

# 독립형 화물창 내부의 슬로싱 하중에 대한 실험적 연구

김상엽<sup>1</sup>·안양준<sup>2</sup>·김용환<sup>1,†</sup>·허주호<sup>3</sup>·정태석<sup>3</sup>·이철호<sup>3</sup>·김도현<sup>3</sup>  
서울대학교 조선해양공학과<sup>1,2,3</sup>  
STX조선해양<sup>3</sup>

## Experimental Study on Sloshing Loads in a B-Type Independent Tank

Sang-Yeob Kim<sup>1</sup>·Yangjun Ahn<sup>2</sup>·Yonghwan Kim<sup>1,†</sup>·Joo-Ho Heo<sup>3</sup>·Taeseok Jeong<sup>3</sup>·Chul-Ho Lee<sup>3</sup>·Do-Hyun Kim<sup>3</sup>  
Depart of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University<sup>1,2,3</sup>  
STX Offshore and Shipbuilding Co<sup>3</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

In this paper, an experimental study on sloshing problems in an independent B-type tank of STX Offshore and Shipbuilding Co. is described. Recently STX Offshore and Shipbuilding Co. introduced a new design of an independent B-type tank in order to reduce sloshing impact loads on LNG CCS. This tank has many internal members, so that sloshing flow and the resultant hydrodynamic loads are very different from those in typical membrane tanks. In this study, a series of sloshing experiment have been carried out for 1/50 scale model, and the main characteristics of sloshing load on the independent tank are observed. The properly scaled internal members such as swash bulkhead, center bulkhead and stringers have been installed in the test tank model, but sloshing pressures are measured on the tank walls only. The forced excitation signals have been generated by using the predicted ship motion in irregular sea states. The characteristics of sloshing loads on this tank have been observed in different filling levels with various heading angles, and sea states. In this paper, some key findings from the model tests are discussed.

**Keywords** : Sloshing(슬로싱), B-Type Independent tank(B형 독립형 탱크), Sloshing model test(슬로싱 모형실험), LNG CCS(액화천연가스 화물창), Hydrodynamic impact loads(충격 동압력)

## 1. 서론

LNG 운반선, LNG-FPSO, FSRU 등의 LNG선 제품군의 개발에 있어 슬로싱 충격하중을 고려한 LNG 화물창의 설계 및 구조 안전성 평가에 대한 기술개발 요구가 증대되고 있다. 이는 최근 진행 중인 LNG 화물창의 대형화, 부분적재와 황천상태에서의 운항 가능성 등과 같은 이유에 기인한다. LNG 화물탱크의 설계에 있어서 슬로싱 해석기술은 가장 중요한 핵심요소기술 중 하나로 잘 알려져 있으나, 기술적인 어려움으로 인해 현재까지 국제적으로 통용되는 표준화된 해석 및 평가절차가 완성되지 못한 상황이다. 특히, 최근 선박이나 해양구조물의 대형화가 급격히 진행되며, 실선 탱크에서 슬로싱으로 인한 손상으로 판단되는 사례들도 보고되고 있는 상황이다 (Gavory, 2009).

슬로싱 하중을 추정하기 위한 여러 노력들은 1970년대에 들어 다수의 LNG 운반선이 건조되면서 발생하기 시작한 손상사례들이 보고되면서부터 본격적으로 진행되었다. 그동안 많은 수치기법들

이 적용되어 왔음에도 불구하고, 아직 수치계산을 적용한 압력에 측은 신뢰성에 의문들이 있고, 또한 정확도가 높은 압력에측을 위한 적용에는 앞으로도 상당기간의 시간이 필요한 것으로 보인다. 따라서 아직까지는 선주나 선급들이 모형실험에 기반을 둔 해석을 요구하고 있으며, 약 1/50 축척의 슬로싱 모형실험이 현재까지는 슬로싱 해석의 대표적 방법으로 알려져있다 (ABS, 2006; DNV, 2006; LR, 2009).

최근 들어, 국내 조선소들은 기존의 GTT가 특허를 보유한 화물창 모델에서 벗어나 자체의 화물창 모델을 개발하기 위해 노력을 기울이고 있고, 일부 조선소들은 자체의 화물창 모델을 개발하여 발표한 바 있다. 특히, 새롭게 개발되는 화물창 모델 중 독립형 화물창(independent tank B-type) 모델은 화물창 내부에 많은 내부재들이 배치됨으로 인하여 큰 슬로싱 입력의 발생자체가 억제되는 효과를 가져올 것으로 기대하고 있다. 스트링거 혹은 제수격벽(swash bulkhead) 등의 내부재가 있는 화물창의 경우, 구조 강도 관점에서는 충격적 슬로싱 동압력 이외에도 주기적인 슬로싱 하중에 의한 피로파괴가 주요한 고려사항이 될 수 있다.

그러나 Song (2012)을 제외하고는 아직까지 독립형 화물창의 슬로싱 하중에 관한 연구를 찾아보기가 어렵다. Song (2012)은 독립형 화물창에 대한 2차원 슬로싱 모형 실험을 통하여 내부재에 대한 피로강도해석을 수행하였다. 이 연구에서는 탱크 내벽 뿐 아니라 내부재에 작용하는 압력까지 계속하였다는 점에서 큰 의미가 있다. 그러나 내부재의 압력 측정을 위해 부재 두께의 축척비가 제대로 고려되지 못하였고, 3차원 효과를 살펴볼지 못하였다는 한계점이 존재한다.

