

KSR-III 추진기관 공급계 pogo 해석

이한주*·정태규*·O.M. Menshikova**·정영석*·조인현*·오승협*·서건수*

Pogo Analysis on the KSR-III Propulsion Feeding System

H.J. Lee*, T.K. Jung*, O.M. Menshikova**, Y.S. Jung*, I.H. Cho*, S.H. Oh*, K.S. Seo*

Key Words : longitudinal instability(축방향 불안정성), pogo(포고), rocket propulsion system(로켓 추진기관)

Abstract

This article deals with the introduction of longitudinal instability of liquid rocket (pogo) and the analytical results on the frequency responses of KSR-III propulsion feeding system. Both the stiffness of bellows and the cavitation volume of venturi affect the frequency response of the feeding system. Especially, bellows has a great roll to reduce the natural frequency of the feeding system. Also, oxidizer and fuel feeding systems of the KSR-III have natural frequencies of ~280Hz and ~90Hz, respectively.

1. 서론

액체 추진체를 사용한 로켓은 연료 및 산화제를 연소실로 이동시키기 위한 배관과 밸브 등의 공급계 구성품으로 이루어진 추진기관을 가지게 된다. 일반적으로 액체 추진 로켓이 비행을 하면서 질량이 감소하므로 발사체 전체 구조의 고유진동수는 커지게 된다. 한편 추진기관의 고유 진동수는 비행조건에 따라 바뀌기는 하지만 거의 일정하게 유지되므로, 특정 비행 시간에 발사체 구조 시스템과 추진기관 간의 고유 진동수가 비슷해지는 상황이 생길 수 있으며, 이때 불안정성이 야기될 수 있다.

비행 중에 로켓에 작용하는 공력에 의한 저항과 추력과의 관계에 의해 로켓이 진동을 겪을 수 있다. 로켓 구조물의 가속도의 섭동은 연료 탱크와 산화제 탱크의 가속도 섭동을 야기시키며, 이러한 섭동 항은 연료 탱크와 산화제 탱크로부터 공급되는 유체의 압력과 유량의 섭동을 일으켜 공급계 배관으로 흐르는 유체에 전달된다. 공급계 배관 내의 유체의 압력과 유량의 섭동은 또한 엔진으로 유입되는 산화제와 연료의 압력섭동을 발생시키고 이는 엔진에서 소모되는 산화제와 연료의 유량과 추력의 변화를 야기시킨다. 이러한 변화는 다시 로켓 구조물의 가속도의 섭동, 연료와 산화제 배관의 유량 섭동을 일으키는 폐회로를 구성하게 된다. (Fig. 1)

Pogo 현상은 전 연소시간에 걸쳐 발생하는 것은 아니며, Fig. 2와 같이 축방향의 진동이 생기면 단기간에 진폭이 급격히 커지다가 시간이 지나면서 줄어

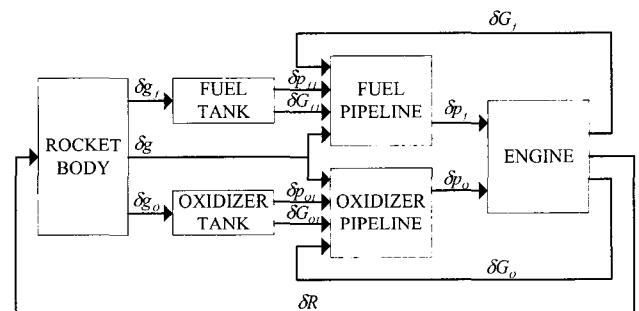


Fig. 1 Block diagram of longitudinal instability analysis in rocket propulsion system.

드는 특성을 가지고 있다. Pogo 현상으로 인한 진동의 진폭이 커지면서 연소실의 성능에 큰 영향을 끼쳐 연소실이 파괴되는 경우가 발생하기도 하며, 연소실이 파괴되지 않더라도 축방향의 진동으로 인해 자세 제어에 영향을 받아 발사체적의 오차가 생길 수도 있다. 또한 유인 발사체의 경우에는, pogo 현상이

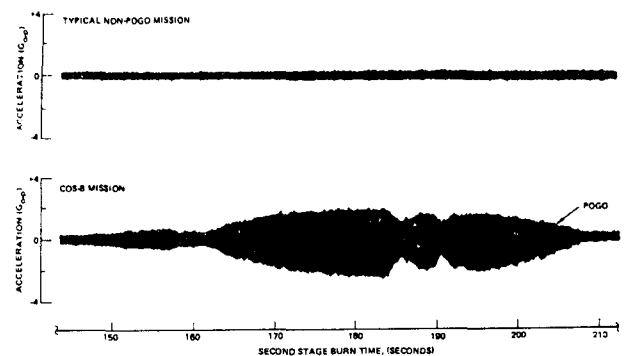


Fig. 2 Typical pogo phenomenon [1].

