

Technical Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2020.24.5.077>

작동 횟수에 따른 연소기 산화제 개폐밸브 작동 특성

홍문근^{a,b,*}

Operating Characteristics of a Main Oxidizer Shut-off Valve According to Operating Times

Moongeun Hong^{a,b,*}^aLiquid Propulsion Control Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea^bAerospace System Engineering, University of Science and Technology, Korea*Corresponding author. E-mail: conquet@kari.re.kr

ABSTRACT

The operating characteristics of a main oxidizer shut-off valve have been examined by life-cycle tests in which the valve operates as many times as is required at room and cryogenic temperatures. It is shown that there is no significant change of the operating characteristics in the course of the life-cycle tests. The critical pressures and principal forces, which represent the operating characteristics, differ at each operating time by less than about 3%. These qualified operating characteristics of the valve are expected to play an indispensable role in the stable startup and shutdown of a liquid rocket engine.

초 록

본 논문에서 연소기 산화제 개폐밸브의 작동 특성 변화를 확인하기 위해 극저온 및 상온 작동 시험으로 이뤄진 밸브 내구성시험 내용과 함께 시험 결과를 소개하였다. 극저온 및 상온 내구성시험을 통해 밸브 작동 횟수와 상관없이 밸브의 작동 특성이 매우 안정적으로 유지되는 것을 확인하였다. 밸브 작동 특성을 대표하는 주요 압력 측정값과 마찰력 및 스프링 예측값이 밸브 내구성시험 내내 대략 최대 $\pm 3\%$ 이내 수준에서 동일하게 측정되었으며, 연소기 산화제 개폐밸브의 이와 같은 안정적인 밸브 작동 특성은 해당 밸브가 적용되는 엔진의 안정적인 시동 및 종료를 위한 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 기대한다.

Key Words: Main Oxidizer Shut-off Valve(연소기 산화제 개폐밸브), Life-Cycle Test(내구성시험), Operating Characteristics(작동 특성), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진)

1. 서 론

인 시동 및 종료는 필수적으로 요구되는 요소이며, 이를 구현하기 위해서는 엔진 시동 및 종료와 관련된 많은 기술적인 부분들이 고려되어야 한다[1]. 터보펌프를 최초 구동하는 파이로시동기의 특성, 엔진 시동 및 종료 시의 엔진 퍼지 특성 등, 엔진 시동 및 종료와 관련된 여러 기술적인 요소 중에서 추진제 공급과 차단을 담당하는 개폐밸브들의 작동 특성 또한 엔진의 안정적인 운용에 있어서 매우 중요한 요소들 중에 하나이다. 엔진 작동의 전반적인 운용 절차를 사이클로그래(cyclogram)이라 하는데, 이 사이클로그래에 따라 추진제 개폐밸브는 지정된 시점에 정확히 개방되고 닫힘으로써, 추진제 공급 및 차단이 엔진 운용 절차에 따라 예측 가능하도록 구현되어야 한다. 만약 사이클로그래 상에 설정되지 않은 시점에 밸브가 작동한다면 엔진의 안정적인 운용 자체가 불가능하게 된다. 또한 수차례의 엔진 시험을 감안할 때, 더욱 중요하게 고려되어야 할 부분은 밸브의 작동 특성이 엔진 운용 횟수에 상관없이 동일하게 유지되어야 한다는 것이다. 이에 본 논문에서는 액체로켓엔진용 주 개폐밸브들 중에서 고압, 고유량 및 극저온 환경이라는 가장 극한 환경에서 운용되는 연소기 산화제 개폐밸브에 대해 밸브 작동횟수에 따른 밸브 작동 특성 변화에 대한 시험 내용 및 결과를 정리하여 소개하고자 한다.