본 연구에서는 STX조선해양에서 설계한 독립형 B형 화물창에 대한 슬로싱 해석을 위해 축소 모형시험을 수행하였다. 이를 위하여 축척비 1/50의 3차원 모형탱크를 제작하고 Froude 상사법칙을 적용하여 화물창의 운동을 재현하였다. 그리고 다양한 적재 조건, 선수각, 해상상태 조건에 대하여 실험을 수행하고, 내부유동의 관측 및 충격압력신호의 형상, 압력의 크기 비교 등 다양한 방법으로 각 조건에서 탱크 내벽에 나타나는 슬로싱 특성을 살펴 보았다. 또한 기존에 수행된 내부재를 고려하지 않은 슬로싱 모형실험 결과와의 비교를 통해 연구를 통해 독립형 화물창에서 나타나는 슬로싱 하중에 대한 주요한 특성을 확인하였다.

## 2. 실험 기법

### 2.1 운동 플랫폼과 모형탱크

모형실험은 서울대학교 슬로싱 실험실에서 수행되었다. 실험은 모형탱크를 설치한 운동플랫폼을 가진하여 탱크 내부유동을 관측하고 탱크 내벽에 발생하는 충격압력신호를 계속하는 일련의 과정으로 수행된다. 탱크를 가진시키기 위하여 최대적재하중 5톤의 스튜어트 운동 플랫폼을 사용하였다 (Fig. 1).

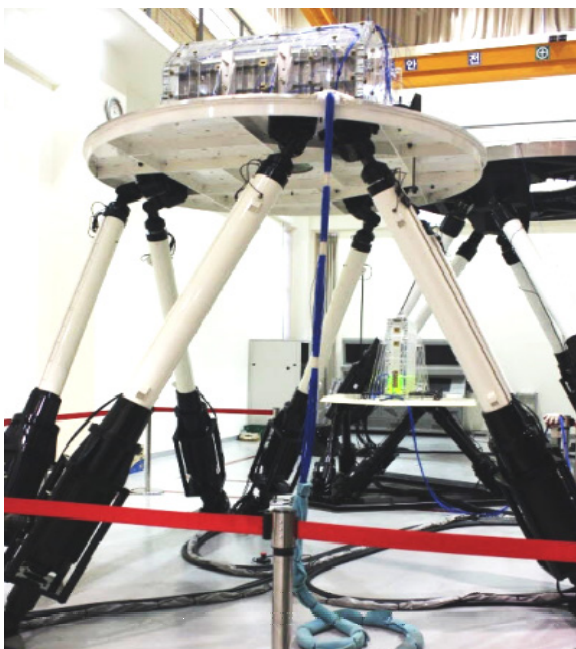
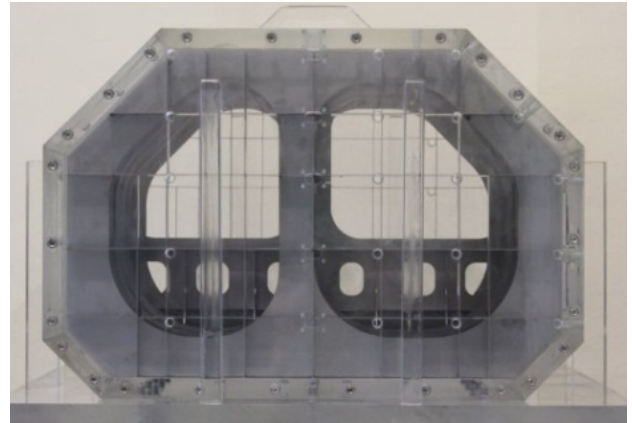
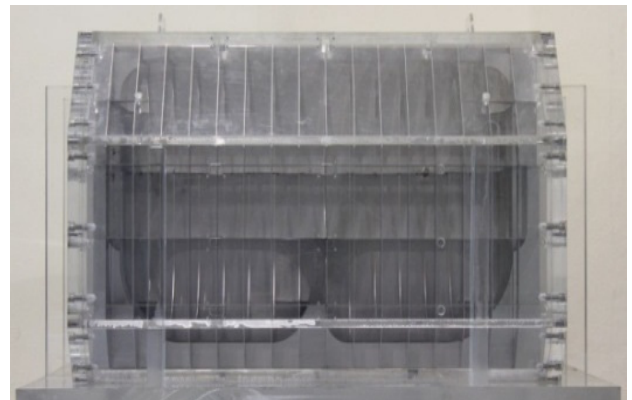


Fig.1 Motion platform with a 3D model tank

본 연구에서 고려된 모형탱크는 STX조선해양에서 설계한 independent tank B-type 모델로서, Fig. 2에 제작된 모형 탱크의 모습을 나타내었다. 이 모형탱크는 1/50 축척비의 3차원 모형으로, 높이/길이 비는 0.57이고, 폭/길이 비는 0.87 이다. 탱크는 35mm 두께의 아크릴로 제작하여 내부 유동을 관측할 수 있으면서도 유탄성 효과를 배제할 수 있도록 하였다. 본 모형은 아크릴로 이루어진 탱크 내부에 복잡한 형태의 내부재가 수직, 수평방향으로 교차되어 있는 형태로 구성되어 있다.



