

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 45(8), 704-710(2017)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2017.45.8.704

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브 개발

홍문근*

Development of a Two-Step Main Oxidizer Shut-off Valve

Moongeun Hong*

Launcher Propulsion Control Team, Korea Aerospace Research Institute, Korea
Aerospace System Engineering Department, University of Science and Technology, Korea

ABSTRACT

The supply of the liquid oxygen into a rocket combustor is simply controlled by the 'on' and 'off' positions of a main oxidizer shut-off valve. However, the partially opened position of a three-position valve can control and optimize the engine start transients by regulating the liquid oxygen flow rate during the start-up of the engine. In this paper, the design and performances of a three-position pneumatic poppet valve, which is intended to be employed in liquid rocket engines, have been presented.

초 록

액체로켓엔진용 연소기 산화제 개폐밸브는 단순 온·오프 개폐작동을 통해 연소기로의 산화제 공급 유무만을 제어하기 때문에, 산화제 공급 유량 조절을 통한 엔진 점화·시동 특성 제어 및 최적화에 한계가 있는 반면에 2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브는 밸브의 부분 개방에 의해 산화제 공급 유량을 조절함으로써 엔진 점화·시동 특성을 제어할 수 있는 이점이 있다. 이에 본 논문에서는 액체로켓엔진용 2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브 개발을 위한 기본 설계 내용과 함께 밸브 작동성에 관한 검증시험 결과를 소개하기로 한다.

Key Words : Main Oxidizer Shut-off Valve(연소기 산화제 개폐밸브), Three-Position Valve(2단계 개방 밸브), Partial Opening Valve(부분 개방 밸브), Self-Sustainable Valve(자체유지형 밸브), Liquid Rocket Engine(액체로켓엔진)

1. 서 론

우주발사체 액체로켓엔진용 연소기 산화제 개폐밸브는 비록 비교적 간단한 온·오프 작동만으로 연소기로의 산화제 공급을 제어하지만, 고압, 고유량의 극저온 액체산소가 산화제로 사용되기 때문에 일반 산업용 극저온 개폐밸브에 비해 밸브 운용 환경 자체가 매우 가혹할 뿐만

아니라, 밸브 누설기준, 밸브 열림 압력 등과 같은 밸브 작동 특성, 밸브의 무게 제한 등 관련 개발요구조건의 난이도가 상당히 높다고 볼 수 있다. 한국형발사체 액체로켓엔진용 연소기 산화제 개폐밸브의 경우, 헬륨의 구동압력으로 밸브가 최초 개방되지만, 밸브 개방 이후에는 운용유체인 액체산소의 압력 변화만으로 밸브 개폐가 가능한 자체유지형(Self-sustainable) 포핏 밸브

† Received : April 30, 2017 Revised : July 24, 2017 Accepted : July 24, 2017

* Corresponding author, E-mail : conquet@kari.re.kr

타입으로 개발이 진행되었다. 자체유지형 포핏 밸브의 작동특성을 이해하고 밸브 설계에 적절히 반영하기 위해 밸브에 작용하는 힘들과 밸브 무빙파트(Moving part, 운동부)와의 운동방정식을 계산하여 밸브의 과도 응답 특성을 해석하였으며 [1,2], 밸브 성능을 좌우하는 주요 기밀부(구동부, 포핏·시트부)에 대한 연구·개발과 관련하여 기밀면 코팅 소재 변화에 따른 기밀 특성 연구와 기밀 접촉면에서의 반발력과 마찰력 크기를 정량적으로 계산하였다[2,3]. 또한 최근에는 액체로켓엔진 재순환예냉 시스템의 설계 개선을 위해 연소기 산화제 개폐밸브의 재순환예냉 유로에서 발생하는 압력손실을 줄이는 연구가 진행된 바 있다 [4]. 이와 같은 연구·개발을 통해 제작된 연소기 산화제 개폐밸브의 안정적인 성능은 한국형발사체 액체로켓엔진의 연소시험을 통해 실제적으로 확인되었다[5].

