

포고억제장치 설치에 따른 배관계 동특성 변화

이준경* · 이상용* · 이한주** · 오승협**

Change of Piping-System Dynamics with Installation of Pogo Suppression Device

Jun Kyoung Lee* · Sang Yong Lee* · Han Ju Lee** · Seung Hyub Oh**

ABSTRACT

The effectiveness of the pogo suppression device (PSD) on the response of the piping system simulating the fuel (or oxidizer) 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 $((0 \sim 2) \times 10^{-3} \text{ m}^3)$ and three different baffle hole diameters (5, 50, 115 mm). 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, while the fluctuations of the main tube pressure and the flow rate damped down considerably. The resonance frequency decreased with the increase of the PSD inlet restriction (or the decrease of the baffle hole diameter), though slightly. However, with a larger inlet restriction, the PSD pressure wave showed a delayed response with the smaller amplitude compared to the pressure variation in the main tube.

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 체적 $((0 \sim 2) \times 10^{-3} \text{ m}^3)$ 과 PSD 배플의 직경(5, 50, 115 mm)을 변화시키며 살펴보았다. PSD 내에 기체가 있을 경우, 시스템의 고유진동 주파수가 작아짐을 확인하였다. 그리고 기체의 체적이 클수록 시스템 고유진동 주파수가 작아졌으나, 그 변화는 그리 크지 않았다. 또한 PSD 내 기체량이 많은 경우, 주관 내 압력 및 유량 변화의 진폭이 많이 감소함을 확인할 수 있었다. PSD 배플의 직경이 작아질수록 시스템 고유 진동 주파수가 작아졌으나 그 변화는 작았다. 또한 PSD 배플의 저항이 클 때, PSD 내 압력은 주관의 압력 크기보다 작고, 지연된 파형이 관찰되었다.

Key Words: PSD (포고억제장치), Gas Volume (기체 체적), Baffle Restriction (배플 저항)

1. 서 론

† 2005년 4월 8일 접수 ~ 2005년 5월 24일 심사완료

* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

** 정희원, 한국항공우주연구원 추진기관체그룹
연락처, E-mail: sangyonglee@kaist.ac.kr

발사체의 축방향 진동은 액체 추진제 펌프공급 방식의 대형 발사체에서 주로 관찰되었다.

이러한 축방향 발사체의 진동을 그 1차 진동모드가 포고 스틱(pogo stick)의 진동 모드와 유사해서 포고(pogo)라 부른다[1-3]. 포고에 의한 진동의 증폭은 로켓 엔진 연소실의 급격한 압력 변동을 유발하여 심각한 경우, 연소실을 파괴할 수도 있다. 또 극단적인 로켓 파손에 이르지 않더라도 비행 중에 발생하는 심각한 추진력 변화는 자세 제어에 영향을 주어 정밀하게 계산된 로켓의 예상 궤적으로부터의 이탈을 유발할 가능성도 있다. 이 외에도 극단적 가속도 환경에 노출된 우주비행사에게 진동에 의한 신체적 부담을 추가로 주어 성공적인 임무 수행을 방해할 수 있다. 따라서 액체로켓 개발 시 포고의 제거는 필수적이라 할 수 있다. 포고를 제거하기 위해 발사체에 설치하는 장치를 포고억제장치(Pogo Suppression Device, PSD), 또는 포고 수정 장치(Pogo Corrective Device, PCD)라 부른다.

포고는 Fig. 1의 점 A와 점 B와 같이 연료 및 산화제 공급계와 발사체 구조물 고유 진동의 일치(공진)에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. 따라서 Fig. 2가 보여주듯이 연료 공급계의 고유진동 주파수와 1차 구조모드에서의 고유진동 주파수를 분리하면 포고를 제거할 수 있다. 즉 발사체 구조물의 고유진동 주파수와 공급계의 고유진동 주파수의 대역이 충분히 떨어져 있을 경우에는 공급계와 구조 시스템 사이의 공진이 일어나지 않아 포고를 제거할 수 있다.