(a) Front view



(b) Side view

Fig. 2 3D model tank

### 2.2 압력 계측

탱크 내벽에 발생하는 충격압력을 계측하기 위하여 KISTLER 211B5센서를 사용하였다. 211B5 센서는 ICP(Integrated Circuit Piezoelectric) 방식을 적용하는 센서로서 계측직경은 5.54mm, 최대 계측압력은 약 700kPa이다. 운동플랫폼에 의해 탱크가 동요되면 내부유동에 의해 탱크 내벽에 충격압력이 발생하고, 이러한 동압력은 압력센서를 통하여 계측된다. 압력센서로부터 전송되는 전기적 신호는 DAQ보드를 거쳐 디지털 신호로 변환되어 20kHz의 샘플링 주파수로 저장된다 (Kim, et al., 2012). 슬로싱 실험과 관련하여 수행된 기존의 많은 연구에서는 20kHz의 샘플링 주파수가 사용되어 왔으며 (Maillard, et al., 2009; Ryu, et

al., 2011; Ahn, et al., 2012; Nitin, et al., 2010), 본 실험에서도 동일한 샘플링 주파수를 적용하였다.

Fig. 3은 입력계측 위치를 탱크 도면에 표시한 것이다. 각 탱크면에서 격자모양으로 나타낸 가는 실선은 내부재를 의미한다. Fig. 4는 이러한 압력센서과 케이블이 탱크 벽면에 설치된 모습을 보여주고 있다. 모든 압력센서는 탱크의 내벽에 설치하였다. 본 실험에서는 내부재의 두께 및 부재 사이의 간격, 센서 크기 등의 인자들이 고려되어 내부재에 직접적으로 압력센서를 설치하지는 못하였다.

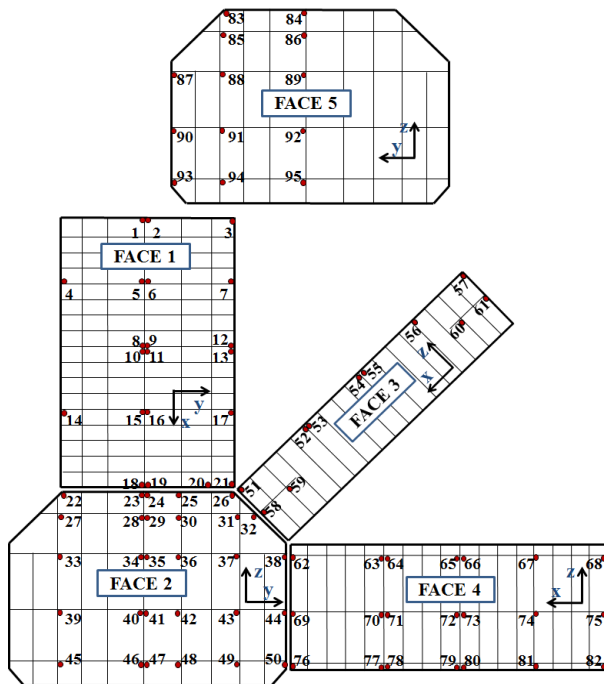


Fig. 3 Sensor configuration of 3D tank

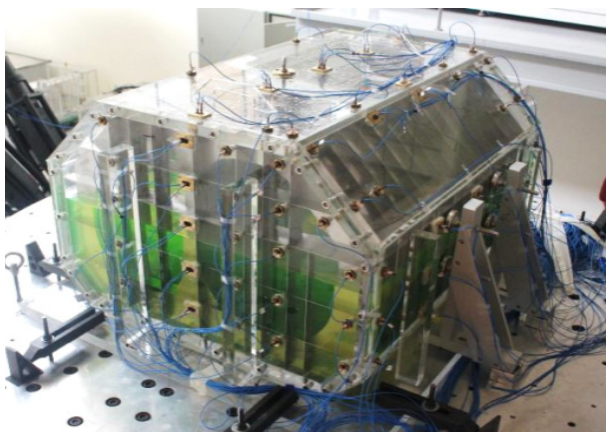


Fig. 4 Installation of sensor and cable

### 2.3 실험조건

본 연구에서 수행된 실험조건을 Table 1에 정리하였다. 대상 선박은 210K m3급 LNG선이며 19.5knots로 운항하는 조건으로

한정하였다. 동일한 모형탱크에 대하여 0.10H, 0.15H, 0.50H, 0.80H, 0.95H의 다섯가지 적재율 조건에서 실험을 수행하였다.

Table 1 Description of test conditions

Filling depth [H]	Heading angle [°]	Tz [sec]	Hs [m]
0.95H	180/150	9~15	40year wave for 180/150° 1year wave for 90°
0.80H	180/150	9~15	
0.50H	180/150	9~15	
0.15H	150/90	6~15	
0.10H	150/90	6~15	

\*Tz: 부호변환파랑주기(zero-crossing period), Hs: 유의파고 (significant wave height)

여기서 H는 탱크의 높이를 의미한다. 높은 적재율의 경우 180°, 150° 선수각을, 낮은 적재율의 경우 150°, 90° 선수각을 고려하였다. 해상상태의 경우 4~6가지 조건을 적용하였으며, 선수각 180°, 150° 조건의 경우 북대서양 40년 주기파를, 90° 조건의 경우 1년 주기파를 고려하였다. 총 40가지 조건에 대한 실험이 수행되었고, 각 조건마다 실선기준 5시간동안 압력을 계측하였다.

