

포고억제장치(PSD) 동특성 모델링에 관한 연구

이준경*

Study on Dynamics Modeling of Pogo Suppression Device (PSD)

Jun Kyoung Lee*

ABSTRACT

The effectiveness of a pogo suppression device (PSD) on the response of piping system simulating the propellant supply lines of the rocket engines was investigated experimentally by other researchers. In this study, the simplified analytical model was made, and the key parameters which are difficult to derive theoretically were identified in combination with the previous experimental work. In other words, the flow transient equations for a PSD system and the key parameters used to decide the instability of the system from the linearized transfer function including inertance, compliance, and resistance were derived. From the analysis, the values of key parameters could be determined from the experimental results.

초 록

PSD(pogo suppression device)는 액체 추진 로켓의 추진제 공급부를 모사한 배관 시스템에 대한 기존의 실험 연구를 통해 배관 시스템의 동특성을 변화시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는, PSD에 대한 수학적 모델을 만들고, 각 변수에 대한 값을 결정하는 과정에서 이론적으로 구하기 힘든 변수를 파악하여, 이를 기존의 실험 결과로부터 구하고자 하였다. 그를 위해, 선형화된 전달함수를 만들어 전체 시스템에 대한 불안정성을 판단하는 방법에 대해, PSD를 유체 섭동에 대한 연속 방정식 등의 지배 방정식을 이용하여, 제작된 PSD의 실제 적용시 중요한 이너턴스, 컴플라이언스, 레지스턴스 등의 변수를 수식화하고, 실험 결과를 이용하여 이를 정량화 하는 방법을 제시하였다.

Key Words: PSD(Pogo Suppression Device, 포고억제장치), Inertance(이너턴스), Compliance(컴플라이언스), Resistance(레지스턴스)

Nomenclature

† 2007년 8월 20일 접수 ~ 2007년 10월 6일 심사완료

* 정회원, 경남대학교 기계자동화공학부
연락처, E-mail: jklee99@kyungnam.ac.kr

A : Cross sectional area [m²]

a : Pressure wave velocity [m]

C : Compliance	[-]
C_d : Discharge coefficient	[-]
D : Tube diameter	[m]
f : Natural frequency	[Hz]
g : Gravitational acceleration	[m/s ²]
H : Pressure head	[m]
\bar{H} : Mean pressure head	[m]
h : Perturbation of pressure head	[m]
I : Inertance ($1/A$)	[-]
K : Stiffness ($1/C$)	[-]
m : Mass	[kg]
\dot{M} : Mass flow rate	[kg/s]
\bar{M} : Mean mass flow rate	[kg/s]
\dot{m} : Perturbation of mass flow rate	[kg/s]
P : Pressure	[N/m ²]
\bar{P} : Mean pressure	[N/m ²]
p : Perturbation of pressure	[N/m ²]
\dot{Q} : Volume flow rate (vA)	[m ³ /s]
\bar{Q} : Mean volume flow rate	[m ³ /s]
\dot{q} : Perturbation of volume flow rate	[m ³ /s]
R : Resistance	[-]
$(R = (32\nu)/(AD^2))$ (Laminar flow),	
$R = (nf\bar{Q}^{n-1})/(2A^n D)$ (Turbulent flow)	
r : Frequency ratio	[-]
v : Velocity	[m/s]
V : Volume	[m ³]
\bar{V} : Mean volume	[m ³]
v : Perturbation of volume	[m ³]
Y : Flow admittance	[-]

Subscripts

baffle	: Baffle of PSD inlet
i, j	: Node point
main	: Main tube
p	: Pogo suppression device
s	: Steady state

