

PSD 성능 시험 장치의 설계

고광웅* · 정동운* · 이한주** · 이상용*

Design of PSD Performance Test System

Kwang Uoong Koh* · Dong Woon Jeong · Han Ju Lee*** · Sang Yong Lee****

ABSTRACT

In the present study, several different types of PSD performance test systems were reviewed. Basically there are two methods to pulsate the system; whole-feeding-system pulsation and working-fluid pulsation. The latter method adopts either a piston-type pulsator or a restrict-type pulsator. The working-fluid pulsation using a restrict-type pulsator was considered to be the most appropriate experimental system to study the effects of the primary parameters, and a practical design of the system was proposed.

초 록

본 연구에서는 기존 연구에서 사용된 PSD 성능 시험 장치를 살펴보았다. 성능 시험 장치는 공급관 전체 가진 방식과 작동 유체 가진 방식으로 구분할 수 있다. 작동유체 가진 방식은 다시 피스톤 방식과 면적제한 방식으로 분류할 수 있다. 면적 제한 방식이 기초 연구에 알맞으며, 제작된 실험 장치의 구성품을 제시하였다.

Key Words: POGO(포고), PSD(포고 억제 장치), Whole-feeding-system Pulsation(공급관 전체 가진 방식), Working-fluid Pulsation(작동 유체 가진 방식), Piston-type(피스톤 방식), Restrict-type(면적 제한 방식)

1. 서 론

포고(pogo)는 액체 추진식 로켓의 엔진 시스템과 발사체 구조물의 진동이 상호 영향을 미침으로써 발생하는 축 방향 불안정이다. Fig. 1이 보여주듯이 축방향의 불안정은 초기의 섭동이 추력의 변화에 의해 증폭되어 피드백(feedback)

† 2003년 6월 11일 접수 ~ 2003년 8월 20일 심사완료

* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

** 정희원, 한국항공우주연구원 추진기관그룹
연락처, E-mail: kohku87@kaist.ac.kr

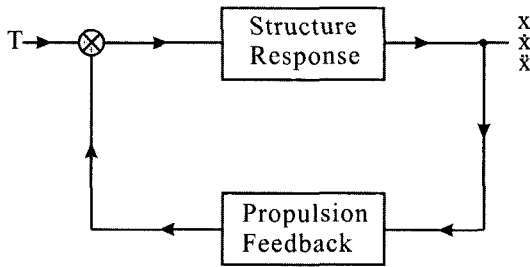
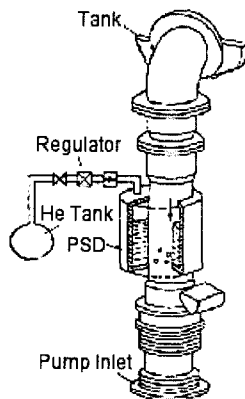
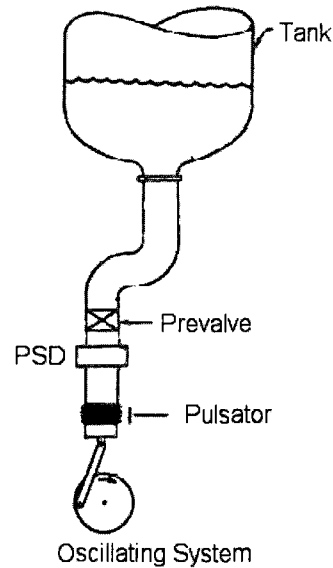
Fig. 1 Closed-loop representation of POGO ¹

Fig. 2 PSD in Saturn V S-II

되고, 증폭된 섭동이 다시 추력에 변화를 주어 섭동이 성장하는 과정에서 발생한다.¹⁻⁴ 그리고 포고는 엔진 시스템과 발사체 고유 진동의 공진에 의해 발생하는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 이와 같은 공진을 막으면 포고를 제거할 수 있다. 실제 엔진 시스템에서는 Fig. 2에서처럼 연료 공급관에 기체로 채워진 완충기(accumulator)를 설치하거나 공급관 내에 기체(gas)를 주입함으로써 공급계에 적절한 컴플라이언스(compliance)를 첨가한다. 이와 같이 포고를 제거하기 위한 장치가 PSD(Pogo Suppression Device) 또는 PCD(Pogo Corrective Device)이다. Fig. 3은 PSD의 한 예로 Saturn V의 S-II에 적용된 PSD의 형상 및 설치 방식을 보여주고 있다.

