

## 액체연료탱크의 슬로싱 거동 평가기법

윤성호\*(금오공대 기계공학부), 박기진(금오공대 대학원 기계공학과)  
 심국상(금오공대 기계공학부)

### Evaluation for Sloshing Behaviors of Liquid Storage Tank

Sung Ho Yoon(School of Mech. Eng., KNUT),  
 Kee Jin Park(Mech. Eng. Dept., KNUT), Kook Sang Sim(School of Mech. Eng., KNUT)

#### ABSTRACT

The sloshing phenomenon sometimes happens to be occurred in the liquid storage tank due to the unexpected and/or inevitable vibrating conditions and may result in severe effects on the structural stability. This study deals with the development of experimental techniques for the evaluation of sloshing behaviors in the liquid storage tank and for the identification of natural frequencies and mode shapes by varying with various vibrating conditions. In addition, suitable method is suggested to minimize the sloshing effect on the liquid storage tank and its validity is experimentally investigated.

**Key Words** : Liquid storage tank(액체 저장 탱크), Sloshing phenomenon(슬로싱 현상), Structural stability(구조 안정성), Vibration condition(가진 조건), Natural frequency(고유진동수), Mode shape(모드 형상)

#### 1. 서론

유도무기체계, 선박, 항공기 등에 장착된 액체 저장탱크는 외부에서 가진을 받는 경우 저장탱크 내에는 액체의 출렁임인 슬로싱 현상이 발생한다 [1-3]. 이와 같은 액체 저장탱크는 유체-구조물 연계 시스템의 대표적인 예로서 이를 설계하기 위해서는 정확한 동특성 해석과 이를 기초로 한 구조설계 기법이 필수적이다. 선진기술국의 경우 액체 저장탱크의 동특성에 대한 해석과 실험평가에 관해서는 비교적 많은 연구가 진행되어 왔지만 국내에서는 아직 체계적인 연구가 미흡한 실정이다. 특히 비행체에 장착된 액체 저장탱크에서의 슬로싱 현상은 비행체의 조정 안정성 상실은 물론 구조적인 파손을 초래할 수 있을 뿐 아니라 이로 인한 인명 및 재정 손실은 매우 크다 [4]. 따라서 비행 중인 비행체에서의 액체 저장탱크의 동특성 거동은 연료 소모에 따른 연료량이 변하기 때문에 해석 자체가 매우 복잡하고 어려운 주제 중의 하나이다.

본 연구에서는 비행체의 액체 저장탱크를 모사하기 위한 액체 저장탱크와 가진 장치를 설계/제작하여 액체 저장탱크에서의 슬로싱 현상을 규명하고자 하였다. 이를 위해 다양한 가진 변화와 연료의 양에

따른 저장탱크 내에서의 액체의 모드 형상을 가시화하고 고유진동수를 측정하였다.

#### 2. 실험장치의 설계 및 제작

그림 1에는 액체 저장탱크와 가진 장치로 구성된 실험장치가 나타나 있다. 이때 액체 연료탱크는 내경이 244mm, 길이가 732mm의 실린더 형태로 되어 있으며 액체의 출렁임을 가시화 할 수 있도록 두께 8mm의 아크릴로 제작하였다. 가진 장치는 DC 모터, 커넥팅 로드, 크랭크축을 이용하여 속도 제어와 충분한 구동력을 얻을 수 있도록 설계/제작하였다. 초기의 실험장치에는 가진 주파수의 제어가 가능하도록 하기 위해 스텝 모터를 적용하였지만 가진 장치 자체의 반복적인 가속/감속의 제어가 용이하지 않다는 단점을 내포하고 있다. 또한 저장탱크를 구동시키기 위한 충분한 구동력을 얻을 수가 없을 뿐 아니라 저장탱크가 가진 장치의 레일에서 벗어나는 단점이 발생하여 저장탱크에서의 고유진동수 및 모드 형상을 측정하기가 어려웠다. 본 연구에 적용된 가진 장치는 저장탱크의 액체를 100% 채운 경우에도 충분한 구동력을 얻을 수 있을 뿐 아니라 스텝 모터

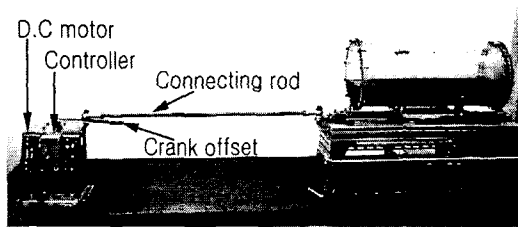


Fig. 1 Test equipment with liquid storage tank.

