



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 48(10), 801-807(2020)

DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2020.48.10.801>

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

밸브 입구 압력 변화에 따른 연소기 산화제 개폐밸브 열림 특성

홍문근¹

Opening Characteristics of a Main Oxidizer Shut-off Valve at Different Valve Inlet Pressures

Moongeun Hong¹

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

ABSTRACT

Opening characteristics of a main oxidizer shut-off valve at different valve inlet pressures have been experimentally investigated. The pilot pressure at the moment of the valve opening increases linearly with increasing the valve inlet pressure and the increased pilot pressure reduces the valve travel time. As the pilot pressure increases at the moment of valve opening, the time to start opening the valve is delayed resulting in increasing the valve opening time. With the increment of the valve inlet pressure, the valve opening time is mainly determined by the time required for the pilot pressure to start opening the valve. Therefore the design of a pilot gas supply system can readily control the valve inlet pressure at the valve opening as well as the amount of oxidizer supplied to a combustion chamber during the engine startup.

초 록

밸브 입구 압력 변화에 따른 액체로켓엔진용 연소기 산화제 개폐밸브의 개방 특성에 대해 시험을 통한 연구를 수행하였다. 연소기 산화제 개폐밸브의 포핏 방식 밸브 특성에 의해 밸브 입구 압력이 상승함에 따라 밸브 개방에 필요한 구동압력은 선형적으로 증가하며, 밸브 행정 시간은 감소하게 된다. 하지만 밸브 입구 압력 상승으로 밸브 개방 구동압력 도달까지의 시간이 길어져 전체적인 밸브 개방 시간이 증가하는 것으로 나타났다. 결국 밸브 입구 압력이 증가할수록 밸브 행정 시간의 감소량은 미미해지며 밸브 개방에 필요한 구동압력에 도달하는데 필요한 시간이 밸브 개방 시간을 좌우한다는 것을 확인하였다. 따라서 밸브 구동부에 대한 설계를 통해 밸브 개방 시점의 밸브 입구 압력과 연소기로의 순간적인 산화제 공급량을 조절할 수 있다.

Key Words : Main Oxidizer Shut-off Valve(연소기 산화제 개폐밸브), Valve Opening Characteristics (밸브 개방 특성), Valve Opening Time(밸브 개방 시간), Valve Travel Time(밸브 행정 시간), Engine Startup(엔진 시동)

† Received : March 6, 2020 Revised : August 18, 2020 Accepted : August 25, 2020

¹ Principal Researcher

¹ Corresponding author, E-mail : conquet@kari.re.kr, ORCID 0000-0002-2323-5844

© 2020 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

I. 서 론

충전된 추진제가 수동적으로 연소되는 고체로켓모터에 비해, 액체로켓엔진은 추진제를 능동적으로 공급 및 차단하기 때문에 상대적으로 복잡한 점화 과정을 통해 엔진 시동이 이뤄진다. 한국형발사체의 가스발생기 사이클 액체로켓엔진 경우에 있어서도 터빈을 구동하는 가스발생기와 엔진의 추력을 발생시키는 연소기에서 추진제의 점화 및 연소가 이뤄지며, 다양한 요소들이 액체로켓엔진의 점화 및 시동 특성에 영향을 미친다. 엔진의 시동 특성은 파이로시동기, 연소기 점화기, 엔진 퍼지, 추진제 탱크 압력, 엔진 사이클로그래프 뿐만 아니라 추진제를 공급하는 주요 개폐밸브들의 작동 특성에 의해 영향을 받는다. 주요 개폐밸브들의 개폐시간과 밸브 개폐시 밸브 입구 압력을 정확히 예측할 수 있어야 액체로켓엔진의 점화 및 시동 절차를 안정적으로 설정할 수 있다[1]. 가스발생기와 연소기로의 추진제 공급 시작 시점과 해당 시점에서의 추진제 공급량에 대한 선정이 엔진 시동 설계에 있어서 매우 중요한 변수라고 할 수 있다. 이러한 엔진 시동과 연관된 추진제 공급 특성은 주요 개폐밸브들의 밸브 개방 시간과 밸브 행정 속도 등과 같은 밸브 개방 특성에 의해 근본적으로 좌우된다. 따라서 엔진 시동 설계의 높은 신뢰성을 확보하기 위해서는 추진제 공급 특성을 결정짓는 개폐밸브들의 밸브 개방 특성에 대한 정확한 이해가 필수불가결하다고 할 수 있다.

