

Technical Paper

DOI: <https://doi.org/10.6108/KSPE.2024.28.2.075>

2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브 작동시험

홍문근^{a,b,*}

Operating Tests of a Two-Step Opening Main Oxidizer Shut-off Valve

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

ABSTRACT

Recently, we have developed a shut-off valve for a liquid rocket engine that can supply a reduced amount of oxidizer during ignition and start-up. By partially opening the valve and supplying a small quantity of oxidizer, it is possible to enhance ignition reliability and achieve flexible engine start-up. This paper presents the results of operating tests performed on a two-step opening oxidizer shut-off valve, which enables gradual control of the oxidizer supply amount. Experimental tests were conducted to validate the operational characteristics of the valve by adjusting the orifice diameter, which regulates the pilot gas pressures. The tests confirmed the valve's performance, including its extremely short operating time required during the ignition and starting sequence of the actual engine.

초 록

액체로켓엔진의 점화 및 시동 과정에서 짧은 시간 동안 정격 유량보다 적은 양의 산화제를 공급할 수 있는 산화제 개폐밸브가 개발 중이다. 밸브의 부분 개방을 통해 소량의 산화제를 선공급함으로써 엔진 점화 신뢰성을 높이고 유연한 엔진 시동을 구현할 수 있다. 본 논문에서 산화제 공급량의 단계적 조절이 가능한 연소기 산화제 개폐밸브에 대한 작동시험 내용을 소개하기로 한다. 구동가스 공급량을 조절하는 오리피스 지름 변화에 따른 밸브 작동특성을 시험적으로 확인하였다. 또한 실제 엔진의 점화 및 시동 과정에서 요구되는 매우 짧은 밸브 작동시간 등 밸브의 주요 작동 성능의 건전성을 시험을 통해 검증하였다.

Key Words: Oxidizer Shut-off Valve(산화제 개폐밸브), Poppet Valve(포핏 밸브), Partial Opening(부분개방), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진)

Received 4 December 2023 / Revised 23 March 2024 / Accepted 26 March 2024

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2023년도 추계학술대회(2023.11.29.~12.1,

경주 리한셀렉트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

액체로켓엔진용 연소기 산화제 개폐밸브는 비

교적 간단한 개폐 작동을 통해 연소기로 액체 산소를 공급 및 차단한다[1]. 볼밸브, 버터플라이 밸브, 포핏 밸브 등 다양한 방식의 밸브가 액체 로켓엔진용 연소기 산화제 개폐밸브로 사용되고 있는데, 한국형발사체 액체로켓엔진용 연소기 산화제 개폐밸브를 포함하여 국내 액체로켓엔진용 추진제 공급시스템의 개폐밸브에는 대부분 포핏 밸브가 적용되고 있다[2-6]. 포핏 밸브는 피스톤의 왕복 운동에 필요한 에너지를 공급하는 고압의 가스로 구동하는 액추에이터(actuator)로 작동된다.

일반적인 산화제 개폐밸브는 단순 온·오프 작동을 통해 산화제 공급을 완전 차단하거나 설계 유량으로만 산화제를 공급하기 때문에 액체 로켓엔진의 시동 특성을 제어하는데 어느 정도의 한계를 가지고 있다. 반면에 2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브는 엔진 점화·시동 구간에서의 정격 유량보다 적은 유량의 산화제를 공급할 수 있으므로 엔진 시동 특성을 보다 정교화하고 최적화할 수 있는 장점을 가지게 된다[7]. 2단계 개방 산화제 개폐밸브는 엔진 시동 구간에서 적은 산화제 유량을 사용할 수 있으므로 엔진 점화 충격을 감소시킬 수 있다. 적은 산화제 유량으로 점화된 연소기 내부에 일정 수준의 연소압이 형성되기 때문에 상대적으로 높은 터보펌프 토출압력에서, 즉 상대적으로 높은 밸브 입구 압력 조건에서 산화제 개폐밸브가 완전히 개방하더라도 점화 및 연소 충격이 커지지 않는다. 결과적으로 밸브의 부분 개방 기능은 액체 로켓엔진의 점화 및 시동 특성의 유연성을 가질 수 있는 장점이 있다.