개발 초기의 연소기 산화제 개폐밸브에 대한 극저온 내구성시험에서의 밸브 작동 특성 내용을 일부 소개한 바가 있다[2]. 초기 밸브의 경우, 마찰력 변화가 미미하다는 가정 하에 극저온 작동 횟수가 증가할수록 스프링 상수가 서서히 증가하는 경향이 나타났는데, 이는 스프링 소재로 사용한 오일 템퍼션(Oil tempered wire)의 극저온 특성과 과도한 스프링 압축 길이에 의한 엔드 코일 효과(end-coil effect)에 의한 것으로 예측하였다. 결과적으로 스프링 상수 변화에 따른 밸브의 작동 특성 변화는 엔진의 안정적 운용에 커다란 위험 요소로 작용할 수 있다. 이후로 상당한 수준의 설계 개선이 이뤄졌는데[3], 충격과 피로에 대한 저항력이 상대적으로 강한 크롬-바나듐강(AISI 6150)으로 스프링 소재를 변경하였

으며, 불안정한 엔드 코일 효과를 없애기 위해 스프링의 운용 압축 길이가 스프링 전체 압축 길이의 20~80% 범위 내에서 유지되도록 조정하였다.

작동 횟수로 대표되는 연소기 산화제 개폐밸브의 내구성 요구조건은 일반적으로 상위 개발 체계로부터 결정되는데, 엔진 연소시험 즉 극저온 환경에서와 연소시험 전·후 상온 환경에서의 밸브의 총 작동 횟수를 고려하여 충분한 횟수의 작동 시험을 통해 밸브 작동 성능을 검증한다. 밸브 작동 횟수 증가에 따라 구동부 기밀면에서의 마찰력이나 스프링 상수의 변화가 생길 경우, 이로 인해 변화된 밸브 작동 특성, 특히 밸브 닫힘 압력이나 밸브 열림 압력 변화는 엔진의 안정적 운용에 상당한 위험 요소로 작용할 수 있다. 특히 한국형발사체용 연소기 산화제 개폐밸브의 구동부는 금속대 금속 기밀인 동시에 마찰면이 매우 강하게 눌린 상태에서의 고속의 움직임으로 인해 구동부 표면의 코팅 금속재의 이탈 등으로 인해 밸브 작동 특성 변화가 발생할 수 있기 때문에 밸브 제작 및 품질관리에 상당한 주의가 요구된다[4]. 한편 한국형발사체용 연소기 산화제 개폐밸브는 엔진의 최대 연소시험 횟수의 대략 3배 수준의 밸브 작동 횟수가 지 밸브의 모든 규격을 만족하여야 한다[5].

본 논문의 목적은 극저온 및 상온 작동 시험을 통해 연소기 산화제 개폐밸브의 작동 횟수 증가에 따른 작동 특성 변화에 대한 연구 결과를 소개하는 것이다. 또한 본 논문을 통해 한국형발사체용 75톤급 액체로켓엔진에 사용되고 있는 연소기 산화제 개폐밸브의 우수한 작동 특성을 소개하고자 한다. 우선 2절에서는 극저온 및 상온 내구성시험 방법과 함께 밸브의 일반적인 작동 특성을 제시하고, 3절에서는 밸브 작동 횟수에 따른 밸브 작동 특성 변화에 대한 시험 결과를 정리하도록 한다.

2. 시험 방법

2.1 극저온 내구성시험

극저온 내구성시험은 총 50회의 밸브 작동으

로 이뤄지며 운용유체로는 액체산소를 대체하여 액체질소를 사용하였다. 밸브 개방 시의 밸브 입구 압력 등은 엔진 운용 요구 조건에 따라 결정된다. 엔진 시동 시 파이로시동기에 의해 터보펌프 토출압이 증가하고 연소기 산화제 개폐밸브 전단까지의 산화제 공급 배관 내 압력이 일정 압력 수준까지 상승한 시점에서 밸브가 개방되는데, 이를 모사하기 위해 극저온 내구성시험에서는 최대 밸브 입구 압력(2.5 MPaG)이상의 압력이 가해진 상태에서 헬륨의 구동압을 이용하여 밸브를 개방한다. 밸브가 닫히는 과정 또한 엔진 운용 조건과 동일하게 운용유체인 액체질소의 압력 강하만으로 밸브가 닫힌다.

