

## KSR-III 추진기관 공급계 pogo 해석

이한주\* · 정태규\*\* · O. M. Menshikova\*\*\* · 김용욱\*\* · 조인현\*\* · 오승협\*\* · 이대성\*\*

### Pogo Analysis on the KSR-III Propulsion Feeding System

H. J. Lee\* · T. K. Jung\*\* · O. M. Menshikova\*\*\* · Y. W. Kim\*\* · I. H. Cho\*\* · S. H. Oh\*\* · D. S. Lee\*\*

#### ABSTRACT

This article deals with the introduction of longitudinal instability of liquid rocket (pogo) and the analytical results on the frequency responses of Korean Sounding Rocket (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 about 280Hz and 90Hz, respectively.

#### 초 록

본 연구에서는 액체 로켓의 축방향 불안정성에 대한 개요와 국내 최초의 액체 추진로켓인 과학로켓 3호 (KSR-III) 추진기관 공급계 시스템에 대한 주파수 특성에 대한 결과를 다룬다. 공급계에 설치된 여러 구성품 중 벨로우즈와 벤튜리의 cavitation volume이 공급계의 주파수 특성에 미치는 영향을 파악하였다. 벨로우즈는 공급계의 고유진동수를 낮추는 데 큰 역할을 함을 알 수 있다. 또한 KSR-III의 산화제와 연료 공급계의 고유진동수는 각각 약 280Hz와 90Hz임을 알 수 있다.

Key Words : longitudinal instability(축방향불안정성), pogo(포고), rocket propulsion system(로켓추진기관)

#### 1. 서 론

액체 추진제를 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 고유진동수는 비행조건에 따라 바뀌기는 하지만 거의 일정하게 유지되므로, 특정 비행 시간에 발

● 2002년 8월 21일 접수 ~ 2002년 9월 30일 심사 완료

\* 정회원, 한국항공우주연구원 (Korea Aerospace Research Institute)

주연락저자, leejh@kari.re.kr, 대전광역시 유성구 어은동 45번지

\*\* 정회원, 한국항공우주연구원 (Korea Aerospace Research Institute)

\*\*\* Keldysh Research Center

사체 구조 시스템과 추진기관 간의 고유 진동수가 비슷해지는 상황이 생길 수 있으며, 이때 불안정성이 야기될 수 있다.

비행 중에 로켓에 작용하는 공력에 의한 저항과 추력과 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 것이 아니며, Fig. 2와 같이 축방향의 진동이 생기면 단기간에 진폭이 급격히 커지다가 시간이 지나면서 줄어드는 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 발생할 경우에 우주비행사에게 심각한 영향을 끼칠 수 있다. Fig. 3에는 Saturn-V에 탑승한 승무원들이 pogo 현상 발생 시 겪은 상황을 도시하였으며, 이러한 경험을 바탕으로 유인 발사체의 경우  $\pm 1/4g$ 의

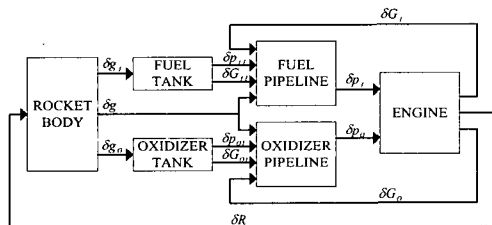


Fig. 1 Block diagram of longitudinal instability analysis in rocket propulsion system.

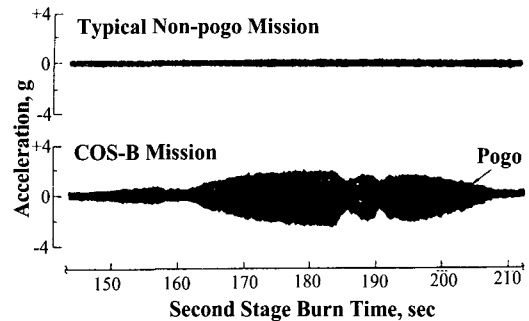


Fig. 2 Typical pogo phenomenon [1].

가속도 진폭이 발생하지 않도록 제안하고 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].

