

사각단면 액체저장탱크에서의 슬로싱 거동 연구

윤성호*(금오공대 기계공학부), 이은동(금오공대 기계공학부), 박기진(한국철도기술원)

Study on Sloshing Behaviors in Liquid Storage Tank with Rectangular Cross Section

S.H. Yoon(School of Mech. Eng., Kumoh Nat. Inst. of Tech.), E. D. Lee(School of Mech. Eng., Kumoh Nat. Inst. of Tech.), and K. J. Park(Korea Railroad Research Inst.)

ABSTRACT

In this study, experimental procedures were suggested to investigate the sloshing behavior of a liquid storage tank subjected to inevitably external vibrating conditions. For this purpose, liquid storage tank with rectangular cross section was made of an acrylic resin for the visualization of liquid fluctuation. A specially designed vibrator was used to provide a specified vibrating condition to the liquid storage tank. Extrapolation technique was applied to determine sloshing natural frequency by using various sloshing frequencies at each vibrating displacement and liquid contents at a fixed vibrating frequency. Sloshing mode was also determined from continuous images of liquid fluctuation captured from a video camera. In addition, change in the height of the liquid free surface was measured by using a floating target and a laser displacement sensor. It is found that the suggested method can be applicable to identify the sloshing behavior of liquid storage tank with rectangular cross section.

Key Words : Sloshing behavior (슬로싱 거동), Liquid storage tank (액체저장탱크), Sloshing natural frequency (슬로싱 고유진동수), Sloshing mode (슬로싱 모드)

1. 서론

외부 가진에 의해 액체저장탱크의 내부에 저장된 액체에는 슬로싱이 발생하고 이러한 슬로싱 현상은 가진주파수가 액체저장탱크의 고유진동수에 근접하게 되면 매우 심해진다. 유도부기체계와 항공기 등에 장착된 연료탱크는 동특성이 서로 다른 유체-고체 연계 시스템을 갖는 액체저장탱크의 예로서 외부 가진을 받는 경우 심한 슬로싱 현상이 발생하면 비행체의 조정안정성 및 구조안전성에 좋지 않은 영향을 초래한다. 선진기술국에서는 우주산업의 개발과 더불어 유체-고체 연계성이 고려된 액체저장탱크의 모델링, 액체저장탱크에서의 슬로싱 평가, 슬로싱 현상의 최소화를 위한 액체저장탱크 설계기법 등에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 이들 연구들은 설계변수에 따른 슬로싱 거동의 정성적인 예측을 위해서는 좋은 지침이 되지만 문제의 단순화를 위해 행해진 많은 가정과 수치해석을 위해 적용된 입력값으로 인해 슬로싱 거동을 정량적으로 평가하기에는

어려움이 있다.

본 연구에서는 사각단면 액체저장탱크 및 가진변위와 가진주파수를 변화시킬 수 있는 가진장치를 제작하여 가진변위와 저장된 액체량에 따른 액체저장탱크에서의 슬로싱 진동수를 실험적으로 평가하였다. 또한 평가된 슬로싱 진동수들을 외삽함으로써 슬로싱 고유진동수를 평가하였으며 비디오 카메라를 통해 슬로싱 모드를 가시화하였다. 아울러 액체의 자유면에 부표와 레이저 변위센서를 설치하여 시간에 따른 액체의 자유면 높이 변화를 측정하였다.

2. 실험방법

2.1 실험장치의 구성

그림 1과 그림 2에는 각각 사각단면 액체저장탱크의 제원 및 가진장치가 나타나 있다. 액체저장탱크는 길이가 508mm, 폭이 152.4mm, 높이가 152.4mm로서 DC 모터에 감속기가 결합되어 있는

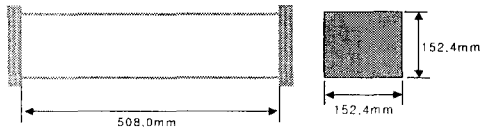


그림 1. 사각단면 액체저장탱크의 제원

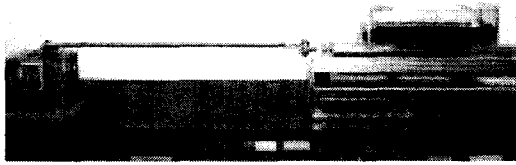


그림 2. 액체저장탱크 가진을 위한 실험장치

가진장치에 설치된다. 액체저장탱크는 5mm 간격의 구멍이 있는 크랭크 축에 연결되어 40~120mm 범위의 가진변위로 구동된다. 또한 액체저장탱크는 내부에 저장된 액체의 출렁임을 가시화하기 위해 아크릴 수지로 제작하였다.

