

포고억제장치에 의한 시스템 동특성 변화

이준경* · 고헌용** · 이한주*** · 이상용*

Dependence of System Dynamics on Characteristics of Pogo Suppression Device

Jun Kyoung Lee · Kwang Uoong Koh · Han Ju Lee · Sang Yong Lee

ABSTRACT

The effectiveness of the pogo suppression device (PSD) installed at the piping system simulating the fuel supply lines of the rocket engines was investigated. The system response defined as the ratio of the flow rate to the pressure in the main tube was obtained for various PSD gas volumes (0, 0.5, 1, 2×10^{-6} m³). Existence of a gas volume in the PSD reduced the system resonance frequency. With a larger gas volume, the resonance frequency became lower, but only slightly, though the fluctuations of the main tube pressure and the flow rate damped down considerably.

초 록

액체 연료 로켓의 연료 공급 라인을 모사한 시스템에 대해, PSD가 시스템의 응답에 미치는 영향을 살펴보았다. 주관의 유량 변화에 대한 주관 압력 변화의 비(시스템 응답)를 PSD 내의 기체 체적을 변화시키며 살펴보았다. PSD 내에 기체가 있을 경우, 시스템의 공진 주파수가 작아짐을 확인하였다. 그리고 기체의 체적이 클수록 시스템 공진 주파수가 작아졌으나, 그 변화는 그리 크지 않았다. 또한 PSD 내 기체량이 많은 경우, 주관 내 압력 및 유량 변화의 진폭이 많이 줄어들음을 확인할 수 있었다.

Key Words: PSD (포고 억제 장치), Gas Volume(가스 체적)

1. 서 론

액체 추진제 펌프공급 방식의 대형 발사체에서 주로 관찰되는 진동은 포고 스틱(pogo stick)의 진동 모드와 유사해서 포고(pogo)라 부른다[1]. 포고에 의한 진동의 증폭은 로켓 엔진 연소실의 급격한 압력 변동을 유발하여, 연소실을 파괴할

* 한국과학기술원 기계공학과

** 대우중합기계 특수사업본부

*** 한국항공우주연구원

이상용, E-mail: sangyonglee@kaist.ac.kr

수도 있다. 따라서 이러한 포고를 제거하기 위해 발사체에 설치하는 장치를 포고억제장치(Pogo Suppression Device, PSD), 또는 포고수정장치(Pogo Corrective Device, PCD)라 부른다.

포고는 연료 및 산화제 공급계와 발사체 구조물 고유 진동의 공진에 의해 발생하는 것으로 알려져 있고, 이 두 공진 주파수의 대역이 충분히 떨어져 있을 경우에는 포고가 제거된다. 보통의 경우, 구조물의 고유진동수를 바꾸는 데는 심각한 설계 변경을 요구하게 되므로, 공급계 내부 유체의 공진 주파수를 바꾸기 위한 장치(PSD)를 이미 설계되어 있는 비행체에 추가적으로 설치함으로써 포고를 억제할 수 있다.[2] 주로 기체로 채워진 완충기(accumulator)를 엔진시스템 경계의 공급계 배관에 설치하거나 불용축성 기체를 추진제 내에 첨가하는 방법을 이용한다. 즉 식 (1)에서 볼 수 있듯이 이러한 압축성 부피의 첨가는 추진기관 시스템 공급계의 순응성(compliance) C_a 를 증가시켜, 공급계 내부 유체의 공진 주파수 f_1 를 감소시킨다[2].

$$f_1 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{I(C_a + C_b)}} \quad (1)$$

여기서, I 는 각 공급계의 탱크 출구로부터 펌프 입구까지의 공급계의 이너턴스(inertia)를 나타낸다. 완충기의 순응성 C_a 는 다음과 같이 정의된다.

$$C_a = \frac{\rho p_1 V_1}{\gamma p^2} \quad (2)$$

C_b 는 펌프입구에서의 캐비테이션이나 시스템의 공급계에 주입한 기상의 순응성을 나타낸다. 여기서, ρ , p_1 , V_1 , γ , p 는 각각 추진제의 밀도, 초기 가스 충전 압력, 초기 가스 부피, 가압 가스의 비열비, 그리고 가스에 작용하는 공급시스템 압력을 의미한다.