에서 얻기가 어려웠던 sine wave 형태로 가진 시킬 수 있다. 또한 커넥팅 로드와 크랭크축의 길이를 가변 시킬 수 있어 다양한 형태의 가진 조건을 얻을 수 있다.

### 3. 실험방법 및 결과

#### 3.1 실험방법

비행체의 연료 저장탱크를 모사하기 위해 제작된 저장탱크에 외부 가진을 작용시켜 저장탱크 내에서의 슬로싱 현상을 두 가지 측면에서 조사하였다.

첫째, 저장탱크 내에 저장된 액체의 양이 저장탱크의 동특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 액체의 양에 따른 저장탱크에서의 모드 형상과 고유진동수를 측정하였다. 둘째, 저장탱크의 가진 조건이 저장탱크의 동특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 가진 진폭에 따른 저장탱크에서의 모드 형상과 고유진동수를 측정하였다. 이때 저장탱크에 대한 다양한 가진 조건은 크랭크축의 길이를 변화시켜 얻었으며 저장탱크는 종 방향으로의 수평 가진되는 경우와 횡 방향으로의 수평 가진되는 경우를 고려하였다.

#### 3.2 실험결과

그림 2와 3에는 저장탱크 내에 30% 액체를 채운 상태에서 크랭크축의 길이를 20~60mm 사이에서 5mm 간격으로 변화시켜 가며 얻은 저장탱크에서의 1차 고유진동수와 2차 고유진동수가 나타나 있다. 이때 크랭크축의 길이가 늘어나면 저장탱크의 가진 진폭을 증가시키는 효과를 얻을 수 있다. 여기에서 보면 저장탱크의 가진 진폭이 증가할수록 1차 고유진동수는 감소하며 2차 고유진동수는 증가하는 양상을 나타낸다. 그러나 기존의 DC 모터는 저장탱크가 가진되는 진폭이 커지면 일정 진폭 이상의 2차 고유진동수를 측정하기는 어려워지기 때문에 고차 고유진동수를 측정하기 위해서는 고용량의 DC 모터가 요구될 것으로 판단된다.

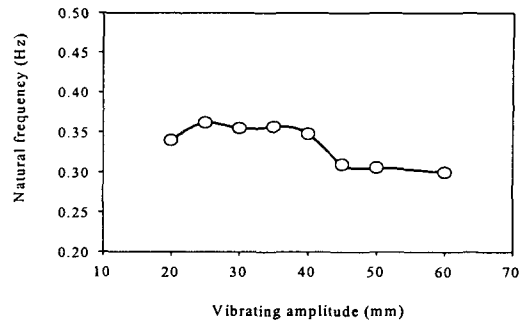


Fig. 2 1st natural frequencies of 30% filled case.

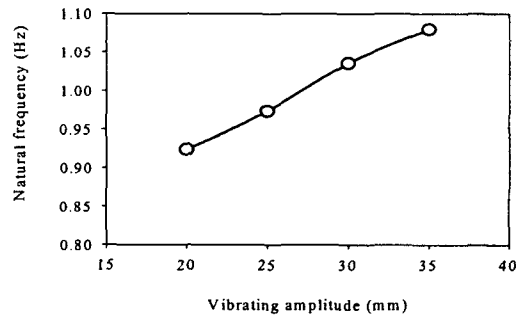


Fig. 3 2nd natural frequencies of 30% filled case.

그림 4와 5에는 크랭크 축 길이가 20mm인 경우의 저장탱크에서의 1차 모드 형상과 2차 모드 형상이 나타나 있다.

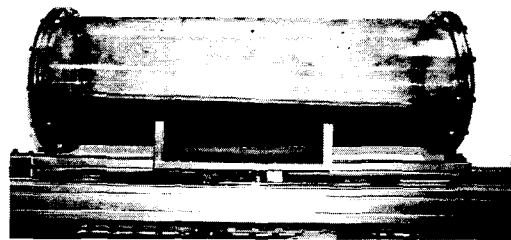


Fig. 4 1st mode at 20mm vibrating amplitude.