2.2 슬로싱 고유진동수 및 슬로싱 모드 결정

일정 가진변위를 갖는 액체저장탱크에 가진주파수를 점차 증가시키면 특정 가진주파수에서는 액체가 회전되지 않고 출렁이는 양상이 나타난다. 액체저장탱크에서의 슬로싱 고유진동수를 결정하는 방법은 몇 가지가 제시되어 있지만 본 연구에서는 액체가 회전되지 않고 출렁이는 양상이 나타날 때의 가진주파수로 정의하였으며 그리고 이때의 출렁임 양상을 슬로싱 모드로 정의하였다.

그림 3에는 액체저장탱크에서의 슬로싱 고유진동수와 슬로싱 모드를 결정하기 위한 가진조건이 나타나 있다. 여기에서 보면 액체저장탱크는 액체의 자유면이 길이방향과 평행하도록 하여 길이방향을 따라 가진시켰으며 액체의 출렁임은 비디오 카메라로 촬영하여 가시화하였다.

2.3 액체의 자유면 높이 측정

그림 4에는 슬로싱 현상에 의한 액체의 자유면 높이를 측정하기 위한 실험장치가 나타나 있다. 여기에서 보면 액체저장탱크의 하단부에 수직한 두 축 사이에 반사면을 가진 부표를 설치하고 부표의 상부에 수직방향으로 레이저를 조사시켰다. 이때 부표는 액체의 자유면 변화에 따라 바닥면에 대해

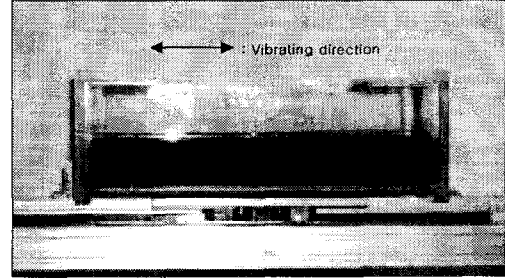


그림 3. 사각단면 액체저장탱크의 가진조건

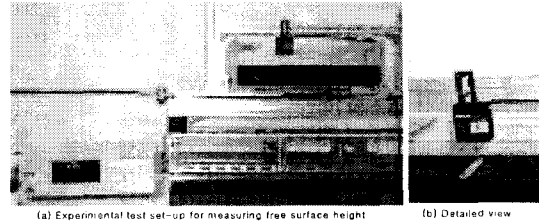


그림 4. 액체의 자유면 높이 측정장치

수직방향으로만 움직이도록 되어 있으며 액체의 자유면 높이 변화는 부표에서 반사되는 레이저 신호에 의해 결정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 슬로싱 고유진동수 및 슬로싱 모드 평가

그림 5에는 액체가 30% 저장된 액체저장탱크를 40~120mm 범위에서 10mm 간격으로 가진시키는 경우의 각 가진변위에 대한 1차 슬로싱 진동수가 나타나 있다. 이때 1차 슬로싱 진동수는 가진변위가 40mm인 경우 0.440Hz, 50mm인 경우 0.427Hz, 60mm인 경우 0.381Hz, 70mm인 경우 0.364Hz, 80mm인 경우 0.353Hz, 90mm인 경우 0.294Hz, 100mm인 경우 0.283Hz, 120mm인 경우 0.278Hz로서 가진변위가 증가함에 따라 점차 감소하는 양상이 나타난다. 1차 슬로싱 고유진동수는 각 가진변위에 따른 1차 슬로싱 진동수들을 외삽하여 비소가진변위에서의 1차 슬로싱 진동수로 정의하는 경우 0.618Hz로 나타난다.

그림 6에는 액체가 30% 저장된 액체저장탱크가 가진변위 40mm로 가진되는 경우 가진주파수의 변화에 따른 액체의 자유면 높이 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 가진주파수를 증가시키면 액체의 자유면 높이 변화는 점차 커지며 특정한 가진주