한편 기존의 연소기 산화제 개폐밸브는 온·오프 단순 작동을 통해 밸브가 완전히 닫혀있거나 완전히 열리기 때문에 산화제 공급 유량 조절을 통한 엔진 점화·시동 특성 제어에 한계가 있다고 볼 수 있다. 반면에 부분 개방이 가능한 2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브의 경우에는 산화제의 초기 공급 유량 제어가 가능하기 때문에 액체로켓엔진의 점화·시동 특성을 최적화할 수 있는 이점이 있다[6]. 밸브의 부분 개방을 통해 연소기 초기 점화 구간에서 독립적으로 제어 가능한, 소량의 산화제를 공급함으로써 엔진의 점화 신뢰성을 높이고 유연한 엔진 시동을 구현할 수 있다. 한편 다단연소사이클 엔진인 나로호 1단 엔진(RD-151)의 경우에는 예연소기와 연결된 추력 제어밸브를 이용하여 엔진 점화·시동 구간에서의 연소기 연소압이 단계적으로 정상상태에 도달하도록 운용된 바가 있다.

밸브의 부분 개방을 거쳐 상대적으로 높은 밸브 입구 압력에서 밸브의 완전 개방이 이뤄지면 소량의 추진제 점화 및 연소로 인해 이미 일정 수준 연소기 내부 압력이 존재하기 때문에 차압 감소 효과에 따른 부드러운 엔진 시동을 구현할 수 있다. 반면 밸브의 부분 개방 없이 높은 입구 압력 조건에서 순간적으로 밸브가 완전 개방되면 대기압 상태인 연소기와의 높은 차압으로 인해 산화제가 연소기에 과도하게 공급되면서 점화 충격이 발생할 수 있기 때문에 밸브 개방 시점에 제한을 둘 수밖에 없다. 따라서 밸브의 부분 개방을 통해 연소기 산화제 개폐밸브의 완전 개방 시점의 운용 범위가 보다 높은 밸브 입구 압력까지 넓어지게 되면, 연료 공급 배관 압력과 연동

되는 연소기 점화제 공급 시점의 범위 또한 확장될 수 있기 때문에 엔진의 점화·시동 특성을 보다 효과적으로 제어할 수 있게 된다.

이에 본 논문에서는 단순 개폐 기능만이 가능한 기존의 연소기 산화제 개폐밸브를 개선하여 부분 개방이 가능한 2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브에 대한 연구·개발 내용을 소개하고자 한다. 먼저 2장에서는 2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브의 기본 설계 방향과 함께 밸브 작동성에 초점을 맞춰 밸브 설계 내용을 정리하였으며, 3장에서는 2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브의 구현 가능성을 검증하기 위해 수행한 밸브 작동 시험에서 획득한 시험결과 내용을 간단히 소개하기로 한다.

II. 설계 및 작동원리

2.1 기본 설계방향 및 작동특성

기존 밸브와의 호환성을 높이기 위해 설계가 변경되는 부분을 최소화하려 하였는데, 결론적으로는 기존 밸브 상단부에 작동부(Actuator)의 추가적인 설치만으로 2단계 개방 기능이 가능하도록 설계가 이뤄졌다. Fig. 1에서와 같이 기존 밸브에 사용되는 클로져(Closure) 대신에, 구동부(Pneumatic part)와 연동되는 작동부를 추가적으로 설치함으로써 2단계 개방을 구현하고자 하였다. 한편 Fig. 1에서 밸브 내부에 회색으로 칠해진 부분이 밸브 개폐와 연관된 밸브 무빙파트에 해당한다. 밸브 상단 구동부와 체결되는 클로져는 밸브 구동부와 외부 환경을 격리시키는 동시에 구동부에서 누설되는 구동가스를 외부로 배출하는 역할을 한다. 연소기 산화제 개폐밸브는 극저온 환경에서 운영되고 구동부 또한 매우 낮은 온도 환경에 노출되기 때문에 외부로부터의 습기로 인한 결빙 등을 피하기 위해 외부 환경과의 격리가 필수적이다. 이를 위해 클로져 상단에 일종의 체크밸브, 즉 유로가 밸브 내부에서 외부로의 방향으로만 통하는 드레인 밸브를 설치하게 된다. 구동가스인 고압 헬륨의 구동부에서의 미세한 누설이 발생하여 클로져로 밀폐되어 있는 공간(구동부 상단 부분)의 내부 압력이 일정 수준(대략 0.1~0.2 MPaG)에 도달하게 되면 드레인 밸브를 통해 외부로 누설 가스가 배출된다. 기존 밸브의 이와 같은 클로져 역할은 2단계 개방 밸브의 작동부 하단에서 이뤄지며, 작동부 상단은 기존 밸브의 구동부와 연동되어 2단계로 개방되는 기능을 구현하게 된다.