구조물의 고유진동 주파수를 바꾸는 데는 추진제 탱크라든지 그 외 다른 구조물을 변경해야 하기 때문에 심각한 설계 변경을 요구하게 된다. 그러므로 실질적인 포고 억제는 추진기관 시스템의 공급계 내부 유체의 고유진동 주파수를 바꾸기 위한 장치(이것이 PSD가 된다)를 이미 설계되어 있는 비행체에 추가적으로 설치함으로써 이루어진다[4, 5]. 주로 기체로 채워진 완충기(accumulator)를 엔진시스템 공급계 배관에 설치하거나 불응축성 기체를 추진제 내에 첨가하는 방법을 이용한다. 즉 Eq. 1에서 볼 수 있듯이 이러한 압축성 부피의 첨가는 추진기관 시스템 공급계의 순응성(compliance) C_a 를 증

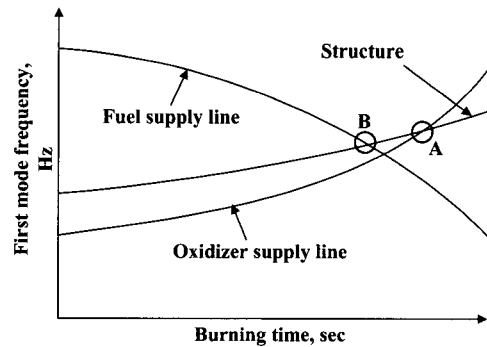


Fig. 1 1st mode frequencies of suction line and structure without PSD as a function of burning time [4]

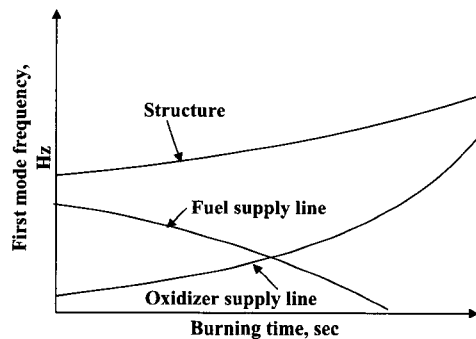


Fig. 2 1st mode frequencies of suction line and structure with PSD as a function of burning time [4]

가 시켜, 공급계 내부 유체의 고유진동 주파수 f_1 을 감소시킨다[4].

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

여기서, I 는 각 공급계의 탱크 출구로부터 펌프 입구까지의 공급계의 이너턴스(inertia)를 나타낸다. 완충기의 순응성 C_a 는 다음과 같이 정의된다[4].

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

C_g 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 연료 공급계 파이프 라인의 구성, 펌프에 근접하여 설치할 수 있는 구조, 제작의 편리성, 그리고 작동의 신뢰성 등을 고려해야 한다[5]. 따라서 상대적으로 제작이 쉽고, 구조가 간단한 수동형 PSD를 주로 이용한다[6]. 그 중에서 가장 기본적인 형태가 기체와 액체를 분리하는 벨로우즈도 없는 완충기 형태이다. 이 경우 엔진 시동 시와 같이 엔진의 부하가 급격히 변하는 과도 영역에서 PSD 내의 기체 양을 일정하게 유지시키기 위하여 PSD 입구에 배플(baffle)을 설치한다. 그러나 배플의 유동 저항, 즉 PSD 입구 저항이 너무 크면 PSD가 제 역할을 하지 못하는 것으로 알려져 있다[6]. 따라서 최적의 저항을 갖는 배플의 설계가 PSD 설계의 주요 과정 중 하나이다. 그러나 국내에서는 PSD의 설계 경험이 현재 없으며, 배플 설계에 대한 경험도 매우 부족한 실정이다. 따라서 이에 대한 기초 연구들이 필요하다.

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(VPSD)과 PSD의 입구 저항, 즉 PSD 입구에 설치된 배플 구멍의 유로 단면적을 변화시키며 가진에 따른 시스템 응답의 변화를 살펴보았다.