포고는 발사체의 크기 등 구조물과 직접적인 관계가 있으므로 기존에 개발된 각각의 발사체

Fig. 3 PSD performance test system configuration of pulsating whole feeding system ⁴

들은 형상, 크기 및 설치 방식 등이 다른 고유한 PSD를 갖고 있다. 따라서 국내에서 개발하는 발사체를 위한 PSD가 새롭게 설계되어야 한다. PSD 설계를 위해서는 먼저 PSD의 특성이 파악되어야 한다. 이를 위해서 성능 시험 장치가 구현되어야 한다. 그러나 국내에서는 액체 추진 발사체에 대한 연구의 역사가 극히 짧아 PSD 및 PSD의 성능 시험 장치를 개발한 사례가 거의 없다. 따라서 PSD 설계를 위한 기초 자료 확보와 성능 시험 장치의 구현에 대한 연구가 절실한 형편이다.

본 연구에서는 PSD의 특성을 파악하기 위한 성능 시험 장치의 구현에 앞서 기존에 구현된 성능 시험 장치들을 정리하고자 한다. 이를 통해서 PSD 성능 시험 장치의 구현 시에 있을 수 있는 시행착오를 줄이려 한다. 그리고 PSD를 지배하는 요소 인자(변수)를 파악하기 위한 PSD 성능 시험 장치의 형태를 제시한다. 그리고 구현된 PSD 성능 시험 장치의 구성 요소들에 대해

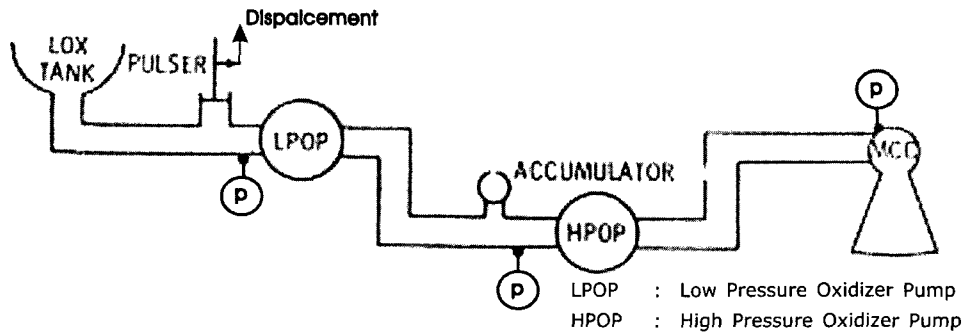


Fig. 4 General schematic of pulsating-working-fluid-type PSD performance test system using piston-type pulsator⁶

살펴본다.

2. PSD 성능 시험 장치의 종류

PSD 개발 시 실제 엔진 시스템을 이용해서 PSD의 성능을 시험하는 것은 막대한 비용이 필요하다. 따라서 실제 엔진 시스템에서의 PSD 성능 시험은 발사체 발사에 앞서 최종 단계에서 적용되는 PSD의 성능을 확인하는 경우에만 사용한다. 따라서 Fig. 3에서와 같이, 엔진 시스템의 일부만으로 PSD 성능을 살펴본다. 또는 Fig. 4와 같이 실제의 엔진 시스템의 모든 구성품(펌프 등)을 모사하여 설치하고 PSD의 성능을 살펴보는 것이 일반적이다. Fig. 4는 SSME(Space Shuttle Main Engine)의 PSD 성능 시험 장치의 개략도이다. SSME의 PSD 성능 시험 장치에서는 저압 산화제 펌프의 경우 전기 구동 모터 드라이버로 모사하였고, Fig. 4에서는 표시되어 있지 않지만 고온의 GOx를 제공하기 위한 엔진 열교환기 대신, 오일 파이어드(oil fired) 열교환기를 사용하였다.⁶

PSD 설계를 위한 성능 시험 장치는 시스템 전체를 가진하는 공급관 전체 가진 방식(pulsating whole feeding system)(Fig. 3)과 공급관 등 시스템을 고정시키고 작동 유체만을 가진하는 작동 유체 가진 방식(pulsating working fluid)(Fig. 4, Fig. 7)으로 나눌 수 있다.