또한 추진제의 부분적인 공급을 통해 주 공급 배관의 연소기 산화제 개폐밸브 개방 시점의 운용 범위가 상대적으로 확장되어 엔진 점화 시동 특성을 더욱 효과적으로 제어할 수 있다. 상대적으로 높은 밸브 입구 압력 조건에서 밸브를 개방할 수 있으면, 다시 말해, 더욱 높은 펌프 출구압력에서 밸브를 개방하게 되면, 연료 공급 배관의 압력과 연동되는 연소기 점화제 공급 시점 또한 유연하게 조절할 수 있다. 참고로 한국형발사체 액체로켓엔진은 상대적으로 낮은 밸브 입

구 압력 조건에서 산화제 개폐밸브가 개방되는 엔진 시동 절차(sequence)로 엔진이 운용되었으나[8]. 차세대발사체에서는 2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브를 사용하여 보다 최적화된 엔진 점화 및 시동을 할 수 있을 것으로 기대되고 있다. 엔진 점화 시동 구간에서의 추진제의 단계적 공급의 실제적인 한 예로써 한국형발사체 액체로켓엔진의 초기 연소시험 과정에서 산화제 주 공급배관과 별도로 우회 배관(bypass)과 밸브를 설치하여 주 공급배관 개방 전에 소량의 산화제를 연소기로 선공급하였다. 우회 배관으로 공급된 소량의 추진제 점화 및 연소로 연소기 내부 압력이 일정 수준 존재하는 상태에서, 다시 말해 안정된 점화가 확보된 상태에서 산화제 주 공급배관을 완전 개방함으로써 상대적으로 부드러운 시동을 구현한 바가 있다.

액체로켓 상단 엔진용으로 부분 개방이 가능한 볼밸브 방식의 산화제 개폐밸브가 개발된 바가 있으나, 해당 밸브 작동을 위해서는 두 개의 독립적인 구동가스 공급시스템이 요구된다[9]. 반면에 본 논문의 밸브는 별도의 추가적인 구동가스 공급 없이도 부분 개방이 가능함으로써, 보다 간소한 시스템 구성으로 엔진 고장 위험성을 줄일 수 있는 장점이 있다[9]. 포핏 밸브 방식의 연소기 산화제 개폐밸브의 2단계 작동 가능성은 이전 연구를 통해 이미 검토한 바가 있으나[10], 실제 액체로켓엔진에 적용하기 위해서는 엔진 운용에 필요한 까다로운 요구조건들을 만족하여야 한다. 그 주요 요구조건의 하나로써, 일정 시간 동안에 안정된 부분 개방이 유지되어야 하고 밸브의 완전 개방은 최소 1~2초 이내의 짧은 시간에 이뤄져야 한다. 더욱이 이와 같은 작동 요구조건들의 만족 여부는 밸브와 연결되는 구동가스 공급시스템의 유량계수 등 엔진의 다른 구성품들의 성능과도 밀접하게 연관되어 있다.

다음 절에서 2단계 개방 작동 원리에 대해 우선 간단한 설명과 함께 엔진에서의 밸브 작동에 영향을 주는 주요 설계 변수들에 대해 탐색해 보기로 한다. 이후 3절에서는 실제 엔진 운용 모사 환경에서의 밸브 작동 시험을 통해 액체로켓엔진에의 적용 가능성을 확인해 보도록 한다.

2. 작동 원리 및 주요 설계 요소

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 서로 연결된 Cavity (공동) 1과 Cavity 2간 구동가스의 가압과 해압 과정에서 발생하는 두 Cavity 내부의 구동가스 압력차를 활용하여 2단계 개방이 이뤄진다. 포트 P1으로 구동가스가 공급 및 배출되는데, P1을 통해 공급되는 구동가스는 우선 Cavity 1을 거쳐, 포트 P2와 P3로 연결된 배관을 통해 Cavity 2를 채운다. 이같이 공급되는 구동가스의 흐름에 의해, Cavity 1의 구동압력, p_{a1} 은 Cavity 2의 구동압력, p_{a2} 보다 항상 높게 유지된다. 이 과정에서 두 Cavity 내부 압력 증가율을 P2와 P3 사이에 설치된 오리피스 크기에 의해 결정된다. p_{a1} 에 의해 스톱퍼가 부분 개방 위치까지 눌리면서 밸브 작동부가 완전히 개방되지 않도록 한다. 결국 두 Cavity에 구동가스를 공급함으로써, Fig. 1(c)와 같이 밸브는 중간 개방된다.

