

배플을 적용한 액체연료탱크 내의 슬로싱 억제 기법 연구

Sloshing Minimization Technique in Liquid Fuel Tank By the Use of Baffle

박기진* · 윤성호**

Kee Jin Park, Sung Ho Yoon

Key Words : Sloshing minimization technique (슬로싱 억제 기법), Liquid fuel tank (액체연료탱크), Baffle (배플)

ABSTRACT

The sloshing phenomenon sometimes happens to occur in a liquid fuel 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 fuel tank and for the identification of natural frequencies and mode shapes by varying with various vibrating conditions. Measurements of the pressure and load acting on the side surface of vibrated liquid fuel tank are carried in order to identify the effects of sloshing phenomenon by using various types of baffles. The results show that the baffles can be used to minimize the sloshing phenomenon in liquid fuel tank effectively

1. 서 론

액체를 저장하고 있는 연료탱크가 외부에서 가진을 받게 되면 연료탱크 내부의 액체는 출렁임이 발생하게 된다. 이와 같은 연료탱크 내부의 액체가 출렁이는 현상을 슬로싱 현상이라 한다. 이와 같은 슬로싱 현상은 연료탱크 내부에 액체가 가득 찬 경우에는 잘 발생하지 않지만 액체가 줄어들거나 액체의 자유표면이 구속되지 않은 경우에는 작은 흔들림에도 쉽게 발생한다. 특히 외부 가진주파수가 저장된 액체의 고유진동수와 연료탱크의 고유진동수에 근접하게 되면 슬로싱 현상은 더욱 커지게 된다. 또한 유도무기체계나 비행 중인 비행체의 연료탱크에서 슬로싱 현상이 커지게 되면 연료탱크 벽면에는 큰 하중과 모멘트가 발생하게 되며 이로 인해 비행체의 구조안정성에 심각한 영향을 미쳐 비행체의 조정안정성을 상실하게 되는 극단적인 상황이 초래될 수 있다.⁽¹⁾ 1950년대 이후 미국 등과 같은 선진국에서는 비행체의 안정성과 제어에 크게 영향을 미치는 연료탱크 내부에서의 슬로싱 해석 및 동역학적 모델링에 대한

연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나 국내에서는 선진국과 비교할 때, 수치해석적 기법 뿐 아니라 실험적 기법을 통한 슬로싱 연구는 많지 않으며 특히 연료탱크에 저장된 연료탱크의 슬로싱에 대한 실험적인 연구는 매우 미흡한 실정이다.⁽²⁾⁻⁽⁴⁾

본 연구에서는 실험적 기법을 적용하여 액체가 저장된 연료탱크에서의 슬로싱 현상을 조사하고 슬로싱 현상을 억제할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다. 이를 위해 우선 비행체의 연료탱크를 모사한 모의 연료탱크를 설계/제작하고 다양한 조건의 외부 가진을 줄 수 있는 가진장치를 제작하였다. 실험적인 기법을 통해 연료량과 가진조건에 따른 슬로싱 거동을 조사하였으며 슬로싱 현상의 가시화를 시도하였다. 또한 슬로싱 현상으로 인해 연료탱크 벽면에서 발생하는 하중과 압력을 측정할 수 있는 방법을 제시하였으며 다양한 종류의 배플의 적용을 통해 배플에 의한 슬로싱 억제 효과를 조사하였다.

2. 실험장치 구성

2.1 연료탱크

그림 1에는 비행체의 연료탱크를 모사한 원통형 모의 연료탱크가 나타나 있다. 연료탱크는 연료탱크 내부에서의 슬로싱 현상을 가시화하기 위해 두께 8mm의 투명한 아크릴을

* 한국철도기술연구원 시스템엔지니어링팀
E-mail : coti@krti.re.kr
Tel : (031) 400-5576, Fax : (031) 400-5339