### 3. 통계해석 기법

실험 결과를 분석하기 위해서 압력 데이터로부터 통계해석에 사용할 충격압력신호를 추출하였다. 충격압력신호 추출에는 peak-over-threshold방법(이하 POT 방법)을 사용하였다. POT 방법은 압력신호 중 정해진 압력 역값(threshold pressure) 이상의 값이 계측된 신호를 우선적으로 선별하고 추출시간간격 (sampling time window) 내에서 가장 큰 충격압력신호를 최종적으로 추출하는 방법이다. Fig. 5에 POT 방법을 통한 슬로싱 충격 압력신호 추출의 예를 나타내었다. 본 연구에서 사용한 압력역값과 추출시간 간격은 모형스케일 기준값으로 각각 2.0 kPa과 0.2 초이다.

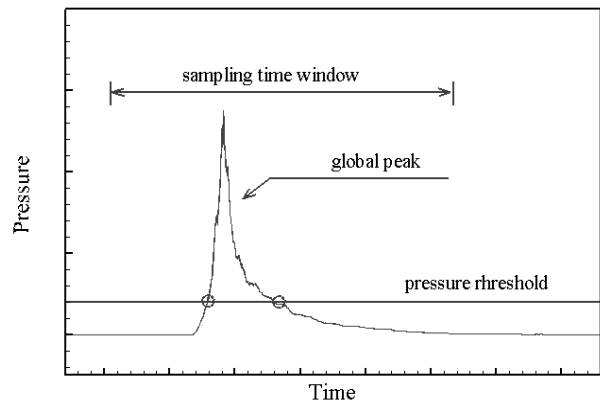


Fig. 5 Definition of global peak

본 연구에서는 슬로싱 충격압의 확률분포를 3변수 Weibull 분포함수에 근사하였다. 삼변수(Three parameter) Weibull 분포함수의 누적확률밀도함수는 다음과 같다.

$$F(x) = 1 - \exp(-[(x - \delta)/\beta]^\gamma) \quad (1)$$

이때 변수  $x$ 의 범위는  $\delta \leq x < \infty$ 이다, 여기서  $\delta$ 는 위치모수,  $\beta$ 는 척도모수,  $\gamma$ 는 형상모수이며, 각 모수는 모멘트법을 이용하여 구할 수 있다. 모멘트법은 실험으로부터 얻은 충격압력신호 샘플의 압력값의 평균, 분산, 와도를 분포함수의 평균, 분산, 와도와 일치시키는 방법으로 모수를 추정하는 방법이다. 분포함수 근사를 통해 각 실험조건에서 나타는 슬로싱 충격압의 분포확률을 구하고 이를 바탕으로 유압력값을 도출하였다.

본 연구에서는 모형 실험의 분석 값을 실선 기준으로 확장하기 위하여 사용하는 Froude 척도법칙을 사용하였다. Froude 척도법칙에 의하면 모형 계측 압력과 실선 압력 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\left(\frac{p}{\rho g L}\right)_r = \left(\frac{p}{\rho g L}\right)_m \quad (2)$$

여기서  $p$ 는 압력,  $\rho$ 는 유체 밀도,  $g$ 는 중력 가속도, 그리고  $L$ 은 탱크길이이며 첨자  $r$ 과  $m$ 은 각각 실선 및 모형을 표시한다. Froude 척도법칙을 이용하면 시간은 기하학적 스케일의 제곱근에 비례하고 압력은 기하학적 스케일에 비례하게 된다. 물론, Froude 척도법칙은 실선적용을 위해서는 실제보다 큰 예측결과를 주는 것으로 알려져 있으나, 현재 실선확장을 위한 적절한 척도법칙이 알려져 있지 않는 상황이므로 보수적인 관점에서 Froude 척도법칙을 적용하였다.