그림 6과 7에는 저장탱크에 액체가 50% 채워진 경우의 1차 고유진동수와 2차 고유진동수가 나타나 있다. 여기에서도 그림 2와 그림 3에서와 마찬가지로 저장탱크가 가진되는 진폭이 클수록 1차 고유진동수는 감소하며 2차 고유진동수는 증가하는 양상을 나타낸다. 저장탱크가 가진되는 진폭이 일정하면 액체의 양이 50%인 경우가 액체의 양이 30%인 경우보

다 고유진동수는 조금 높게 나타남을 알 수 있다. 그러나 저장탱크에서의 고유진동수는 액체의 양이 증가함에 따라 높아질 것으로 예상하였으나 그림 8에서와 같이 액체의 양이 60%까지는 액체의 양이 증가함에 따라 1차 고유진동수가 증가하는 양상을 나타내지만 액체의 양이 90%인 경우에는 액체의 양이 60%인 경우보다도 낮게 나타났다. 이에 대한 이유는 저장탱크의 기하학적 형상과 저장탱크 내의 액체와의 상호작용 때문으로 판단된다.

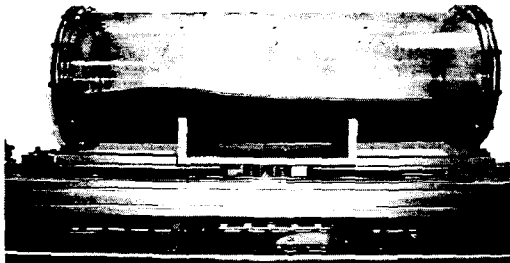


Fig. 5 2nd mode at 20mm vibrating amplitude.

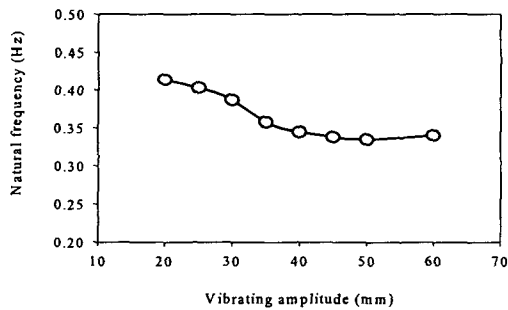


Fig. 6 1st natural frequencies of 50% filled case.

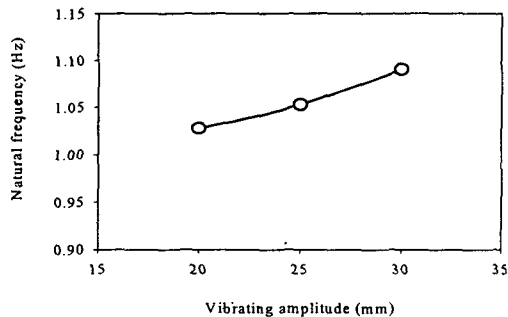


Fig. 7 2nd natural frequencies of 50% filled case.

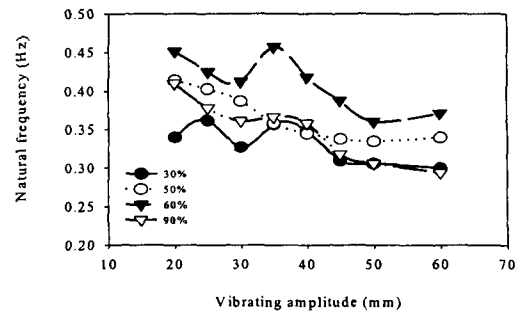


Fig. 8 1st natural frequencies with liquid content and vibrating amplitude.

연료탱크가 가진되는 가진폭의 거리에 변화를 주었을 때 발생하는 연료의 고유주파수 변화를 관찰하기 위하여 5mm 간격으로 길이를 변화시켜 실험을 행하여 보았으며 연료량의 변화에 따른 고유주파수 변화와 비교하여 보았다.

그림 9와 10에는 저장탱크가 가진되는 진폭이 20mm인 상태에서 액체의 양을 변화시키며 얻은 저장탱크에서의 1차 고유진동수와 2차 고유진동수가 나타나 있다. 여기에서도 마찬가지로 액체의 양이 많아지면 1차 고유진동수는 증가하다가 액체의 양이 60% 이상이 되면 오히려 고유진동수는 감소함을 나타낸다. 그러나 2차 고유진동수는 액체의 양이 증가함에 따라 선형적으로 증가되지만 액체의 양이 90%가 되면 고유진동수를 결정하기 위한 가시화에 어려움이 있었다.