한편 한국형발사체의 가스발생기와 연소기로 추진제를 공급하는 주요 개폐밸브들 중에서 액체산소라는 극저온 운용유체와 공급 유량의 절대적인 크기 면에서 연소기 산화제 개폐밸브는 다른 개폐밸브들에 비해 기술적 난이도가 상대적으로 높다고 볼 수 있다. 한국형발사체에 사용되는 연소기 산화제 개폐밸브는 운용유체의 압력만으로 밸브 개방이 유지되는 자체개방유지형(Self-sustainable) 포핏(Poppet) 방식 밸브 특성으로 인해[2,3]. 밸브 개방 시점에서의 밸브 입구 압력이 증가할수록 밸브 개방에 필요한 보다 높은 구동압력이 요구된다. 밸브 개방에 필요한 구동압력까지 도달하는 시간은 밸브 입구 압력과 함께 증가한다. 따라서 밸브 개방 시의 밸브 입구 압력은 밸브 개방 특성뿐만 아니라 엔진 시동 특성에 영향을 미치게 된다. 결과적으로 정교하고 신뢰성 높은 엔진 시동 운용을 위해서는 밸브 입구 압력 변화에 따른 연소기 산화제 개폐밸브의 개방 특성에 대한 이해가 필수적이라고 할 수 있다.

한국형발사체 개발 과정에서 포핏 방식의 다양한 밸브들에 대한 작동 특성에 대한 연구가 진행되었다. 유공압 해석용 상용코드인 AMESim을 이용하여, 가스발생기용 연료 개폐밸브와 연료 차단밸브의

작동 속도 등 다양한 설계 변수에 따른 밸브 작동 특성 변화에 대한 해석 결과를 제시하였다[4,5]. 시험결과와의 비교를 통해 검증된 해석 결과는 밸브 최적화 설계에 활용되었다. 또 다른 포핏 방식의 밸브인 산화제 벤트릴리프 밸브의 경우, 정적인 힘평형 방정식과 주요 캐비티(Cavity) 간의 압력차에 의한 질유량 관계식을 이용하여 밸브의 크래킹 압력(Cracking pressure)과 최종 작동 평형 상태를 예측하였다[6]. 한편 포핏 밸브의 작동 특성과 관련하여 흥미로운 것은 단순 개폐 기능에서 유량제어가 가능하도록 밸브 활용성이 확장되고 있다는 점이다[7].

자체개방유지형 포핏 방식 밸브의 개방 특성을 파악하기 위해 밸브 개방 과정에서의 과도 응답 특성에 대한 연구가 이미 수행된 바가 있다[3]. 그러나 해당 연구 내용은 운용유체 압력이 없는 경우(상온 작동)와 밸브 입구 압력이 0.9 MPaG인 특정한 한 가지 경우로 제한되었다. 이에 본 논문에서는 연소기 산화제 개폐밸브의 개방 특성에 대한 추가적인 연구의 일환으로써 밸브 입구 압력 변화에 따른 밸브의 개방 특성에 대한 연구 내용을 소개하도록 한다. 우선 2절에서는 밸브 작동에서의 밸브 입구 압력의 영향을 이해하기 위해 연소기 산화제 개폐밸브의 작동 원리에 대한 간단한 설명과 함께 시험 방법 및 시험 설비에 대한 내용을 정리하도록 한다. 이후 3절에서는 밸브 입구 압력 상승에 따른 밸브 개방 구동압력과 밸브 개방 시간 변화 등 밸브 개방 특성 변화에 대한 시험 결과와 이에 대한 검토 내용을 소개하도록 한다.

II. 시험 방법

2.1 재순환예냉과 밸브 개방 특성

밸브 입구 압력 변화에 따른 밸브 개방 특성에 대한 시험 방법을 정리하기에 앞서 밸브 입구 압력 변화에 의해 영향을 받을 수밖에 없는 밸브 작동 특성에 대해 간단히 소개하기로 하자. 정상 단힘 상태일 때와 밸브 행정 30mm 이동 후 밸브가 완전 개방되었을 때의 밸브 단면은 Fig. 1(a)와 (b)에서 확인할 수 있다. 밸브 단면에서 회색으로 칠해진 부분은 극저온 운용유체(액체산소)가 채워져 흐르는 내부를 나타낸다. 연소기 산화제 개폐밸브는 일종의 3방향(3-way) 밸브로써 밸브가 닫혀 있는 상태에서는 Fig. 1(c)에서와 같이 재순환유로를 통해 산화제가 산화제 탱크로 재순환 된다[8]. 산화제 재순환은 연소기 산화제 개폐밸브 전단까지의 산화제 공급 배관을 충분히 예냉시킴으로써 연소기 점화 시동 시 외부로부터 유입되는 열로 인한 산화제의 급격한 증기화와 이에 따른 압력 충격을 줄일 수 있는 장점이 있다. 또한 연소기 산화제 개폐밸브가 터보펌프 후단에 위