시스템 전체 가진 방식(Fig. 3)은 발사체의 축방향 불안정성을 직접적으로 모사한 것이다. 가진하는 섭동은 진동 장치(oscillating system) 위에 설치된 피스톤의 상하 운동에 기인한다. 진폭과 주파수는 피스톤의 행정과 피스톤의 왕복수로 조절 된다. 이 방식은 축 방향 불안정성을 직접적으로 모사한다는 장점이 있으나 전체 시스템을 진동시켜야 하므로 작동유체 가진 방식에 비해 큰 동력을 필요로 하는 단점이 있다. 또한 PSD의 크기, 관의 직경 등 시험부의 장치가 커짐에 따라 가진 장치(피스톤)를 구동하기 위해서 필요한 동력도 커져야 하므로 실험 수행 중 구성 요소의 크기를 변경하기 어려운 점도 문제시 된다. 시스템 전체 가진 방식의 성능 시험 장치는 Titan II에서 사용한 PSD의 개발에서 이용되었다. Titan II의 PSD의 개발 시에는 4-50 Hz로 피스톤을 구동할 수 있는 구동장치가 설치되었다. 또한 PSD의 전달함수와 주파수 응답 특성을 구하기 위해 가진기 축(pulsator shaft)에 가속도계가 부착되었다.

작동 유체 가진 방식은 측관에 설치된 가진기(pulsator)를 통해 유체에 가진을 주는 방식이다. 이 방식은 작동 유체를 가진하는 방식에 따라 피스톤 방식(piston-type)과 면적 제한 방식(restrict-type)으로 나눌 수 있다.

피스톤 방식(piston-type)은 Fig. 5가 보여 주듯이, 피스톤을 왕복시킴으로써 작동 유체에 가진을 주는 방식이다. 피스톤이 후진하면 Fig. 5(a)

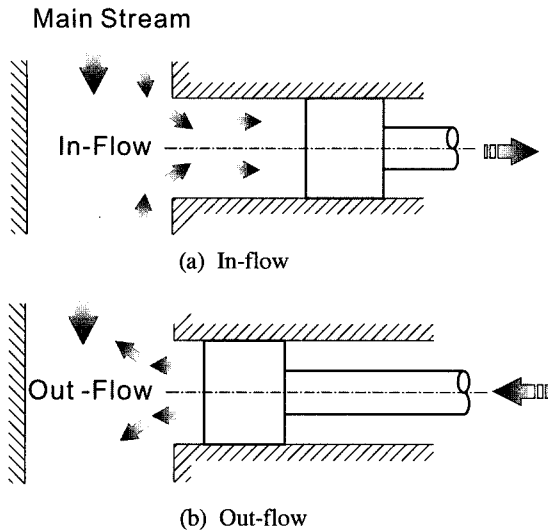


Fig. 5 Operation of piston-type pulsator

처럼 액체 탱크에서 공급관 내로 공급된 일부의 유체가 측관으로 이동한다. 그러나 Fig. 5(b)에서와 같이 피스톤이 전진하면 측관 내의 유체가 공급관으로 추가로 공급된다. 측관의 액체가 추가적으로 공급관으로 공급되고 제거됨에 따라 공급관 내의 압력은 증가하고 감소한다. 가진되는 진폭과 주파수는 피스톤의 행정과 단위 시간당 왕복수로 조절되도록 설계된다. 그러나 섭동의 진폭은 주파수와 강한 상관관계가 있어 주파수에 따라 진폭이 결정되는 것으로 알려져 있다.⁷ 따라서 이 방식은 진폭과 주파수 각각의 영향을 독립적으로 살펴보기가 어렵다.

이와 같은 형식의 성능 시험 장치는 SSME의 PSD 개발 때 사용되었다. 실험은 터보펌프의 작동조건을 일정하게 고정한 상태에서 일정 범위의 주파수 대역에서 시스템에 삼각함수 파형의 유량 가진(SSME의 PSD 시험에서는 산화제 공급계에 1.5 - 50 Hz 범위에서 사인파 가진을 준다.)을 주었다. 이 때 PSD가 있는 경우와 없는 경우에 대해서 공급계의 주파수 특성을 파악하였다. 이러한 방법을 이용하여 얻은 실험 결과를 바탕으로 일정 주파수 대역에 대한 펌프 전단의 흡입압력(suction pressure)과 가진기 유량(pulsar flow rate)의 비를 얻을 수 있었다.