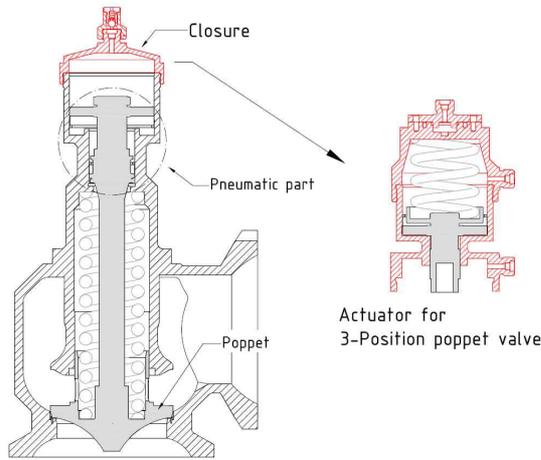


Fig. 1. Sectional view of the main oxidizer shut-off valve with a closure(left) and the actuator for the two-step poppet valve(right)

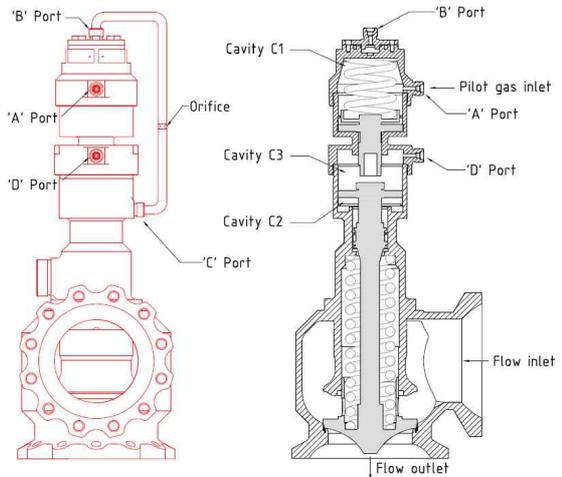


Fig. 2. Principal ports and cavities in the actuator and the pneumatic part of the two-step poppet valve

Figure 2에서 2단계 개방 연소기 산화제 개폐 밸브의 주요 포트와 밸브 작동 제어를 위한 주요 공간(Cavity)을 확인할 수 있다. A 포트는 구동 가스가 밸브로 최초 공급되는 포트이며, A 포트를 통해 Cavity C1 내부로 유입된 구동가스는 Cavity C1의 B 포트를 거쳐 C 포트를 통해 Cavity C2로 공급된다. 한편 Cavity C1과 Cavity C2의 구동부 기밀면을 통해 누설되는 구동가스는 Cavity C3를 거쳐 D 포트를 통해 외부로 배출됨으로써 기존 밸브의 클로저와 동일한 기능이 이뤄진다. 따라서 Cavity C3은 항상 대기압 수준의 압력을 유지하게 된다.

구동압력 가압 시 구동가스 공급 유로 경로(포트 A→B→C)를 통해 밸브의 구동압력이 상승하는 과도 구간에서 Cavity C1의 압력이 Cavity C2의 압력에 비해 항상 높게 유지될 뿐만 아니라, 압축성 유체에서의 초킹(Choking) 구간에서는 B와 C 포트 사이에 설치된 오리피스에 의해 Cavity C1과 Cavity C2의 압력비를 조절할 수 있게 된다. 구동가스의 가압과 해압이 A 포트와 연결된 배관에 설치된 솔레노이드 밸브를 통해 제어되기 때문에, 구동가스의 해압 과정에서도 Cavity C1 내부 압력이 먼저 감소하며, 감소된 Cavity C1 내부 압력에 맞춰 질유량 보존법칙에 따라 Cavity C2의 내부 압력이 연동하여 감소하게 된다. 결과적으로 구동압력이 증가함과 동시에 연소기 산화제 개폐밸브가 부분적으로 개방되어 유지되며, 구동압력을 해압함으로써 밸브가 완전 개방된다. 이후 밸브 주유로의 운영유체 압력에 의해 밸브의 완전 개방 상태가 유지되며, 운영유체의 압력이 일정 압력 이하로 감소하면

밸브가 닫히게 된다. 한편 주유로의 운영유체가 없는 대기압 조건에서는 구동압력의 해압 과정에서 밸브가 완전 개방된 이후, 밸브 개방 상태를 유지할 수 있는 운영유체의 압력이 없기 때문에 밸브의 완전 개방 상태가 유지하지 못하고 밸브가 닫히게 된다. 밸브의 개폐 작동특성을 간단히 정리하면 다음과 같다.