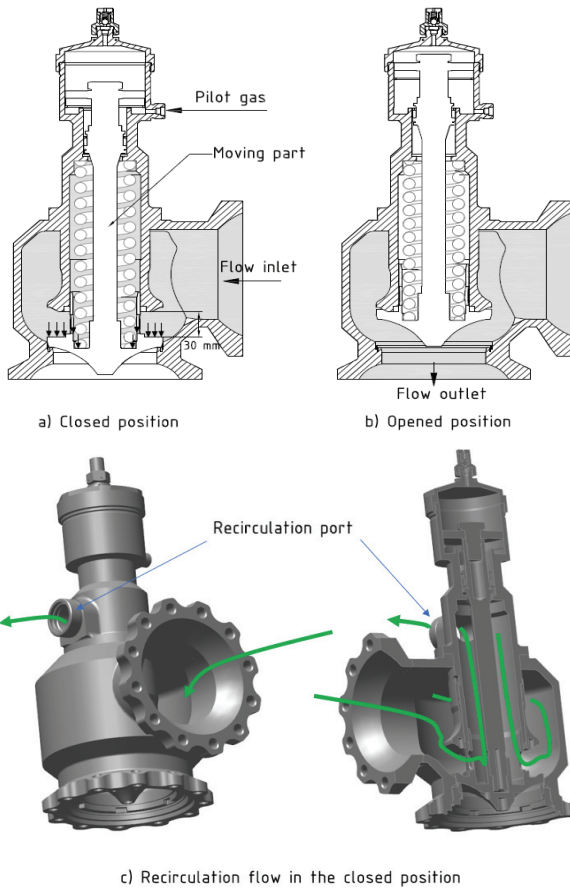


Fig. 1. Sectional view of the valve in the closed and opened positions and the recirculation flow line inside the valve

치해 있기 때문에 산화제 공급배관의 지속적인 예냉을 통해 산화제 펌프 입구 온도를 충분히 낮게 유지할 수 있다.

이와 같은 산화제 재순환예냉 기능을 위해 설계된 연소기 산화제 개폐밸브의 무빙파트는 밸브 개방 직전까지 운용유체인 산화제의 압력에 의한 힘을 받게 된다. Fig. 1(a)의 무빙파트 하단부에 표기된 화살표 방향에서와 같이 운용유체인 산화제의 압력은 밸브 개방에 반하는 힘으로 작용하기 때문에 밸브 개방 특성은 밸브 입구 압력의 영향을 받을 수밖에 없다. 밸브 입구 압력 변화에 따라 밸브가 개방하기 시작하는 시점뿐만 아니라, 밸브가 완전히 개방되는데 소요되는 시간을 좌우하는 밸브 행정 속도 또한 영향을 받는다. 이러한 밸브 입구 압력 변화에 따른 연소기 산화제 개폐밸브 개방 특성에 대한 정확한 이해는 신뢰성 높은 엔진 시동 설계에 필요한 가장 기본적인 요소라고 볼 수 있다. 이에 극저온 유체를 이용한 밸브 개방 시험을 통해, 밸브 개방 구동압력과 밸브 개방 시간에 대한 밸브 입구 압력의 영향을 확인해 보도록 한다.

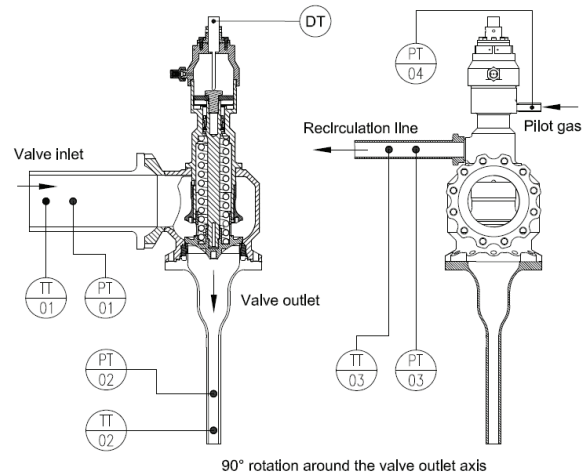


Fig. 2. Schematics of the experimental setup and sensor locations (PT: pressure transducer, TT: RTD sensor, DT: Displacement transducer)

