

KSR-III 로켓의 액체 연료 탱크 내에서 발생하는 슬로싱 현상의 배플에 의한 감쇄율 측정

Measurement of Damping Ratio of Fuel Sloshing in a Baffled Liquid Propellant Tank of KSR-III Rocket

박순홍*·유준태**·이영무***
Soon-Hong Park, Joon-Tae Yoo, and Yeong-Moo Yi

Key Words : Sloshing(슬로싱), Baffle(배플), 감쇄율(Damping ratio).

ABSTRACT

Sloshing of fuel in a liquid propellant tank is an important part of the dynamic and the stability analysis of the rocket. Baffles are installed in a propellant tank to reduce the instability due to sloshing. Multi degree of spring-mass-damper model was used to model sloshing of fuel in an axisymmetric tank. The natural frequencies and damping ratios are estimated. In order to verify the estimated natural frequencies and damping ratios, tests are performed for the real propellant tank of KSR-III with single ring baffle. Results of fuel sloshing analysis are compared with those of tests.

1. 서론

액체 연료를 사용한 로켓은 고체 연료를 사용하는 로켓과는 달리 탱크내 추진제의 출렁거림(슬로싱, sloshing)으로 구조 및 자세 제어계의 불안정성을 야기하게 된다. 슬로싱으로 인한 문제점을 줄이기 위하여 탱크내에 여러 가지 형태의 배플들을 설치하며, 배치 형태에 따라 불안정성을 감소시킬 수 있다.

1950-60 년대에 로켓 개발과 더불어 연료 탱크의 슬로싱 해석과 이의 동역학적 모델링 및 배플 설계등에 대한 체계적 연구가 NASA 등에서 활발히 수행되었으며 액체 추진 로켓에 성공적으로 적용되었다. Abramson 은 그 시대에 수행되었던 로켓 탱크내에서의 액체연료의 동적 거동에 관한 이론 및 실험에 대한 연구를 수행하였는데, 다양한 연료탱크의 형상에 대한 동역학적 등가 모델과 배플에 의한 댐핑효과에 대하여 기술하였다.⁽¹⁾ 또한 실린더탱크에서 액체연료 진동시 동적등가모델 도입에 따른 여러 결과들과 배플로 인하여 나타나는 댐핑효과에 대한 연구가 수행되었다.⁽²⁻⁴⁾ 이러한 여러 가지 슬로싱 해석 결과는 최근까지 유용하게 사용되고 있으며⁽⁵⁾ 최근에는 유한요소법(FEM)을 이용하여 비선형 슬로싱 해석도 수행되고 있다.^(6,7)

KSR-III 로켓은 국내에서 최초로 액체 연료를 사용한 로켓으로서, 추진제의 슬로싱에 의한 불안정성을 감소시키기 위해 추진제 탱크에 배플이 적용되었다. 배플의 설계를 위해 탱크 내의 유체의 운동을 다자유도 질량-스프링-댐퍼 요소로 모델링하였다.⁽⁸⁾ 이러한 모델링을 바탕으로하면 슬로싱 현상과 설계 인자간의 상호 관계를 몇 개의 인자만으로 파악할 수 있어 로켓의 자세 제어를 위한 요구 사양을 쉽게 반영할 수 있다. 본 논문에서는 슬로싱 현상을 간단히 표현할 수 있는 동역학적 등가 모델을 살펴보고, 그 결과의 검증을 위하여 추진제탱크 실제품을 이용한 슬로싱 시험을 수행한 결과를 다루고 있다. 실험 결과와 동역학적 등가 모델을 통하여 얻어진 슬로싱 고유진동수와 비교하였으며 배플로 인하여 발생한 댐핑효과도 추정하였다.

2. 슬로싱 현상의 동역학적 등가 모델⁽⁸⁾

2.1 다자유도 질량-스프링-댐퍼 모델

간단한 형상의 탱크에 대해서도 유체연료의 거동을 해석적으로 나타내기는 어렵다. 유체연료의 거동을 해석적으로 나타내려면 Navier-Stokes 방정식과 경계조건을 풀기 위한 여러 가지 수학적 방법이 필요하게 된다. 유체연료를 비압축성 비회전 유동으로 가정하여 속도포텐셜을 사용하더라도 복잡한 형상의 탱크에 대해서는 해를 구하기 힘들다 그래서 간단한 방법으로 슬로싱현상을 해석하여

* 한국항공우주연구원, 우주발사체연구부
E-mail : shpark@kari.re.kr
Tel : (042) 860-2093, Fax : (042) 860-2233