축방향 불안정성을 억제하기 위한 연구는 주로 해석적 방법에 의존하고 있으며, 추진기관 각

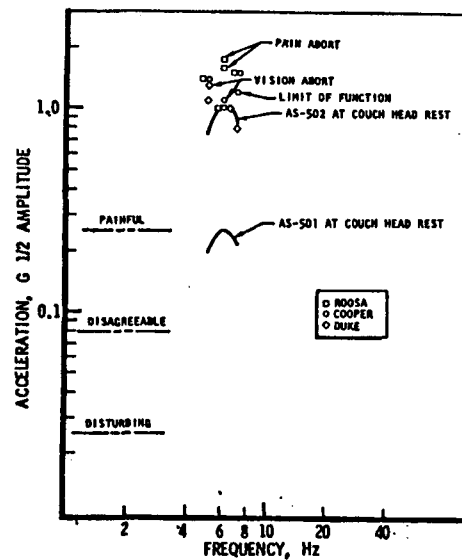


Fig. 3 Couch vibration and crew acceleration tolerance [2].

구성품에 대한 선형화된 전달함수를 구현하여 구조물과 추진기관 연계시스템에 있어서의 감쇠 효과를 파악하는 형태로 이루어진다. 또한 이러한 해석결과를 바탕으로 pogo 억제 장치 (pogo suppression device)를 추진기관 시스템에 설치하여 pogo 현상이 발생하지 않도록 하고 있다.

본 연구에서는 국내 최초의 액체 추진로켓인 과학로켓 3호 (KSR-III) 추진기관 공급계 시스템에 대한 주파수 특성에 대한 결과를 다룬다.

2. KSR-III 공급계 시스템 해석

2.1 수학적 모델

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. 4와 같이 표현할 수 있다. 각 구성품 중 탱크 출구, 벤튜리, 벨브와 같은 유동의 저항체는 lumped resistance model을 적용하고, lumped elasticity model의 경우에는 유체 및 구성품을 하나의 탄성체로 보고 해석하는 것으로 벨로우즈와 벤튜리 하단부가 이에 해당한다. 탄성체 역할을 하는 구성품은 공급계 내의 유체의 고유 진동수를 줄이는 역할을 하며, 고유 진동수

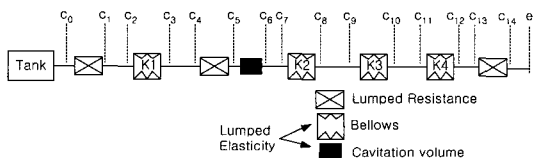


Fig. 4 Schematic diagram of propellant feeding system.

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 고려한다.

2.2 Lumped resistance model

Fig. 4의 c0-c1, c4-c5, c13-c14 구간에 해당하는 구성품, 즉 탱크 출구부, 벤튜리, 벨브와 같은 유동 저항체에 대한 수학적 모델을 나타내며, 다음과 같다.

$$\delta p_a^{C_n} - \delta p_a^{C_{n+1}} = h_a^{C_{n+1}} \delta u_a^{C_{n+1}} \quad (1)$$

$$h_a^{C_{n+1}} = \frac{2\Delta p_a^{C_n}}{p^0} \quad (2)$$

여기서, 하첨자  $a$ 는 추진제를 즉, 산화제와 연료를 나타내며, 상첨자  $C_n$ 은 Fig. 4의 구간을 나타낸다. 또한  $p, u, \delta p, \delta u, \Delta p$ , 그리고  $p^0$ 는 각각 압력, 유량, 무차원 압력섭동, 무차원 유량섭동, 압력강하, 그리고 참고치로 사용되는 연소실 압력을 나타낸다.

2.3 Lumped elasticity model

Fig. 4의 c2-c3, c5-c6, c7-c8, c9-c10, c11-c12 구간에 해당하며, 벨로우즈와 벤튜리 하단에서의 cavity의 수학적 모델로서 다음과 같이 유도된다.

$$\delta u_a^{C_{n+1}} = -iw\epsilon_a T_{Va} \delta p_a^{C_n} + \delta u_a^{C_n} \quad (3)$$

$$\delta p_a^{C_{n+1}} = \delta p_a^{C_n} \quad (4)$$

여기서,  $\epsilon_a = \tau \frac{p^0 A}{V}$ 로 배관의 고유진동수 계산을 위해서는 벨로우즈의 부피탄성만을 고려한다.  $\tau = \frac{1}{A} \frac{\partial V}{\partial p}$ 로 벨로우즈의 강성계수의 역수에 해당한다. 또한  $w$ 는 circular frequency를,