* 한국항공우주연구원 (KARI), leehj@kari.re.kr

** Keldysh Research Center, Russia

발생할 경우에 우주비행사에게 심각한 영향을 끼칠 수 있다.

Pogo 불안정성은 주로 pump-fed 방식의 대형 액체 추진기관 발사체에서 발생하며, 구조물의 고유진동수와 연계된 불안정성으로 35Hz 미만의 저주파에서 발생한다. 축방향 불안정성을 겪은 발사체로는 Saturn, Titan, Thor-Agena, Delta, Diamant-B 등을 들 수 있다 [1, 2].

축방향 불안정성을 억제하기 위한 연구는 주로 해석적 방법에 의존하고 있으며, 추진기관 각 구성품에 대한 선형화된 전달함수를 구현하여 구조물과 추진기관 연계시스템에 있어서의 damping 효과를 파악하는 형태로 이루어진다. 또한 이러한 해석결과를 바탕으로 pogo 억제 장치 (pogo suppression device)를 추진기관 시스템에 설치하여 pogo 현상이 발생하지 않도록 하고 있다.

2. KSR-III 공급계 시스템 해석

Pogo 현상을 해석하는 데 있어서는 Fig. 1과 같이 발사체 전체의 구조적 진동 및 추진제 공급계 진동과 연소실에서의 불안정성을 동시에 고려해야 한다. 그러나 공급계 유동의 고유진동수와 구조물의 고유진동수와의 공진이 pogo의 주 요인임을 감안할 때, 공급계 해석만으로도 의미가 있다고 볼 수 있으며, pogo 현상의 발생 유/무를 예측할 수 있다 [3, 4].

공급계에 대한 해석을 위해 각 구성품을 lumped resistance model, lumped elasticity model, 그리고 pipe line section으로 구분하여 나타내면 Fig. 3과 같이 표현할 수 있다. 각 구성품 중 탱크 출구, 벨류리, 밸브와 같은 유동의 저항체는 lumped resistance model을 적용하고, lumped elasticity model의 경우에는 유체 및 구성품을 하나의 탄성체로 보고 해석하는 것으로 벨로우즈와 벨류리 하단부가 이에 해당한다. 탄성체 역할을 하는 구성품은 공급계 내의 유체의 고유진동수를 줄이는 역할을 하며, 고유진동수 변화에 따라 시스템이 안정 혹은 불안정해질 것이기 때문에, 이를 배제하거나 간과할 경우에는 정확한 해석이 될 수 없다. 또한 pipe line section의 경우에는 배관 내의 마찰에 의한 에너지 손실을 고려해야 하며, 각 구성품에 대한 수학적 모델링은 참고문헌 [4, 5]에 제시되어 있다.

3. 벨로우즈의 강성과 벨류리 디퓨저에서의 cavitation volume의 영향

벨로우즈가 시스템에 미치는 영향을 파악하기 위하여 벨로우즈의 강성을 최대 (1mm bellows thickness) 와 최소 (0.6mm bellows thickness)로 가정하고 벨류리 후단의 cavitation volume이 $0.1 \times 10^{-4} \text{m}^3$ 과 $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$ 인 두 경우에 대하여 연료 공급계에 대한 주파수 특성을 파악하였다.

Fig. 4로부터 벨로우즈의 강성이 줄어들면, 연료 공급계의 고유진동수가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 벨로우즈의 강성이 작은 경우에 벨로우즈에 의한 탄성 효과의 증대로 고유진동수를 감소

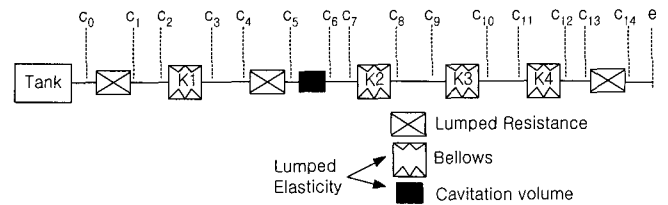


Fig. 3 Schematic diagram of pipe line.