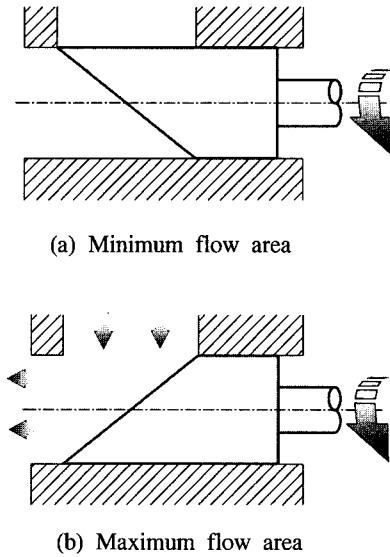


Fig. 6 Operation of restrict-type pulsator

면적 제한 방식(restrict-type)은 작동 유체의 공급압력을 일정하게 유지한 상태에서 유로의 단면적을 주기적으로 변화시킴으로써 작동 유체에 가진을 주는 방식이다.(Fig. 6) 면적 제한 방식의 가진기를 이용하는 PSD의 성능 시험장치의 개략도는 Fig. 7과 같다. 가진되는 주파수는 축의 단위 시간 당 회전수로 결정되며, 진폭은 Fig. 7의 [5]에 있는 유량 조절 밸브를 통해서 조절된다. 밸브가 고정되면 가진기의 단면적 변화에 따라 주관 [3]에서 출구 노즐 [7]로 흐르는 유체의 유로 단면적이 결정된다. Fig. 6 (a)처럼 측관의 유로가 막혔다가 축이 회전하면 점차 유로의 단면적은 증가한다. 따라서 주관 [3]의 압력은 감소하게 된다. 회전축이 회전하여 Fig. 6(b)처럼 유로의 단면적이 최대가 되면 주관 [3]안의 압력은 최소가 된다. 이후 회전축이 더 회전하면 유로의 단면적이 감소하고 이에 따라 주관 [3]안의 압력은 다시 증가한다. 제작 과정이 피스톤 방식에 비해 복잡하지만, 가진 주파수와 진폭을 독립적으로 조절 가능하여 섭동 크기와 PSD 성능에 관한 정량적 관계를 보다 쉽게 파악할 수 있는 것으로 알려져 있다.⁷

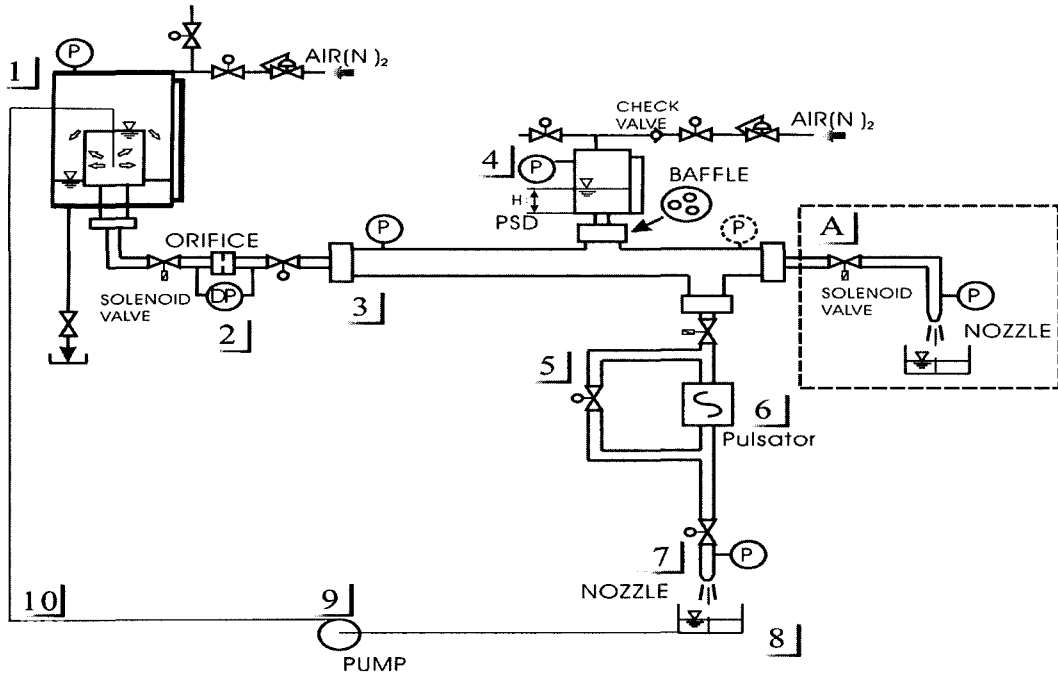


Fig. 7 Schematic diagram of PSD performance test system with restrict-type pulsator