PSD를 설계할 때는 제작의 용이함 그리고 작

동의 신뢰성 등을 고려해야 하고, 따라서 구조가 간단한 수동형 PSD를 주로 이용한다[3]. 그 중에서 가장 기본적인 형태가 기체와 액체를 분리하는 완충기 형태이다.

본 연구는 국내 제작 발사체용 PSD의 설계를 위한 기초연구로서 그러한 기본적인 완충기 형태의 PSD가 시스템 응답에 미치는 영향을 살펴 보았다. 이를 위하여, PSD 내의 공기의 양(V_{PSD})을 변화시키며 가진에 따른 시스템 응답의 변화를 살펴보았다.

2 실험 장치

공급계 해석만으로도 포고의 발생 유무를 예측할 수 있다는 선행 연구[4] 결과를 바탕으로 작동 유체 가진 방식으로 실험 장치를 구성하였다. 가진기 방식으로는 주파수와 진폭을 각각 독립적으로 조절 가능하여 PSD 특성을 보다 쉽게 파악할 수 있는 면적 제한 방식을 선택하였다[5]. 본 연구에서 구성한 면적 제한 방식의 PSD 성능 시험 장치의 개략도는 Fig. 1에 도시되어 있다. 작동 유체로는 물과 공기(질소)를 사용한다.

장치의 구성은 액체 저장 탱크(1), 공급되는 액체 유량을 측정하는 오리피스(2), 주관(3), PSD(4)와 진폭 조절용 밸브(5), 가진기(6), 그리고 출구 노즐(7) 등으로 이루어져 있다. 또한 출구 노즐로부터 분사된 작동 유체를 다시 액체 저장 탱크로 순환시키기 위한 저장용 용기(8), 펌프(9), 그리고 순환관(10)이 있다. 이외 부속 장치로는 가진기의 회전수를 측정하기 위한 타코메타(tachometer)와 각 위치의 압력을 측정하고 오리피스 전후단의 압력을 측정하기 위한 압력계(DP15TL, Validyne)가 있다.

주관의 압력은 PSD 입구에서 250 mm 떨어진 지점(Fig. 1의 P_{main})에서 측정하였고, 유량은 액체 저장 탱크 후단에 오리피스를 이용하여 측정하였다. PSD 내 기체 충전량은 $(0 \sim 2) \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 이며, 탱크의 압력은 350 kPa이다. 또한 두께 3 mm의 판의 중앙에 지름이 50 mm인 구멍이

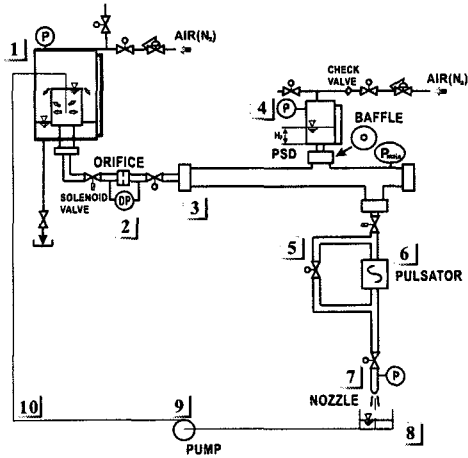


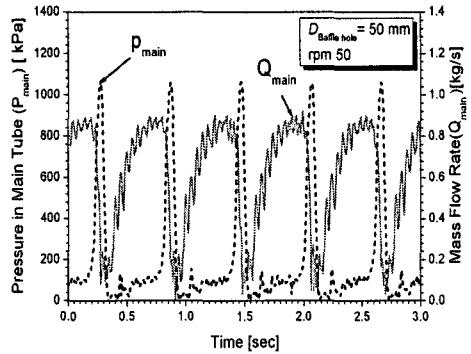
Fig. 1 Schematic diagram of PSD performance test facility
 뿔려있는 형태의 배플을 이용하였다.