부분 개방 이후, P1으로 구동가스를 배출함으로써 밸브가 완전히 개방된다. Cavity 2에서

Cavity 1으로 구동가스가 배출됨으로써 p_{a2} 는 항상 p_{a1} 보다 높은 압력 상태를 유지한다. p_{a2} 에 의한 힘이 p_{a1} 에 의한 스톱퍼의 누르는 힘과 마찰력 등 반대 방향으로 작용하는 힘들의 합보다 충분히 거치게 되면 Fig. 1(d)와 같이 밸브는 완전 개방된다.

부분 개방에서 밸브가 완전 개방되기 위해서는 p_{a2} 가 p_{a1} 보다 일정 수준 이상의 압력을 유지하여야 한다. 두 Cavity 내부 압력 차이를 나타내는 특정식, $p_{a2} - 0.93 \times p_{a1} (\equiv \widetilde{\Delta p}_a)$ 의 완전 개방을 위한 최소값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_{a2} &= F_{a1} + F_f + F_s \\
 p_{a2}A_{a2} &= p_{a1}A_{a1} + F_f + F_s \\
 p_{a2} - \frac{A_{a1}}{A_{a2}} \times p_{a1} &= \frac{F_f + F_s}{A_{a2}} \quad (1) \\
 p_{a2} - 0.93 \times p_{a1} &\equiv \widetilde{\Delta p}_a \approx 3.55 [MPa]
 \end{aligned}$$

여기서, F_{a1} 와 F_{a2} 는 Cavity 1과 Cavity 2에

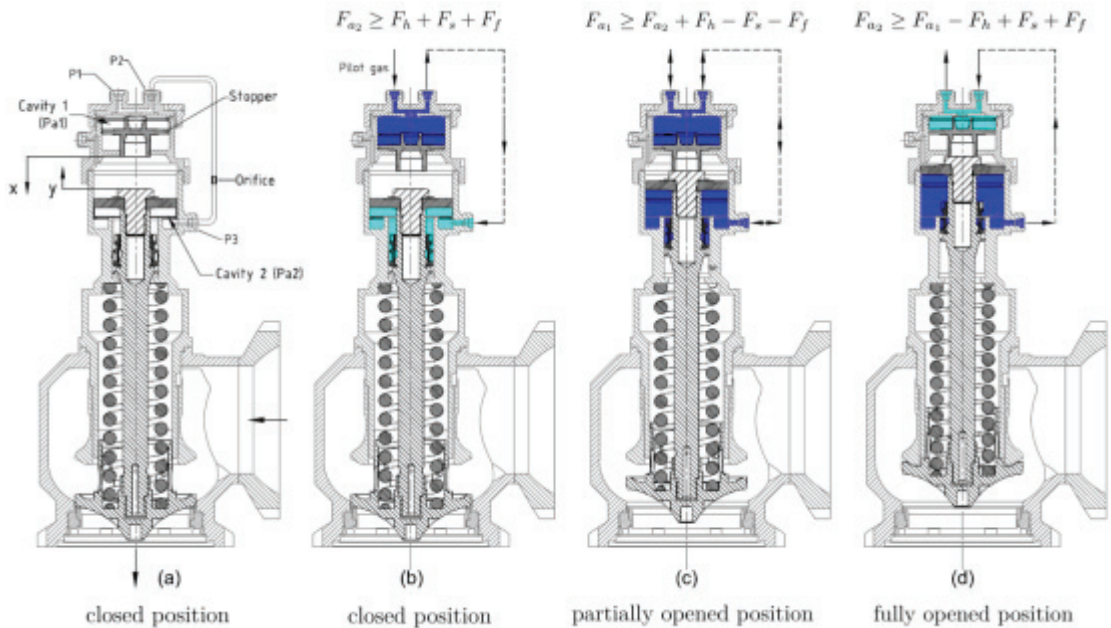


Fig. 1 Operating mechanism of a two-step opening valve (F_{a1} : Pneumatic force by p_{a1} , F_{a2} : Pneumatic force by p_{a2} , F_h : Hydraulic force by the operating flow, F_s : Spring force, F_f : Friction force).