** , *** 한국항공우주연구원, 우주발사체연구부

발사체 제어에 효과적으로 적용하기 위해 동역학적 등가 모델을 수립한다. 탱크내에서의 유체 움직임을 모델링할때는 크게 두개의 부분으로 나누어 모델링을 한다. 첫째로 탱크의 아래부분은 강체거동을 한다고 가정하고, 윗부분은 유한개의 모드형상과 고유진동수를 가지며 진동하는 부분으로 모델링을 한다. 이 윗부분은 여러개의 스프링과 질량 또는 진자들로써 나타낼 수 있는데 각각의 경우에 대하여는 장단점이 있다.^(1,8)

참고문헌(1)을 바탕으로 실린더 형상 탱크에 대하여 슬로싱 효과를 스프링-질량모델(Fig.1)을 사용하여 나타내었다. 스프링-질량모델을 사용한 이유는 배플로 인하여 발생하는 댐핑효과를 추가하기 용이하게 하기 위해서이다.⁽⁸⁾

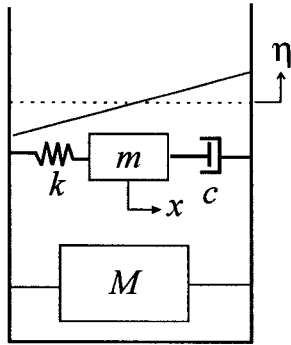


Fig. 1 Mass-Spring-Damper Model

2.2 배플의 모델링

슬로싱으로 인하여 발생하는 힘과 모멘트를 줄이기 위한 장치로서 여러 가지가 쓰이게 된다. 이러한 장치들은 대개 에너지 방출효과를 이용하여 슬로싱으로 인한 자세 제어계의 불안정성을 줄이는 역할을 한다. 이러한 장치들은 댐퍼로써 모델링 할 수 있으며 액체 추진 로켓의 경우 이러한 장치들의 도입이 필수적이다.

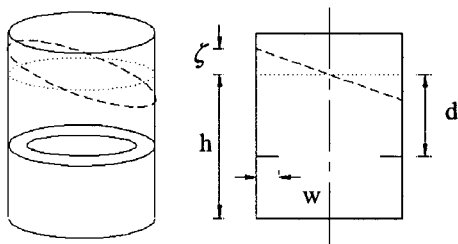


Fig. 2 링형태의 배플

가장 효과가 우수한 장치로 링형태의 배플(Fig. 2)을 들 수 있다. 그러나 슬로싱을 줄이기 위한

장치들의 댐핑효과는 여러 가지 변수값에 따라 다양하게 변하고, 해석적으로 구하는 것이 상당히 어렵다. 따라서 대부분의 경우 실험에 의하여 구한다⁽²⁾. 해석적인 면에서보면 슬로싱을 줄이기 위한 장치들에 의한 감쇠가 작아서 적절한 선형 점성 댐퍼로 모델링이 가능하다.^(2,5,8)

3. KSR-III 추진재 탱크의 배플에 의한 감쇠율 측정

3.1 실험 장치

KSR-III 로켓의 추진재 탱크 내에 장착된 링형태의 배플에 의한 감쇠율을 측정하기 위해 Fig. 3 과 같이 실험장치를 구성하였다.

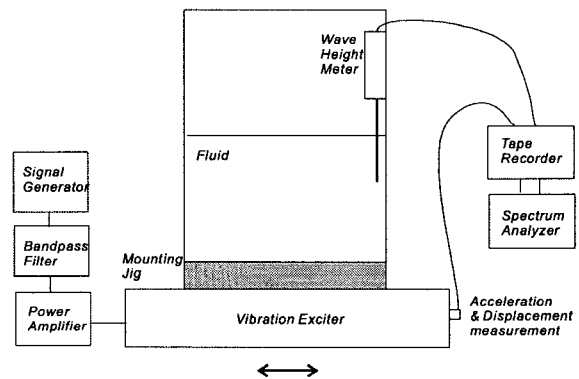


Fig. 3 감쇠율 측정을 위한 실험 장치

사용한 탱크는 KSR-III 로켓의 액체 연료 탱크이며, 슬로싱 모드의 관측 및 기록을 위해 상부돔을 절단하였다. 실제 연료 대신 물을 사용하였으며, 탱크내에는 해석 모델과의 비교의 편의를 위해 링 형태의 배플이 1개만 설치되었다. 배플의 형태는 강성보강을 위하여 끝부분이 꺾여있다. 탱크의 가진을 위해 한국기계연구원의 6 자유도 유압식 가진기를 사용하였다. 탱크가 축대칭이고, 탱크 내 유체의 회전 운동은 고려할 필요가 없어서 탱크를 횡방향으로만 가진하였다. 참고로 해석에 사용된 슬로싱 모델은 횡방향만 고려한 모델이다.