3. 실험 결과

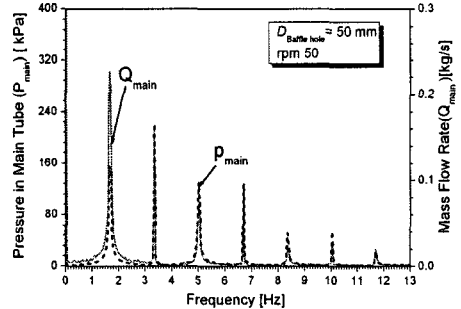
본 연구에서 시스템 내의 유체를 가진기 위하여 볼밸브형의 가진기를 사용하였다. 가진기는 유량의 변동을 일으키고, 그에 의해 주관 내의 압력의 변화가 생기므로, 시스템의 응답은 유량의 변동이라는 입력 조건에 대한 주관 내 압력 변화를 말한다[4]. 본 연구에서의 볼 밸브형 가진기에 의해서 발생된 유량과 주관 내 압력과의 형태는, Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 단일 주파수의 조화함수의 형태가 아니다. 따라서 본 연구에서는 발생한 유량과 압력 신호에 포함되어 있는 각 주파수의 성분(진폭(amplitude))을 파악하기 위하여 FFT를 이용하였다. Fig. 2 (b)는 FFT를 한 결과를 보여준다. 가진기 축의 회전수가 50 rpm인 경우, 축의 1회전 당 2번의 가진 사이클이 형성되므로 첫 번째 주요 주파수 성분은 1.7 Hz에서 나타난다. 상대적으로 진폭(amplitude)이 큰 주파수 성분만이 해석에 이용되었다.

Fig. 3은 PSD가 없는 경우($V_{PSD} = 0$)와 PSD가 있는 경우에 대해, 시스템의 응답을 주파수에 따라 나타낸 것이다. 이 때, 공진 주파수는 입력에 대한 출력의 비가 최대가 되는 주파수이

다. PSD가 없는 경우, 본 연구에서 구성한 시스템의 공진 주파수가 10 Hz 정도임을 알 수 있다. 그러나 PSD가 있는 경우에는 시스템의 공진 주파수가 약 3 Hz 정도 작아지는 것을 볼 수 있다. 이는 식 (1), (2)에서 볼 수 있듯이 시