작용하는 구동가스에 의한 힘을 나타내며, F_f 과 F_s 는 각각 밸브 작동부에 작용하는 마찰력과 스프링 힘을 의미한다. 식 (1)은 운용유체에 의한 힘 F_h 가 없는 경우의 밸브 작동부에 작용하는 힘평형에 관한 식이다. A_{a1} 와 A_{a2} 는 각각 p_{a1} 와 p_{a2} 가 작용하는 면적을 의미하며, 특정식 $\tilde{\Delta p}_a$ 의 계수값 0.93은 A_{a1} 와 A_{a2} 의 면적비로 계산된다. 식 (1)은 최대 마찰력(4000 N)을 고려한 것으로써[11], $\tilde{\Delta p}_a$ 가 3.55 MPa 이상이 되면 밸브 완전 개방이 시작되고, 밸브의 완전 개방까지 필요한 $\tilde{\Delta p}_a$ 는 4.19 MPa 이상이어야 한다. 한편, 밸브가 완전히 개방된 이후에는 구동가스가 없는 상태에서도 운용 유체인 액체산소의 유로 압력에 의한 힘, F_h 에 의해 밸브 개방이 유지된다.

이처럼 구동가스의 공급과 배출을 통해 이뤄지는 2단계 개방 작동 성능에 있어서 중요한 설계 요소로는 밸브 작동부의 운동에 관여하는 힘들이라고 할 수 있다. 마찰력이나 스프링 힘, 그리고 밸브 작동 과정에서의 운용유체 압력 등도 중요하겠지만, 무엇보다도 두 Cavity 내부 압력 변화를 결정하는 오리피스 크기가 주요 설계 변수라고 볼 수 있다. 또한 일반적인 액체로켓엔진의 점화·시동 시간을 고려해 볼 때, 2단계 개방 작동은 1~2초 이내의 매우 빠른 시간에 이뤄져야 한다. 2단계 개방 작동 성능 자체뿐만 아니라 짧은 작동시간 요구조건에 만족 여부는 구동가스 공급시스템의 유량계수 성능과 매우 밀접한 관계가 있는데, 기존 밸브 작동시험 결과로부터 해당 유량계수 성능이 충분히 높은 것을 확인할 수 있다[11].

3. 작동시험 및 평가

3.1 시험방법 및 작동시험

Fig 2에서 2단계 개방 작동시험을 위해 설치된 밸브와 측정 센서들의 모습을 확인할 수 있

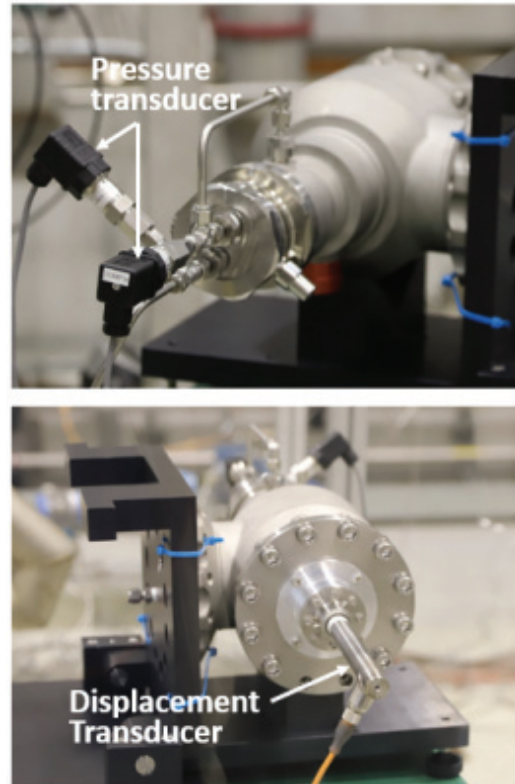


Fig. 2 Experimental setup for two-step opening operating tests.

다. Cavity 1과 Cavity 2 내부 압력 측정을 위해 Keller사의 압전저항 압력센서(PA-235Y)를 사용하였으며, RDP Group사의 스프링 리턴 방식의 변위측정기(ACW1000A)를 이용하여 밸브 행정을 측정하였다. 측정 샘플링 주파수는 1 kHz로 설정하였다. 엔진 운용환경에서의 밸브 작동특성을 파악하기 위해 실제 엔진에 설치되는 밸브 구동용 솔레노이드 밸브와 구동가스 공급 배관을 사용하였다.