Fig. 1과 Fig. 2에서 각각 밸브가 열리고 닫히기 시작하는 시점에서 밸브 작동부에 작용하는 주요 힘들과 밸브 작동 시의 밸브 행정과 주요 압력 측정값을 확인할 수 있다. 밸브가 열릴 때 밸브가 열리는 방향과 반대로 작용하는 힘은 Fig. 1(a)에서와 같이 화살표가 아래쪽으로 표시되어 있는 운용유체 압력에 의한 힘 F_h , 밸브 작동부에 작용하는 마찰력 F_f 와 스프링 힘인 F_s 이다. 구동가스 공급에 의한 구동압력에 의한 힘 F_a 가 증가하여 Eq. 1과 같이 F_a 가 다른 힘들의 합과 같아지는 순간 밸브가 열리기 시작한다.

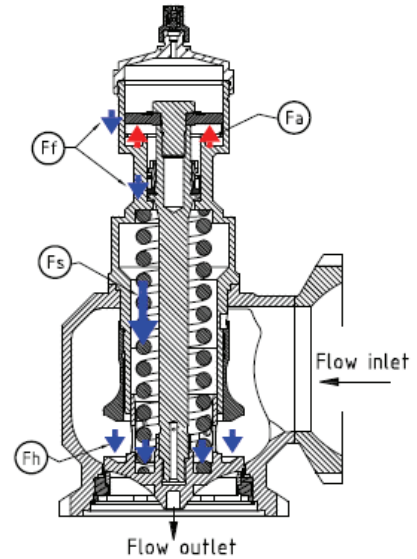
$$F_a = F_h + F_s + F_f \quad (1)$$

한편 밸브 개방이 시작되자마자 운용유체에 의한 힘 F_h 가 급격하게 감소하기 때문에 매우 빠른 속도로 밸브가 개방되며 이에 따라 순간적으로 증가한 밸브 구동부 공간에 의해 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 구동압력은 급격하게 감소한다. 이후 구동부 공간이 더 이상 증가하지 않는 시점, 즉 밸브가 완전히 열리게 되면 구동압력은 다시 증가하게 되는데, Fig. 2(a)에서 p_1 과 p_2 는 각각 밸브가 열리기 시작한 시점과 밸브 개방이 완료된 시점을 의미한다. 이는 30 mm인 밸브 행정 그래프와의 비교에서도 확인할 수 있다.

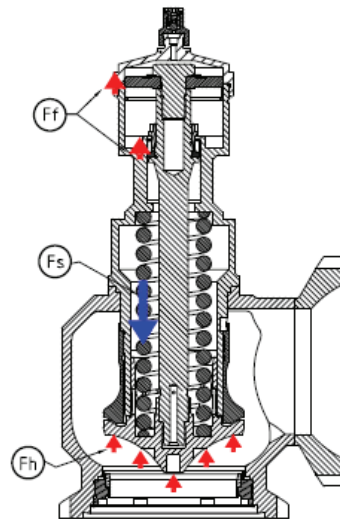
밸브가 닫힐 때는 Fig. 1(b)에서와 같이 구동압력없이 운용유체의 압력 강하만으로 작동하기

때문에 운용유체 압력에 의한 힘 F_h 가 Eq. 2와 같이 스프링 힘과 마찰력과의 차이와 같아질 때 밸브가 닫히기 시작한다.

$$F_h = F_s - F_f \quad (2)$$



a) At the moment of valve opening



b) At the moment of valve closing

Fig. 1 Forces acting on the valve moving part at the moment of valve opening and valve closing at cryogenic temperature.

밸브가 닫힐 때의 운용유체 압력 p_h 는 Fig. 2(b)에서와 같이 운용유체 압력 감소 기울기가 변하는 지점이 되는데, 이는 밸브 주유로를 통해 일정하게 감소하던 운용유체 압력이 밸브가 닫히기 시작하면서 유량계수가 상대적으로 더 큰 밸브의 재순환유로로 변경되면서 압력 감소 기울기가 변하기 때문이다. 한편 밸브 행정 측정값에서 보이는, 밸브가 닫히는 시점과 운용유체 압력 감소 기울기가 변화하는 시점과의 차이는 압력 센서와 연결된 매우 긴 압력 유도관에 의한 압력 측정 지연에 따른 것이다.

결국 극저온 내구성시험에서 밸브 작동 횟수에 따른 주요 압력값인 p_1 , p_2 , p_h 변화를 측정함으로써 밸브 작동 특성 변화를 손쉽게 확인할 수 있으며, 3절에서 해당 변화 경향에 대해 정리 하도록 한다.