가진 신호를 측정하기 위해 가속도계를 이용하였으며, 탱크 내의 유체의 운동을 측정하기 위해 파고계(wave height meter)를 이용하였다(Fig. 4). 파고계는 실험을 위해 주문 제작하였는데, capacitance type 으로 측정 범위는 ±0.1 m, 측정 가능 주파수 범위는 0~10 Hz 이다. 가속도계와 파고계로부터의 출력 신호는 4 채널 스펙트럼 분석기

에 입력하여 주파수 응답함수를 구하였으며, DAT 레코더를 이용하여 신호를 저장하였다.

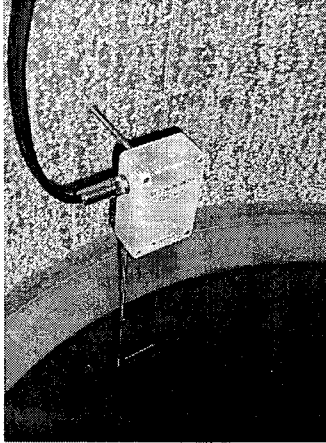


Fig. 4 연료 탱크 내부에 장착된 파고계

배플에 대한 유체의 상대 높이의 변화에 따라 배플이 슬로싱에 대해 가지는 감쇠율이 달라지므로 세가지 수면의 높이를 설정하여 실험을 수행하였다. 첫번째 경우는 수면의 높이가 배플면과 같을 때 (Case 1), 두번째 경우는 수면의 높이가 배플의 높이에 비해 16mm 높을때 (Case 2), 세번째 경우는 수면의 높이가 배플의 높이에 비해 120mm 높을때로 설정하였다 (Case 3). 여기서 세번째 경우는 배플이 장착되지 않은 경우와 동등하다.

3.2 실험 결과

가진기에 0.1-10 Hz 의 랜덤 신호를 입력하고, 가진기에 설치된 가속도계 신호에 대한 파고계 신호의 주파수 응답함수(FRF)를 측정하였다. 가진 주파수 레벨은 0.01g 이었으며, 세가지 수면 높이에 대한 주파수 응답 함수는 Fig. 5 와 같다.

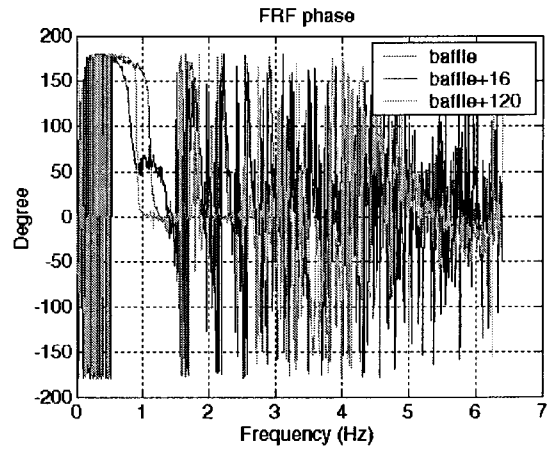
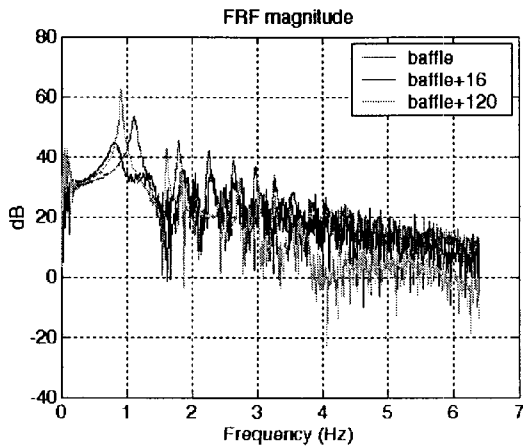


Fig. 5 주파수 응답 함수

주파수 응답함수(Fig. 4)로부터 KSR-III 추진제 탱크내의 연료 슬로싱의 공진 주파수 및 배플에 의한 감쇠율을 측정할 수 있었다. Table 1 은 세가지 경우의 수면 높이에 대한 공진 주파수 및 감쇠율을 나타낸다.