2. 실험장치

공급계 해석만으로도 포고의 발생 유무를 예측할 수 있다는 선행 연구[7, 8] 결과를 바탕으로 작동 유체 가진 방식으로 실험 장치를 구성하였다. 그리고 가진기 방식으로는 주파수와 진폭을 각각 독립적으로 조절 가능하여 섭동 크기

와 PSD 성능에 관한 관계를 보다 쉽게 파악할 수 있는 면적 제한 방식(restrict-type)을 선택하였다. 본 연구에서 구성한 면적 제한 방식의 PSD 성능 시험 장치의 개략도는 Fig. 3에 도시되어 있다. 전체적인 구성은 고흡용 등[9]이 제안한 성능 시험 장치와 유사하다. 다만 다른 점이 있다면, 가진기의 작동 방식에 있어, 유량의 진동 형태를 두 판의 면접촉을 통해 결정하는 면적 제한 방식의 구현에 어려움이 있어, 동일한 성격의 면적 제한 방식이지만 제작이 용이한 볼밸브형(2" ball valve) 가진기로 변경되었다. 작동 유체로는 물과 공기를 사용한다[5].

PSD 성능 시험 장치(Fig. 3)는 액체 저장 탱크(1), 공급되는 7액체 유량을 측정하는 오리피스와 이론적인 시스템의 고유진동 주파수를 설정하기 위한 곡관(2), 주관(3), PSD(4)와 진폭 조절용 밸브(5), 가진기(6), 그리고 출구 노즐(7) 등으로 이루어져 있다. 이외의 부가 장치로서 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 가진기 축의 회전수를 조절하기 위한 조절기와 모터, 그리고 각 위치의

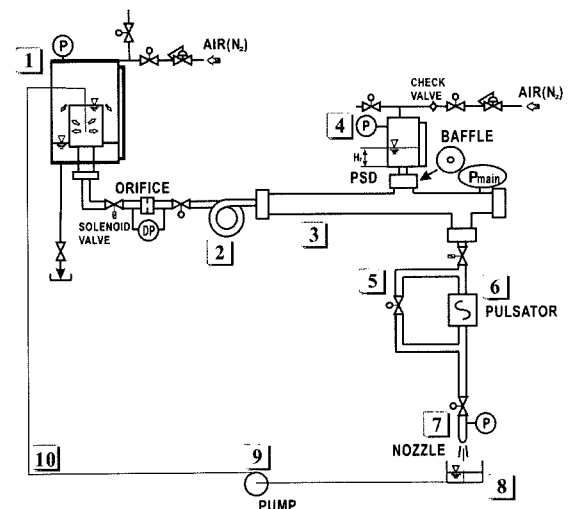


Fig. 3 Schematic diagram of PSD performance test facility

압력을 측정하고 오리피스 전후단의 압력을 측정하기 위한 차압 측정기(DP15TL, Validyne)가 있다. 또한 측정 기기의 신호저장과 신호 처리를 위한 데이터 획득 장치(data acquisition system)가 포함된 컴퓨터가 있다.

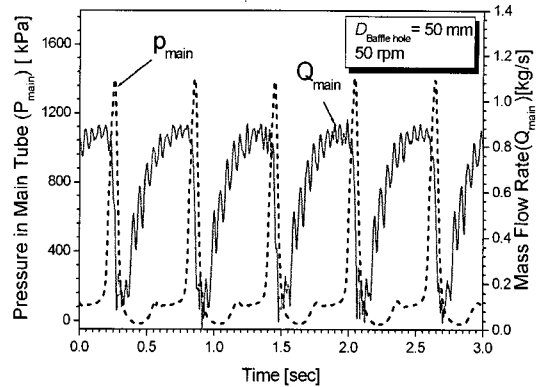
주관의 압력은 PSD 입구에서 250 mm 떨어진 지점(Fig. 3의 P_{main})에서 측정하였고, 유량은 액체 저장 탱크 후단에 오리피스를 이용하여 측정하였다. PSD는 내경 115 mm, 높이 500 mm로 $5.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 의 부피를 가지고, 내부 기체 충전량은 $(0 \sim 2) \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 이며, 탱크내의 압력은 350 kPa이다. 또한 두께 3 mm의 판의 중앙에 지름이 각각 5, 50, 115 mm인 구멍이 뚫려 있는 형태의 배플을 이용하였다.