1. 서 론

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[1-2]. 포고에 의한 진동의 증폭은 로켓 엔진 연소실의 급격한 압력 변동을 유발하여 심각한 경우, 로켓 구조를 파괴할 수도 있다. 또 극단적인 로켓 파손에 이르지 않더라도 비행 중에 발생하는 심각한 추진력 변화는 설계 제작으로부터의 이탈을 유발할 가능성도 있다. 따라서 액체로켓 개발 시 포고의 제거는 필수적이고, 그를 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 추진제 공급계의 고유진동 주파수와 1차 구조모드에서의 고유진동 주파수를 분리하면 포고를 제거할 수 있다. 즉 발사체 구조물의 고유진동 주파수와 추진제 공급으로 인한 유체유동 고유진동 주파수의 대역이 충분히 떨어져 있을 경우에는 유체유동부와 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. 실질적인 포고 억제는 포고를 미리 예측하여, 추진기관 시스템의 공급계 내부 유체의 고유진동 주파수를 바꾸기 위한 장치(이것이 PSD가 된다)를 설계 후 이미 구성되어 있는 비행체에 설치함으로써 이루어진다. 주로 비교적 제작이 쉽고, 구조가 간단한 수동형 PSD를 주로 이용하고, 기체로 채워진 완충기(accumulator)를 추진시스템 공급계 배관에 설치하거나 불용축성 기체를 추진제 내에 첨가하는 방법을 이용한다[3-5].

그러한 형태의 PSD를 설계하고 개발하는 과정

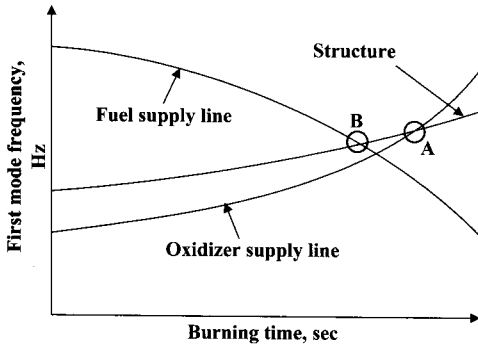


Fig. 1 1st mode frequencies of suction line and structure without PSD as a function of burning time [3]

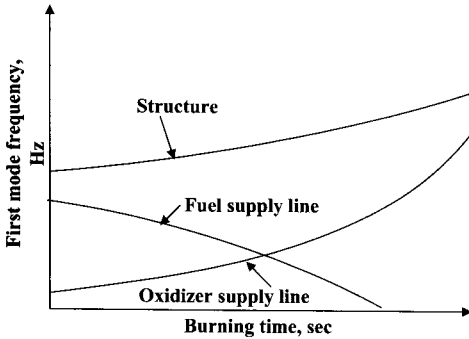


Fig. 2 1st mode frequencies of suction line and structure with PSD as a function of burning time [3]

에 있어, 형상과 관련된 주요 변수를 결정하는 것은 가장 중요한 부분이고, 이를 위해서 선행되어야 하는 것이 모델링 및 해석이다.

PSD 해석에 관한 연구는 크게 두 가지 방법으로 정리할 수 있는데, 하나는 각 추진기관 구성품들의 구성 방정식을 선형화된 전달함수의 형태로 만들어 추진기관 전체의 수학적 모델을 만들어 시스템의 안정성 판단 유무를 해석하는 방법이고, 또 하나는 시간에 따른 유동의 특성식(characteristics formulation)을 사용하여 추진기관의 수학적 모델을 만들어 해석하는 방법이다 [6-7]. 이러한 방법들은 모든 요소에 대한 방정식으로부터 시스템의 고유 모드 등을 얻어내는 방법으로 주로 시스템을 디자인하는 단계에서 주

로 사용하는 방법들이다.

본 연구에서는 위의 두 방법 중 선형화된 전달함수를 만들어 전체 시스템에 대한 불안정성을 판단하는 방법에 대해, PSD에 대한 수학적 모델을 만들고, 각 변수에 대한 값을 결정하는 과정에서 이론적으로 구하기 힘든 변수를 파악하고, 이를 실험 결과로부터 구하고자 한다.

2. 실험 결과

Figure 3은 기존 연구를 통해 얻은 결과로서, PSD가 없는 경우와 PSD가 있는 경우에 대해, 시스템의 응답(압력 및 유량 변화)을 시간변화에 따라 나타낸 것이다[8]. PSD가 있는 경우, 기체의 부피 증가에 따라 PSD 내 기체 부피가 증가할수록, 유량 및 압력의 진폭(amplitude)은 작아짐을 볼 수 있고, 특히 기체가 많은 경우, 주관내 압력의 변화는 크게 감소함을 확인할 수 있다. Fig.4는 그러한 조건 중, PSD가 없는 경우와 있는 경우에 대해, 시스템의 응답을 주파수에 따라 나타낸 것이다[8].