- 1) 밸브 부분 개방: 구동가스 가압 (2.2절)
- 2) 밸브 완전 개방: 구동가스 해압 (2.3절)
- 3) 밸브 닫힘: 운영유체 해압 (2.4절)

2.2 부분 개방

2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브의 개방 작동 원리와 주요 작용 힘들은 Fig. 3에서 확인할 수 있는데, Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 밸브가 닫혀 있는 때는 압축되어 설치된 스프링에 의한 힘 F_s 와 운영유체 압력 P_h 에 의한 힘 $F_h (= P_h \times \pi(D_{h1}^2 - D_{h2}^2)/4)$ 가 동시에 밸브의 포핏을 강하게 누르면서 연소기로의 유로를 차단하게 된다. A 포트를 통해 고압의 구동가스가 Cavity C1을 거쳐 Cavity C2로 공급되면서 Cavity C2에서의 구동가스 압력 P_p 에 의한 힘 F_p 가 증가하게 되는데, 이 F_p 의 크기가 밸브 구동부의 마찰력 F_f 와 F_s, F_h 의 합력보다 커지는 아래의 조건이 만족되는 순간에 밸브가 개방되기 시작한다.

$$F_p \geq F_h + F_s + F_f \tag{1}$$

이후 F_p 의 지속적인 증가로 인해 밸브 개방이 진행되다가, Fig. 3(b)에서와 같이 Cavity C1 내의 구동가스 압력 P_a 에 의해 작용하는 힘 F_a 에

