

슬로싱 고유주기 해석 및 발사체의 슬로싱 효과 제어

Analysis of Natural Periods of Sloshing and Control of Sloshing Effect for a Launch Vehicle

°김동현*, 최재원**

* 부산대학교 기계공학부(Tel : 051-510-3203; Fax : 051-510-2470; E-mail : pnukdh@hyowon.pusan.ac.kr)
** 부산대학교 기계공학부(Tel : 051-510-2470; Fax : 051-510-2470; E-mail : choijw@hyowon.pusan.ac.kr)

Abstract : Recently in the design of fuel tanks(launch vehicle, ship, automobile) which transport a large amount of liquid in the cargo holds, the structural damage due to liquid-sloshing becomes an important problem. The impact pressure from sloshing is most violent when the liquid motion of a partially filled tank is in resonance with the motion of a system. In this paper, the sloshing natural periods in liquid tanks are estimated for partially filled tanks with various geometries. In addition to, controlled for a launch vehicle with liquid sloshing effect by PD controller and sloshing filter. The PD gain and sloshing filter parameter are determined by optimal algorithm.

Keywords : liquid sloshing, natural periods, attitude controller, optimal parameter, launch vehicle

1. 서론

직선 또는 회전운동을 하는 용기내의 유체 유동현상인 액체 슬로싱(sloshing)의 해석은 많은 공학문제에서 대단히 중요한 문제중의 하나가 된다. 이 현상은 발사체나 선박, 자동차등의 연료탱크는 물론 액체 화물을 수송하는 유조선, LPG/LNG선 및 일반 화물선의 액체 화물을 참고 그리고 지진으로 인한 석유 저장시설내의 유동현상 등에서와 같이 다양하게 나타나고 있다. 이러한 액체 슬로싱 효과는 탱크의 형상, 치수, 부재의 배치, 액체의 종류와 특성, 액체 화물의 높이, 탱크의 운동특성 등 많은 요인과 관련되어 있으며, 또한 무수히 많은 고유주기를 가지는 특성이 있으나 일반적으로 가장 긴 고유주기에 해당하는 주파수 근처에서 탱크가 운동할 때 가장 심한 경우가 야기된다. 슬로싱 효과는 운동특성에 따라 lateral sloshing, rotational sloshing, vertical sloshing 등으로 나누어지며, 이로 인한 하중은 탱크 벽에 작용하는 주기적인 압력에 의한 하중과 순간적인 충격압력에 의한 하중으로 나누어진다. 슬로싱으로 야기되는 이러한 하중들은 탱크의 천장이나 외벽에 손상을 주기도 하고 시스템의 자세를 불안정하게 만들기도 한다.

따라서, 액체 슬로싱 효과를 해석하고 억제하는 방법이 연구되어야 한다. 액체 슬로싱 효과는 유한요소법(finite element method), 경계요소법(boundary element method) 및 유한차분법(finite difference method) 등을 이용하여 수치적으로 해석하거나 단순진자운동으로 가정하여 해석하기도 한다[1-2]. 그리고 탱크 내에 배풀을 설치하거나 커다란 탱크를 여러 개의 작은 탱크로 나누어 액체 슬로싱 효과를 억제할 수 있으나, 이러한 방법은 시스템의 하중을 증가시키고 시스템의 구조에 영향을 주는 단점이 있다. 또한 제어기를 설계하여 액체 슬로싱 효과를 가지는 시스템을 제어하는 방법이 있는데, 주로 PD나 PID 등의 고전제어[3]에 국한되어 있다. 이러한 PD, PID 제어기는 액체 슬로싱 효과 제어시, 양의 실수 영역에 극점이 존재하는 문제점이 발생한다. 따라서, 본 논문에서는 불안정한 극점이 존재하는 문제점을 없애기 위해 슬로싱 필터와 PD 제어기를 사용하여 액체 슬로싱 효과를 제어하기로 한다.

본 논문에서는 먼저 액체 슬로싱 효과를 해석하기 위한 기초단

계로 다양한 형상(직사각형, 원통형, 구형)을 가지는 탱크에 대한 액체 슬로싱 고유 주기에 대한 이론해와 경험식을 구하였다. 그리고 액체 슬로싱 효과를 가지는 발사체에 대해 자세를 안정화시키는 자세제어기를 설계하였다. 자세제어기에는 발사체의 강체운동을 제어하는 PD 제어기와 슬로싱 운동을 제어하는 슬로싱 필터로 구성되며 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 확인하였다.

2. 탱크 형상에 따른 고유주기

액체 슬로싱에 의해 발생하는 진동의 고유주기는 선형이론을 적용하여 유도할 수 있다. 용기내의 유체는 강체벽 S 와 자유표면 F 에 의해 한정된다. 액체 슬로싱에 의해 야기되는 진동이 진폭이 작고 조화운동을 한다면, 속도포텐셜 ϕ 가 존재하는 보존력장이 존재하고 탱크내의 유체가 만족해야 할 지배방정식은 다음과 같은 Laplace 방정식으로 표현된다.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (1)$$

또한 강체벽에서는 다음과 같은 경계조건을 만족한다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S \quad (2)$$

그리고 자유표면에서의 선형화된 역학적 경계조건과 운동학적 경계조건을 조합한 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = \lambda \phi, \quad \lambda = \frac{\omega^2}{g} \quad \text{on } F \quad (3)$$

여기서, g 는 중력가속도이고 λ 는 고유진동수 파라미터로 정의되는 값이다. 한편 경계조건 식 (2)와 (3)을 만족하도록 미분방정식 (1)을 직접 푸는 대신 등가의 범함수(functional)를 도입하여 변분법을 적용하여 해를 구할 수 있는데, 특히 근사해를 구할 때 유용하다. 범함수는 탱크내 액체의 운동에너지와 위치에너지를 구하여 이를 Hamilton 원리에 적용하여 구할 수 있다. 유동이 시간에 대해 조화적(harmonic)이라고 가정하면 Hamilton 원리에서 범함수는 다음과 같다.