1.4 mm 지름의 오리피스를 적용한 경우에서의 2단계 개방 작동시험을 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 구동가스 공급과 배출 과정에서 Cavity 1과 Cavity 2의 내부 압력 변화에서 볼 수 있듯이(Fig. 3(a) 참조), 구동가스 공급 중에는 p_{a1} 이, 그리고 구동가스 배출 중에는 p_{a2} 가 각각 상대적으로 높은 압력값이 유지되는 것을 확인할 수

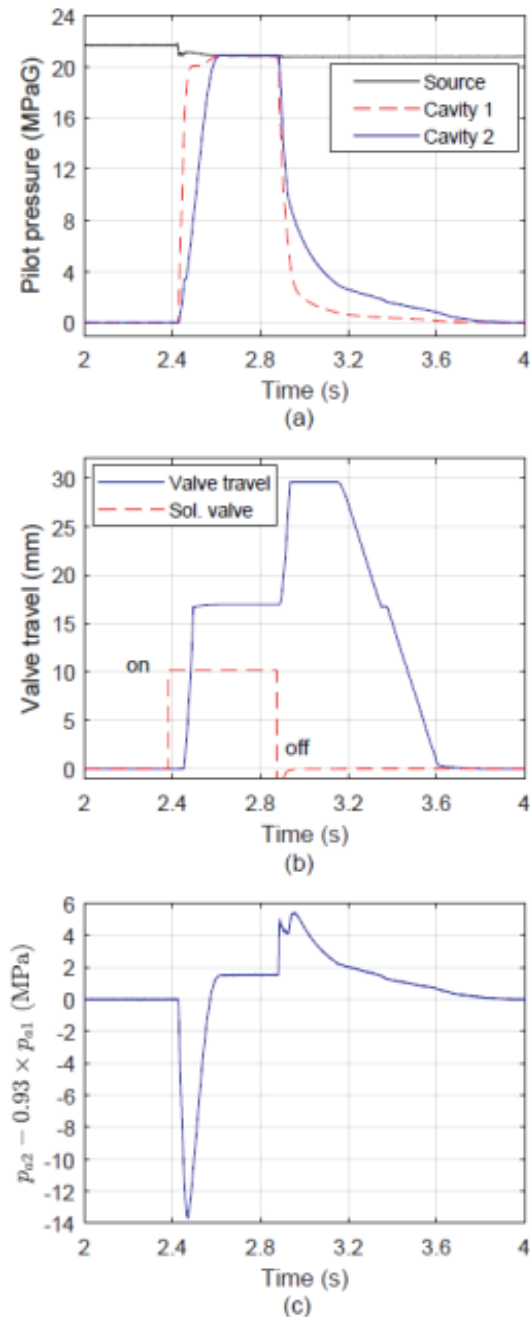


Fig. 3 Operating test using an orifice with a diameter of 1.4 mm.

있다. 이러한 Cavity 내부 압력 변화는 Cavity 사이에 설치된 오리피스 지름에 의해 조정된다. Fig. 3(b)에서와 같이 구동가스 공급시스템에 설

치된 3-way 솔레노이드 밸브를 개방하면 구동가스가 공급되면서 밸브 행정 16.5 mm 지점까지 중간 개방된다. 이후 솔레노이드 밸브를 닫아 구동가스를 배출하면 밸브 행정 30 mm까지 완전 개방이 이뤄지는 것을 볼 수 있다. 결과적으로 밸브의 2단계 개방이 0.5초 이내 수준까지 매우 빠르게 진행되는 것을 확인하였다.

Fig. 3(c)에서 볼 수 있듯이 \tilde{p}_a 가 4~5 MPa 수준에서 밸브가 완전 개방된 것을 확인할 수 있는데, 이는 식 (1)의 예측 결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다. \tilde{p}_a 가 2.89초 부근에서 순간적으로 감소하는 이유는 밸브가 완전히 개방되면서 Cavity 1과 Cavity 2의 내부 공간이 순간적으로 각각 감소하고 증가하기 때문이다.