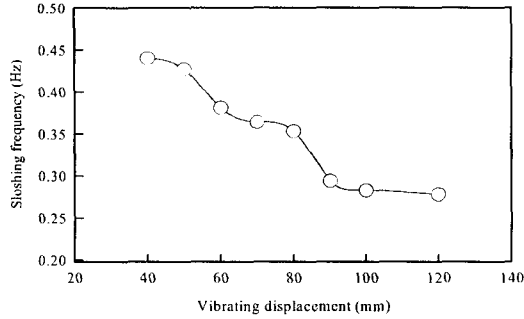


그림 5. 액체가 30% 저장된 액체저장탱크에서의 1차 슬로싱 진동수 변화

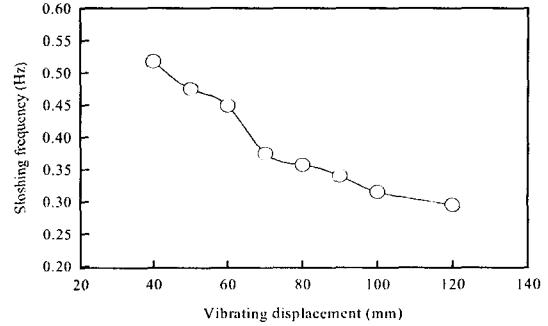


그림 7. 가진변위에 따른 사각단면 액체저장탱크의 1차 슬로싱 진동수 (액체량: 50%, 가진변위: 40mm)

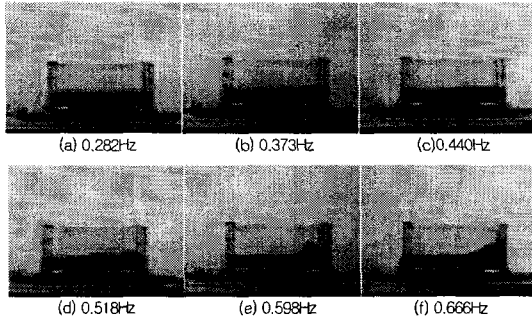


그림 6. 액체가 30% 저장된 액체저장탱크에서의 슬로싱 양상 변화

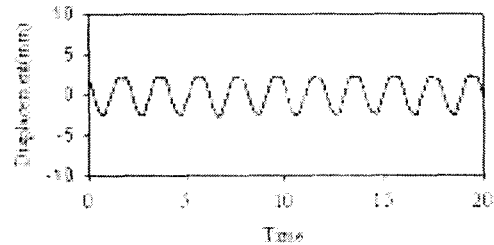
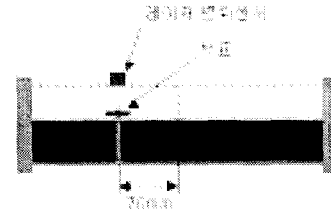


그림 8. 중앙부에서 70mm 떨어진 지점의 액체 자유면 높이 변화 (액체량: 50%, 가진변위: 40mm, 가진주파수: 0.518Hz)

파수 이상이 되면 자유면 높이 변화는 다른 양상을 나타낸다.

그림 7에는 액체가 50% 저장된 액체저장탱크에서의 가진변위 변화에 따른 1차 슬로싱 진동수가 나타나 있다. 이때 1차 슬로싱 진동수는 가진변위가 40mm인 경우 0.518Hz, 50mm인 경우 0.475Hz, 60mm인 경우 0.449Hz, 70mm인 경우 0.375Hz, 80mm인 경우 0.357Hz, 90mm인 경우 0.340Hz, 100mm인 경우 0.315Hz, 120mm인 경우 0.295Hz로서 가진변위가 증가함에 따라 점차 감소하는 양상이 나타난다. 또한 액체가 30% 저장된 경우와 동일한 방법을 적용하여 액체가 50% 저장된 경우의 1차 슬로싱 고유진동수를 구하면 1차 슬로싱 고유진동수는 0.783Hz로 얻어진다.

그림 8에는 액체가 50% 저장된 액체저장탱크를 가진주파수 0.518Hz로 가진시킨 경우 액체저장탱크의 중앙부에서 70mm 떨어진 액체의 자유면 지점에서 시간에 따른 액체의 자유면 높이 변화가 나타나 있다. 이때 가진주파수는 액체가 50% 저장된

액체저장탱크가 40mm의 가진변위를 갖는 1차 슬로싱 진동수이며 액체의 자유면 높이 변화는 부표의 상부에 장착된 레이저 변위센서로 측정하였다. 여기에서 보면 길이방향을 따른 액체저장탱크에서의 액체의 자유면 높이 변화는 액체저장탱크의 중앙부를 기준으로 일정한 진폭의 주기성을 갖는 직선 형태의 점대칭 sine 파형으로 나타난다.