따라서 PSD 내의 기체는 시스템의 공진 주파수를 감소시키는 것(Fig.4)과 더불어 유로 내 압력 및 유량의 급격한 변화를 감소시키는 기능도 있음(Fig.3)을 확인할 수 있었다[8].

3. 시스템 모델링

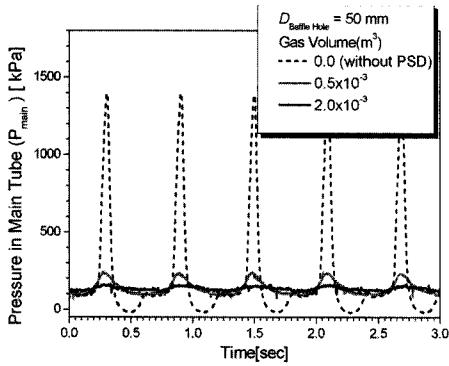
3.1. 지배 방정식

포고 장치가 있는 경우에 단순화된 관내 비정상 유동 방정식을 이용하여 지배 방정식을 다음과 같이 구할 수 있다[9, 10].

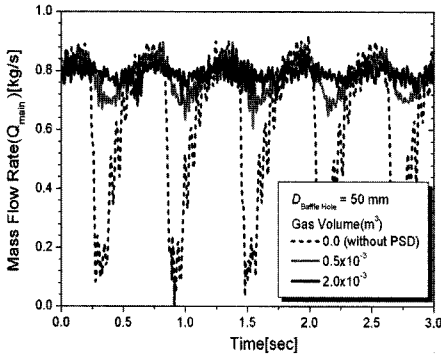
$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial \dot{Q}}{\partial t} + \frac{f \dot{Q}^n}{2gDA^n} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \dot{Q}}{\partial x} + \frac{gA}{a^2} \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Eq. (1) 및 (2)에 대해, 유량과 압력에 대한 선형 섭동방정식을 구하기위해 다음과 같이 정의하자.



(a) Pressure



(b) Flow rate

Fig. 3 Time responses with different PSD gas volumes in the main tube (50 rpm) [8]

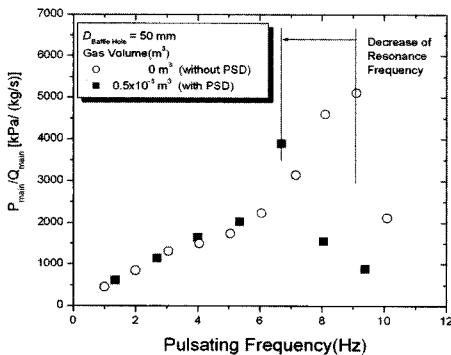


Fig. 4 System resonance frequency decrease due to PSD [8]

$$H = \bar{H} + h \quad (3)$$

$$\dot{Q} = \bar{Q} + \dot{q} \quad (4)$$

Eq. (3) 및 (4)를 Eq. (1) 과 (2)에 대입하고 ρg 를 곱하면 다음과 같은 방정식을 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial p}{\partial x} + I \frac{\partial \dot{m}}{\partial t} + R \dot{m} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial \dot{m}}{\partial x} + C \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

Eq. (5)에 대해 일정한 단면적의 배관에 대해 다음과 같은 단위 길이당의 방정식을 유도할 수 있다.

$$\Delta p = I \ddot{m} + R \dot{m} \quad (7)$$

Eq. (6) 및 (7)을 바탕으로 하여, Fig. 5와 같은 형태의 포고 장치에 대한 지배 방정식을 유도해 보기로 한다.