시키는 것으로 해석된다. 따라서 벨로우즈의 강성을 조절함으로써, 시스템의 고유진동수를 바꾸어 시스템의 불안정성을 제어할 수 있음을 알 수 있다. 벨로우즈의 강성이 최소인 경우에는 벨류리의 cavitation volume 변화와 배관 길이에 무관하게 ~13Hz의 고유주파수를 나타내고 있음을 Fig. 4 (c), (d)를 통해 알 수 있다. 이는 벨로우즈의 높은 탄성 효과 (이는 높은 compliance를 의미)에 의해 벨류리와 배관 길이를 비롯한 기타 다른 구성품들이 공급계에 미치는 영향이 거의 없음을 의미한다.

벨로우즈의 강성이 최대인 경우에는 벨류리 디퓨저에서의 cavitation volume이 큰 경우에 고유진동수가 감소함을 Fig. 4 (a), (b)로부터 알 수 있다. 즉, cavitation volume이 증가할수록, 연료의 경우에는 ~56.4Hz에서 ~41.3Hz로 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 벨로우즈의 강성이 큰 경우에, 벨류리 디퓨저에서의 cavitation volume에 의한 즉, 기상의 탄성효과에 의해 고유주파수가 감소하는 것을 의미한다. 그러나 벨류리의 목적은 유량 제어를 위한 것이며, 또한 벨류리 디퓨저에서의 cavitation volume을 정확히 제어하는 것이 불가능하므로 불안정성 제어 측면에서 벨류리를 사용하는 것은 적합하지 않음을 알 수 있다.

4. KSR-III로의 적용

현재 KSR-III에 설치되어 있는 벨로우즈와 벨류리, 그리고 배관의 길이 및 형상과 관련된 사항은 참고문헌 [5]에 자세히 나와 있다. Fig. 5에 KSR-III 공급계에 대한 주파수 특성을 도시하였다. 벨류리 디퓨저에서의 cavitation volume이 $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$ (Fig. 5 (a)와 (c))에서 $0.5 \times 10^{-3} \text{m}^3$ (Fig. 5 (b)와 (d))으로 증가하였을 경우에, 산화제의 경우 ~280.4Hz에서 ~274.7Hz로, 연료의 경우 ~90.9Hz에서 ~89.7Hz로 변화하였음을 알 수 있으며, 그 감소폭이 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 KSR-III에 설치된 벨류리의 경우에는 유량 제어의 역할을 충실히 수행 [3]하는 반면 시스템의 고유진동수를 변화시키는 데는 기여하고 있지 않다고 결론지을 수 있다.

현재 KSR-III의 공급계의 고유진동수 영역은 Fig. 5로부터 산화제의 경우 ~280Hz 그리고 연료의 경우 ~90Hz의 1차 고유진동수를 갖고 있는 것으로 확인되었으며, 이는 현재 구조물의 고유진동수인 56Hz [6]를 훨씬 웃도는 값으로 축방향 불안정성은 일어나지 않을 것으로 판단된다. 따라서 KSR-III에 대한 공급계 동특성 해석 결과 pogo corrective device의 설치에 고려하지 않아도 될 것으로 사료된다.