그림 9에는 액체가 50% 저장된 액체저장탱크를 가진변위 40mm, 가진주파수 0.610Hz로 가진시킨 경우 액체연료탱크의 중앙부에서 70mm 떨어진 지점에서의 시간에 따른 액체의 자유면 높이 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 길이방향을 따른 액체저장탱크에서의 시간에 따른 액체의 자유면 높이는

4. 결론

사각단면 액체저장탱크의 모형을 이용하여 가진변위와 액체량에 따른 슬로싱 진동수를 결정하고 슬로싱 모드의 가시화, 그리고 시간에 따른 액체의 자유면 높이 변화를 측정하였으며 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 액체저장탱크에 가진주파수를 증가시키면 액체의 자유면 변위는 점차 높아지며 특정한 가진주파수를 경계로 아주 다른 슬로싱 양상이 나타남을 관찰할 수 있었다.

둘째, 슬로싱 고유진동수는 가진변위에 따른 슬로싱 진동수의 외삽을 통해 미소 가진변위에서의 슬로싱 진동수로 정의하면 저장된 액체량에 따라 슬로싱 고유진동수를 평가할 수 있다.

셋째, 슬로싱 고유진동수보다 낮은 가진주파수로 가진되면 액체 자유면 높이 변화는 길이방향을 따라 일정한 진폭의 주기성을 갖는 직선 형태의 점대칭 sine 파형으로 나타나지만 슬로싱 고유진동수보다 높은 가진주파수가 작용되면 큰 진폭의 출렁임을 갖는 불규칙적인 파형으로 나타난다.

후기

본 연구는 국방과학연구소 장기기초연구사업 (과제명: 슬로싱을 감안한 연료탱크 구조해석)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 윤성호, 박기진, 심국상, "액체연료저장탱크의 슬로싱 거동 평가기법," 2002년도 춘계학술대회 논문집, 한국정밀공학회, 한밭대학교, pp. 314-317, 2002.
2. McCarty, J. L. and Stephens, D. G., "Investigation of the Natural Frequencies of Fluids in Spherical and Cylindrical Tanks," NASA TN D-252, 1960.
3. Abramson, H. N., ed: The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers, NASA SP-106, 1966.

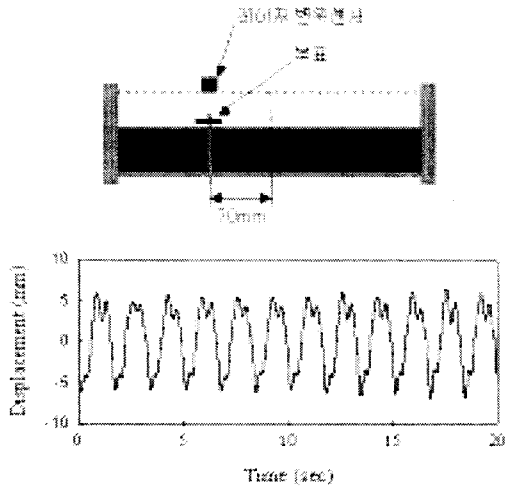


그림 9. 중앙부에서 70mm 떨어진 지점의 액체 자유면 높이 변화 (액체량: 50%, 가진 변위: 40mm, 가진주파수: 0.610Hz)

1차 슬로싱 진동수인 0.518Hz로 가진시킨 경우와는 달리 액체저장탱크의 중앙부를 기점으로 점대칭의 직선형태가 아니고 큰 진폭의 출렁임을 갖는 불규칙적인 파형으로 나타난다.

그림 10에는 액체가 50% 저장된 액체저장탱크를 가진변위 40mm, 가진주파수 0.518Hz로 가진시킨 경우 시간에 따른 액체 자유면의 높이 변화가 나타나 있다. 여기에서 보면 액체의 자유면 높이 변화는 액체저장탱크의 중앙부를 기점으로 점대칭의 주기성을 갖는 직선 형태로 나타나며 그림 8에 나타난 일정 진폭의 주기성을 갖는 sine 파형의 결과를 검증할 수 있는 정보를 제공한다.

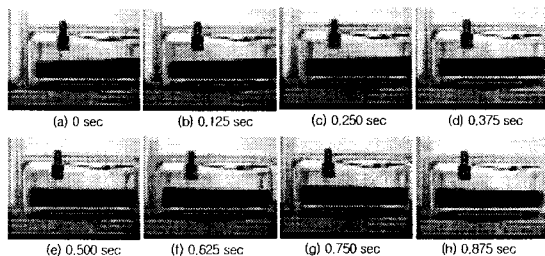


그림 10. 액체가 50% 저장된 액체저장탱크에서의 시간에 따른 액체 자유면 높이 변화 (가진변위: 40mm, 가진주파수: 0.518Hz)