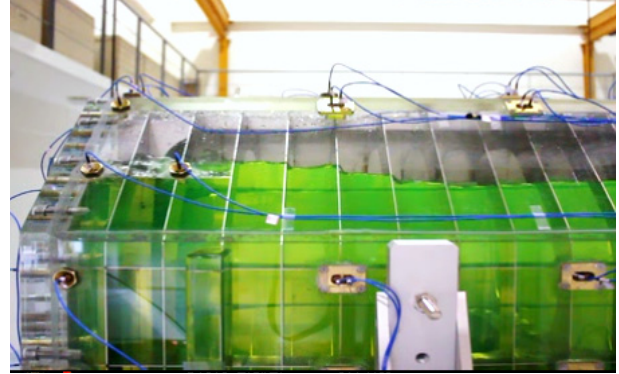
## 4. 실험 결과

### 4.1 내부유동 관측결과

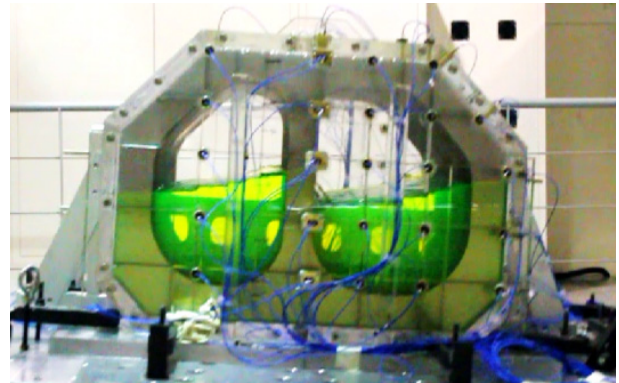
실험 중 탱크 내부에서 발생한 슬로싱 유동을 촬영한 경우를 Fig. 6에 도시하였다. 사실 이러한 독립형 탱크의 경우, 탱크의 운동으로 인해 발생하는 내부 슬로싱 유동의 정도가 크지 않다. 이는 크게 두가지의 주요한 영향에 기인하는데, 우선 여러 내부 구조물들이 유체의 이동을 방해하고 많은 감쇄효과를 주는 영향이 크다. 또한, 내부재의 존재로 인하여 슬로싱 유동의 고유주기 변화가 변하고 이로 인해 유동의 특성이 변화하기 때문이기도 하다.

Fig. 6(a)의 경우와 같이 높은 적재의 경우에는 중앙선 격벽이 유동이동의 큰 역할을 하여, 내부 유동은 Fig. 6(b)와 같이 폭이 좁은 두 개의 독립적인 화물창에서 나타나는 것과 유사한 모습을 보였다. 이로 미루어 볼때 중심선 격벽에서도 탱크 내벽에서 계측된 압력과 유사한 수준의 슬로싱 충격압이 나타날 것으로 추측

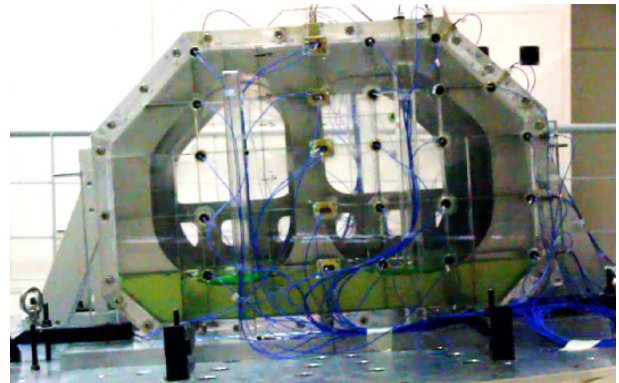
된다. Fig. 6(c)와 같이 적재율이 낮은 경우에는 탱크 바닥에 위치한 내부재로 인해 0.15H와 0.10H의 낮은 적재를 조건인 경우 유동을 정도 높게 관측하는것이 쉽지 않았으며 큰 슬로싱 유동 현상은 나타나지 않았다.



(a) Filling=0.95H, Heading =180°, Tz=12.0sec



(b) Filling=0.50H, Heading =150°, Tz=12.0sec



(c) Filling=0.15H, Heading =90°, Tz=7.5sec

Fig. 6 Snapshots of 3D model tests

### 4.2 입력신호의 특성

Fig. 7은 모형실험에서 나타난 대표적인 충격압력 신호를 나타낸 것이다. 충격압력 신호 특성에 따라 압력 신호 그래프의 시간폭은 두 가지로 나타내었다. 긴 충격시간을 갖는 신호의 경우 그 그래프의 시간폭은 0.5초, 짧은 충격시간을 갖는 신호의 경우 0.2초 이다.