3. PSD 성능 시험 장치 제안

PSD를 개발하는 데 있어서, 공급계 배관 내의 유체의 고유진동수를 원하는 만큼 조절할 수 있는 능력, 지상과 비행 중에 겪게 될 환경에 견딜 수 있는 구조, 그리고 엔진 성능과 작동에 미치는 영향 등이 고려되어야 한다. 또한 제작 비용과 결과로 얻은 시험 자료의 용도에 따라 제작되는 성능 시험 장치의 크기 및 방식이 결정된다.

우선 PSD 연구의 초기 단계이므로, 엔진 시스템의 구성 요소들을 직접 사용하지는 않고 간단하게 모사하기로 하였다. 본 연구에서 제안하는 PSD 성능 시험 장치는 PSD의 설계에 앞서 기초 자료를 얻기 위한 장치이다. 따라서 넓은 범위에 걸쳐 다양한 변수를 실험해야 한다. 공급관 전체 가진 방식은 앞 절에서 설명하였듯이 축 방향 불안정성을 직접적으로 모사한다는 장

점이 있다. 그러나 큰 동력을 필요로 할 뿐 아니라 넓은 범위의 다양한 변수에 대해 성능 시험함에 있어 장치의 수정이 작동 유체 가진 방식보다 어려운 단점이 있다. 따라서 기초 연구를 위해서는 작동 유체 가진 방식이 유리하다고 여겨진다. 그리고 섭동 크기와 PSD 성능에 관한 관계를 보다 쉽게 파악하기 위해서는 주파수와 진폭을 각각 독립적으로 조절 가능한 방식이 연구에 유리하다. 따라서 작동 유체를 가진하는 방식 중 면적 제한 방식(restrict-type)이 기초 연구에 있어서 알맞다고 여겨진다.

4. PSD 성능 시험장치의 변수

주요 변수로는 섭동이 없을 때의 주관 압력, 유량, PSD의 전체 부피, PSD 내 수위, 가진폭과 가진 주파수 등이 있다. 그리고 PSD와 주관의 연결부 사이에 있는 배플(Baffle)의 형상도 중요한 변수가 된다. 배플은 PSD와 주관 사이에

유동 저항을 줌으로써 PSD와 주관 사이의 유체 이동을 제한하는 역할을 한다. 배플에서의 저항이 너무 크면 PSD가 제 역할을 하기 어렵다. 반면에 저항이 너무 작으면 조건에 따라 PSD 내의 액체 뿐 아니라 기체까지도 주관으로 흘러가게 된다. 따라서 알맞은 배플에서의 유동 저항 설정이 PSD의 설계에 있어서 매우 중요하다. 그러나 주기적인 섭동이 있는 조건에서 얇은 판 위에 있는 작은 구멍(hole)에서의 유동저항에 관한 연구 결과는 부족하다. 따라서 이를 실험적인 방법을 통해서 구해야만 한다. 배플과 관련된 변수로는 배플에서의 유동 전체 단면적과 구멍의 수와 크기 등이 있다. 그 이외에 배플의 두께도 또 다른 변수이다.

각 시험 조건에서 가진기 축의 회전수(w)(가진 주파수)가 독립변수가 된다. PSD 성능 시험은 2단계로 진행된다. 1단계에서는 PSD 내 각 요소의 특성을 살펴보기 위해 섭동의 주파수와 크기가 일정하게 유지되는 정상상태에서의 PSD의 반응을 살펴본다. 즉, 주관에서의 압력 섭동($\delta p'$)과 PSD안의 압력 변동($\delta p'_d$)(또는 PSD안의 수위 변동)의 비와 위상차(ϕ_d)가 주요 측정자료가 된다. 즉, 이와 같은 내용은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$K_d(iw, \delta p') = \frac{\delta p'_d}{\delta p'} e^{i\phi_d} \quad (1)$$

2단계에서는 발생한 섭동에 대해서 시간에 따른 PSD의 반응을 살펴본다. 즉, 섭동을 발생시키고 섭동의 성장 또는 감쇠를 시간에 따라 살펴본다.