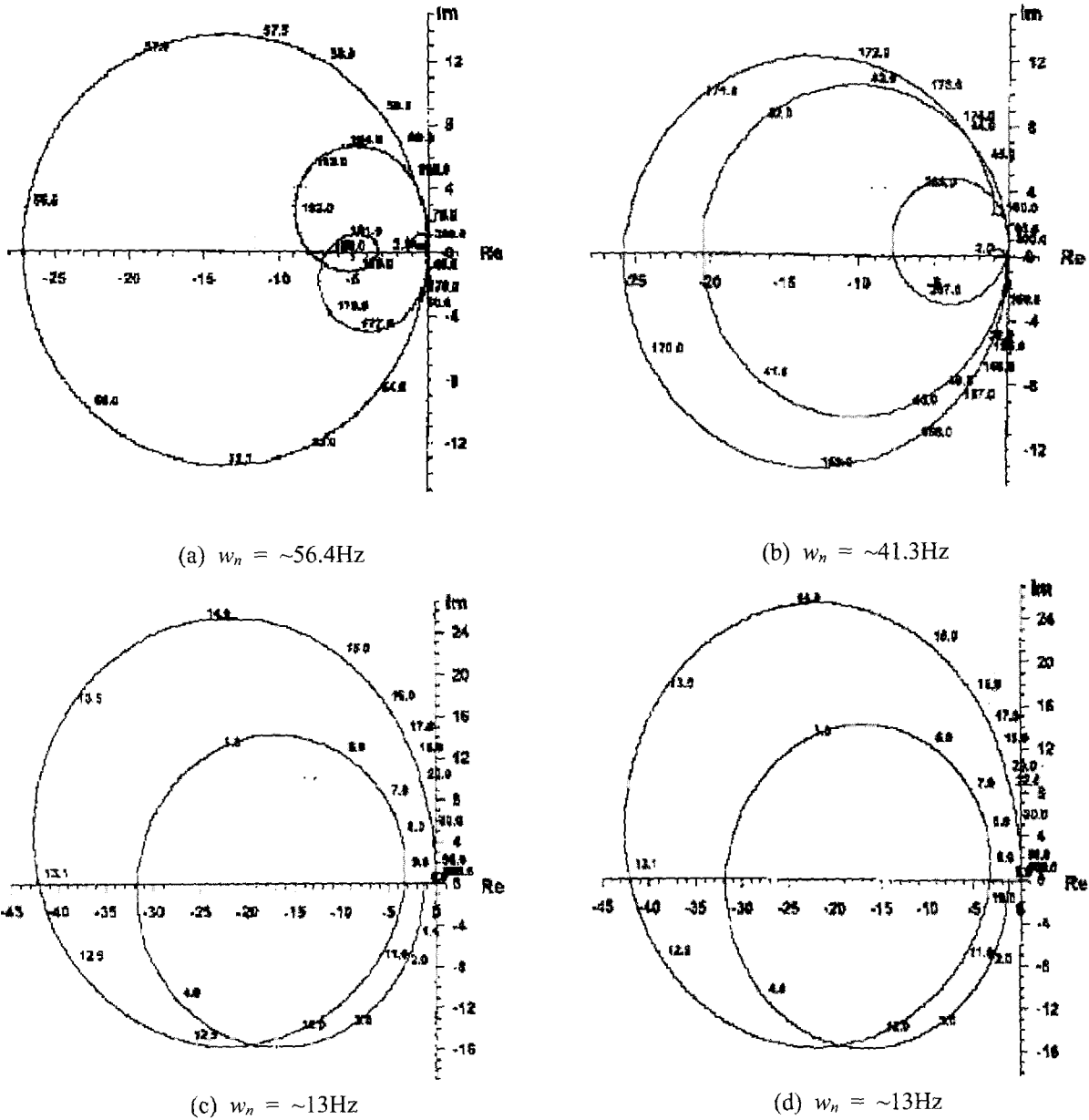


Fig. 4 The effects of bellows and venturi (Fuel): (a) Maximum stiffness bellows, cavitation volume = $0.1 \times 10^{-4} \text{m}^3$; (b) Maximum stiffness bellows, cavitation volume = $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$; (c) Minimum stiffness bellows, cavitation volume = $0.1 \times 10^{-4} \text{m}^3$; (d) Minimum stiffness bellows, cavitation volume = $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$.

5. 결론

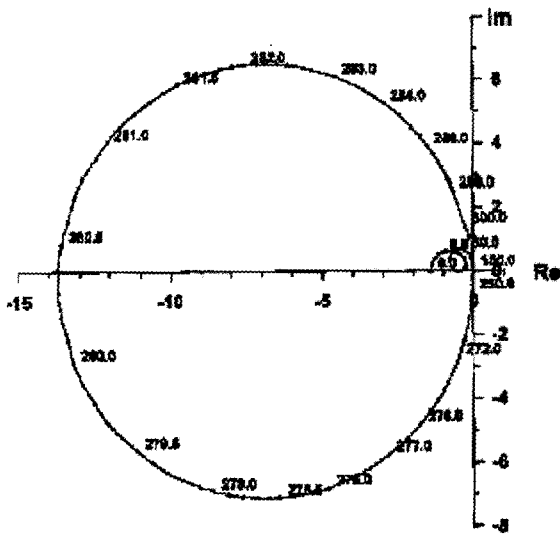
본 논문에서는 액체 추진기관의 축방향 불안정성인 pogo에 대한 개요와 한국항공우주연구원에서 개발하고 있는 과학관측로켓 (KSR-III)의 추진기관 공급계의 주파수 특성에 대한 해석 결과를 다루고 있으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1) 벨로우즈의 강성을 변화시킬 경우에 시스템 내의 유체의 고유진동수를 변화시켜 불안정성을 제어할 수 있다. 즉, 벨로우즈의 강성을 줄임으로써 시스템의 고유진동수를 크게 줄일 수 있음을 확인하였다.