3.2 오리피스 크기 변화에 따른 작동특성

스토퍼와 구동부 사이 오리피스 지름 1.4 mm, 1.6 mm, 1.8 mm, 2.0 mm를 설치하여 작동특성 변화를 확인하였다. Fig. 4에서와 같이 오리피스 지름이 작아질수록 p_{a2} 의 압력 변화 속도 또한 감소한다. p_{a2} 의 압력 변화 속도가 작아지면 완전 개방에 필요한 p_{a1} 과의 차압 확보는 유리해 지지만, 밸브 최초 개방 시점이 상대적으로 지연되는 단점이 있을 수 있다. 그런데 Fig. 4의 p_{a2} 의 압력 증가 기울기 변화로부터, 오리피스 지름 1.4 mm와 2.0 mm 사이의 밸브 최초 개방 시점 및 밸브 행정 시간 차이는 대략 0.01~0.02초에 불과한 것으로 측정되었다. 따라서, 오리피스 지름 변화에 따른 밸브의 중간 개방 지점까지의 개방 특성 변화는 매우 미미하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5에 오리피스 지름 변화에 따른 밸브 행정과 \tilde{p}_a 값의 변화를 나타내었다. 오리피스 지름이 작으면 p_{a1} 과 p_{a2} 간의 큰 차압이 충분한 시간 동안 유지되면서 밸브가 완전히 개방된다. 오리피스 지름이 1.4 mm인 경우, \tilde{p}_a 값이 5.02 MPa까지 상승한 이후 스톱퍼가 이동 압축되면서 (완전 개방이 시작되면서) 4.06 MPa까지 감소한다.

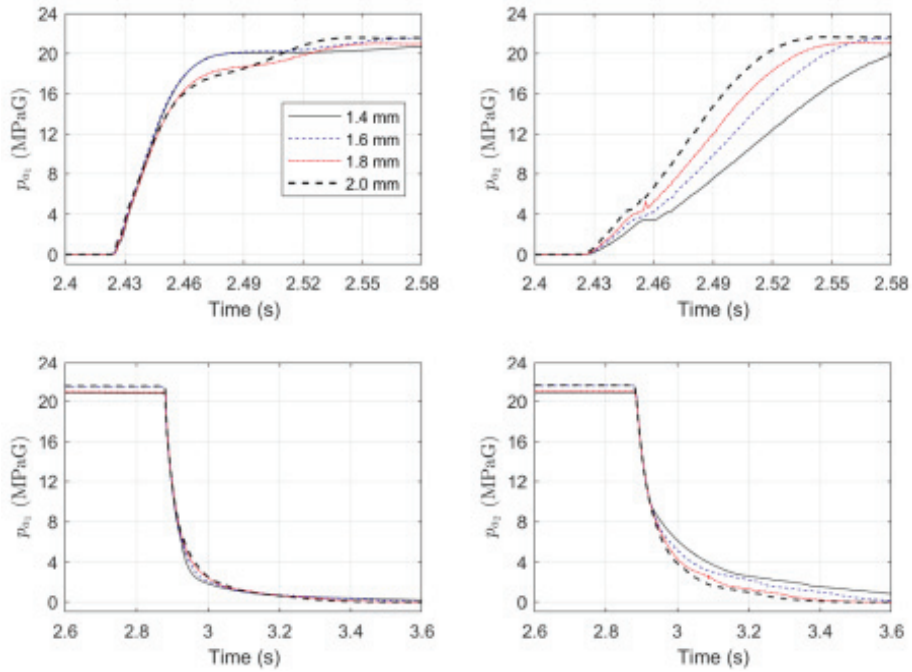


Fig. 4 Evolution of pilot pressures according to the orifice sizes (top: pressurization, bottom: depressurization).