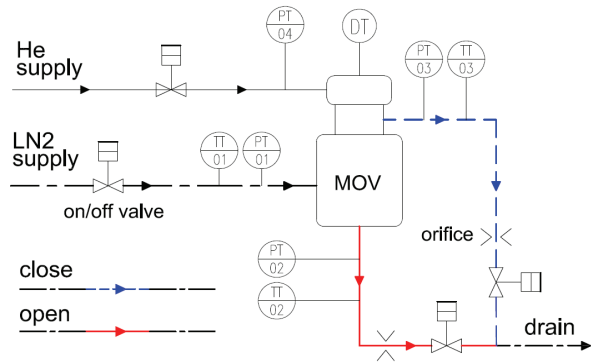


Fig. 3. Schematics of test facilities for the experiments (MOV: Main Oxidizer shut-off Valve)

2.2 시험 방법

밸브 소재의 물리적인 수축뿐만 아니라 소재의 기계적 물성 변화를 감안하여 실제 엔진 운용 환경, 즉 극저온 환경에서의 밸브 입구 압력 변화에 따른 연소기 산화제 개폐밸브의 개방 특성 시험을 수행하였다. 극저온 운용유체로는 액체질소를 사용하였으며, 밸브 입구와 출구, 재순환예냉 배관 출구에서 각각 액체질소의 압력과 온도를 측정하였다. 압력과 온도는 Keller사의 압전저항 압력센서(PA-23SY)와 Sentech사의 백금 RTD 센서(SEN-310-P)를 사용하여 측정하였으며, 측정 샘플링 주파수는 1 kHz로 설정하였다. 한편 밸브 입구 압력 변화에 따른 밸브 개방 특성 파악을 위해 구동가스인 헬륨의 구동압력과 함께 RDP Group사의 스프링 리턴 방식의 변위측정기(ACW1000A)를 이용하여 밸브 무빙파트의 변위, 즉 밸브 행정을 측정하였다. Fig. 2는 주요 유로를

포함한 밸브 단면 형상과 측정 센서들의 측정 위치를 보여주며 시험 설비에 대한 전체적인 개략도는 Fig. 3에서 확인할 수 있다.

III. 시험 결과 및 해석

3.1 밸브 개방 특성

액체질소를 이용한 극저온 환경에서 밸브 입구 압력은 0 MPaG에서 최대 입구 압력 요구조건인 2.6 MPaG 수준까지 증가시켰다. Fig. 4에서 밸브 입구 압력 변화에 따른 밸브 구동압력과 밸브 행정의 일반적인 변화를 확인할 수 있다. 한편 측정 데이터의 효과적인 비교를 위해 Fig. 4의 가로축의 0.2초를 기준으로 밸브 구동압력이 증가하도록 시험 측정 그래프를 조정하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이, 밸브 입

출구 압력차 있는 경우에는 밸브 구동압력이 밸브가 움직이기 전까지 증가하다가 밸브 구동부의 부피가 증가하기 시작하는 시점, 즉 밸브가 최초로 움직이기 시작하는 시점에서 구동압력이 순간적으로 감소한다. 이처럼 밸브 행정이 움직이기 시작하는 시점과 구동압력이 급격히 감소하는 시점은 서로 일치한다. 밸브가 완전히 개방되면, 즉 밸브 행정(l)이 30 mm에 도달하면 구동부의 부피가 더 이상 증가하지 않기 때문에 구동압력은 다시 상승하기 시작한다. 변위측정기에 내장된 스프링 힘에 의해 전기자(armature) 끝이 밸브 무빙파트 상단부에 눌러 접촉된 상태이기 때문에 밸브가 빠른 속도로 개방되다가 급격히 멈추게 되면 전기자는 밸브 무빙파트와 물리적으로 떨어져 튕겨 오르게 된다. 이 때문에 Fig. 4에서와 같이 밸브가 완전히 개방된 이후로도 밸브 행정이 30mm가 넘게 측정된다. 한편, 밸브 입구 압