** 금오공과대학교 기계공학부

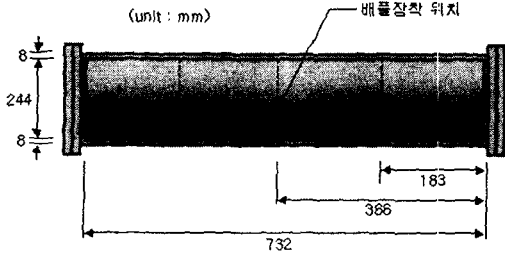


Fig.1 원통형 모의 연료탱크

사용하여 제작하였으며 이때 내경과 길이는 각각 244mm와 732mm로 되어 있다. 연료탱크 내부에는 슬로싱 현상을 억제하기 위해 장착될 배플의 위치는 연료탱크의 오른쪽 끝단을 기준으로 183mm, 366mm, 549mm이며 배플은 최대 3개까지 장착할 수 있도록 하였다.

2.2 가진장치

그림 2에는 모의 연료탱크를 구동시키기 위한 가진장치가 나타나 있다. 가진장치는 DC 모터(150W, 3000rpm), 감속기, 커넥팅 로드(1000mm), 크랭크 읍셋, 컨트롤러 등으로 구성되어 있다. 가진 진폭은 커넥팅 로드와 크랭크 읍셋을 이용하여 40mm~120mm까지 변화시킬 수 있도록 하였으며 가진주파수는 컨트롤러를 이용하여 원하는 주파수를 가할 수 있도록 하였다. 또한 연료탱크는 LM 가이드를 이용한 레일 위에 장착되도록 함으로써 연료탱크와 가진장치와의 마찰력을 최소화하였다.

3. 슬로싱 거동평가

3.1 슬로싱 고유모드 측정

본 연구에서는 (1) 연료탱크 내의 연료량 변화에 따른 슬로싱 거동 평가 (2) 가진 진폭의 변화에 따른 슬로싱 거동 평가의 두 가지를 수행하였다. 그림 3에는 연료탱크에 액체를 30% 채운 상태의 중방향 수평 가진에 대한 모드 양상이 나타나 있다. 이때 가진 진폭은 40mm로 고정하고 컨트롤러로 가진주파수를 서서히 증가시키며 슬로싱 모드 양상을 관

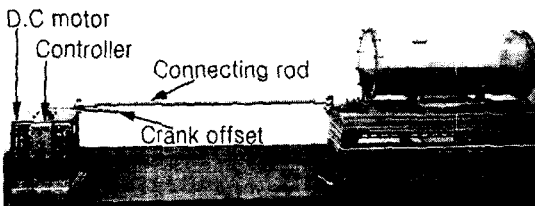


Fig.2 가진장치의 구성

찰하였다. 특히 디지털 캠코더를 이용하여 시간에 따른 슬로싱 모드 양상을 촬영함으로써 모드 양상의 정밀 분석이 가능하도록 하였다.

연료탱크에 외부 가진을 서서히 증가시키면 그림 4의 (a)~(c)와 같이 일정한 기울기를 가지는 좌우대칭 모드가 지배적으로 이때 (c)의 상태에서 가진주파수를 조금만 더 증가시키게 되면 (d)와 같이 심한 출렁임이 발생하게 된다. 본 연구에서는 이와 같이 심한 출렁임이 발생하기 직전의 좌우대칭 모드의 기울기가 최대가 되는 (c)의 모드 양상을 1차 슬로싱 고유 모드로 정의하며 이때의 가진주파수를 1차 슬로싱 진동수로 정의하였다. 연속하여 가진주파수를 점차 증가시키면 그림 4의 (d)~(h)와 같이 출렁임이 증가하는 양상이 나타나다가 특정한 가진주파수를 적용하게 되면 (i)와 (j)와 같은 좌우 대칭의 모드 양상이 나타난다. (i)와 (j)와 같은 모드 양상을 2차 고유 모드로 정의하고 이때의 가진주파수를 2차 슬로싱 진동수로 정의하였다.