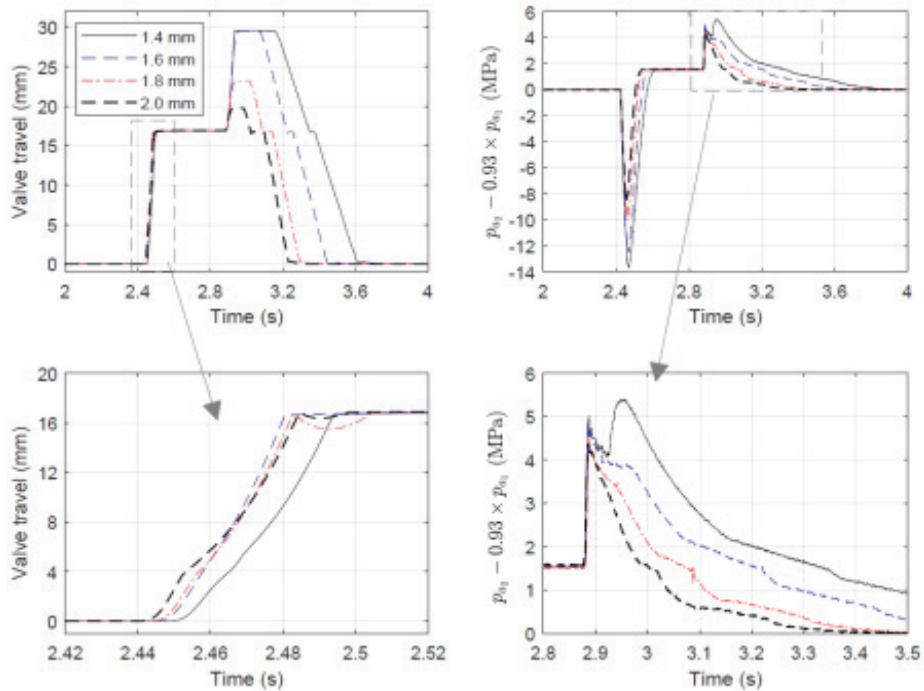


Fig. 5 Evolution of valve travel and pilot pressure difference according to the orifice sizes.

이후 p_{a1} 과 p_{a2} 의 해압 속도 차이에 의해 $\bar{\Delta}p_a$ 값이 5.40 MPa까지 다시 증가한 후 서서히 감소한다. 1.6 mm 지름의 오리피스 경우에는 완전 개방 후 $\bar{\Delta}p_a$ 의 추가적인 증가는 없지만 일정 수준의 $\bar{\Delta}p_a$ 가 유지되면서 밸브의 완전 개방 상태가 지속되었다. 반면, 지름 1.8 mm와 2.0 mm의 오리피스 경우에는 $\bar{\Delta}p_a$ 값이 일정 수준 이상 유지되지 못하면서 완전 개방이 이뤄지지 않는다. 오리피스 지름 2.0 mm의 경우, $\bar{\Delta}p_a$ 의 순간 최대값은 4.38 MPa까지 상승했지만, 이후 급격히 감소하면서 밸브가 완전히 개방되지 않았다.

결과적으로 안정적인 2단계 개방을 위해서는 p_{a1} 과 p_{a2} 간의 충분한 차압이 충분한 시간 동안 유지되어야 한다는 것을 알 수 있다. 결국 스토퍼 압축에 따른 $\bar{\Delta}p_a$ 값의 감소 이후에 $\bar{\Delta}p_a$ 값의 재상승 및 일정한 수준 유지 여부가 2단계 개방 설계 기준이 될 수 있다. 한편, 밸브의 최초(1단계) 개방 행정을 나타낸 그래프에서는 오리피스 지름이 2.0 mm까지 커짐에도 불구하고 밸브 행정 시간이 오히려 증가한 것으로 나타났는데, 이는 밸브 행정 속도를 측정할 수 있을 만큼 LVDT의 반응 속도가 빠르지 못하기 때문이다. 오리피스 지름이 커질수록 밸브의 개방 시작 시점과 1단계 개방까지의 밸브 행정 시간이 대략 0.01~0.02초 수준에서 빨라지는 것을 확인할 수 있다.

3.3 밸브 입구 압력이 있는 경우

밸브 입구 압력이 없는 경우에는 구동용 솔레노이드 밸브가 닫히면, 다시 말해 구동압력이 없으면 개방 상태를 유지하지 못한 채 바로 닫힌다. 이에 엔진의 실제 운용 상태에서의 밸브 작동(self-sustain opening)을 확인하기 위해 밸브 입구 압력에 주유로 압력을 모사하여 2단계 작동시험을 수행하였다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 상대적으로 높은 입구(내부) 압력인 경우(~2.8 MPaG), 구동압력이 없음에도 불구하고 밸브 입구 압력에 의해 밸브의 완전 개방이 유지되는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4와 5에서 볼 수 있