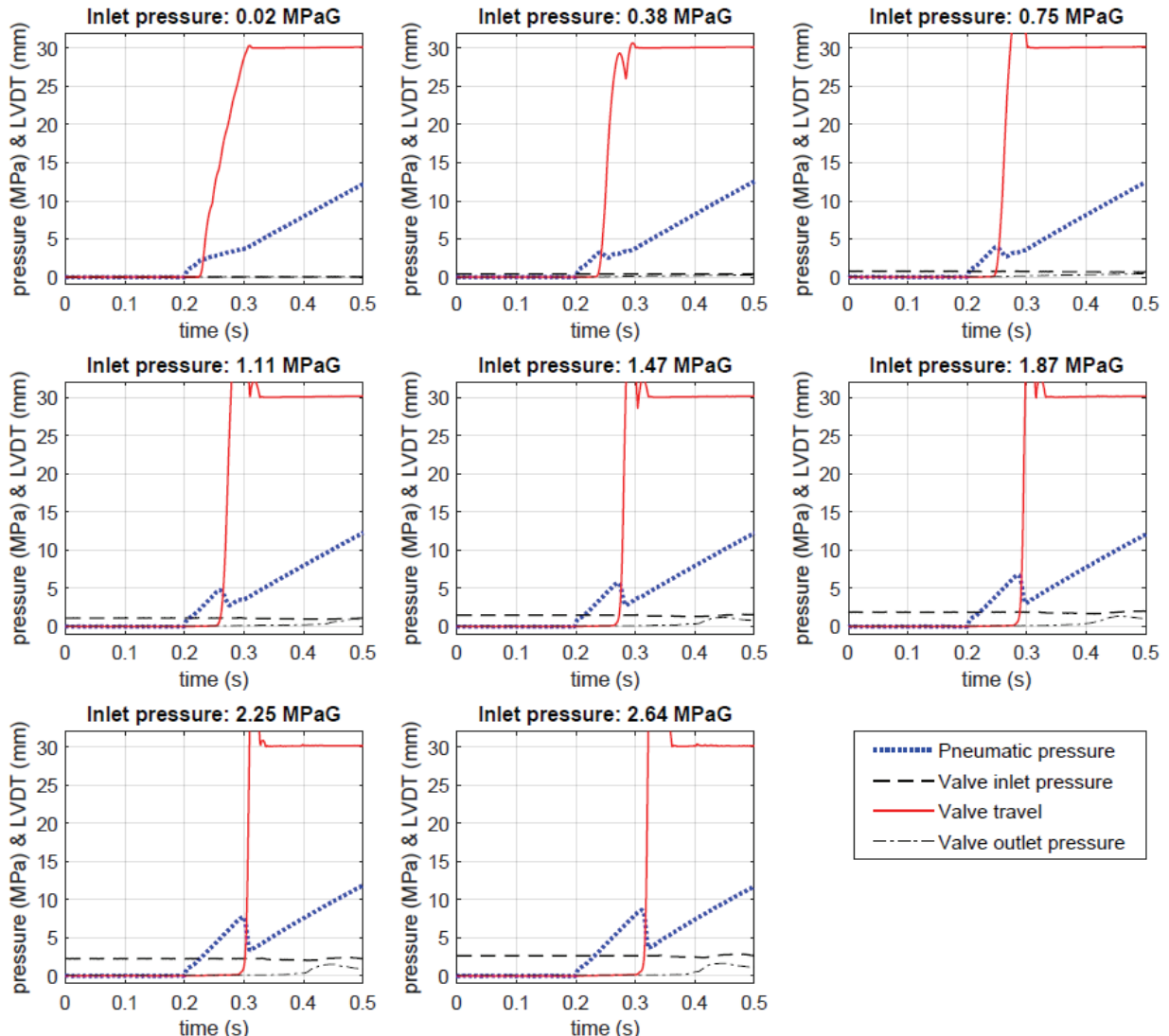


Fig. 4. Evolutions of the pneumatic pressure and the valve travel according to valve inlet pressures

력이 0.38 MPaG의 경우는 밸브 개방 시작 시점에 빠르게 밸브가 개방된 이후에 구동압력의 상승이 충분하지 않아 밸브 개방 속도가 느려지면서 변위측정기의 전기자가 밸브 무빙파트 상단에서 이탈된 것으로 보인다. 따라서 밸브 입구 압력이 0.38 MPaG의 경우, 밸브 완전 개방 시점은 변위측정기 측정값이 30mm가 넘는 시점인 0.292초로 판단하기로 한다.

Figure 4에서와 같이 밸브 입구 압력이 상승할수록 밸브 개방에 필요한 구동압력 또한 증가하면서 밸브 개방의 시작 시점은 늦어지지만, 밸브가 최초 개방된 이후 완전 개방까지 소요되는 시간은 오히려 감소한다. 밸브 입구 압력 변화에 따른 이와 같은 밸브 개방 특성은 재순환예냉 기능을 갖는 자체개방 유지형 포핏 방식 밸브의 고유한 특징이라고 볼 수 있다.