Eq. (7)을 이용하면, 포고 장치의 입구를 노드 i 라고 하고, 가스와 액체가 접하는 표면의 중심 부분을 노드 j 라고 하고 두 노드 사이의 운동 방정식을 유도하면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$p_i - p_j = I_p \ddot{m}_i + R_p \dot{m}_i \quad (8)$$

이 때, 노드 j 에 대해 Eq. (6)을 적용하면,

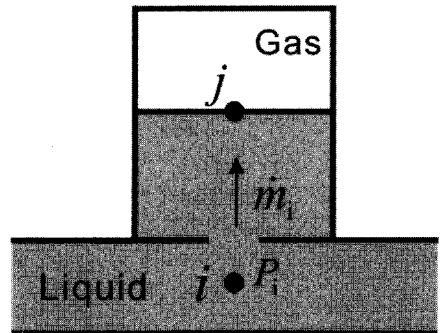


Fig.5 Schematic of PSD

$$p_j = \frac{1}{C_p} \dot{m}_i \Delta t = K_p m_i \quad (9)$$

다시 말해서 기체의 체적 변화에 영향을 주는 압력 p_j 는 포고 장치로 들어가는 유체 증량으로 표시할 수 있다. 이때의 유체 증량은 기체의 늘어나는(혹은 줄어드는) 체적만큼의 액체의 증량을 나타낸다.

3.2 주요 인자의 결정

Eq. (8)과 Eq. (9)로부터 다음과 같은 포고 장치에 대한 지배 방정식을 유도할 수 있다.

$$I_p \ddot{m}_i + R_p \dot{m}_i + K_p m_i = p_i \quad (10)$$

위의 각 계수를 결정하면 포고 장치의 특성을 알 수 있게 되고, 각 항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

(1) 시스템 이너턴스 (Inertance : I_p)

$$I_p = \frac{1}{A_p} \quad (11)$$

이 때, A_p 는 액체가 지나가는 단면적으로 여기서는 PSD의 단면적으로 나타낸다.

(2) 시스템 저항(Resistance : R_p)

저항체(배관)에 대한 총 압력 강하를 다음과 같이 가정한다.

$$\Delta P = R_o \dot{M}^2 \quad (12)$$

이 때, $\dot{M} = \overline{M} + \dot{m}$, $\Delta P = \overline{\Delta P} + \Delta p$ 라고 하면,

$$\Delta P = R_o (\overline{M} + \dot{m})^2 \cong R_o (\overline{M}^2 + 2\overline{M}\dot{m}) \quad (13)$$

이 때 섭동이 있는 유동에 대한 섭동압력강하를 다음과 같이 표현하고,

$$\Delta p = R \dot{m}, \quad R = \frac{\Delta p}{\dot{m}} \quad (14)$$

이 때의 R 을 선형화된 저항이라 하고, Eq. (13), (14)로부터

$$\Delta p = R \dot{m} = (2R_o \overline{M}) \dot{m} \quad (15)$$

로 저항을 구할 수 있다.

\dot{m} 가 \overline{M} 에 비해 충분히 작다고 하면, $R_o \cong R_s$ (정상 상태에서의 저항)가 된다[6]. 따라서 PSD의 입구에 배플(Baffle)이 있는 경우는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_p = 2R_s \overline{M} = \frac{2\Delta P}{\overline{M}} = \overline{Q}^2 / (\rho C_d^2 A_{baffle}^2) \cdot [1 - (A_{baffle}/A_p)^2] \quad (16)$$

$$(\overline{Q} = C_d A_{baffle} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho [1 - (A_{baffle}/A_p)^2]}}$$

$$\Delta P = \overline{Q}^2 / (2 C_d^2 A_{baffle}^2) \cdot \rho [1 - (A_{baffle}/A_p)^2])$$

위의 Eq. (16) 형태에 대해서, 배플을 표현하는 R 과 C_d 의 경우, 유량의 함수이며 비선형 형태이기 때문에 식의 유도를 통해서 바로 구할 수 없다. 따라서 실험으로 위의 값을 구하는 것이 가장 용이하다고 할 수 있다.

(3) 시스템 컴플라이언스 (Compliance : $C_p = 1/K_p$)

컴플라이언스란 유동이 있는 배관에서 검사 체적 내의 압력의 증가에 대한 유체증량의 증가를 나타내는 값으로, 강성계수의 역수에 해당한다. 유체의 압축성 계수, 가스의 여부, 배관의 탄성 계수 등이 이 값에 영향을 미친다.