3. 실험 결과

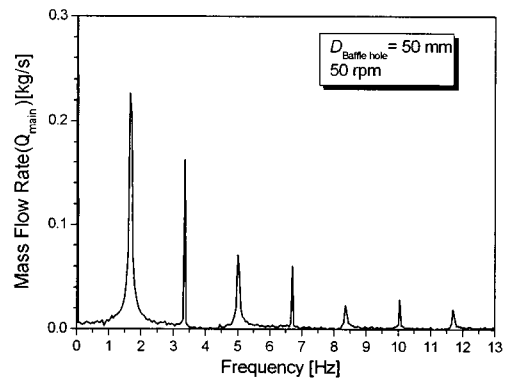
3.1 PSD 내 기체량이 시스템 응답에 미치는 영향

본 연구에서 시스템 내의 유체를 가진하기 위하여 볼밸브형의 가진기를 사용하였고, 그에 의해 유량의 변동이 발생하면, 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, 볼 밸브 내 유로의 시간에 따른 면적 변화가 이상적(ideal)이 아닌 관계로, Fig. 4(a)에서 볼 수 있듯이 단일 주파수를 가진 조화함수의 형태가 아니다. 따라서 본 연구에서는 발생한 유량과 압력 신호에 포함되어 있는 각 주파수의 성분(진폭(amplitude))을 파악하기 위하여 FFT(Fast Fourier Transform)을 이용하였다.

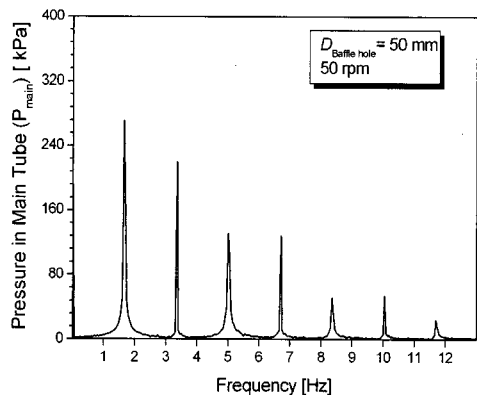
Figure 4 (b), (c)는 각 신호를 FFT 처리한 결과를 보여준다. 가진기 축의 회전수가 50 rpm인 경우, 축의 1회전 당 2번의 가진 사이클이 형성되므로 첫 번째 모드의 주파수 성분은 1.7 Hz에서 나타난다. 실험 결과의 정리시, 상대적으로 진폭(amplitude)이 큰 주파수 성분만이 해석에 이용되었다. 신호의 1초 당 샘플링 수는



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



(b) FFT result of flow rate in the main tube



(c) FFT result of pressure in the main tube

Fig. 4 Wave forms and FFT results

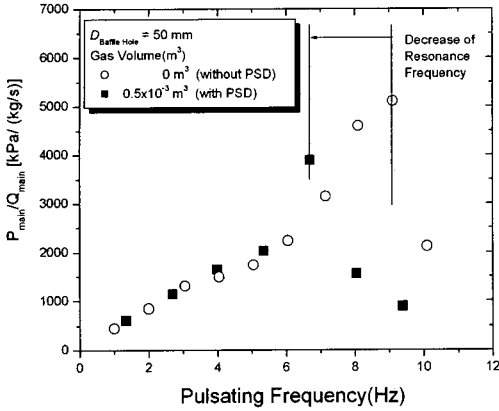


Fig. 5 System resonance frequency decrease due to PSD

200이고, 4000개의 데이터가 FFT 처리시 이용되었다. 따라서 수행된 FFT의 주파수 분해능은 1/20 Hz이다[10].

Figure 5는 PSD가 없는 경우와 PSD가 있는 경우에 대해, 시스템의 응답을 주파수에 따라 나타낸 것이다. 이 때, 공진 주파수는 입력에 대한 출력의 비가 최대가 되는 주파수이다. PSD가 없는 경우, 본 연구에서 구성한 시스템의 공진 주파수가 9 Hz 정도임을 알 수 있다. 그러나 PSD가 있는 경우에는 시스템의 공진 주파수가 약 2 Hz 정도 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 Eq. 1, 2에서 볼 수 있듯이 시스템에 컴플라이언스(순용성, C_d)를 추가함으로써 공진 주파수가 감소된 것이다.