3.2 슬로싱 진동수 측정

연료량과 가진 진폭의 변화에 따른 연료탱크 내에서의 슬로싱 현상을 조사하기 위해 연료량은 30%, 50%, 60%, 70%, 80%인 경우를 고려하였으며 가진 진폭은 40mm, 60mm, 80mm, 100mm, 120mm인 경우를 고려하였다.

그림 4에는 연료량과 가진 진폭의 변화에 따른 1차 슬로싱 진동수가 나타나 있다. 여기에서 보면 액체량이 증가할수록 1차 슬로싱 진동수는 증가하는 양상을 보이지만 액체량이 일정 한도를 넘게 되면 오히려 감소하는 양상이 나타난다. 그러나 1차 슬로싱 진동수는 연료탱크 내의 액체량에 무관하게 가진 진폭이 증가할수록 감소하는 양상을 나타낸다.

그림 5에는 연료량 변화와 가진 진폭의 변화에 따른 2차 슬로싱 진동수가 나타나 있다. 여기에서 보면 1차 슬로싱 진동수와는 달리 2차 슬로싱 진동수는 연료량과 가진 진폭이 커질수록 증가하는 양상을 나타낸다.

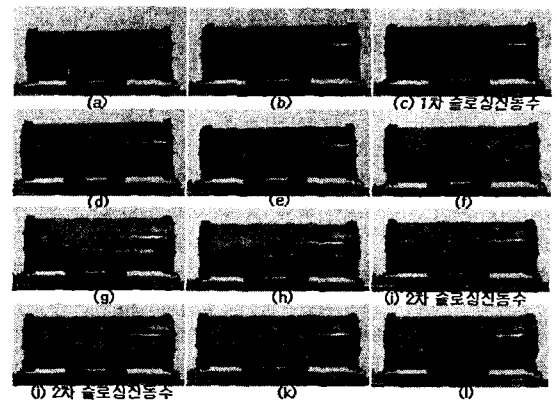


Fig.3 슬로싱 진동수의 결정

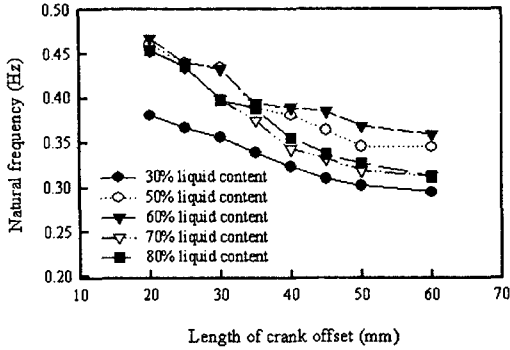


Fig.4 1차 슬로싱 진동수의 변화

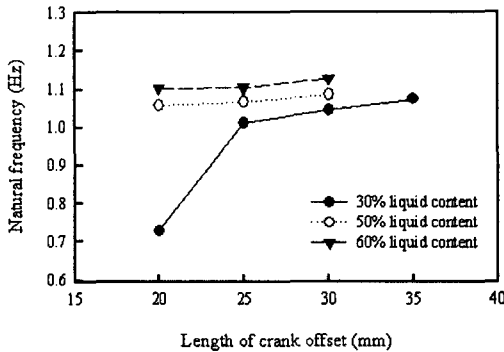


Fig.5 2차 슬로싱 진동수의 변화

4. 슬로싱 완화 기법

4.1 슬로싱 하중 측정

그림 6에는 연료탱크에 외부 가진이 작용된 경우 연료탱크의 벽면에 미치는 슬로싱 하중을 측정하기 위한 실험장치가 나타나 있다. 실험조건은 가진 진폭을 40mm로 고정시킨 상태에서 연료량을 30%, 50%, 70%로 변화시켰다. 여기에서 보면 연료탱크의 벽면에는 저용량의 로드셀 (50lb)을 장착하여 슬로싱 현상으로 인한 미세한 하중신호를 측정할 수 있도록 하였다. 