특히 포고 장치의 경우, 충전된 가스가 압력에 따라 부피를 변화해 가며, 강성을 가진 스프링과 같이 작동을 하게 되므로, 다음과 같이 섭동이 있는 유동에 대한 K (강성, stiffness)를 정의할 수 있다.

$$p = -K \cdot v \quad (17)$$

기체의 경우, 폴리트로픽 과정이라 가정하면,

$PV^\gamma = \text{일정}$ 이므로, $V = \bar{V} + v$, $P = \bar{P} + p$ 로 두고, Eq. (17)에 대입하면, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$K \cong \frac{\gamma \bar{P}}{\bar{V}} \quad (18)$$

Eq. (9)과 Eq. (18)을 이용하면,

$$K_p \cong \frac{\gamma \bar{P}}{\rho \bar{V}} \quad (19)$$

로 정리할 수 있다.

이제, 지배 방정식인 Eq. (10)을 기반으로 하여, 고유 진동수 및 감쇠비를 유도할 수 있다. 즉, Eq. (10)을 Laplace 변환을 하면, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_p \dot{M} \cdot s + R_p \dot{M} + K_p \dot{M}/s = P_{main} \quad (20)$$

Eq. (20)에 대해, 주관의 압력 변화에 대한 포고 장치 내 유량 변화로서 포고 장치의 특성을 살펴볼 수 있다. 여기서 유동 어드미턴스 (Y)를 다음과 같이 정의 할 수 있다 [7].

$$Y = \frac{\dot{M}}{P_{main}} = \frac{\dot{M}}{I_p \dot{M} \cdot s + R_p \dot{M} + K_p \dot{M}/s} \quad (21)$$

$$Y = \frac{s}{I_p s^2 + R_p s + K_p} = \frac{s}{I_p [s^2 + 2\zeta_p \omega_p s + \omega_p^2]}^{-1} \quad (22)$$

Eq. (21)에 대해, $s = i\omega$ 를 대입하여, 복소 주파수 응답을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Y &= \frac{s}{I_p [s^2 + 2\zeta_p \omega_p s + \omega_p^2]}^{-1} \\ &= \frac{i\omega}{I_p [(i\omega)^2 + 2\zeta_p \omega_p (i\omega) + \omega_p^2]}^{-1} \end{aligned} \quad (23)$$

Eq. (23)의 절대값을 구해 정리하면, 다음과 같다.

$$\left| \frac{\dot{M}}{P_{main}}(i\omega) \right| = \frac{1}{\sqrt{(I_p \omega - K_p/\omega)^2 + R_p^2}}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\omega}{\sqrt{(1 - \frac{\omega^2}{K_p/I_p})^2 K_p^2 + R_p^2 \omega^2}} \quad (24) \\ &= \frac{r_p}{\sqrt{(1 - r_p^2)^2 + (2\zeta_p r_p)^2}} \times \frac{1}{\sqrt{I_p K_p}} \end{aligned}$$

여기서,

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{I_p \cdot C_p}} = \sqrt{\frac{K_p}{I_p}} \quad (25)$$

$$r_p = \frac{\omega}{\omega_p} \quad (26)$$

$$\zeta_p = \frac{R_p}{2\omega_p I_p} = \frac{R_p \times \sqrt{K_p/I_p}}{2\sqrt{K_p/I_p} I_p \times \sqrt{K_p/I_p}} = \frac{R_p \omega_p}{2K_p} \quad (27)$$

각각, ω_p , r_p , ζ_p 는 각각 고유 진동수, 진동수 비, 감쇠비를 나타낸다.

위의 내용으로부터 포고 장치의 특성을 이론적으로 접근할 수 있다. 또한 포고와 관련된 각 변수들의 영향을 대략적으로 살펴볼 수도 있다. 즉, 배플이 없는 경우, 고유 진동수는 포고 장치 내의 가스 부피에 의해서만 결정이 됨을 알 수 있고, 배플이 존재하는 경우, 그것에 의해서도 진동수가 변함을 알 수 있다. 그러나 실제의 경우, 압력이나 유량의 진폭이 크고, 에너지 손실 및 배플이 있을 경우의 저항 계수의 비선형성이 크기 때문에, 위의 식을 바탕으로 실험을 통해 포고 장치와 관련된 변수 (I_p , R_p , K_p)를 밝혀야 한다. 그러나 위의 지배 방정식의 경우, 포고 내에서 주관으로 향하는, 또는 그 반대의 유량과 주관 압력에 대한 관계를 나타내는 것이고, 따라서 실험을 통해서 그것을 측정하고, 위의 값을 제시할 수 있으면, 포고 장치의 변수를 정의하는 기본값들을 정리할 수 있다.