또한 PSD 내의 기체 부피를 더욱 증가시켰을 때의 시스템 응답을 Fig. 6에 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 유량이 변해도 PSD 내 기체 체적이 커서 체적 변화율이 작아 압력의 변화도 작게 나타나기 때문이다. 주파수에 대한 크기 변화와 더불어 주관 내의 압력 및 유량의 시간 변화를 Fig. 7에 도

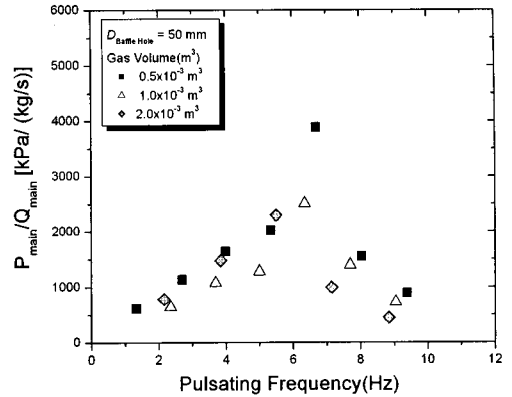
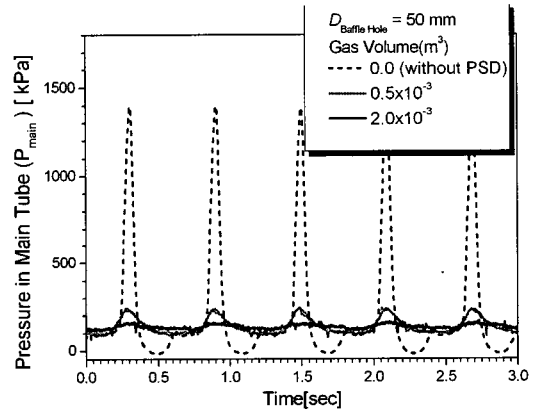
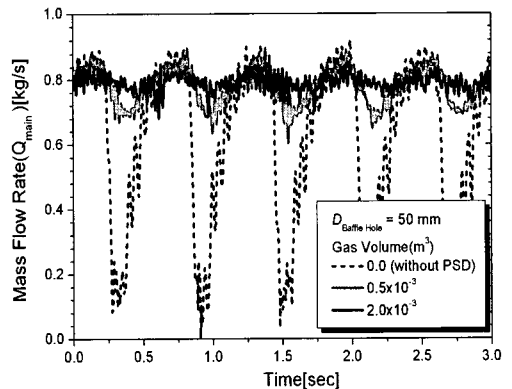


Fig. 6 Effect of the PSD gas volume on the system response



(a) Pressure



(b) Flow rate

Fig. 7 Time responses with different PSD gas volumes in the main tube (50 rpm)

시하였다. 몇 개의 주파수 성분이 섞여 있어, 결과로부터 주파수 응답 특성을 바로 알기란 쉽지 않지만, PSD 내 기체 부피가 증가할수록, 유량 및 압력의 진폭(amplitude)은 작아짐을 볼 수 있고, 특히 기체가 많은 경우, 주관 내 압력의 변화는 크게 감소함을 확인할 수 있다.

따라서 PSD 내의 기체는 시스템의 공진 주파수를 감소시키는 것과 더불어 유로 내 압력 및 유량의 급격한 변화를 감쇠시키는 기능도 있음을 확인할 수 있다.

3.2 PSD 입구 저항이 시스템 응답에 미치는 영향

PSD의 입구 저항이 다른 경우(PSD 입구의 배플 구멍 크기가 변화함에 따라)에 대한 시스템의 응답 특성을 주파수 영역에 대하여 Fig. 8에 나타내었다. PSD 내 기체 충전량의 많고 적음에 관계없이, PSD 입구의 저항이 커질수록(즉, 오리피스 크기가 작아질수록) 시스템 공진 주파수가 약간은 감소하지만, 그 변화는 크지 않음을 알 수 있다. 반면에, 입구의 저항이 증가할수록 시스템 응답의 크기는 작아짐을 볼 수 있다.