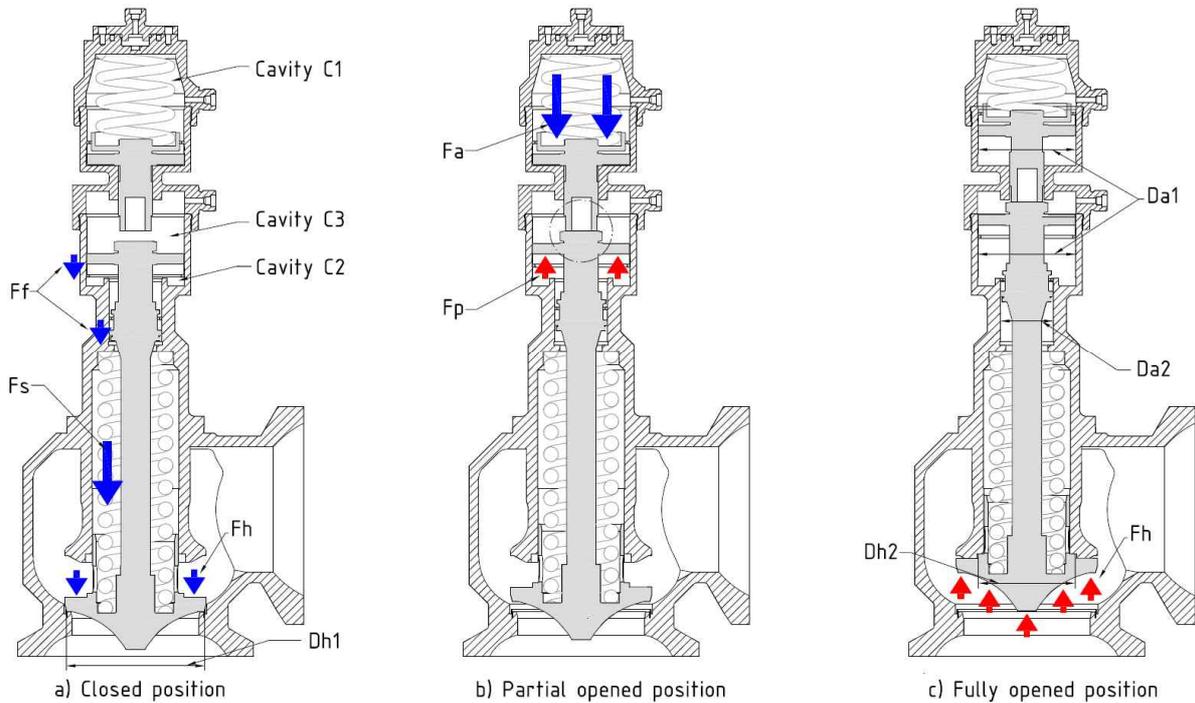


Fig. 3. Valve opening positions and principal forces acting on the moving part of the two-step poppet valve

의해 눌러져 있는 작동부에 의해 더 이상의 밸브 개방이 진행되지 못한 채 밸브가 부분적으로 개방된 상태가 유지된다.

한편, 밸브의 작동부와 맞닿아 연동되기 시작하는 부분 개방 단계에서 밸브 개방이 추가적으로 진행되기 위해서는 다음의 힘평형 조건을 만족하여야 한다.

$$F_p - F_a \geq F_s + F_f - F_h \quad (2)$$

식 (2)에서 Cavity C2의 내부 압력 P_p 에 작용하는 힘 F_p 와 운영유체 압력 P_h 에 의해 작용하는 힘 F_h , 그리고 Cavity C1의 구동가스 압력 P_a 에 의해 작용하는 힘 F_a 를 각각 압력이 가해지는 해당 면적들을 이용하여 계산하게 되면 식 (2)는 보다 구체적으로 형태로 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P_p \times \frac{\pi(D_{a1}^2 - D_{a2}^2)}{4} + P_h \times \frac{\pi D_{a2}^2}{4} \geq P_a \times \frac{\pi D_{a1}^2}{4} + F_s + F_f \quad (3)$$

여기서 구동가스의 공급압력이 22 MPa 수준이며, 엔진 정상 운용 조건에서의 운영유체 최대 압력을 고려하더라도 P_h 범위가 최대 9 MPa 수준이기 때문에 ($P_a \geq P_p > P_h$), 식 (3)에서 볼 수

있듯이 구동압력을 해압하지 않은 한, 밸브 개방이 더 이상 진행되지 못하고 부분 개방 상태가 유지된다는 것을 알 수 있다. 다시 말해, 구동가스가 공급되는 한, 작동부에서 포핏(무빙파트)을 누르는 힘은 포핏을 올리려는 힘보다 항상 크다는 것을 알 수 있다.

2.3 완전 개방

밸브가 부분 개방된 단계에게 추가적으로 개방이 진행되어 밸브가 완전 개방되려면 Cavity C2 내부 압력 P_p 와 Cavity C1 내부 압력 P_a 의 상대적인 압력 차이가 충분히 커져 두 압력에 의한 힘의 차 $F_p - F_a$ 가 식 (2)의 조건을 만족할 수 있어야 하는데, 이는 구동압력을 해압하는 과정에서 구현된다. Cavity C1과 연결된 A 포트로 구동압력의 해압이 시작되면 P_a 가 먼저 감소하기 시작하고 이와 연동하여 질유량 보존법칙에 따라 P_p 가 낮아지기 때문에 P_p 는 P_a 보다 항상 크게 되며, B 포트와 C 포트 사이에 설치된 오리피스에 의해 결정되는 P_p 와 P_a 의 압력비를 이용하여 두 압력차 변화를 조절할 수 있다.

밸브 완전 개방 시점에서의 밸브 주유로 입구 운영유체 압력이 1 MPa 수준으로써, 운영유체에 의해 발생하는 힘 F_h 가 다른 주요 힘들에 비해 매우 미비하다고 간주할 수 있다(F_p 의 1~2% 수

준). 따라서 계산의 편의를 위해 운용유체에 의해 포핏을 들어 올리려는 힘 $F_h \approx 0$ 으로 가정하기로 한다. 식 (3)으로부터 실제 값들을 사용하여 밸브의 완전 개방에 필요한 P_p 를 예측해 보면 다음과 같다.

$$P_p \geq P_a \times \frac{D_{a1}^2}{D_{a1}^2 - D_{a2}^2} + \frac{4(F_s + F_f)}{\pi(D_{a1}^2 - D_{a2}^2)} \quad (4)$$