2.2 상온 내구성시험

상온 내구성시험은 엔진 시험 전·후 밸브의 작동 건전성을 확인하는 밸브 작동 성능에 대한 내구성시험으로써, 운용유체 없이 구동가스의 압력만으로 밸브가 작동된다. Fig. 1(a)에 나타난 힘들 중에 F_h 가 없는 상태에서 F_a 에 의해 밸브를 작동시킴으로 밸브 작동부에 작용하는 힘은 Eq. 3과 같다.

$$F = \begin{cases} F_a - F_s - F_f & \text{for opening} \\ F_a - F_s + F_f & \text{for closing} \end{cases} \quad (3)$$

헬륨을 구동가스로 사용하는 상온 내구성시험의 일반적인 측정 결과는 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 상온 내구성시험은 총 100회의 작동을 수행하며 실제 구동가스인 헬륨과 함께 고유량 슬레노이드 밸브를 사용하기 때문에 고속으로 밸브가 작동된다. 헬륨을 구동가스로 사용할 경우

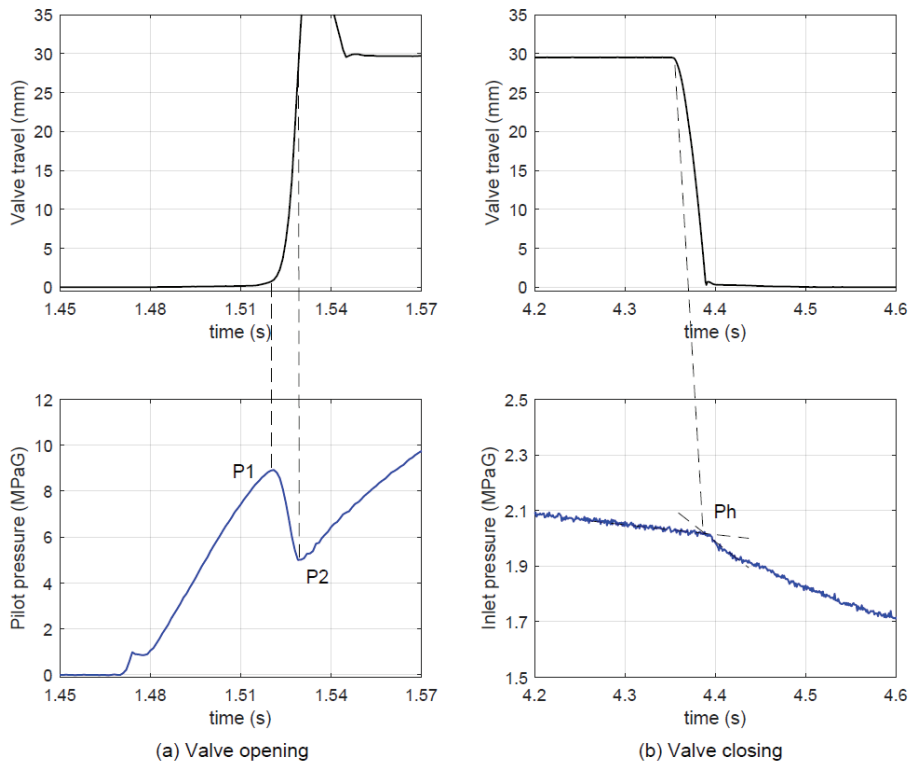


Fig. 2 Valve travel and critical pressures measured during the 2nd operating of the valve using LN2 (pilot gas: He).

의 밸브 개방에 소요되는 시간은 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 대략 14 ms로써, 밸브 행정 속도가 순간적으로 2.7 m/s 수준까지 이르며 매우 빠르게 개방된다. 헬륨을 구동가스로 사용하여 고속으로 밸브를 작동시킴으로써 실제 밸브 운용 환경에서와 동일한 수준의 작동 부하를 모사하게 된다. 한편 상온 내구성시험의 첫 회와 마지막 100회는 밸브 작동시험과 함께 밸브 구동부의 기밀시험을 동시에 수행하기 위해 질소를 사용하며, 헬륨에 비해 상대적으로 구동가스 압력이 느리게 상승하는 질소의 경우에는 밸브 개방에 소요되는 시간이 100 ms로 상당히 길어진다.