따라서 앞에서 살펴보았듯이 PSD 내 기체는 주관의 유체 압력에 따라 부피가 변화하면서, 강성을 가진 스프링과 같이 작용을 하고, PSD 입구 저항은 유체가 움직임에 대한 일종의 감쇠(저항) 역할과 같음을 확인할 수 있다.

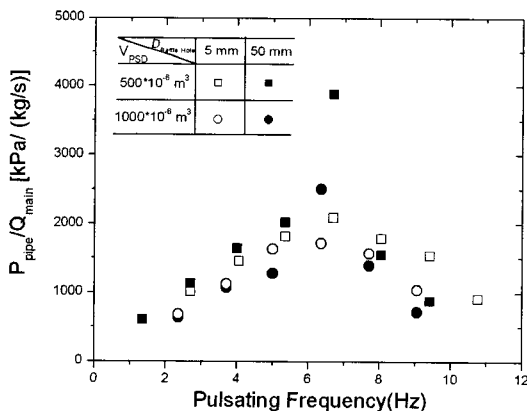


Fig. 8 Effect of PSD inlet restriction on the system response

3.3 PSD 입구 저항이 PSD 응답에 미치는 영향

앞에서는 PSD가 시스템에 어떠한 영향을 미치는가에 대해서 살펴보았다. 이와 더불어 주관의 압력 변화에 대한 PSD 내 압력 변화가 또한 중요한데, 그것은 주관의 압력 변화에 대해 PSD 내 압력 변화(PSD 내 기체 부피의 변화)가 작으면 PSD의 주관에 대한 진동 저감 효과가 작아지는 결과가 발생한다. 그러한 현상은 특히 PSD 배플의 저항이 클 때 나타나며, 따라서 PSD 내 압력 변화는 효과적인 PSD 배플의 저항 설계에 중요한 인자가 되고, 이러한 주관의 압력파(P_{main})의 크기와 PSD 내의 압력파(P_{PSD})의 크기의 비를 PSD 응답이라 한다[5].

본 논문에서는 PSD의 입구 저항이 다른 경우(배플의 구멍 크기가 다른 경우), 가진기에 의해 형성된 주관과 PSD 내 압력을 측정, 그들의 형상을 Fig. 9와 10에 나타내었다. PSD가 액체로만 충전되어 있는 경우, PSD의 입구 저항과 상관없이 주관의 압력파(P_{main})와 위상과 크기가 동일한 PSD 내의 압력파(P_{PSD})가 발생한다. PSD 내에 기체가 충전되어 있는 경우, 액체만으로 충전된 경우에 비해서 상대적으로 작은 진폭의 압력파가 주관과 PSD 내에 형성된다. 즉, PSD 내에 기체가 충전되면 일반적인 완충기의 역할을 한다.

기체가 PSD 내에 충전되어 있고, PSD 입구 저항이 작을 경우에는 주관과 PSD내에 형성된 압력파는 약간의 진폭과 위상 차이는 있지만 그 차이값이 작다는 것을 알 수 있다(Fig. 9). 그러나 PSD 입구 저항이 큰 경우에는 주관 압력파 (P_{main})에 비해 PSD내에 상대적으로 작은 진폭의 압력파 (P_{PSD})가 형성된다. 그리고 두 압력파 사이에는 시간 지연, 즉 위상차가 크다(Fig. 10). 이것은 PSD가 기체로 충전되어 있는 경우, 주관 압력파의 전달을 PSD의 입구 저항이 제한함을 의미한다. 따라서 PSD의 입구 저항은 PSD 내의 압력파의 형성을 방해하며, 결과적으로 주관 내 압력파보다 상대적으로 작은 진폭을 가지면서 시간 지연이 있는 압력파가 PSD 내에서 발생한다. 결과적으로 PSD 입구 저항은 PSD의 응답성을 저하시키며, PSD의 완충기 역할을 방