Table 1. 수면 높이에 따른 공진 주파수 및 감쇠율

Fluid Height	1 st Natural Frequency	2 nd Natural Frequency	Damping ratio at 1 st natural frequency
(Case1) Baffle	1.12 Hz	1.80 Hz	4.2 %
(Case2) Baffle + 16mm	0.82 Hz	1.88 Hz	15.9 %
(Case3) Baffle + 120mm	0.91 Hz	1.62 Hz	2.1 %

Table 1 에서 물의 높이가 배플 높이와 같은 (Case1)에서 고유 진동수가 가장 큰 이유는 배플 끝단의 형상 때문에 반경 감소 효과가 발생하기 때문이다. 유체높이가 배플보다 16mm 높은 (Case 2)의 경우 첫번째 공진 주파수에서 가장 큰 감쇠율이 측정되었으며, 공진 주파수도 가장 낮다. 한편 (Case 3)의 경우에는 배플에 의한 슬로싱의 감쇠율이 가장 낮게 측정되었는데, 배플이 없는 경우의 감쇠율에 해당한다. 즉, 배플이 없는 상태에서 슬로싱의 고유 진동수는 유체높이가 배플보다 120mm 위에 있는 경우에서 측정한 0.91 Hz 라고 볼 수 있다. 탱크내부에 링형태의 배플이 설치되었을 경우 유체가 배플과 동일평면일때보다는 유체가 배플보다 약간 위쪽에 있을 때 댐핑이 더 크며 그 효과는 유체가 상승함에 따라 감소함이 보고되어 있으며, 본 시험에서도 동일한 경향을

관찰할 수 있었다⁽²⁾.

한편, 슬로싱 모드의 관측을 위해 정현파 소인 실험(sine sweep test)을 수행하였다. 0.1-2.5 Hz의 범위에서 가진하였으며, 슬로싱 모드는 캠코더를 이용하여 레코딩하였다. 횡방향 가진시의 첫번째 슬로싱 모드와 두번째 슬로싱 모드를 잘 관찰할 수 있었으며 Fig. 6-7 과 같다.

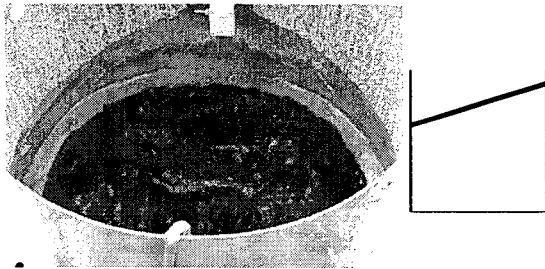


Fig. 6 첫번째 슬로싱 모드

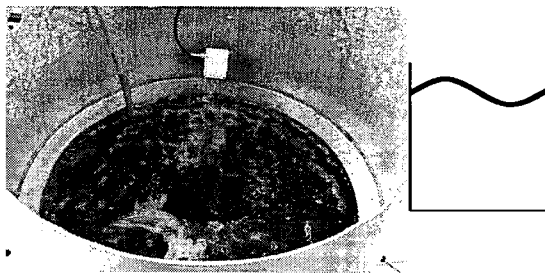


Fig. 7 두번째 슬로싱 모드

4. 결론

KSR-III 추진재 탱크내에 설치된 배플에 의한 슬로싱의 감쇠율을 대형 가진기와 파고계를 사용하여 측정하였다. 사용한 배플에 의한 감쇠 효과는 KSR-III 로켓의 설계 사양을 만족함을 알 수 있었으며, 가진주파수의 변화에 따른 유체의 움직임은 통하여 슬로싱 모드를 관찰할 수 있었다.

참고 문헌

- (1) H. N. Abramson, The dynamic behavior of liquids in moving containers, NASA SP-106, 1966.
- (2) J. R. Roberts, E. R. Basurto, and P. Chen, Sloshing design handbook I, NASA CR-406, 1966.
- (3) Henry A. Cole, Jr. "On a Fundamental Damping Law for Fuel Sloshing", NASA TN D-3240, 1966
- (4) G. P. Stricklin, J. A. Baird "A Survey of Ring Baffle Damping in Cylindrical Tanks", NASA TN R-185, 1966

- (5) C. Scott, MATRIXx simulation of fuel slosh behavior for AUSROC III, RMIT department of aerospace engineering AV408, 1995.
- (6) N. Tokuda, T. Sakurai, and T. Teraoku, "Sloshing analysis method using existing FEM structural analysis code", ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 117, pp. 268-272, 1995.
- (7) S. S. Babu, and S. K. Bhattacharyya, "Finite element analysis of fluid-structure interaction effect on liquid retaining structures due to sloshing", Computers and Structures, Vol. 59, pp. 1165-1171, 1996.
- (8) 유준태, 연정흠, 윤성기, 액체연료 탱크내부의 연료슬로싱 해석 및 최적 배플설계에 관한 연구, 한국항공우주학회지, 27 권 5 호, pp. 60-70, 1999.