째 수명시험에서의 밸브 개도에 따른 닫힘 압력을 나타내었다. 밸브 내부 운용유체의 압력이 닫힘 압력 p_{hc} 와 같아질 때까지는 밸브가 열림 상태를 유지하다가 p_{hc} 보다 작아지는 순간부터 내부의 힘평형 관계에 의하여 밸브가 닫히는 것을 확인할 수 있다. 그러나 48회차의 닫힘 압력이 21회차보다 2배가량 높아진 것을 확인할 수 있으며, 21회차와 48회차 모두 Eq. 6을 이용해 계산한 닫힘 압력보다 월등히 높다. Fig. 10에 3회 ~ 50회까지 시험에서 측정된 닫힘 압력(Phc_{Ex})을 나타내었는데, 측정된 닫힘 압력이 계산을 통해 얻은 닫힘 압력(Phc_{Cal})보다 월등히 높다.

이러한 결과는 스프링의 end-coil effect에 의한 것으로 판단된다. 스프링이 완전히 압축되기 약 20% 전부터 스프링 상수 k_s 가 급격히 증가하게 되는데 현재 적용된 스프링의 최대 압축 길이가 60.9 mm 이고 밸브가 완전히 열린 상태에서 스프링 압축 길이가 60.4 mm 이므로 최대 압

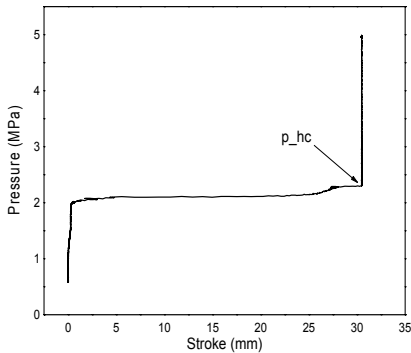


Fig. 8 p_{hc} along the valve stroke on the 21st cryogenic life-cycle test.

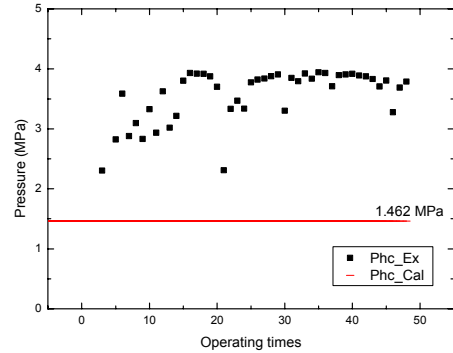


Fig. 10 Comparison of measured p_{hc} with the predicted value.

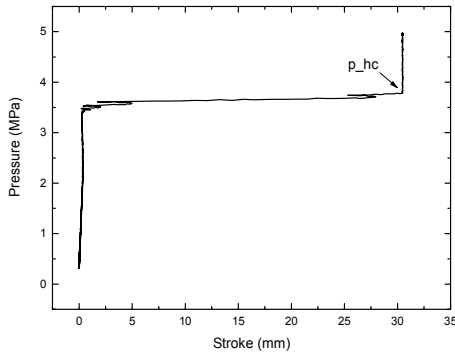


Fig. 9 p_{hc} along the valve stroke on the 48th cryogenic life-cycle test.

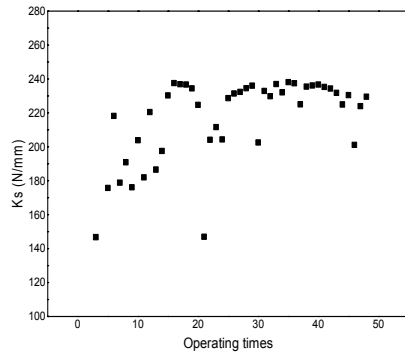


Fig. 11 Calculated spring constant using measured p_{hc} from the cryogenic life-cycle test.

축 길이의 1%안에 위치하게 되고 따라서 end-coil effect에 의해 단힘 압력이 증가한 것으로 생각된다.