5. PSD 성능 시험장치의 구현 및 작동 방법

면적 제한 방식의 PSD 성능 시험 장치는 Fig. 7이 보여 주듯이 액체 저장 탱크 [1], 공급되는 액체 유량을 측정하는 오리피스 [2], 주관 [3], PSD [4]와 진폭 조절용 밸브 [5], 가진기 [6],

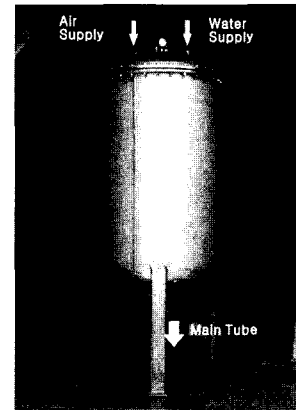


Fig. 8 Front view of liquid storage tank

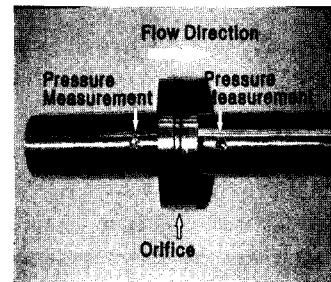


Fig. 9 Orifice and orifice holder

그리고 출구 노즐 등으로 이루어져 있다. 그리고 부가 장치로서 출구 노즐로부터 분사된 작동 유체를 다시 액체 저장 탱크로 순환시키기 위한 저장용 용기[8], 펌프[9] 그리고 순환관이 있다. Fig. 7의 A 부분은 2단계 성능 시험에서 사용된다.

면적 제한 방식의 PSD 성능 시험 장치에서 작동 유체로는 물과 공기(질소)를 사용한다.⁷

압력 0.6MPa의 조건에서 직경 9.5 mm의 출구 노즐 [7]을 통해 배출되는 유량을 기준으로 최대 실험 유량을 설정하였다. 최대 공급유량 조건에서 액체 공급 없이 2분간 실험할 수 있는 부피를 기준으로 액체 저장 탱크의 용량을 선정하였다. 그리고 큰 저장 용기(지름 800mm, 높이 1600mm)안에 작은 용기(지름 600mm, 높이

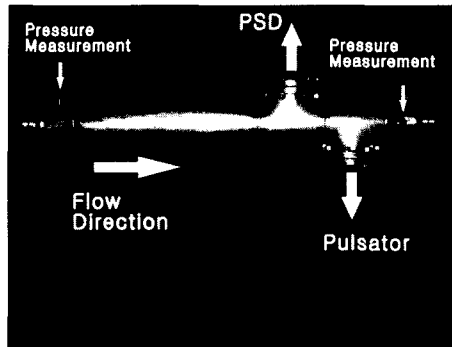


Fig. 10 Main tube

1000mm)를 설치하여 오버플로우(overflow)시키는 구조로 설계하였다. 이와 같이 오버플로우 구조를 사용하면 액체 저장 탱크 내에 수위가 일정하게 유지되어 공급 압력의 섭동이 감소한다. 최대 실험 압력은 0.6MPa이며, 최대 실험 가능 압력은 1MPa로 설계하였다. Fig. 8은 제작된 액체 저장 탱크의 외형을 보여주고 있다.

오리피스를 이용하여 액체 저장 탱크로부터 주관으로 공급되는 유량을 측정한다. 오리피스의 설계 및 차압의 측정위치는 ISO에서 제안하는 방식을 따랐다.⁸ Fig. 9는 유량을 측정하는 오리피스와 차압을 측정하는 오리피스 홀더를 보여준다.

주관(main tube)은 로켓의 연료 공급관을 동일한 직경을 갖는 압력 용기로 모사한 것이다. 면적 제한 방식의 PSD 성능 시험 장치에서는 실제 로켓의 연료 공급관의 직경과 유사하게 선정하며, 길이는 실제 로켓의 공급관보다 짧게 설계한다. 따라서 지름 100mm, 길이 1200mm로 주관을 제작하였다. 압력을 측정할 압력 탭을 주관의 양 끝에 설치하였다. 주관의 위쪽으로 배플과 PSD(모형)이 결합되고 아래쪽으로 가진기와 출구 노즐이 연결된다. Fig. 10은 제작된 주관의 외형을 보여준다.