내구성시험에서의 밸브 작동 성능 변화에 대한 확인을 위해서, Fig. 3의 오른쪽 그래프와 같이 밸브 행정 대비 구동압력 선도를 활용하도록 한다. 밸브 행정 대비 구동압력 선도가 밸브 작동 횟수에 상관없이 일정하다면 밸브 작동 특성이 특별한 변화 없이 잘 유지되는 것으로 판단할 수 있다.

3. 시험 결과 및 토의

3.1 극저온 내구성시험

극저온 환경에서의 밸브 작동 특성을 정의할 수 있는 주요 압력값인 p_1 , p_2 , p_h 에 대한 밸브 작동 횟수에 따른 변화는 Fig. 4에서 확인할 수 있다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 총 50회의 밸브 작동 횟수에 상관없이 주요 압력 값들이 3% 이내에서 매우 안정되게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 실제 엔진 운용에서 예상되는, 밸브 입구 최대 압력은 대략 2.5 MPaG 수준이다. 이에 본 시험에서는 밸브 개방 시 밸브 입구의 액체질소 압력은 2.69 ± 0.05 MPaG로 유지하였으며, 이때의 밸브 개방 시 구동압력 p_1 과 밸브가 완전히 개방된 시점에서의 구동압력 p_2 는 각각 8.92 ± 0.28 MPaG과 4.88 ± 0.13 MPaG 수준에서 측정되었다. 또한 밸브가 닫힐 때의 운용유체 압력 p_h 는 1.97 ± 0.05 MPaG로써 극저온 내구성시험 내내 특이한 변화 없이 동일하게 유지되었다. 이전 밸

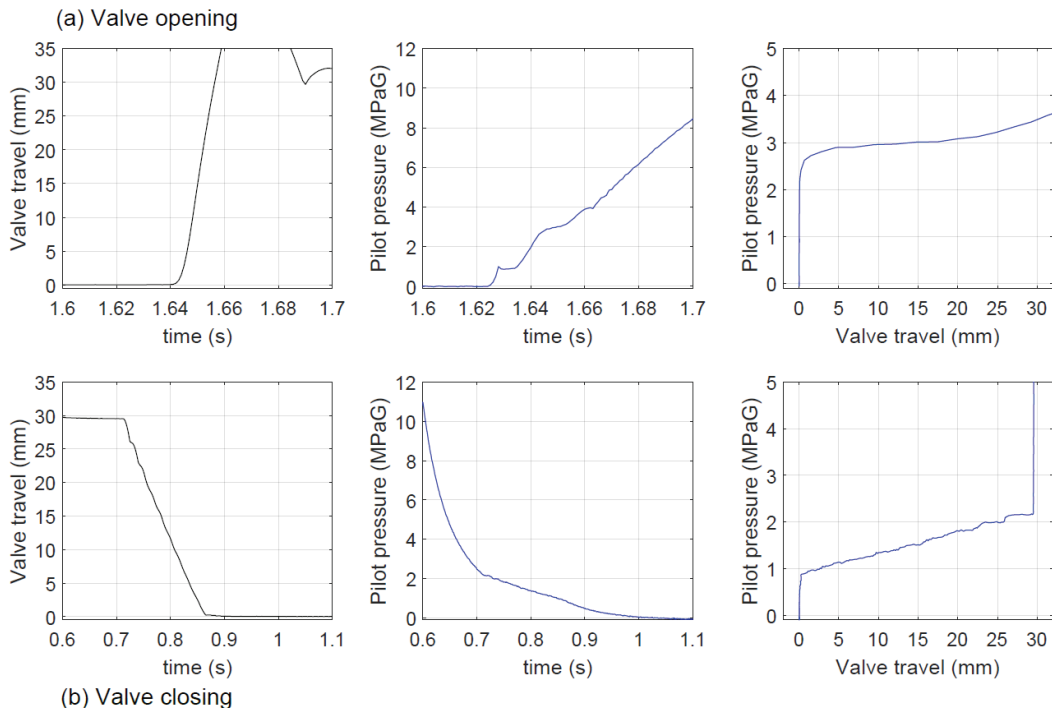


Fig. 3 Valve travel and pilot pressure measured during the 2nd operating of the valve using He as a pilot gas at room temperature.