3.2 밸브 개방 구동압력 변화

연소기 산화제 개폐밸브의 밸브 입구 압력과 밸브 개방에 필요한 구동압력과의 관계는 식 (1)과 같이 밸브 무빙파트의 간단한 힘평형 관계로부터 예측할 수 있다. 밸브 구동압력에 의한 힘($P_a A_a$, 구동압력×작용면적)이 밸브 마찰력(F_f)과 스프링 힘(F_s), 그리고 밸브 입구 압력에 의한 힘($P_h A_h$, 밸브입구압력×작용면적)과 같아지면 밸브 개방이 시작된다. 한편 연소기 산화제 개폐밸브의 일반적인 마찰력 F_f 는 1680±400 N으로 수준이다[9].

$$P_a = \frac{A_h}{A_a} \times P_h + \frac{F_s + F_f}{A_a} \quad (1)$$

$$\approx \frac{7402.38}{3042.66} \times P_h + \frac{146.1(230 - 200) + 1680}{3042.66}$$

$$= 2.43 \times P_h + 1.99 \text{ [MPaG]}$$

식 (1)의 직선 기울기와 세로축 절편은 각각 밸브 입구 압력과 구동압력의 작용면적비와 밸브 개방에 필요한 구동압력을 나타낸다. 직선의 기울기가 급해 질수록 구동압력이 작용하는 면적에 비해 밸브 입구 압력이 작용하는 면적이 상대적으로 크다는 것을 의미한다. 따라서 압력의 작용면적비 A_h/A_a 를 조정함으로써 밸브 입구 압력 상승에 따른 구동압력 증가율을 조절할 수 있다. 한편 직선의 세로축 절편은 밸브 입출구 압력 차이가 없는 경우에 밸브가 개방되는데 필요한 구동압력, 즉 밸브 개방에 필요한 최소 구동압력을 의미한다.

Figure 5에서 밸브 입구 압력 변화에 따른 밸브 개방 구동압력 측정값과 식 (1)에 의한 예측값을 확인할 수 있는데, 두 값이 매우 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 단, 극저온 환경에서 측정한 밸브 개방 시 구동압력이 식 (1)에 비해 대략 5~12% 증가하는 것으로 나타났는데, 마찰력과 스프링 힘 자체의 오차

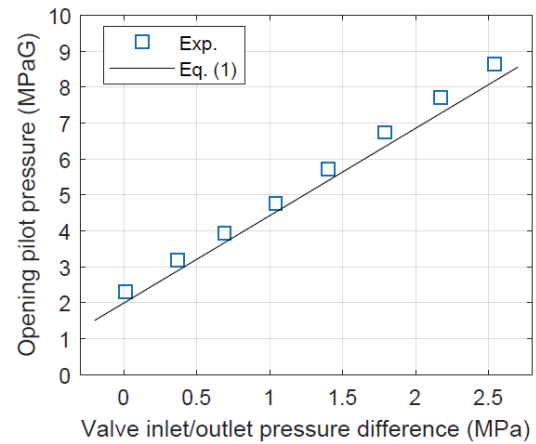


Fig. 5. Opening pilot pressures according to the pressure difference between the valve inlet/outlet

범위를 고려하더라도 이러한 차이는 극저온 환경에 의한 소재 특성 변화에 의한 것으로 판단된다. 일반적으로 극저온 환경에서는 스프링 힘은 상온 환경에 비해 10% 가량 증가하는 것으로 알려져 있다[10].

3.3 밸브 개방 시간 변화

밸브 입구 압력 변화에 따른 밸브 개방 시간과 밸브 행정 시간에 대한 시험결과는 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 밸브 개방 시간(Valve opening time, t_o)은 밸브 구동압력이 증가하기 시작하는 시점부터 밸브가 완전히 개방되기까지의 총 소요된 시간을 의미한다. 한편, 밸브 행정 시간(Valve travel time, t_t)은 밸브가 물리적으로 개방하기 시작하는 시점부터 밸브가 완전히 개방되기까지의 시간을 나타낸다. 따라서 밸브 개방 시간 t_o 은 식 (2)와 같이 밸브 개방 시작에 필요한 구동압력까지 상승하는데 소요되는 시간, t_p 와 밸브 행정 시간, t_t 의 합이 된다.

$$t_o = t_p + t_t \quad (2)$$

밸브 입구 압력, P_h 가 높아질수록 t_p 는 증가하고 t_t 은 감소하게 되는데, 이는 밸브 입구 압력이 밸브 개방의 반대 방향 힘으로 작용하기 때문이다(Fig. 1(a) 참조). 밸브 개방에 필요한 구동압력이 밸브 입구 압력과 비례하여 증가하기 때문에 밸브 입구 압력 상승에 따라 밸브 개방에 필요한 구동압력까지 도달하는데 소요되는 시간은 증가한다. 반면에 밸브 개방 시작 이후로는 밸브 입구 압력의 영향이 급격히 사라지고 구동압력의 힘으로 밸브가 개방되기 때문에 밸브 개방 시점에서의 구동압력이 높을수록, 즉 P_h 가 클수록 밸브 행정 속도는 빠르게 증가한다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 밸브 입구 압력이 0~2.6 MPaG 구간에서 밸브 개방 시간은 70~120 ms 수준