PSD(모형)은 외경 200mm, 높이 300mm로 제작하였다. 예상되는 섭동을 모두 안정화시킬 수 있는 충분한 크기로 용량을 결정하였다. 위판의 형상을 바꾸면 PSD의 전체 용량을 변화시

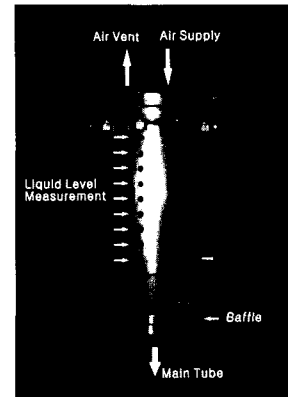


Fig. 11 Front view of PSD(model)

킬 수 있다. 정면에는 수위를 측정하기 위한 탐침과 압력을 측정하기 위해 9개의 탭을 내었다. 윗판에 기체 공급과 배출 관을 설치하였다. PSD(모형)과 주관 사이에 배플을 설치할 수 있으며, 배플을 교환할 수 있도록 PSD와 주관의 연결 부분을 설계하였다. 주관과의 연결부는 배플 이외의 연결부의 크기가 저항으로 작용하는 것을 막기 위하여 주관의 직경과 같이 설계하였다. Fig. 11은 PSD(모형)의 형상이다.

가진기는 조화함수의 형태로 유동 단면적을 변화시킴으로써 조화 함수 형태의 압력 섭동을 발생시키도록 설계되었다. 작동 유체의 유량은 가진기의 크기와 진폭에 의해 결정된다.⁷ 가진기의 최대 단면적은 유량 조절용 밸브의 최대 유로(직경 19mm) 단면적과 동일하게 설계하였다. 본 연구에서 제작한 가진기는 4°의 부채꼴 형상을 한 2개의 유로가 있는 고정판(Fig. 12(a))과 유로의 형상이 각도에 따라 변하는 회전판(Fig. 12(b))으로 이루어져 있다. 두 판을 겹치고 회전축에 연결된 회전판이 회전축과 같이 회전하면 축의 회전각에 따라 다른 유로 단면적을 얻을 수 있다(Fig. 13). 회전각이 0°와 180°에서 유로 단면적은 최소이며 회전각이 90°에서 유로 단면적은 최대가 된다. 단면적 변화의 주기는 1/2회전이다. 이를 함수 형태로 나타내면 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

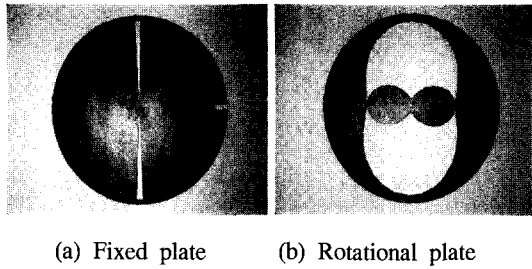


Fig. 12 Fixed and rotational plates in pulsator

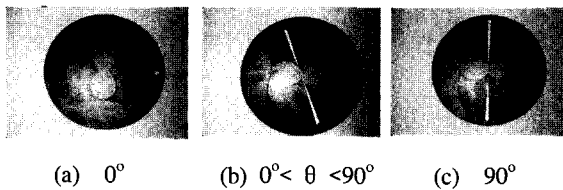


Fig. 13 Photos of flow-cross-section area with shaft angle

$$A = 143 \left(1 + \sin 2 \left(\theta - \frac{\pi}{4} \right) \right) [mm^2] \quad (2)$$

Fig. 14는 회전축의 회전각에 따라 계산한 유로 단면적의 변화를 보여준다. 모터의 회전속도와 기어비의 조절로 주파수를 조절한다.