구동부의 특성 지름인 D_{a1} 과 D_{a2} 는 각각 74 mm와 40 mm이며, 마찰력 F_f 는 일반적으로 측정되는 값으로써 1500 N을 사용하였으며[3], 스프링 힘은 부분 개방에서의 스트록(Stroke)을 9 mm (밸브의 완전 개방 시 스트록은 30 mm)로 선정하여 스프링 설치 시의 압축길이 30 mm와 합쳐 스프링의 총 압축거리는 39 mm로 하고, 스프링 상수 값은 146.1 N/mm를 사용하였다. 실제 값들을 적용함으로써 식 (4)를 보다 간단한 식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_p \geq 1.41 \times P_a + 2.36 \quad (5)$$

여기서 P_p 의 단위는 MPa이다. 결국 구동압력을 해압하는 과정에서 Cavity C1의 압력 P_a 와 Cavity C2의 압력 P_p 가 식 (5)를 만족하여야 밸브가 완전 개방될 수 있다는 것을 알 수 있다. 식 (5)에서 흥미로운 점은 직선의 기울기 1.41은 구동압력이 작용하는 특성 면적비로 결정되며, P_p 측 절편 2.36은 밸브의 부분 개방 지점에서의 작동부의 힘을 고려하지 않은, 밸브 추가 개방에 필요한 구동압력을 의미한다는 것이다. 따라서 특성 면적비나 스프링 및 마찰부 소재 등의 적절한 설계 변경을 통해 식 (5)를 유연하게 조절할 수 있다는 것을 짐작할 수 있다.

2.4 밸브 닫힘

한국형발사체에 적용되는 연소기 산화제 개폐 밸브는 헬륨의 구동압력으로 일단 개방된 이후에는 구동압력 없이 운용유체의 압력만으로 밸브 개폐가 가능한 자체유지형 포핏타입 개폐밸브로써, 구동압력이 해압된 이후로도 밸브가 완전 개방 상태를 유지하기 위해서는 다음과 같은 힘평형 관계를 만족하여야 한다.

$$F_h \geq F_s - F_f \quad (6)$$

결국 Fig. 3(c)에서 보는 바와 같이, 운용유체에 의한 힘 $F_h (= P_h \times \pi D_{h2}^2 / 4)$ 와 마찰력 F_f 의 합이 스프링힘 F_s 보다 클 경우에는 밸브는 완전 개방된 상태를 유지하게 된다. 엔진 정상 운용 환경

에서는 고압의 P_h (~9 MPa)에 의해 밸브 개방이 자연스럽게 유지되지만, 엔진 종료 시점에 이르러 운용유체의 압력, 즉 F_h 감소하면서 압축되어 있던 스프링의 강한 힘에 의해 밸브가 닫히게 되는데, 일반적으로 P_h 가 2.5 MPa 내외에서 밸브가 닫히도록 설계되어 진다[5].

III. 시험검증

3.1 시험조건

밸브의 2단계 개방 작동성을 확인하기 위해 설계에 따라 밸브 시제품을 제작하여 작동시험을 수행하였는데, 밸브 작동성을 충분히 확인할 수 있으면서도 간소화된 시험을 위해 밸브의 운용유체가 없는 경우, 즉 P_h 가 대기압 조건에서 시험을 진행하였다. 실제 엔진 운용 환경에서는 구동압력이 완전히 해압된 상태에서($P_a = P_p =$ 대기압), P_h 가 감소하면서 밸브가 자연스럽게 닫히게 되나, 본 시험에서는 P_h 가 대기압 상태이므로, P_p 가 해압되는 과정에서 밸브가 닫히게 된다. 이때 밸브가 닫히기 시작하는 P_p 값은 스프링힘과 마찰력과의 관계를 나타낸 식 (7)로부터 대략 2.3 MPa임을 간단히 예측할 수 있다.

$$P_p \leq \frac{4(F_s - F_f)}{\pi(D_{a1}^2 - D_{a2}^2)} \approx 2.30 \quad (7)$$

3.2 2단계 개방 작동시험

Figure 4에 2단계 개방 작동시험 결과를 정리하였는데, Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 구동가스 공급용 솔레노이드 밸브가 온·오프 작동하면서 P_a 와 P_p 가 순차적으로 증가·감소하는 것을 볼 수 있으며, 밸브가 2단계로 나눠 개방되는 것을 Fig. 4(b)에서 확인할 수 있다. 밸브가 개방되기 시작하는 시점은 식 (1)에서와 같이 $F_p = F_s + F_f$ ($F_h = 0$)가 되는 순간으로써, P_p 가 대략 1.93 MPa가 도달했을 때이며, 이후로 밸브의 부분 개방이 유지된다.