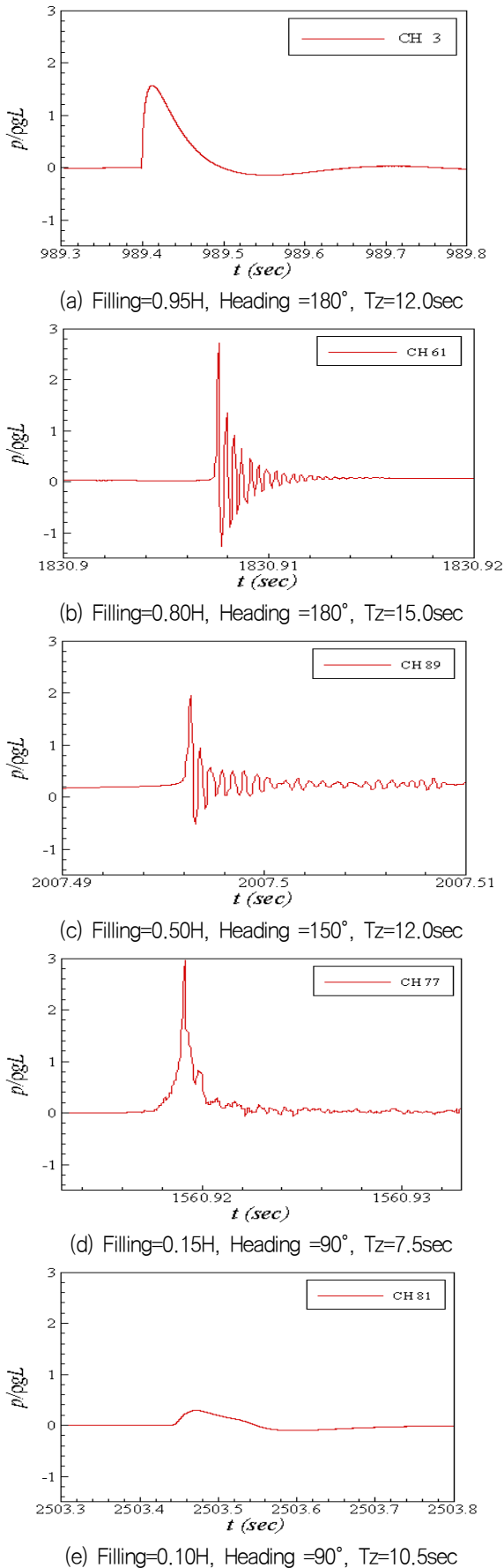


Fig.7 Representative pressure signals

적재율 0.95H 실험의 경우 탱크 상부 뚜껑의 모서리 부근에서 큰 압력이 관찰되었다. 특히 충격압 신호는 압력의 작용 시간이 상대적으로 길며 진동하지 않는 형상을 보여준다. 이는 짧은시간 동안 발생하는 특징을 갖는 슬로싱에 의한 충격과는 차이가 있으며 계속된 압력센서가 위치한 지점의 수두 변화에 기인한 것으로 보인다. 이와 달리 적재율 0.80H 실험의 경우 milli-second 단위의 짧은 작용시간을 갖는 충격압력신호가 나타났으며 전반적으로 진동하는 형태의 신호가 자주 나타났다. 영점을 기준으로 진동하는 형태의 신호는 충격당시 발생하는 air pocket이나 air bubble의 영향으로 pocket의 크기에 따라 진동주기는 달라질 수 있다 (Faltinsen & Timokha, 2009).

적재율 0.50H 실험 또한 0.80H 실험과 유사한 특징을 갖는 충격압력이 나타났으며 그 크기가 상대적으로 작았다. 적재율 0.15H 실험의 경우 선수각 90° 조건에서 큰 충격압력이 나타났다. 신호의 형태는 전반적으로 높은 적재율의 실험들과는 달리 진동하지 않는 경향을 보였다. 일반적으로 air pocket의 생성없이 유체가 탱크벽면에 직접적으로 충격을 가할 경우 이와같은 진동하지 않는 형태의 신호가 나타난다. Fig. 7은 실험 중 자주 발생하는 대표적인 압력의 형상을 나타낸 것일 뿐, 모든 신호들이 동일한 형상을 띠는 것은 아니다. 예를 들어 0.15H 적재율 실험에서 Fig. 7(c)와 같은 진동하는 압력신호가 나타날 수 있다.

적재율 0.10H 실험의 경우 0.15H 실험과는 충격압력신호의 크기와 형태가 확연하게 달랐다. 충격압신호의 크기가 매우 작고 드물게 나타났으며, 그 형태는 가장 높은 적재율인 0.95H 실험과 유사하였다. 위의 결과로부터 독립형 화물창에서 나타나는 슬로싱 현상은 적재율에 따라 민감하게 변화할 수 있음을 알 수 있다.

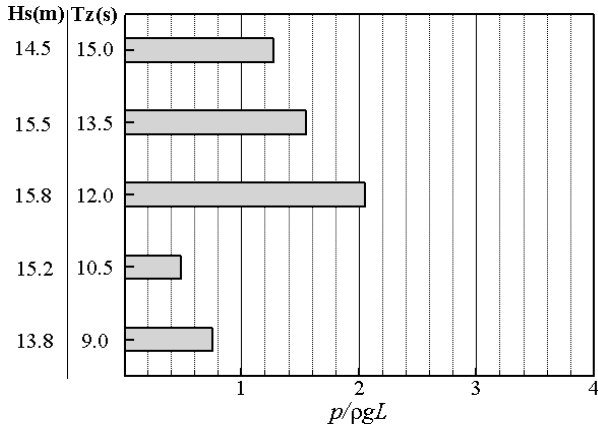
### 4.3 통계해석 결과

#### 4.3.1 높은 적재율 조건: 0.95H, 0.80H

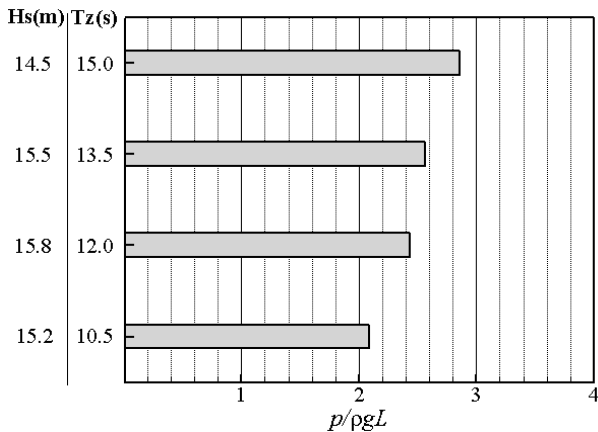
적재율 0.95H와 0.80H에 대한 실험 결과를 Fig. 8에 막대그래프로 나타내었다. 그래프에서 막대의 크기는 실험에 사용된 95개 센서 전체로부터의 통계해석을 수행함으로써 도출된 반복주기 (return period) 3시간의 최대 충격압력을 의미한다. 압력값은 무차원화하여 나타내었다. 적재율 0.95H 실험의 경우 짧은 Tz에서 상당히 작은 수준의 슬로싱 압력이 나타났다. 가장 큰 충격압이 나타난 조건은 Tz=12sec, Hs=15.8m 이며, 이후 Tz가 증가함에 따라 충격압력은 줄어드는 경향을 보였다. 이와는 달리 적재율 0.80H 실험의 경우 Tz가 길어질수록 점점 더 큰 충격압이 나타났다. Tz가 15sec 보다 긴 조건에서 더 큰 충격압이 나타날 가능성도 있지만 본 연구에서 실험조건으로 고려한 북대서양파에는 적합하지 않으므로 더욱 긴 주기를 갖는 파에 대해서는 실험을 수행하지 않았다. 이를 바탕으로 독립형 화물창의 경우 동일 선수각 조건이라 할지라도 큰 충격하중이 발생하는 해상 상태가 적재율에 따라 크게 달라질 수 있음을 알 수 있다.