면적 제한 방식의 PSD 성능 시험 장치의 작동 순서는 오승협 등⁷에서 잘 설명하고 있다. 1 단계 실험을 위한 작동 순서만을 정리하면 다음과 같다. PSD 성능 시험장치는 작동하기 전에 가진기(pulsator)의 축을 중간 위치에 고정 시킨다. 그 후 PSD [4]의 공기 배출 밸브와 액체 저장 탱크 [1]와 주관 [3](main pipe) 사이의 솔레노이드 밸브를 열어 성능 시험 장치를 액체로 채운다. 이 후 PSD [4]의 공기 배출 밸브를 닫는다. 성능 시험 장치에 액체를 채운 후 오리피스 [2]와 주관 [3] 사이의 밸브를 조정하여 주관 [3]의 압력을 실험 조건에 맞춘다. 주관의 압력이 실험 조건에 도달하면 PSD [4]의 공기 공급 밸브를 열어 PSD [4] 내 액체의 수위가 실험 조건에 도달할 때까지 PSD [4] 내로 공기를 공급한다. 주관의 압력과 PSD [4] 내의 수위가 실험

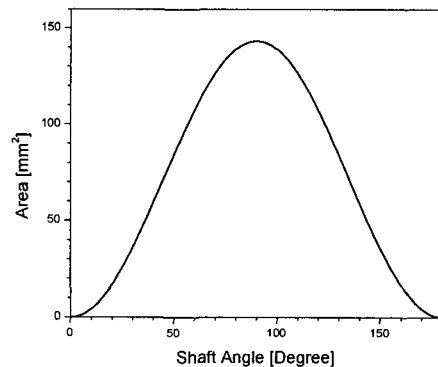


Fig. 14 Variation of flow-cross-section area with shaft angle for each slot (calculated results)

조건으로 설정 되었다면 가진기(pulsator)의 회전축을 회전시켜 유로의 단면적을 변화시킨다. 회전축의 속도가 실험 조건에 도달하면 식 (1)과 같이 주관과 PSD 내 압력의 변화와 위상차를 측정한다.

현재 제작된 PSD 성능 장치를 통해 본 연구에서 제안한 설계안을 평가 중이며, PSD 개발에 필요한 실험 자료를 확보하기 위한 연구를 계속 진행하고 있다.

6. 결론

PSD 성능 시험 장치는 가진 방식에 따라 시스템 전체 가진 방식과 작동유체 가진 방식으로 구분할 수 있다. 작동 유체 가진 방식은 다시 피스톤 방식과 면적 제한 방식으로 구분한다.

섭동 크기와 PSD 성능에 관한 관계를 보다 쉽게 파악하기 위해서는 주파수와 진폭을 각각 독립적으로 조절 가능한 방식이 기초 연구에 유리하다. 따라서 작동 유체를 가진하는 방식 중 면적 제한 방식(restrict-type)이 기초 연구에 알맞다고 여겨진다.

작동 유체로는 물과 공기(질소)를 사용하며, 조화함수의 형태로 유동 단면적을 변화시켜 삼

각 함수 형태의 압력 섭동을 발생시키는 가진기를 포함한 PSD 성능 시험 장치를 설계, 제작하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. Sheldon Rubin, "Longitudinal Instability of Liquid Rockets due to Propulsion Feedback(Pogo)," J. Spacecraft, Vol. 3, No. 8, 1966, pp. 1188-1195
2. H. H. Doiron, "Space Shuttle Pogo Prevention," NASA-TM-79526
3. "NASa Space Vehicle Design Criteria Liquid Rocket Lines, Bellows, Flexible Hoses, And Filters," NASA-SP 8123
4. L. W. S. Norquist, J. P. Marcus, D. A. Ruscio, "Development of Close-Coupled Accumulators for Suppressing Missile Longitudinal Oscillations (POGO)," AIAA Paper No. 69-547
5. 고광웅, 이한주, 정동운, 이상용, "POGO와 PSD의 소개", 한국추진공학회지, 제7권 제4호. 2003. pp. 1-9
6. R. Fenwick, J. H. Jones, R. E. Jewell, "Space Shuttle Main Engine (SSME) Pogo Testing and Results," The Shock and Vibration Bulletin, No. 52, pt. 2, 1982, pp. 1-20
7. 오승협 등, 우주발사체사업 보고서, 항공우주연구원, 2003
8. "Measurement of Fluid Flow by Means of Orifice Plate, Nozzle, and Venturi Tubes, Inserted in Circular Cross Section Conduits Running Full," Int. Organ. Stand. Rep. DIS-5617, Geneva, April 1976