이러한 경우 연료탱크 벽면에서 측정된 로드셀 신호는 가진장치의 구동력, 연료탱크의 관성력, 연료탱크 내부의 유체에 의한 슬로싱 하중 등 여러 가지 신호가 복합적으로 혼합되어 있기 때문에 연료탱크 벽면에 미치는 순수한 슬로싱 하중만을 측정하기는 용이하지 않다. 따라서 본 연구에서는 연료탱크 내의 슬로싱 하중만을 측정하기 위해 일정한 가진주파수로 가진되는 연료탱크를 순간적으로 정지시켜 연료탱크 내의 출렁임만을 유발시켜 줌으로써 연료탱크의 벽면에서의 슬로싱 하중을 측정하는 방법을 적용하였다.

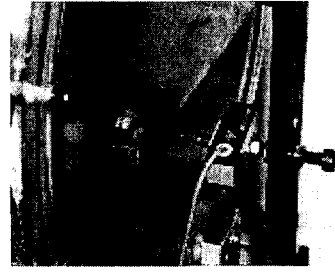


Fig.6 슬로싱 하중 측정장치

그림 7에는 1차 슬로싱 진동수로 가진되는 연료탱크를 순간적으로 정지시킨 경우 측정된 슬로싱 하중신호가 나타나 있다. 이때 연료량은 30%, 50%, 70%인 경우를 고려하였다. 여기에서 보면 연료탱크 내의 벽면에는 외부 가진이 정지된 후에도 하중신호가 지속적으로 측정되었으며 연료량이 30%인 경우보다 연료량이 50%, 70%인 경우가 더 큰 하중신호를 나타냄을 알 수 있다.

4.2 배플을 이용한 슬로싱 하중완화

그림 8은 슬로싱 현상을 억제하기 위해 연료탱크 내에 장착한 배플의 형상이 나타나 있다. 여기에서 보면 Type 1은 중공형 배플로서 외경이 244mm, 내경이 122mm로 제작되었으며, Type 2는 Type 1의 중공형 배플에 직경이 20mm인 원공이 12개 형성되어 있다. Type 3은 Type 1의 중공형 배플에서의 중공과 동일한 유효면적을 갖도록 배플에 직경이 20mm인 원공이 29개 형성되어 있다. Type 4는 Type 3과 거의 유사한 개념을 적