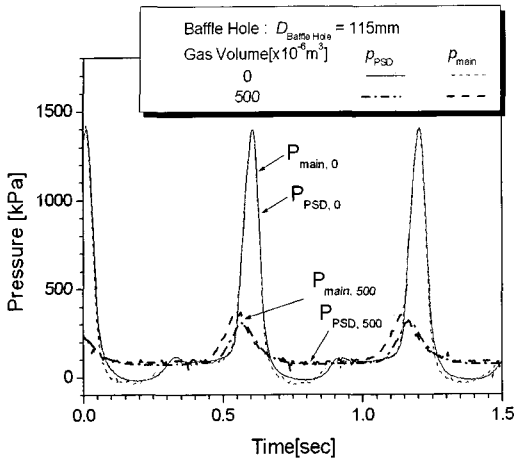


Fig. 9 Wave forms of pressures in the main tube and PSD (1.7 Hz) (small inlet restriction)

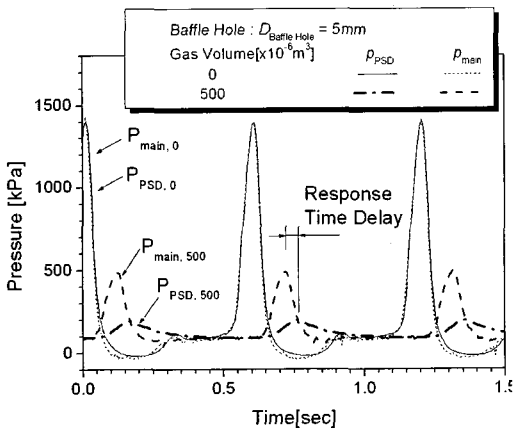


Fig. 10 Wave forms of pressures in the main tube and PSD (1.7 Hz) (large inlet restriction)

해한다.

Figure 11은 배플의 저항이 증가할 때, 주파수에 따른 주관 내 압력(P_{main})과 PSD 내 기체 압력 (P_{PSD})의 비를 보여준다. PSD가 액체만으로 충전되어 있는 경우에는 PSD 입구 저항의 영향이 작아 입구 저항과 상관없이 0 ~ 10 Hz의 주파수 영역에서 압력의 비가 1부근이다. 그

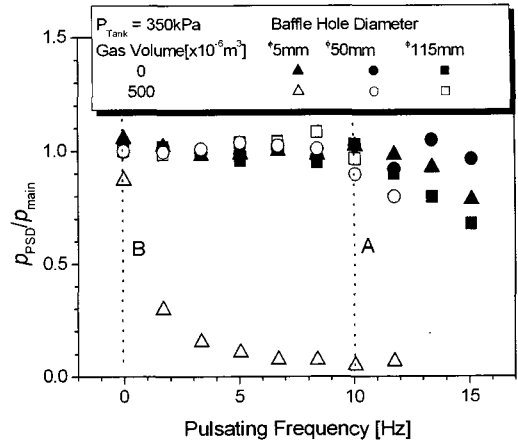


Fig. 11 Effect of baffle restriction on ratio of PSD pressure (P_{PSD}) to main tube pressure (P_{main})

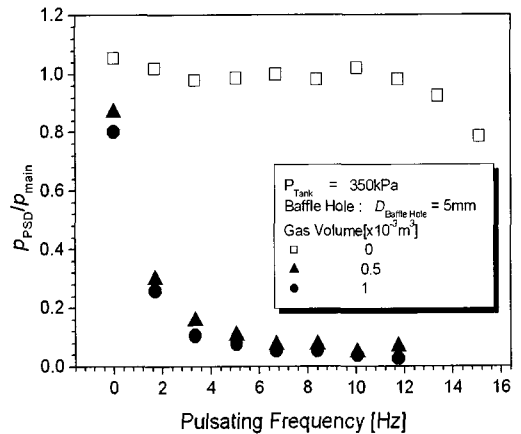


Fig. 12 Effect of gas volume in PSD on ratio of PSD pressure (P_{PSD}) to main tube pressure (P_{main})

러나 기체가 충전되어 있는 경우, PSD 입구 저항이 증가하면 PSD의 응답이 나빠져 낮은 주파수에서도 P_{PSD}/P_{main} 는 작아진다. 따라서 압력비가 1부근이 되는 최대 주파수는 배플의 구멍이 115 mm인 경우는 약 10 Hz(Fig. 11의 A)이나, 배플 구멍이 5 mm인 경우는 0 Hz 부근(Fig. 11의 B)으로 낮아진다.