위의 이론식 Eq. (10)으로부터, 포고 장치와 관련된 지배 방정식이 질량-스프링-감쇠의 1 자유도계 시스템과 유사함을 알 수 있다. 따라서 실험을 통한 주파수 응답 자료로부터, I_p , R_p , K_p 를 언거나 실제 스펙트럼으로부터 가장 근접한

I_p, R_p, K_p 의 값을 찾을 수 있다.

4. 주요변수 결정 방법

3장에서 다루었던 내용을 토대로, 4장에서는 해석식 고려되는 중요한 시스템 주요변수를 실험을 통해 구하는 방법을 실험결과를 바탕으로 제시하고자 한다.

Fig.4에 나타난 실험 결과 중 PSD 기체체적이 $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 인 경우에 대해 I_p, R_p, K_p 의 값을 구하는 과정을 Fig.6에 간략히 나타내었고, 그것을 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 주관에서의 압력과 PSD 내의 압력을 실험을 통하여 측정한다.
- 2) 측정된 결과를 바탕으로 PSD에 유입 또는 유출되는 액체의 양을 주관에서의 압력과 PSD 내의 압력차를 이용하여 구한 후, 주관 내 압력에 대한 유입(유출) 액체의 양의 비(유동 어드미

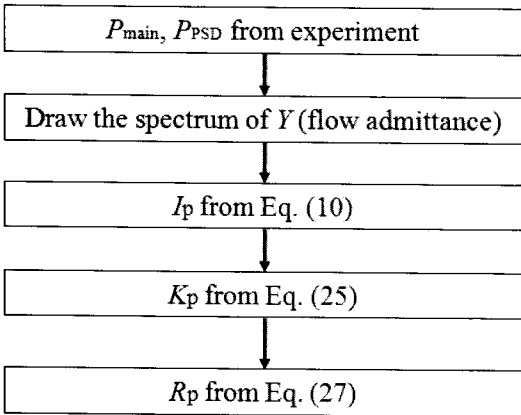


Fig.6 Procedures for determination of I_p, R_p, K_p

Table 1. Variables to calculate I_p, R_p, K_p from experimental results (Fig.7)

D_p	0.1 m ($A = 7.85 \times 10^{-3} \text{ m}^2$)
f_p	6.2 Hz ($\omega_p = 2\pi f_p = 38.96$)
ζ_p	0.04

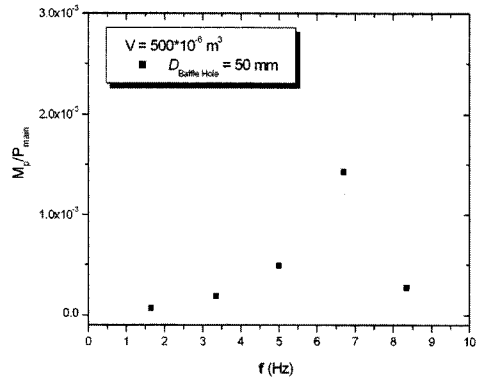


Fig.7 Flow admittance with different frequencies

턴스, Y)를 주파수에 대해 Fig.7과 같이 나타낸다.

3) Eq. (11)을 이용하여 I_p 의 값을 구한다. ($I_p = 1/A = 127.32$)

4) 유동 어드미턴스의 값이 가장 클 때의 주파수(f_p , Table1)를 실험 결과로부터 찾고, 그 때의 주파수는 Eq. (25)와 같이 나타낸다. 이를 이용하여, K_p 를 구할 수 있다.

($K_p = \omega_p^2 \times I_p = 193220.58$)

5) 마지막으로 R_p 는 위 4)의 유동 어드미턴스를 구하는 방법과 유사하게 Fig.8의 실험 결과와 Eq. (23)과 비교하여 실험 결과를 가장 잘 나타내는 ζ_p (Table 1)를 찾는다. 그리고 Eq. (27)을 이용하여 시스템 저항 R_p 의 값을 찾아낸다.