적재율 0.80H 실험에서 가장 큰 충격압력이 나타난 하나의 조

건을 선정하고, 선정된 조건 실험에 대하여 계측 위치에 따른 충격압의 크기를 비교하여 보았다. Fig. 9(a)는 비교에 사용한 계측 지역을 A, B, C로 구분하여 탱크에 표시한 그림이며, Fig. 9(b)는 각 지역에서 나타나는 3시간 최대 충격압의 크기를 비교한 것이다.



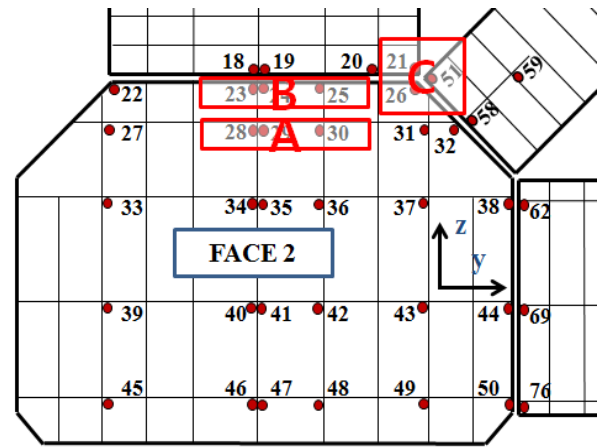
(a) Filling=0.95H, Heading=180°



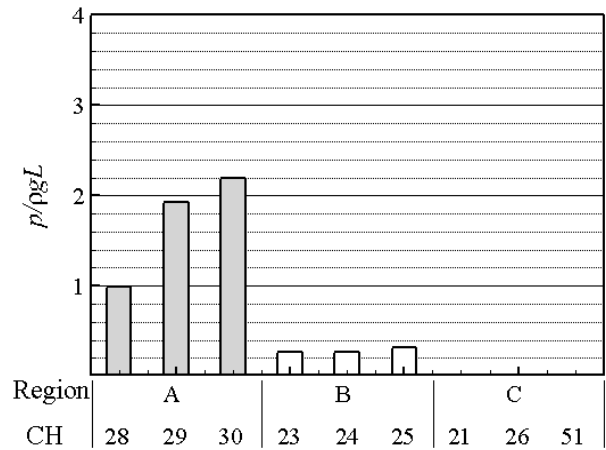
(b) Filling=0.80H, Heading=180°

Fig. 8 3hours probable extreme pressure [high filling condition]

탱크 높이방향으로 크게 차이나지 않는 A 지역과 B 지역에서 발생하는 충격압의 크기는 현저하게 달랐다. 이는 A 지역과 B 지역 사이에 위치한 내부재로 인하여 탱크내 유동이 상당부분 가로막혀서 많은 경우 탱크 상부까지 유체가 달지 않았기 때문이다. 0.80H의 적재높이는 큰 충격압력이 나타난 B지역에 배치한 압력 센서보다 조금 낮게 위치한다. C 지역의 경우 기존에 수행된 내부재가 없는 탱크의 슬로싱 모형 실험에서 0.80H 혹은 유사한 적재율에서 큰 충격압력이 나타난 위치이다 (Ryu, et al., 2009; Kim, et al., 2012). 하지만 본 연구에서 사용된 내부재가 있는 독립형 탱크의 경우 C 지역에서 충격압력이 전혀 발생하지 않았다. 이를 통해 독립형 화물창의 경우 슬로싱 하중에 대한 구조강도 산정에 있어 중점적으로 분석 해야 하는 위치가 기존의 내부재가 없는 탱크와는 다르다는 것을 알 수 있다.