$T_V = V/(Au)$ 는 벨로우즈와 같은 탄성체에서의 시상수를 나타낸다.  $V$ ,  $A$ ,  $u$ 는 각각 벨로우즈의 부피, 파이프 단면적, 그리고 파이프를 통과하는 액체의 평균유속을 나타낸다. 참고적으로, 벨로우즈의 강성계수는 다음과 같이 계산된다.

$$k = \frac{1}{\tau} = \frac{p}{\lambda'} \quad (5)$$

$$\lambda' = 2nA_p p R_H^4 / (Eh^3) \quad (6)$$

여기서,  $R_H$ ,  $R_B$ ,  $n$ ,  $h$ , 그리고  $E$ 는 각각 벨로우즈의 외부와 내부의 반경, 벨로우즈의 접합수, 벨로우즈 벽면 두께, 그리고 벨로우즈의 탄성계수를 나타낸다. 또한  $A_p = R_H/R_B$  이다.

#### 2.4 Pipe line section

Fig. 4의 c1-c2, c3-c4, c6-c7, c8-c9, c10-c11, c12-c13, c14-e 구간에 해당하며, 구성품들을 연결하는 배관내의 마찰에 의한 에너지 손실을 고려하는 모델로 다음과 같다.

$$\delta p_a^{C_{n+1}} = E_{pp}^{(a)} \delta p_a^{C_n} + E_{pu}^{(a)} \delta u_a^{C_n} \quad (7)$$

$$\delta u_a^{C_{n+1}} = E_{up}^{(a)} \delta p_a^{C_n} + E_{uu}^{(a)} \delta u_a^{C_n} \quad (8)$$

여기서,

$$E_{pp}^{(a)} = \cosh(i k_a^{C_n} l_a^{C_n}) \quad (9)$$

$$E_{pu}^{(a)} = -\beta_a^{C_n} \sinh(i k_a^{C_n} l_a^{C_n}) \quad (10)$$

$$E_{up}^{(a)} = -(\beta_a^{C_n})^{-1} \sinh(i k_a^{C_n} l_a^{C_n}) \quad (11)$$

$$E_{uu}^{(a)} = \cosh(i k_a^{C_n} l_a^{C_n}) \quad (12)$$

$$k_a^{C_n} = \frac{w}{c_a^{C_n}} \left[ 1 - 2i \frac{\Delta p_a^{C_n}}{\rho_a u_a^{C_n} l_a^{C_n} w} \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$\beta_a^{C_n} = \frac{\rho_a c_a^{C_n} u_a^{C_n}}{p^0} \left[ 1 - 2i \frac{\Delta p_a^{C_n}}{\rho_a u_a^{C_n} l_a^{C_n} w} \right]^{1/2} \quad (14)$$

$$c = \left( \frac{1}{c_0^2} + \frac{\rho D}{Et} \right)^{-1/2} \quad (15)$$

또한  $l$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $t$ 는 각각 주어진 구간의 파이프 길이, 직경, 재료의 탄성계수, 그리고 두께를 나타낸다.  $c_0$ 는 음속을 나타내며, 산화제(LOx)의 경우 835m/s 그리고 연료(kerosene)의 경우 1295m/s에 해당한다.

상기 시스템 해석을 통해 추진기관 공급계의 동특성을 잘 표현해주는 압력섭동에 대한 유량섭동의 전달함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$B_a = \frac{\delta u_a^e}{\delta p_a^e} = fn(iw) \quad (16)$$

식 (16)으로 표현되는 전달함수를 300Hz 미만의 주파수 범위에서 일정 주파수 간격으로 복소평면에 나타낼 경우, 원을 그리게 되며 원호의 크기 변화율이 가장 커지는 점이 고유진동수가 된다. Pogo 현상은 추진기관 시스템의 고유진동수와 로켓 구조의 고유진동수가 일치하는 조건에서 발생한다. 따라서, 추진기관 시스템의 고유진동수 특성을 파악한 후에 구조물의 고유진동수와와의 비교, 평가를 통해 pogo 불안정성 발생 여부를 판단할 수 있게 된다.