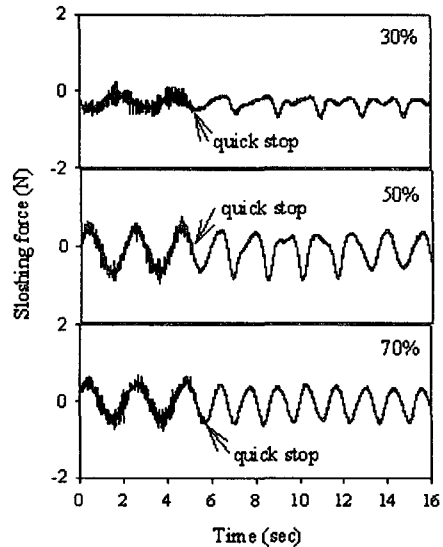


Fig.7 순간 정지 후의 슬로싱 하중신호

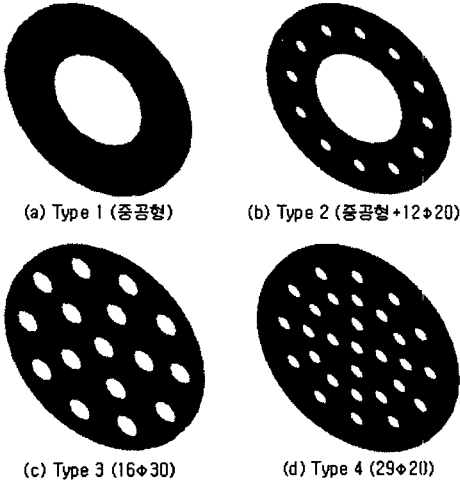


Fig.8 배플의 형상

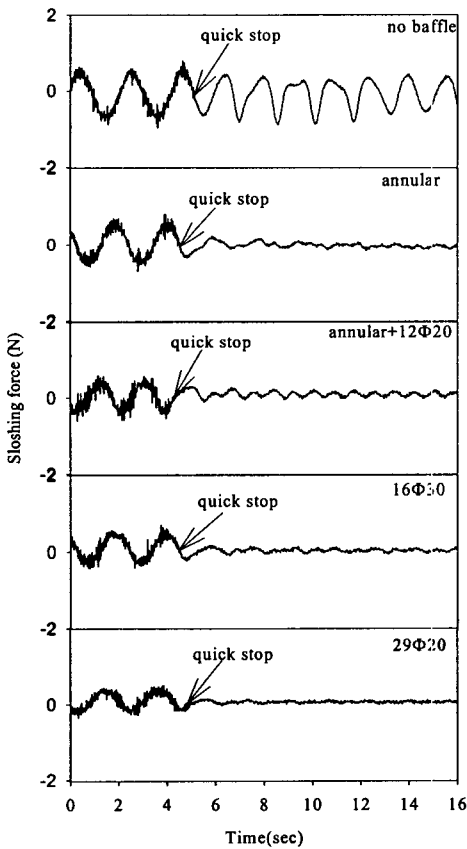


Fig.9 배플에 의한 슬로싱 완화 효과

용하여 제작하였으며 직경이 30mm인 원공이 형성되어 있다.

그림 9에는 한개의 배플이 장착된 연료탱크를 순간 정지시킨 경우의 슬로싱 억제 효과가 나타나 있다. 이때 액체량은 50%, 가진주파수는 1차 슬로싱 진동수인 0.461Hz, 가진 진폭은 40mm로 고정시켰으며 실험조건은 (1) 배플이 장착되지 않은 경우 (2) Type 1 배플 (중공형)이 장착된 경우 (3) Type 2 배플 (중공형+12φ20)이 장착된 경우 (4) Type 3 배플 (16φ30)이 장착된 경우 (5) Type 4 배플 (29φ20)이 장착된 경우 등을 고려하였다. 여기에서 보면 배플의 형상에 따라 슬로싱 억제 효과는 조금씩 다르게 나타나지만 순간 정지 후의 연료탱크의 벽면에 형성된 슬로싱 하중은 배플을 적용한 경우 급속히 감소하는 양상을 나타낸다.

4. 결론

본 연구에서는 외부 가진을 받는 경우 액체를 저장하고 있는 연료탱크 내부에서의 슬로싱 현상을 실험적 기법을 통해 규명하였다. 이를 위해 슬로싱 현상을 가시화할 수 있도록 아크릴로 모의 연료탱크를 설계하고 다양한 외부가진을 가할 수 있는 가진장치를 제작하였으며 연료탱크 내의 슬로싱 모드의 가시화를 통해 다양한 가진조건에 따른 슬로싱 진동수 및 슬로싱 모드 양상을 평가하였다. 또한 연료탱크 벽면에서의 슬로싱 하중을 측정하기 위한 실험적 기법을 제시하고 배플을 적용하는 경우 연료탱크 내의 슬로싱 현상을 현저하게 억제시킬 수 있음을 관찰할 수 있었다. 본 연구에서 제시된 연구결과는 슬로싱 영향을 최소화할 수 있는 연료탱크의 설계에 활용 가능할 것으로 판단된다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) 조진래 등, 2000, "슬로싱을 감안한 연료탱크 구조해석, 연구보고서", 국방과학연구소, TECD-413-001118.
- (2) H.N. Abramson, 1966, The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers, NASA SP-106.
- (3) K.C.C. Smith, Jr., 1948, The Effect of Fuel Sloshing on the Lateral Stability of a Free-flying Airplane Model, NACA RM-L8C16.
- (4) G.C. Manos, 1989, "Study of the Behavior of Cylindrical Liquid Storage Tanks When Subjected to Lateral Loads", PVP Vol.157, pp.75~81.