브에서 문제가 되었던 극저온 내구성시험에서의 스프링 상수의 증가에 따른 밸브 작동 특성 변화[2]는 스프링 설계가 개선된 밸브에서는 나타나지 않았으며, 극저온 환경에서 밸브 작동 특성이 매우 안정하게 유지되는 것을 확인하였다.

3.2 상온 내구성시험

상온 내구성시험에서의 밸브 작동특성을 파악하기 위해 Fig. 5에서와 같이 밸브 행정에 따른 구동압력 변화를 활용하였다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 밸브 작동 횟수에 상관없이 밸브 작동 특성에 특이한 변화가 없음을 확인할 수 있다. 밸브가 개방되고 닫히는 과정에서 각 밸브 행정 위치에서의 구동압력이 밸브 작동 횟수 증가에 관계없이 동일하게 측정된 것을 볼 수 있다.

한편 Fig. 6에서 질소를 구동가스로 사용하는, 밸브 작동 1회와 100회 때의 밸브 행정에 따른 구동압력 측정값을 확인할 수 있다. 밸브 행정의 급격한 변화가 없도록 구동가스의 압력 변화 속도가 완만한 경우에는(질소를 구동가스를 사용하는 경우) 밸브 마찰력과 스프링 힘을 시험결과로부터 예측할 수 있다. Eq. 3의 양변을 밸브 행정, x 로 미분하게 되면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dF}{dx} = \frac{dF_a}{dx} - \frac{dF_s}{dx} \mp \frac{dF_f}{dx} \quad (4)$$

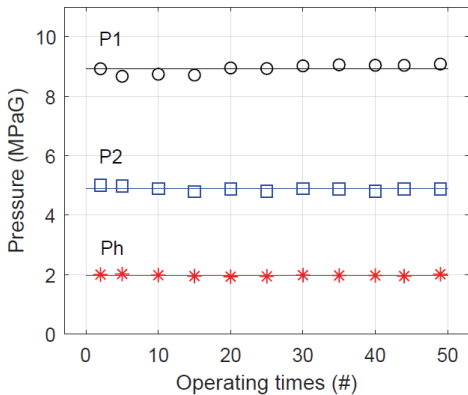


Fig. 4 Evolutions of critical pressures according to the valve operating times at cryogenic temperature.

여기서 구동압력이 충분히 완만하게 가압 및 해압되어 dF/dx 를 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하게 되면 Eq. 4에서 밸브 행정 변화에 따른 구동압력, p_a 변화율을 다음과 같이 간단히 예측할 수 있다.

$$\frac{dp_a}{dx} \approx \frac{k}{A_a} = \frac{133}{3044.2} = 0.0437 \text{ [MPa/mm]} \quad (5)$$

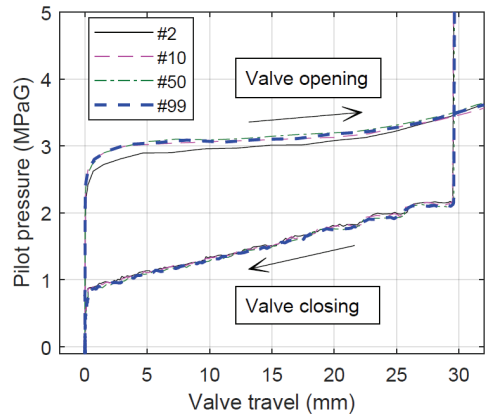


Fig. 5 Evolution of the pilot pressure and the valve travel according to the valve operating times at room temperature (pilot gas: He).

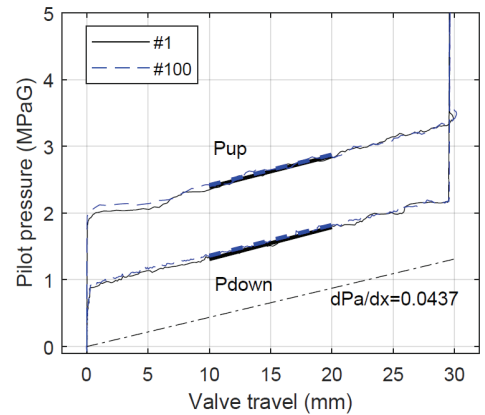


Fig. 6 Evolution of the pilot pressure and the valve travel according to the valve operating times at room temperature (pilot gas: GN2, thick solid lines: linear fitting).