#### 3. 벨로우즈의 강성과 벤투리 디퓨저에서의 cavitation volume의 영향

벨로우즈가 시스템에 미치는 영향을 파악하기

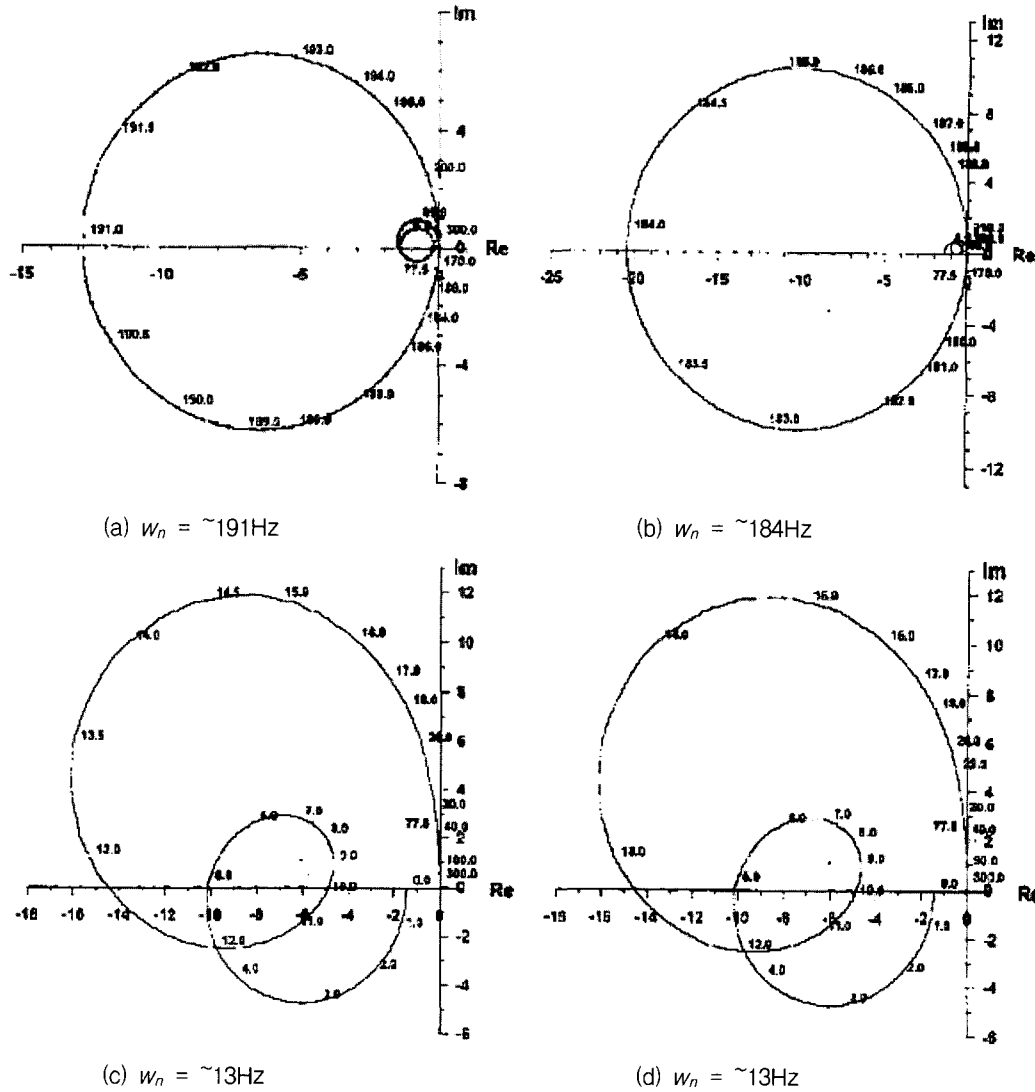


Fig. 5 Effects of bellows and venturi (Oxidizer): (a) maximum stiffness bellows, cavitation volume =  $0.1 \times 10^{-4} \text{m}^3$ ; (b) maximum stiffness bellows, cavitation volume =  $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$ ; (c) minimum stiffness bellows, cavitation volume =  $0.1 \times 10^{-4} \text{m}^3$ ; (d) minimum stiffness bellows, cavitation volume =  $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$ .