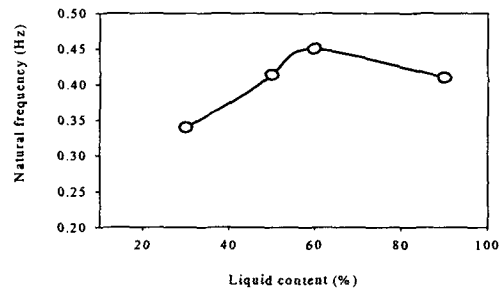


Fig. 9 1st natural frequencies with liquid content at 20mm vibrating amplitude.

그림 11과 12에는 횡 방향으로 수평 가진되는 저장탱크에서의 1차 고유진동수와 전형적인 모드 형상의 한 예가 나타나 있다. 여기에서 보면 1차 고유진동수는 종 방향으로 수평 가진되는 경우보다 높게 나타났다. 그러나 횡 방향으로 가진되는 경우는 종 방향으로 가진되는 경우보다 모드 형상을 관찰하

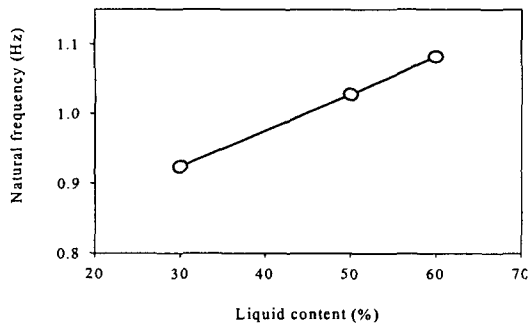


Fig. 10 2nd natural frequencies with liquid content at 20mm vibrating amplitude.

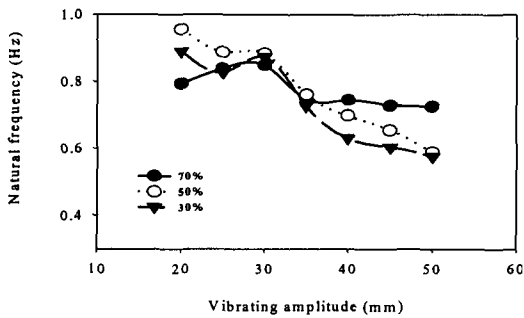


Fig. 11 1st natural frequencies with liquid content and vibrating amplitude.

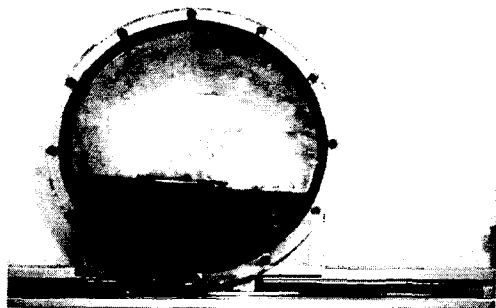


Fig. 12 1st mode of laterally horizontal vibration.

기가 용이하지는 않았으나 횡 방향으로 가진되는 경우도 종 방향으로 가진되는 경우와 거의 유사하게 저장탱크가 가진되는 진폭이 클수록 고유진동수는 감소하며 액체의 양이 많을수록 고유진동수는 증가한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 가진을 받는 액체 저장탱크의 슬로싱 현상을 조사하기 위해 모의 저장탱크와 가진 장치를 설계/제작하고 저장탱크가 가진되는 진폭 및 저장탱크에 채워진 액체의 양에 따른 저장탱크에서의 1차 고유진동수와 2차 고유진동수를 결정하였다. 이러한 실험장치 및 실험기법은 향후 액체 저장탱크에서의 구조안정성을 평가하고 저장탱크 내에서의 슬로싱 현상을 최소화하기 위한 연구에 적용될 수 있다.

#### 참고문헌

1. Cooper, R.M., "Dynamic of Liquids in Moving Containers," ARS Journal, Vol. 30, No. 8, 1960, pp. 725-729.
2. Abramson, H.N., ed: The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers, NASA SP-106, 1966.
3. Silveira, M.A., Stephens, D.G., and Leonard, H.W., "An Experimental Investigation of the Damping of Liquid Oscillations in Cylindrical Tanks," NASA TN D-715, 1961.
4. Mixson, J.S., Catherine, J.J., and Arman, A., "Investigation of the Lateral Characteristics of a 1/5-Scale Model of Saturn SA-1," NASA TN D-1593, 1963.