여기서 k 와 A_a 는 각각 스프링 상수와 구동압력이 작용하는 면적을 의미한다. Eq. 5의 dp_a/dx 계산값과 Fig. 6에서 굵은 직선으로 나타낸 측정값의 기울기가 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. Fig. 6의 직선은 밸브 행정 10 mm에서 20 mm 사이에서의 밸브 행정에 따른 구동압력 측정값을 linear fitting한 것이다.

한편 Eq. 3의 두 식을 더하고 뺄으로써($F \approx 0$), 각 밸브 행정에서의 밸브 마찰력과 스프링 힘을 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$F_f \approx \frac{(p_{up} - p_{down})A_a}{2} \quad (6)$$

$$F_s \approx \frac{(p_{up} + p_{down})A_a}{2}$$

따라서 p_{up} 과 p_{down} 차이가 마찰력의 크기에 비례하는데, 밸브 행정 및 상온 내구성시험 전·후(1회와 100회 작동)로 일정한 폭이 유지되는 것을 확인할 수 있다. Eq. 6에 의해 계산된 마찰력은 1600 N이며, 이는 일반적인 마찰력 수준이라 할 수 있다[6]. 한편 p_{up} 과 p_{down} 의 평균값은 해당 밸브 행정 지점에서의 스프링 힘에 비례하는데, 상온 내구성시험 전·후의 10 mm에서 20 mm 사이 지점에서 측정된 스프링 힘의 차이는 대략 1%내외로 매우 미미하게 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서 연소기 산화제 개폐밸브의 안정적인 작동 특성을 검증하기 위해 극저온 및 상온 내구성시험에 대한 내용과 시험 결과를 소개하였다. 초기 개발 밸브의 경우, 밸브 작동 횟수 증가와 함께 스프링 상수 증가로 인해 극저온 환경에서의 밸브의 작동 특성이 변하는 특성이 있었으나[2], 설계가 개선된 밸브는 이와 같은 작동 특성 변화가 나타나지 않았다. 밸브의 작동 특성을 대표하는 주요 압력 측정값들이 밸브 작동 횟수와 상관없이 극저온 환경에서 최대 3%이내에서 동일하게 유지되었으며, 마찰력 및 스프

링 힘 또한 상온 내구성시험을 통해 매우 동일한 수준으로 유지되는 것을 확인하였다. 본 논문을 통해 한국형발사체용 액체로켓엔진에 적용되어 사용되고 있는 연소기 산화제 개폐밸브의 우수한 작동 특성을 다시 한 번 확인할 수 있었으며, 이와 같은 신뢰성 높은 밸브 작동 특성은 엔진의 안정적인 운용에 요구되는, 엔진 구성품으로써 역할을 충분히 다할 수 있을 것으로 기대한다.

References

1. Lee, K.-J. et al., "A Review on the Factors Influencing the Stable Startup of a Liquid Rocket Engine," *Proceeding of the Korean Society for Propulsion Engineers Spring Conference*, May 2019, KSPE 2019-1173, 2019.
2. Jeong, D., Hong, M. and Han, S., "Performance Characteristics of a Main Oxidizer Shutoff Valve for Liquid Rocket Engines," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 4, pp. 28-35, 2017.
3. Hong, M., "Design Improvement of Main Oxidizer Shut-off Valve DM05 for a 75-tonf Liquid Rocket Engine," L2-DR-01639, KARI-IDMS, 2017.
4. 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.
5. Hong, M., "Specifications for a 75-tonf Main Oxidizer Shut-off Valve," L2-SP-00223, KARI-IDMS, 2020.
6. Hong, M., "Acceptance Test of Main Oxidizer Shut-off Valve DM08-01 for a 75-tonf Liquid Rocket Engine," L2-TR-01766, KARI-IDMS, 2018.