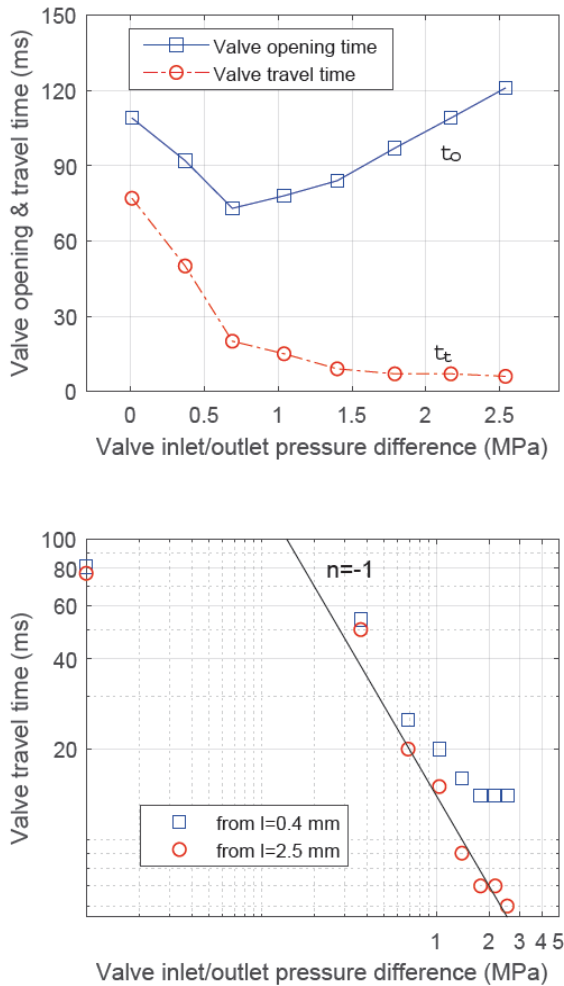


Fig. 6. Evolution of valve opening time and valve travel time according to the different valve inlet pressures

을 유지하는 것으로 나타났으며, 밸브 입구 압력 변화에 따라 밸브 개방 시간 t_o 는 감소하다가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 밸브 입구 압력의 초기 상승 구간에서는 t_i 의 감소량이 상대적으로 영향이 큰 반면에 이후의 밸브 입구 압력 상승 구간에서는 t_o 의 증가량이 우세하게 작용하기 때문이다.

한편 밸브 행정 시간, t_t 는 밸브 입구 압력 증가에 따라 지속적으로 감소한다. t_t 는 밸브 개방 속도에 반비례하는데, 밸브 개방 속도는 매우 짧은 밸브 작동 시간 조건에서는 밸브 무빙파트에 가해지는 힘에 대략적으로 비례한다고 볼 수 있다. 밸브 구동압력에 의한 힘이 밸브 마찰력과 스프링 힘에 비해 상대적으로 매우 크다고 가정할 경우, 다시 말해 밸브 입구 압력이 상대적으로 높은 조건에서는 밸브 개방 속도는 밸브 입구 압력에 비례하기 때문에 밸브 행정 시간과 밸브 입구 압력과의 관계는 다음과 같이 간단히 예측할 수 있다[3].

$$t_t \sim P_h^{-1} \quad (3)$$

식 (3)의 밸브 t_t 와 P_h 와의 반비례 관계는 Fig. 6에서 확인할 수 있는데, 밸브 행정 길이, l 이 2.5mm에서 밸브의 완전 개방에 필요한 행정 길이인 30mm까지 도달하는데 소요되는 행정 시간과 밸브 입구 압력이 이러한 반비례 관계와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 밸브 입구 압력에 의한 시트 변형에 따른 포핏과의 간섭 등 포핏과 시트 접촉과 변형에 의한 영향을 제외하기 위해 밸브 무빙파트가 본격적으로 개방되기 시작하는 지점을 $l=0.4$ mm 대신에 $l=2.5$ mm로 가정하기로 하며, 이는 t_t 가 밸브 총 행정의 92%를 이동하는데 소요되는 시간을 의미한다.