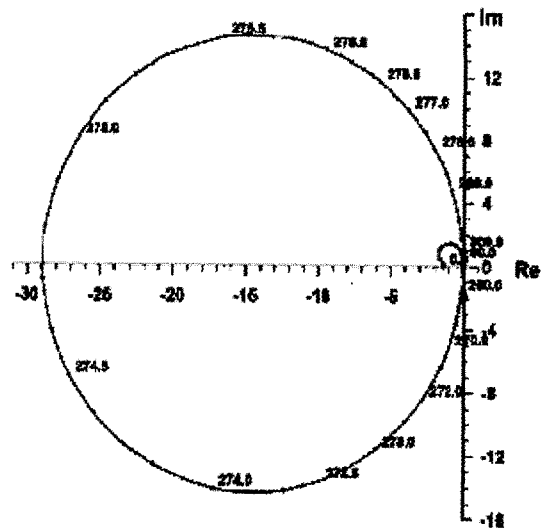
2) KSR-III의 공급계 시스템의 고유진동수는 산화제와 연료 라인의 경우, 각각 $\sim 280\text{Hz}$ 와 $\sim 90\text{Hz}$ 에 해당함을 알 수 있다. 이는 현재 구조물의 고유진동수인 56Hz [6]를 훨씬 웃도는 값으로 축방향 불안정성은 일어나지 않을 것으로 판단된다.

참고문헌

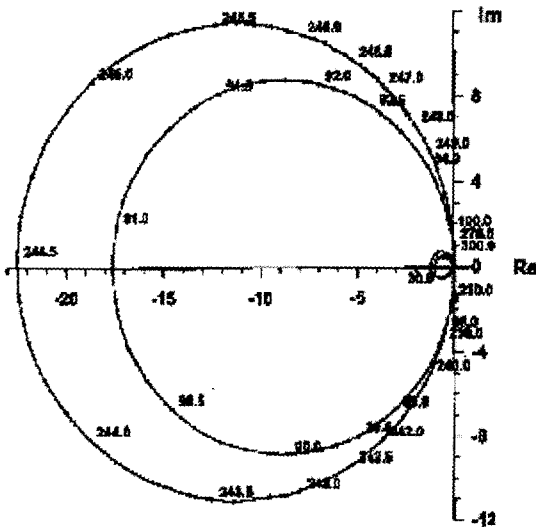
- [1] M. Markowitz, M. J. Morgan, Solution to Delta vehicle second stage pogo problem, AIAA77-408.
- [2] J. R. Fenwick, J. H. Jones, R. E. Jewell, Space shuttle main engine (SSME) pogo testing and results, The Shock and Vibration Bulletin, No. 52, Pt. 2, 1982, pp. 1-20.



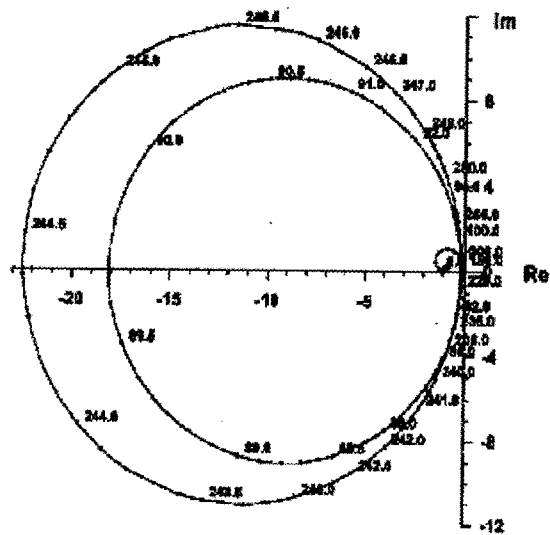
(a) $w_n = \sim 280.4\text{Hz}$



(b) $w_n = \sim 274.7\text{Hz}$



(c) $w_n = \sim 90.9\text{Hz}$



(d) $w_n = \sim 89.7\text{Hz}$

Fig. 5 Feed lines frequency responses of KSR-III: (a) Oxidizer line, cavitation volume = $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$; (b) Oxidizer line, cavitation volume = $0.5 \times 10^{-3} \text{m}^3$; (c) Fuel line, cavitation volume = $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$; (d) Fuel line, cavitation volume = $0.5 \times 10^{-3} \text{m}^3$.

[3] 채연석 등, 3단형 과학로켓 개발사업 (V) 최종보고서, 2002.
 [4] 조인현, 정태규, 강선일, 김용욱, 권오성, 정영석, KSR-III 추진기관 공급시스템 분석, DN-기관-01-04, 2001.

[5] 이한주, 정태규, 조인현, 발사체 동특성 해석 연구 (포고 불안정성 해석 연구)에 대한 검토 보고서, DN-기관-02-02, 2002.
 [6] 장영순, KSR-III 전기체 축방향 모달 시험 결과, TN-구조-02-01, 2002.