위하여 벨로우즈의 강성을 최대 (1mm bellows thickness) 와 최소 (0.6mm bellows thickness)로 가정하고 벤츄리 후단의 공동부의 부피 (cavitation volume)가  $0.1 \times 10^{-4} \text{m}^3$ 과  $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$ 인 두 경우에 대하여 각 추진계의 주파수 특성을 파악하였다. Fig. 5와 6으로부터 산화제와 연료 공급계 모두 벨로우즈의 강성이 줄어들면, 고유

진동수가 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 벨로우즈의 강성이 작은 경우에 벨로우즈에 의한 탄성 효과의 증대로 고유진동수를 감소시키는 것으로 해석된다. 따라서 벨로우즈의 강성을 조절함으로써, 시스템의 고유진동수를 바꾸어 시스템의 불안정성을 제어할 수 있음을 알 수 있다.

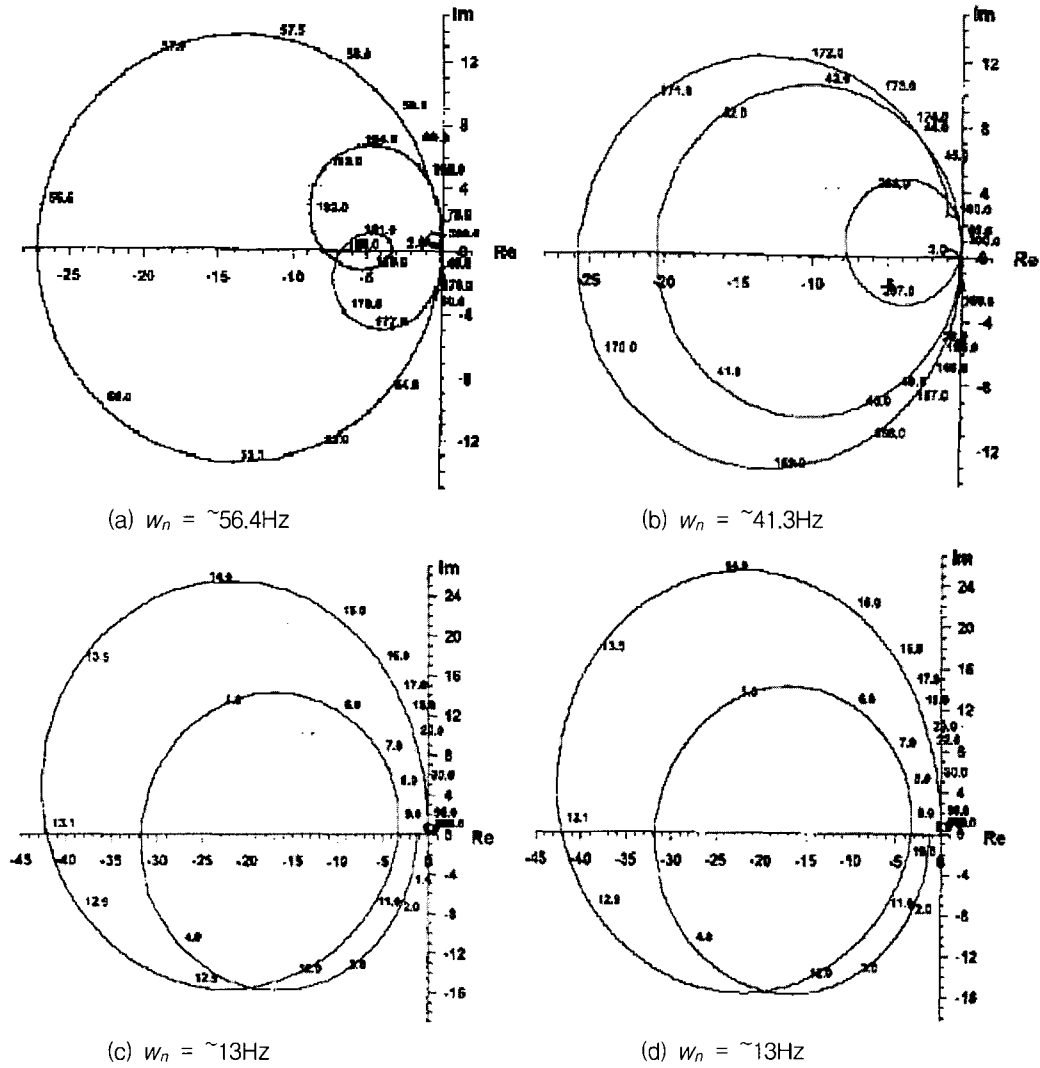


Fig. 6 Effects of bellows and venturi (Fuel): (a) maximum stiffness bellows, cavitation volume =  $0.1 \times 10^{-4} \text{m}^3$ ; (b) maximum stiffness bellows, cavitation volume =  $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$ ; (c) minimum stiffness bellows, cavitation volume =  $0.1 \times 10^{-4} \text{m}^3$ ; (d) minimum stiffness bellows, cavitation volume =  $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$ .