(a) Wave forms of pressure and flow rate in the main tube



(b) FFT results of pressure and flow rate in the main tube

Fig. 2 Wave forms and FFT results

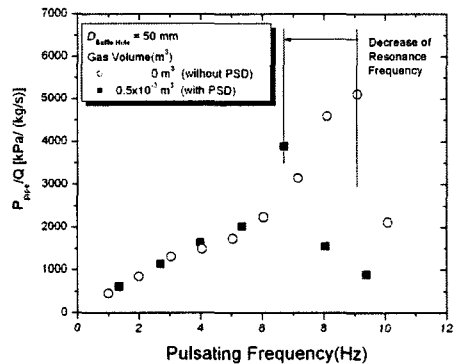


Fig.3 Decrease of system resonance frequency due to PSD

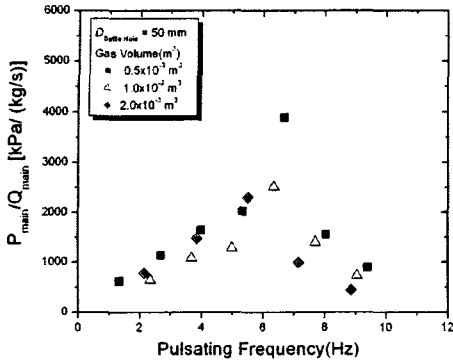
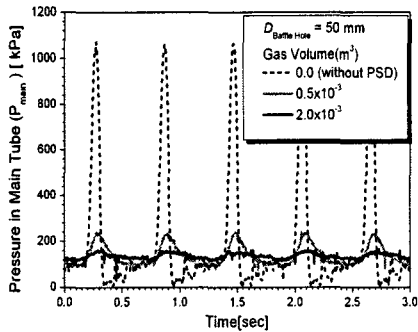
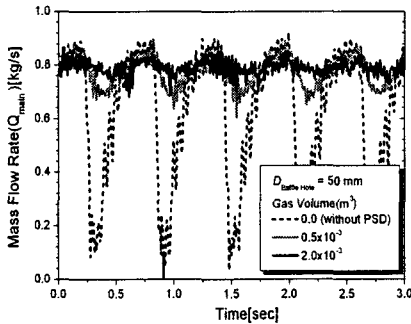


Fig.4 Effect of the PSD gas volume on the system response



(a) Pressure



(b) Flow rate

Fig.5 Time responses in the main tube with different PSD gas volumes (50 rpm)

스텝에 컴플라이언스(순용성)를 추가함으로써 공진 주파수가 감소된 것이다.

또한 PSD 내의 기체 부피를 더욱 증가시켰을 때의 시스템 응답을 Fig. 4에 도시하였다. 기체의 부피가 증가할수록 공진 주파수가 감소하지만, 그리 크게 변하지 않음을 확인할 수 있다. 그와 더불어 부피 증가에 따라 시스템 응답의

크기가 작아짐을 볼 수 있는데, 이는 주관의 압력 변화에 따른 PSD 기체의 부피 변화에 의한 에너지 소산에 의한 것으로 기체의 부피가 클수록 변화량이 커지므로 에너지 소산도 커지게 된다.

PSD 부피의 변화에 따른 주관 내의 압력 및 유량 변화를 Fig. 5에 도시하였다. 이 결과로부터 주파수 응답 특성을 바로 알기란 쉽지 않지만, PSD 내 기체 부피가 증가할수록, 유량 및 압력의 크기(Amplitude)는 작아짐을 볼 수 있고, 특히 기체가 많은 경우, 주관 내 압력의 변화는 크게 줄어들음을 확인할 수 있다. 따라서 PSD는 시스템의 공진 주파수를 감소시키는 것과 더불어 유로 내 압력 및 유량의 급격한 변화를 지연하는 역할도 있음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

PSD 내에 기체가 있을 때 주관 내 유량 변화에 대한 압력 변화의 비라 정의되는 시스템 응답의 공진 주파수가 작아짐을 확인하였다. 또한 기체량이 증가할 때 공진 주파수가 작아지나 그 변화는 크지 않았다. 그리고 PSD 내 기체량이 많은 경우, 주관 내 압력의 크기가 많이 줄어들음을 확인할 수 있었다. 본 연구는 PSD 입구 저항을 고정시켰으나 차후에는 이를 변화시키며 시스템의 응답 특성을 파악하는 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원의 소형위성 발사체 (KSLV-I) 개발사업(I)과 두뇌한국(BK)-21의 연구비 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

1. "NASA Space Vehicle Design Criteria - Liquid Rocket Lines, Bellows, Flexible Hoses, and Filters," NASA-SP, 8123
2. Norquist, L. W. S., Marcus, J. P. and

Ruscio, D. A., "Development of Close-coupled Accumulators for Suppressing Missile Longitudinal Oscillations (POGO)," 1969, AIAA Paper No. 69-547

3. Fenwick, R., Jones, J.H. and Jewell, R. E. , 1982, "Space Shuttle Main Engine (SSME) Pogo Testing and Results," The shock and

Vibration Bulletin, No. 52, pt. 2, pp. 1-20

4. 조인현, 정태규, 강선일, 김용욱, 권오성, 정영석, 2001, "KSR-III 추진 기관 공급 시스템 분석," DN-기관-01-1

5. 고헌웅, 정동운, 이한주, 이상용, "PSD 성능 시험 장치의 설계," 한국추진공학회지, 제7권, 제 4호, pp.10 - 18, 2000