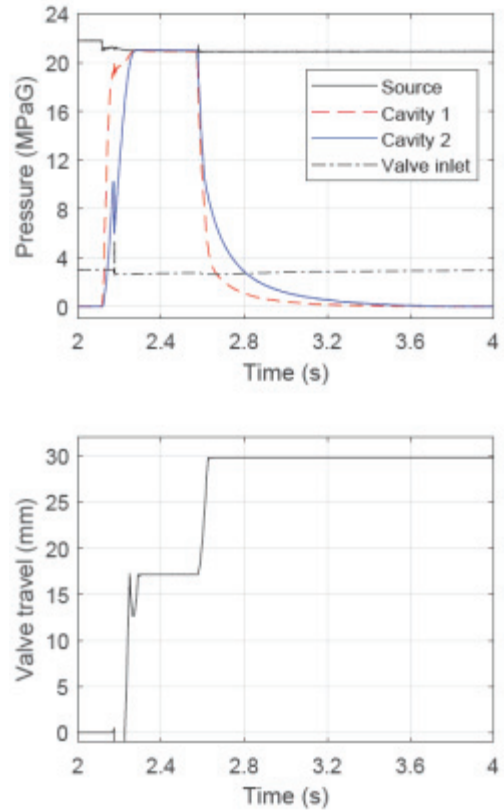


Fig. 6 Opening test with the inlet pressure of 2.98 MPaG (orifice diameter: 1.6 mm).

듯이, 오리피스 지름 1.6 mm 적용 시 밸브 입구 압력이 없는 경우에는 p_{a2} 가 2.91 MPaG에서 밸브 개방이 시작된 반면에 밸브 입구 압력이 2.98 MPaG인 경우에는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 p_{a2} 가 10.3 MPaG까지 상승해서야 밸브 개방이 시작된다[12].

4. 결 론

액체로켓엔진의 점화 및 시동 중에 산화제 개폐밸브를 부분적으로 개방하여 소량의 산화제를 공급함으로써, 엔진 점화 신뢰성을 높이고 동시에 엔진 시동을 유연화할 수 있다. 이에 2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브의 작동 성능을 확인하기 위해 엔진의 실제 운용 환경을 고려한

작동시험을 수행하였다. 밸브의 안정적인 완전 개방을 위해서 오리피스의 지름은 1.6 mm 이하 수준의 상대적으로 작은 유량계수 특성을 가질 필요가 있으며 이에 따른 밸브 초기 1단계 개방 지연은 매우 미미한 것으로 확인되었다. 밸브 개발의 핵심 요구조건으로써, 안정적으로 유지되는 밸브 부분 개방과 이후 완전 개방이 1초 이내의 매우 짧은 시간에 작동될 수 있음을 작동시험을 통해 검증하였다. 향후 2단계 개방 산화제 개폐 밸브를 적용한 실제 액체로켓엔진의 연소시험을 통해 밸브 성능을 검증할 예정이다.

References

1. Sutton, G.P., Rocket Propulsion Elements, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., New York, N.Y., U.S.A., 1992.
2. 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 for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 37, No. 8, pp. 812-818, 2009.
3. Park, H., Bae, Y., Jang, K., Lee, S., Hong, M. and Lee, S.Y., "Development of a Main Oxidizer Shut-off Valve for Liquid Rocket Engine," 60th International Astronautical Congress, Daejeon, Korea, Oct. 2-9, 2009.
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. Lee, J. and Huh, H., "Dynamic Characteristics for Fuel Shutoff Valve of a Gas Generator," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 14, No. 4, pp. 1-9, 2010.
6. Kwon, O., Lee, G., and Kim, J., "Cryogenic Valve Opening Characteristics According to Pilot Gas Flow Rate," *Spring Symposium of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 2022.
7. Park, S.Y. and Cho, W.K., "A Study on the 2-Stage Startup of Liquid Rocket Engine," *Proceedings of The 5th National Congress on Fluids Engineering Jeju, Korea*, March 26-28, 2008.
8. Lee, K.-J. et al., "A Review on the Factors Influencing the Stable Startup of a Liquid Rocket Engine," *Spring Symposium of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 2019.
9. Dantine, G., Servais, T., Lambert, G. and Dambaut, L., "Three-Position Pneumatic Ball Valve," *The 4th International Conference on Launcher Technology "Space Launcher Liquid Propulsion"*, Liege, Belgium, Dec. 3-6, 2002.
10. Hong, M., "Development of a Two-Step Main Oxidizer Shut-Off Valve," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 45, No. 8, pp. 704-710, 2017.
11. Hong, M., "Opening Characteristics of a Main Oxidizer Shut-off Valve," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 45, No. 11, pp. 989-997, 2017.
12. Hong, M., "Opening Characteristics of a Main Oxidizer Shut-Off Valve at Different Valve Inlet Pressures," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 48, No. 10, pp. 801-807, 2020.