벨로우즈의 강성이 최소인 경우에는 벤튜리의 공동 부피 변화와 배관 길이에 무관하게 산화제와 연료 모두  $\sim 13\text{Hz}$ 의 고유주파수를 나타내고 있음을 Fig. 5 (c), (d)와 Fig. 6 (c), (d)를 통해 알 수 있다. 이는 벨로우즈의 높은 탄성 효과 (이는 높은 compliance를 의미)에 의해 벤튜리와 배관

길이를 비롯한 기타 다른 구성품들이 공급계에 미치는 영향이 거의 없음을 의미한다. 반면, 벨로우즈의 강성이 최대인 경우에는 Fig. 5 (a), (b)와 Fig. 6 (a), (b)로부터 배관 길이에 의한 영향 즉, 액상의 탄성과 관성에 의해서 배관 길이가 긴 연료측의 고유주파수가 크게 감소됨을 알 수

있다. 이는 Fig. 5 (a)와 Fig. 6 (a)로부터, 산화제의 경우에는  $\sim 191\text{Hz}$ , 연료의 경우에는  $\sim 56.4\text{Hz}$  임으로부터 확인할 수 있다. 벨로우즈의 강성이

있다. 이는 벨로우즈의 강성이 큰 경우에, 벤튜리 디퓨저에서의 공동 부피에 의한 즉, 기상의 탄성효과에 의해 고유주파수가 감소하는 것을

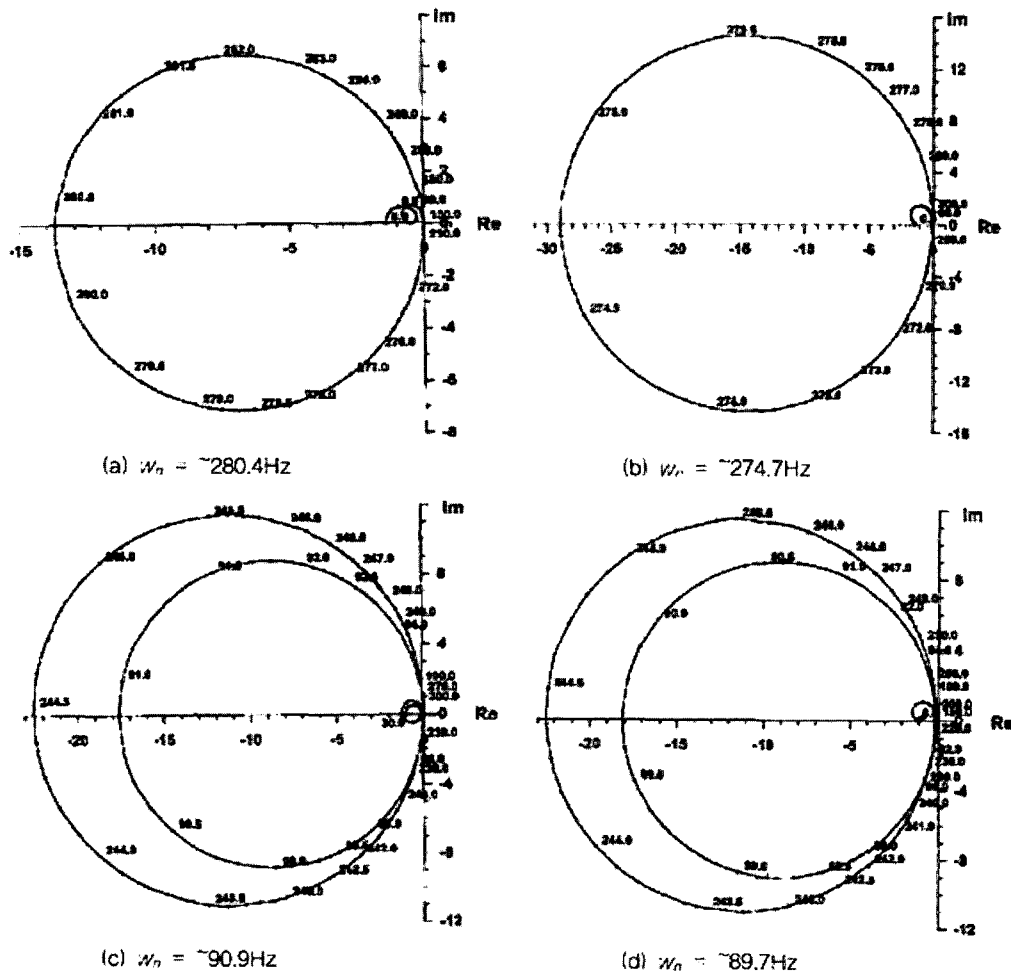


Fig. 7 Frequency responses of the KSR III feed lines: (a) oxidizer line, cavitation volume =  $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$ ; (b) oxidizer line, cavitation volume =  $0.5 \times 10^{-3} \text{m}^3$ ; (c) fuel line, cavitation volume =  $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$ ; (d) fuel line, cavitation volume =  $0.5 \times 10^{-3} \text{m}^3$ .

최대인 경우에는 벤튜리 디퓨저에서의 공동 부피가 큰 경우에 고유진동수가 감소함을 Fig. 5 (a), (b)와 Fig. 6 (a), (b)로부터 알 수 있다. 즉, cavitation volume이 증가할수록, 산화제의 경우에는  $\sim 191\text{Hz}$ 에서  $\sim 184\text{Hz}$ 로, 연료의 경우에는  $\sim 56.4\text{Hz}$ 에서  $\sim 41.3\text{Hz}$ 로 감소한 것을 확인할 수

의미한다. 그러나 벤튜리의 목적은 유량 제어를 위한 것이며, 또한 벤튜리 디퓨저에서의 공동 부피를 정확히 제어하는 것이 불가능하므로 불안 정성 제어 측면에서 벤튜리를 사용하는 것은 적 합하지 않음을 알 수 있다.