엔진 점화 시동 과정의 밸브 입구 압력이 1 MPa 내외 수준인 실제 엔진 시동 구간에서의 밸브 행정 시간이 대략 10ms로 매우 짧기 때문에 밸브 개방 시 산화제 유량은 점진적으로 증가하지 않고 순간적으로 공급된다고 볼 수 있다. 또한 밸브 개방 시간의 대부분이 밸브 개방에 필요한 구동압력에 도달하는데 소요되기 때문에 밸브 구동부 배관의 체적 및 오리피스 크기에 대한 적절한 설계에 따라 밸브 개방 시간을 효과적으로 조절할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 밸브 구동부 설계를 통해 밸브 개방 시점을 결정함으로써 안정한 엔진 점화 시동에 필요한 산화제의 순간적인 공급량, 즉 밸브 개방 시점의 밸브 입구 압력을 확보할 수 있다.

IV. 결 론

액체로켓엔진의 신뢰성 높고 안정된 점화 시동 구현을 위해서는 추진제를 공급하는 개폐밸브들의 개방 특성에 대한 이해가 필수적이다. 이에 한국형발사체용 연소기 산화제 개폐밸브에 대해 밸브 입구 압력 변화에 따른 밸브 개방 특성에 대한 정량적인 분석 내용을 본 논문에서 소개하였다.

한국형발사체용 연소기 산화제 개폐밸브의 자체 개방유지형 포핏 방식의 밸브 특성으로 인해 밸브 입구 압력이 증가할수록 밸브 개방을 위해 보다 높은 구동압력이 요구된다. 밸브 개방에 필요한 구동압력은 밸브 입구 압력과 구동압력의 작용면적 비율에 따라 선형적으로 증가하기 때문에 작용면적을 적절히 선정함으로써 밸브 입구 압력 상승에 따른 밸브 개방에 필요한 구동압력을 조절할 수 있다.

밸브 개방 시 밸브 입구 압력이 상승함에 따라 밸브 행정 시간은 감소한다. 그러나 밸브 행정 시간이 짧아지는 것에 비해 밸브 개방 구동압력 도달까지의 시간이 상대적으로 더욱 길어지기 때문에 밸브 입구 압력이 상승할수록 전체적인 밸브 개방 시간은 결과적으로 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 밸브 개

방 시점은 밸브 개방에 필요한 구동압력까지 소요되는 시간에 의해 좌우된다. 결국 밸브 구동부의 체적 및 오리피스에 대한 설계를 통해 밸브 개방 시점의 밸브 입구 압력과 연소기로의 산화제 공급량을 적절하게 조정할 수 있다.

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, pp. 566~568.
- 2) Kim, D. H., Hong, M. G., Park, J. S. and Lee, S. Y., "Study for the Development of a Main Oxidizer Shut-off Valve for Liquid Rocket Engines," *Journal of the Korean Society for Propulsion Engineers*, Vol. 17, No. 6, 2013, pp. 113~119.
- 3) Hong, M. G., "Opening Characteristics of a Main Oxidizer Shut-off Valve," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 45, No. 11, 2017, pp. 989~997.
- 4) Lee, J. Y. and Huh, H. I., "Dynamic Characteristics of Fuel Shutoff Valve of a Gas Generator," *Journal of the Korean Society for Propulsion Engineers*, Vol. 14, No. 4, 2010, pp. 1~9.
- 5) Jang, J. S. and Kil, G. S., "Analysis of Operation Characteristics of Fuel Isolation Valve," *Proceeding of the Korean Society for Propulsion Engineers Fall Conference*, December 2016, pp. 1047~1052.
- 6) Koh, H. S., "Analysis of Relief Mode Characteristics for Oxidizer Vent Relief Valve Using Force Balance Equation," *Proceeding of the Korean Society for Propulsion Engineers Fall Conference*, December 2014, pp. 824~829.
- 7) Muller, M. T. and Fales, R. C., "Design and Analysis of a Two-Stage Poppet Valve for Flow Control," *International Journal of Fluid Power*, Vol. 9, No. 1, 2008, pp. 17~26.
- 8) Hong, M. G., "Improvement of a Flow Coefficient for the Recirculation Chill-down Flow in a Main Oxidizer Shut-off Valve," *Journal of the Korean Society for Propulsion Engineers*, Vol. 21, No. 4, 2017, pp. 89~95.
- 9) Hong, M. G. and Kim, K., "Analysis on the Elastic Force of the Seat to the Poppet of a Main Oxidizer Shut-off Valve," KARI-IDMS, KARI-LPC-ELN-2019-014, 2019.
- 10) Jeong, D. S., *Study on the Performance Characteristics of a Main Oxidizer Shut-off Valve for Liquid Rocket Engines*, M.S. Thesis, University of Science and Technology, 2018.