또한 입구 저항이 일정할 때 PSD 내 기체 충전량이 PSD의 응답에 미치는 영향을 Fig. 12에 도시하였다. PSD의 응답은 주파수가 높을수록 저하되어 주파수가 증가함에 따라 P_{PSD}/P_{main} 는 작아진다. 특히, 기체 충전량이 증가할수록 이러한 경향은 심화된다. 즉, 입구 저항이 일정할 경우 기체 충전량이 증가할수록 PSD의 응답은 감소된다.

결론적으로 PSD 입구 저항 및 기체 충전량이 증가할수록 주관 (P_{main})과 PSD 내 기체압력 (P_{PSD})의 비, 즉 PSD의 응답은 나빠진다고 할 수 있다.

4. 결 론

PSD 내에 기체가 있을 경우, 주관 내 유량 변화에 대한 압력 변화의 비라고 정의되는 시스템 응답의 공진 주파수가 작아짐을 확인하였다. 또한 기체량이 증가할 때 공진 주파수가 작아지나 그 변화는 크지 않은 반면, 주관 내 압력 및 유량의 크기 변화는 많이 줄어들음을 확인할 수 있었다. 더불어, PSD 배플의 저항이 증가할수록 시스템의 주파수가 작아지나 변화값은 크지 않았다. 전체적으로는 PSD 내 기체 충전량 및 배플의 저항의 증가는 시스템의 주파수뿐만 아니라 주관의 압력 및 유량 진폭의 크기를 감소시킨다는 긍정적인 작용을 한다. 그러나 주관압력(P_{main})과 PSD 내 기체압력(P_{PSD}) 비로 정의된 PSD의 응답의 관점에서는 기체 충전량 및 입구 저항이 커질수록 주관의 압력파에 비해 그 진폭이 작으면서 시간 지연이 있는 압력파가 PSD 내에 발생하여, PSD의 응답을 감소시킨다. 또한 과도하게 기체를 충전할 경우, 기체가 주관으로 유출할 수 있다. 따라서 PSD 설계시 과도한 기체 충전량 및 배플의 저항은 피해야 한다.

후 기

본 연구는 한국항공우주연구원의 소형위성 발

사체(KSLV-I) 개발사업과 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. Martin, R. E., "Atlas II and IIA Analyses and Environments Validation," Acta Astronautica, Vol. 35, No. 12, 1995, pp. 771-791
3. Doiron, H. H., "Space Shuttle Pogo Prevention," NASA-TM-79526
4. 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
5. 오승협, 조인현, 이한주, 정태규, 조기주, 정영석, Kalmykov, G. P. and Menshikova, O. M., 2003, "우주발사체 개발사업 최종보고서", 한국항공우주연구원
6. Fenwick, R., Jones, J. H. and Jewell, R. E., "Space Shuttle Main Engine (SSME) Pogo Testing and Results," The shock and Vibration Bulletin, No. 52, pt. 2, 1982, pp. 1-20
7. 채연석, "3단형 과학로켓 개발 사업(V) 최종보고서", 2002, 한국항공우주연구원
8. 조인현, 정태규, 강선일, 김용욱, 권오성, 정영석, 2001, "KSR-III 추진 기관 공급 시스템 분석", DN-기관-01-1
9. 고희웅, 정동운, 이한주, 이상용, "PSD 성능 시험 장치의 설계", 한국추진공학회지, 제7권, 제4호, 2003, pp. 10-18
10. Beckwith, Thomas, G. and Marangoni, Roy D. and Lienhard V, John H., "Mechanical Measurement," 5th ed., Addison-Wesley Publishing Company, 1993