#### 4. KSR-III 적용 결과

현재 KSR-III에 설치되어 있는 벨로우즈와 벤튜리, 그리고 배관계를 이용해 공급계 동특성 해석을 수행하였다. KSR-III에 설치된 벨로우즈와 벤튜리, 그리고 배관의 길이 및 형상에 관련된 사항은 참고문헌 [5]에 자세히 제시되어 있다.

Fig. 7에 KSR-III 공급계에 대한 주파수 특성을 도시하였다. 벤튜리 디퓨저에서의 공동 부피가  $0.5 \times 10^{-4} \text{m}^3$  (Fig. 7 (a)와 (c))에서  $0.5 \times 10^{-3} \text{m}^3$  (Fig. 7 (b)와 (d))으로 증가하였을 경우에, 산화제의 경우  $\sim 280.4 \text{Hz}$ 에서  $\sim 274.7 \text{Hz}$ 로, 연료의 경우  $\sim 90.9 \text{Hz}$ 에서  $\sim 89.7 \text{Hz}$ 로 변화하였음을 알 수 있으며, 그 감소폭이 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 KSR-III에 설치된 벤튜리의 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. 7로부터 산화제의 경우  $\sim 280 \text{Hz}$  그리고 연료의 경우  $\sim 90 \text{Hz}$ 의 1차 고유진동수를 갖고 있는 것으로 확인되었으며, 이는 현재 구조물의 고유진동수인  $56 \text{Hz}$  [6]를 훨씬 웃도는 값으로 축방향 불안정성은 일어나지 않을 것으로 판단된다. 따라서 KSR-III에 대한 공급계 동특성 해석 결과 pogo 억제 장치의 설치는 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 액체 추진기관의 축방향 불안정성인 pogo에 대한 개요와 한국항공우주연구원 에서 개발하고 있는 과학관측로켓 (KSR-III)의 추진기관 공급계에 대한 주파수 특성을 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 고유 진동수를 크게 줄일 수 있음을 확인하였다.

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

#### 후 기

본 논문은 과학기술부 지원 '3단형 과학로켓 개발사업' 및 '한리센터 현지 Lab 사업 - 우주발사체 개발사업'의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. M. Markowitz, M. J. Morgan, Solution to Delta vehicle second stage pogo problem, AIAA77-408, 1977.
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, pp. 1-20, 1982.
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 통특성 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.