운용유체가 없는 조건에서는 밸브가 부분 개방된 상태에서 구동압력을 해압하면 밸브가 완전 개방되었다가 구동압력 P_p 가 일정 수준이하로 낮아지면 밸브가 닫히게 된다. 구동압력이 해압되는 과정에서 밸브가 완전 개방되는 시점은 식 (5)를 만족하는 P_p 와 P_a 에 도달하였을 때인데, Fig. 4(c)에서 보는 바와 같이 작동시험 결과와도

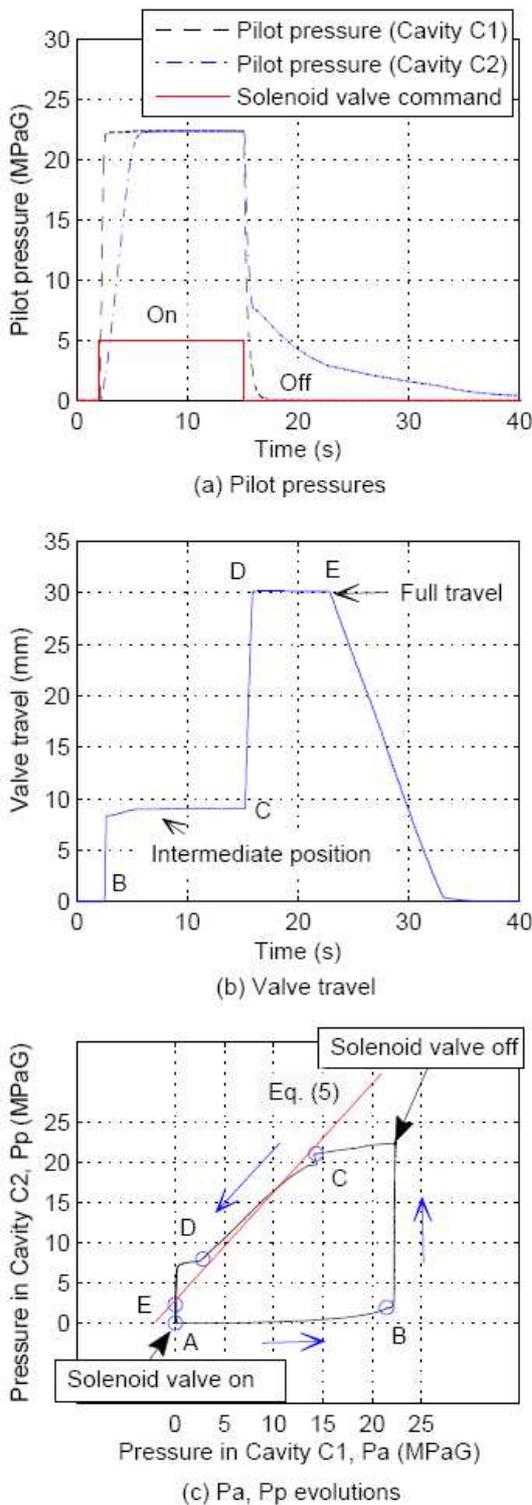


Fig. 4. Operating tests of the two-step poppet valve

잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이후로 밸브는 완전 개방 상태가 유지되다가 식 (7)에서와 같이 P_p 가 2.3 MPa 수준으로 감소하면서 밸브가 닫히기 시작한다. 실제 엔진 운영 조건에서는 엔진

시동 과정에서 P_h 가 일정 압력 이상 상승한 이후에 구동가스를 해압하기 때문에 밸브는 완전 개방 상태를 유지하게 되며, 엔진 종료 시 P_h 가 감소하면서 밸브가 자연스럽게 닫히게 된다.