밸브가 열릴 때와 같이 마찰력 F_f 를 1100 N으로 일정하다고 가정하고 Eq. 6을 이용하여 스프링 힘 F_s 를 계산하여보면, 밸브 작동 횟수에 따른 스프링 상수 k_s 는 Fig. 11과 같다. k_s 값은 50회의 작동 중에 대략 150 N/mm에서 240 N/mm까지 증가하나 240 N/mm 넘어서지는 않는다. k_s 가 증가한 경우 밸브가 운용압력이 더 높은 상태에서 닫히게 되어 밸브가 닫히는 시점이 빨라지므로 엔진의 잔류추력에 영향을 주게 된다. 또한, 밸브가 열리 때와 마찬가지로 21회차에서 값이 떨어졌다가 다시 증가하는 모습을 보이는데, 앞서 언급한 것과 같이 시간 및 액체

질소 저장량의 제약으로 인해 극저온 시험을 1, 2차에 걸쳐 나누어 진행하면서 생기는 현상으로 판단된다. 다만, 밸브가 열릴 때보다 k_s 값의 변화가 훨씬 도드라져 보이는데 이는 스프링의 end-coil effect에 의한 것으로 추측해 볼 수 있다. 그러나 유사한 상황에서 구체적으로 스프링 특성이 분석되지 않았으므로 스프링의 end-coil effect 및 극저온에서 ductile-brittle transition에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 시험을 통하여 연소기 산화제 개폐밸브의 재순환 유량계수를 확인하였고, 엔진

의 안전한 시동점화를 위하여 적절한 설계 개선을 통해 재순환 유량계수를 증가시켜야 함을 확인하였다. 또한, 내부 힘평형 해석을 통해 극저온 상태에서 산화제 개폐밸브의 열림 압력, 닫힘 압력값을 계산하고 시험 결과값과 비교하였다. 연소기 산화제 개폐밸브의 열림 압력 및 닫힘 압력을 이용하여 스프링 상수 변화를 확인하였으며, 밸브의 작동횟수가 증가함에 따라 스프링 상수값이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 시험을 통해 측정된 연소기 산화제 개폐밸브의 닫힘 압력은 계산값보다 상당히 높게 나왔는데 이는 스프링 end-coil effect에 의한 것으로 추정되며, 산화제 개폐밸브의 작동특성 예측 및 성능 해석의 정확성과 용이함을 위해 스프링이 최대 압축길이 대비 적절한 압축길이를 갖도록 설계 변경이 필요해 보인다.

극저온 수명시험 결과에서 20회를 기준으로 닫힘압력, 스프링 상수가 유사한 패턴으로 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 극저온 수명시험에서 1, 2차로 나누어 시험을 진행하였고 그 과정에서 극저온 환경에 있던 스프링이 상온 환경에서 12시간 이상 서서히 열을 얻었으므로 일종의 열처리와 유사한 효과로 인해 내부에 쌓여 있던 전위가 풀려 스프링의 상수가 변한 현상으로 추측해 볼 수 있으나 보다 확실한 결과를 위하여 극저온 환경에서 스프링의 ductile-brittle transition에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 고려된다.

References

1. Jeon, J., Hong, M., Kim, H. and Lee, S.Y., "A Study on the Force Balance of a Main Oxidizer shutoff Valve," *Journal of the Korean Society of Aeronautical & Space Sciences*, Vol. 37, No. 8, pp. 812-818, 2009.
2. Dieter, K.H. and David, H.H., *Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines*, American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc., Washington DC, W.A., U.S.A., 1992.
3. Kim, D., Hong, M., Park, J. and Lee, S.Y., "Study for the Development of a Main Oxidizer Shut-off Valve for Liquid Rocket Engines," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 6, pp. 113-119, 2013.
4. Randal, F.B., *Cryogenic systems*, 2nd ed., Oxford University Press Inc., New York, N.Y., U.S.A., 1985.
5. Hong, M., "Specifications of a 75-tonf main oxidizer shutoff valve," L2-SP-00162, KARI-IDMS, 2016.
6. Hong, M., "Acceptance test of a 75-tonf main oxidizer shutoff valve DM03-03," L2-TR-00442, KARI-IDMS, 2016.
7. William, D.C. Jr., *Materials Science and Engineering an Introduction*, 7th ed., John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y., U.S.A., 2007.