($R_p = (2K_p/\omega_p) \times \zeta_p = 400.02$)

위의 과정에 대해, 3장에서 구한 식을 이용하면, 실험 결과를 통해서 손쉽게 I_p, R_p, K_p 를 구할 수 있음을 알 수 있다. 또한, Fig.8과 같이 실험 결과와의 오차도 적음을 확인할 수 있다. 결과적으로, 위의 과정을 통해서 Eq. (10)의 포고장치의 지배 방정식을 유도할 수 있으며, 이를 바탕으로 선형화된 전달함수를 만들 수 있게 된다.

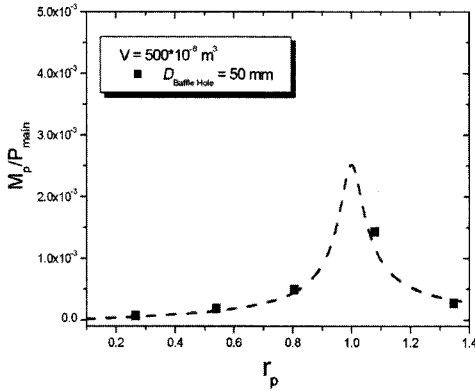


Fig.8 Comparison between experiments and theoretical results

5. 결 론

- 1) 본 연구는 유체 섭동에 대한 연속 방정식 등의 지배 방정식을 이용하여 PSD에 대한 수학적 모델을 만들었다. 그로부터 선형화된 전달함수를 만들어 전체 시스템에 대한 불안정성을 판단하는 방법에 대해, 제작된 PSD의 전달함수를 구성하는 이너턴스, 컴플라이언스, 레지스턴스 등의 변수를 수식화 할 수 있었다 (3장).
- 2) PSD의 주요 변수를 실험 결과를 이용하여 정량화하는 방법을 제시하였고(4장), 주요 변수의 값에 대한 결정을 통한 결과와 실험 결과와의 비교가 우수함을 알 수 있었다.
- 3) 본 연구 결과를 이용하여, 설계된 PSD의 로켓 장착 이전에, 간단한 선행 실험을 통해 해석 시 주요한 변수의 값을 결정할 수 있도록 할 수 있다. 그러나, 본 연구 결과는 Fig. 5와 같은 형태의 PSD에만 적용할 수 있고, 배관 내 기체 주입형과 같은 다른 형태의 경우는 주요 변수를 나타내는 식을 재구성해야 한다.
- 3) 끝으로 본 연구 결과는 본격적인 국내 액체 추진식 발사체를 위한 PSD 설계와 PSD 성능 시험장치의 구성을 위한 선행 기초 연구로서 그 의미를 갖는다. 그리고 국내 발사체를 위한 PSD 설계 시에 기초 자료로서 활용될 수도 있다.

후 기

이 결과물은 2007학년도 경남대학교 학술진흥 연구비 지원에 의하여 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

1. Martin, R. E., "Atlas II and IIA Analyses and Environments Validation," Acta Astronautica, Vol. 35, No. 12, 1995, pp. 771-791
2. Doiron, H. H., "Space Shuttle Pogo Prevention," NASA-TM-79526, 1974
3. 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
4. 오승협, 조인현, 이한주, 정태규, 조기주, 정영석, Kalmykov, G. P. and Menshikova, O. M., "우주발사체 개발사업 최종보고서," 2003, 한국항공우주연구원
5. 고광웅, 이한주, 정동운, 이상용, "POGO와 PSD의 소개," 한국추진공학회지, 제7권, 제4호, 2003, pp.1-9
6. Rubin, S., "Instability Model of Missile Longitudinal Oscillation due to Propulsion Feedback," NASA, 68N86933, 1964
7. Lock, M. H. and Rubin, S., "Passive Suppression of Pogo on the Space Shuttle," NASA, CR-1324452, 1962
8. 이준경, 이상용, 이한주, 오승협, "포고억제장치 설치에 따른 배관계 동특성 변화," 추진공학회지, 제9권, 제2호, 2005, pp.32-39
9. Wylie, E. B., Streeter, V. L. and Suo, L., "Fluid Transients in System," Prentice-Hall, 1993
10. 서용권, "유압제어공학," 경문사, 2001