밸브의 이와 같은 2단계 개방 작동 특성은 밸브가 개폐되는 동안에 변화하는 P_p 와 P_a 의 압력 값을 나타낸 Fig. 4(c)에서 보다 직관적으로 확인할 수 있다. A 지점에서 구동가스가 공급되기 시작하면 P_a 가 P_p 에 비해 빠르게 압력이 상승하게 되고, P_p 가 1.93 MPa 수준에 도달한 시점(B 지점)에 밸브가 개방되기 시작하여 순간적으로 부분 개방에 도달한다. 이후 구동압력이 공급되는 동안에는 밸브의 부분개방이 계속해서 유지되지만 구동용 솔레노이드 밸브를 닫아 구동압력을 해압하게 되면 P_a 가 P_p 에 비해 역시 빠르게 압력이 감소하면서, 식 (5) 조건에 만족하는 지점 즉 C 지점에서 밸브가 추가로 개방되기 시작하여 D 지점에서 완전 개방이 이루어진다. 이후로 P_p 가 계속해서 감소하게 되어 2.3 MPa 수준에 도달하게 되면(E 지점) 밸브가 닫히게 된다. 2단계 개방이 이루어지는 동안 P_p 와 P_a 의 압력변화는 Fig. 4(c)와 같은 반시계 방향으로의 회전 특성이 나타나게 되는데, 압력 변화의 형태는 각 Cavity의 내부 부피, 오리피스 크기 및 주요 힘들의 조정을 통해 유연하게 제어할 수 있을 것으로 기대된다. 한 예로 Cavity C1과 Cavity C2 사이에 설치되는 오리피스를 유로 방향에 따라 사이즈가 변하는 가변 오리피스로 설치함으로써 밸브의 작동 속도를 제어할 수 있게 된다. 유로가 Cavity C1에서 Cavity C2로 흐를 때는 유로가 솔레노이드 밸브의 유효지름보다 크게 열리고, 반대로 Cavity C2에서 Cavity C1로 흐를 때는 유로 면적이 상당히 작아지는 가변 오리피스를 적용함으로써, 밸브의 부분 개방과 완전 개방이 보다 빠른 속도로 이뤄질 수 있다.

IV. 결 론

액체로켓엔진의 점화·시동 특성 제어 및 최적화를 위해 부분 개방이 가능한 2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브에 대한 주요 설계를 수행하였으며, 설계에 따라 제작된 밸브 시제품을 이용한 작동시험을 통해 2단계 연소기 산화제 개폐밸브의 구현 가능성을 검증하였다. 액체로켓엔진의 연소시험을 통해 밸브의 주요 핵심요소에 대한 성능이 이미 검증된 밸브에 부분 개방 기능이 추가됨으로써 보다 개선된 액체로켓엔진 운용에 기

여할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 실제 엔진 운용에 2단계 개방 연소기 산화제 개폐밸브를 적용하기 위해서는 본 논문에서 소개된 부분 개방 작동성 검증을 토대로 하여, 밸브 개방 반응 속도 등 보다 정확한 밸브 거동 해석에 대한 연구가 계속해서 진행되어야 할 것이다.

References

- 1) Lee, H. and Hong, M., "On the Valve Travel of a Main Oxidizer Shut-off Valve," *5th International Symposium on Fluid Machinery and Fluids Engineering*, Jeju, Korea, Oct. 24-27, 2012.
- 2) Kim, D., Kim, E., Kim, S., Park, S., Hong, M. and Lee, S. Y., "A Study on the Pneumatic Part Coatings Characteristics of a Main Oxidizer Shut-off Valve for Liquid Rocket Engines," *2013 SASE Spring Conference*, Muju, Korea, May 9-10, 2013.
- 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, 2013, pp.113~119.
- 4) Hong, M., "Improvement of a Flow Coefficient for the Recirculation Flow in a Main Oxidizer Shut-off Valve," *2016 KSPE Fall Conference*, Jeongsun, Korea, Dec. 21-23, 2016.
- 5) Hong, M., "On the Main Oxidizer Shut-off Valve Operated in Combustion Tests of 75-tonf Liquid Rocket Engine KRE-075-001G," KARI-LPC-ELN-2016-009, 2016.
- 6) Dantine, G., Servais, T., Lambert, G., and Dambaut, L., "Three-Position Pneumatic Ball Valve," *4th International Conference on Launcher Technology "Space Launcher Liquid Propulsion"*, Liege, Belgium, Dec. 3-6, 2002.