(a) Location of particular region (A, B, C)

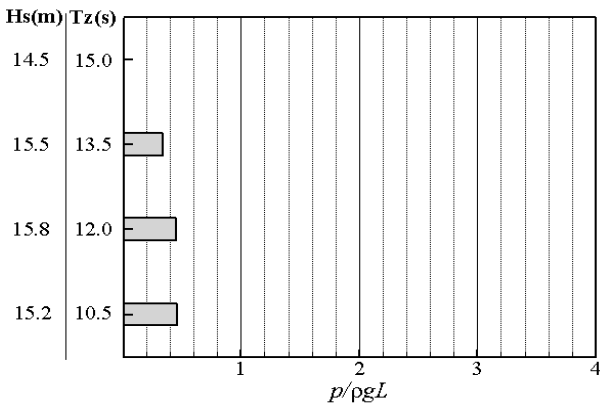


(b) 3hours probable extreme pressure

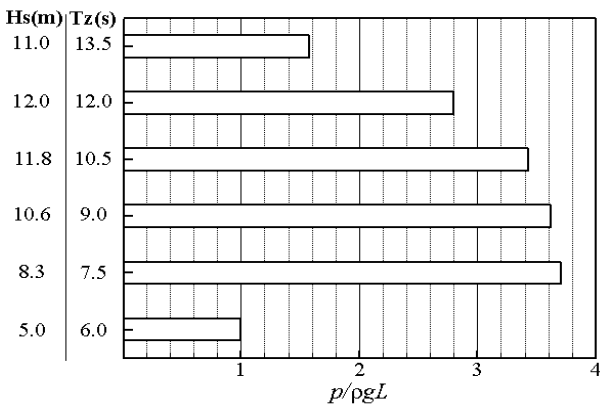
Fig. 9 Comparison of sloshing load for different region [Filling=0.80H, Heading=180°, Tz=15.0sec]

#### 4.3.2 낮은 적재율 조건: 0.15H, 0.10H

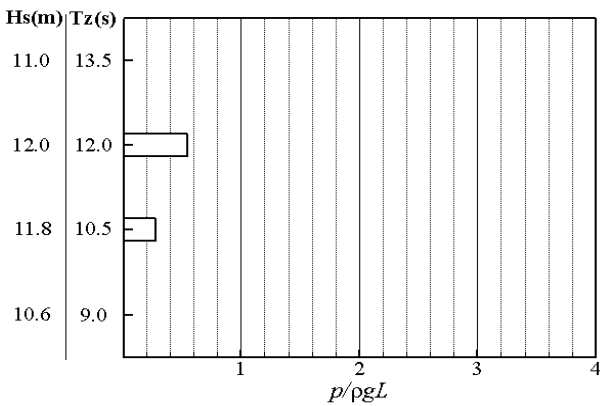
0.15H과 0.10H의 적재율 조건에 대한 실험 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 적재율 0.15H 실험의 경우 선수각 조건에 따라 발생하는 슬로싱 충격압력이 큰 차이가 있었다. 선수각 90° 조건에서 슬로싱 충격압력의 크기는 Tz가 짧아짐에 따라 점차 증가하다가 Tz=7.5sec의 아주 짧은 특성주기의 파에서 최대값을 보였다. 기존의 연구에 따르면 탱크의 내부재를 고려할 경우 고려하지 않은 경우에 비하여 공진주기가 길어져 더욱 긴 주기의 파에서 큰 슬로싱 하중이 나타나는 것으로 알려져있다 (Hamlin, 1990). 그럼에도 불구하고 90° 조건 실험에서 짧은 주기의 Tz에서 큰 슬로싱 충격이 나타난 것은 탱크의 중앙에 위치한 중심선격벽으로 인하여 탱크의 폭 방향 공진주기가 짧아졌기 때문이다. 적재율 0.15H 실험과는 달리 유사한 수심인 0.10H 실험의 경우 충격압력이 거의 나타나지 않았다. 위의 결과로부터 독립형 화물창에서 나타나는 슬로싱 현상은 적재율에 따라 민감하게 달라질 수 있음을 알 수 있다.



(a) Filling=0.15H, Heading=150°



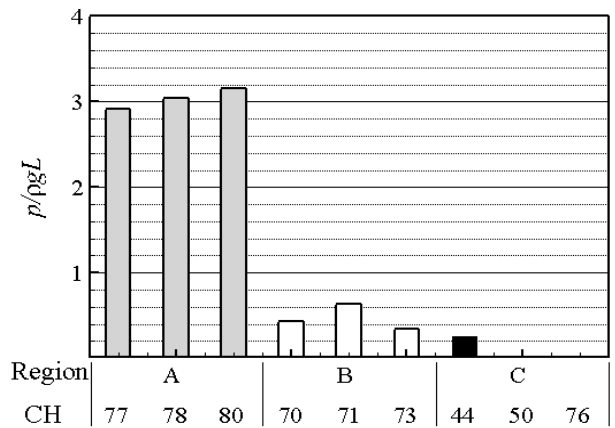
(b) Filling=0.15H, Heading=90°



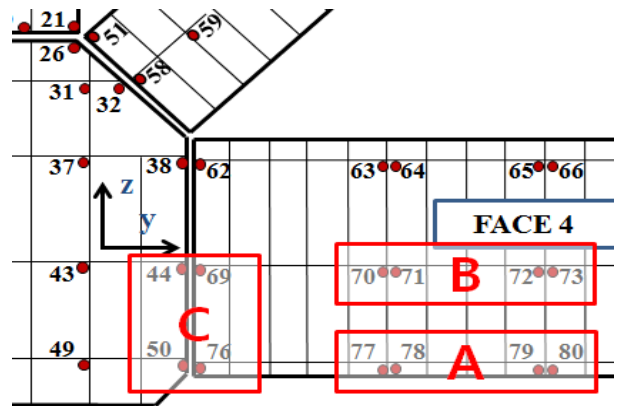
(c) Filling=0.10H, Heading=90°

Fig. 10 3hours probable extreme pressure [low filling condition]

적재율 0.15H 실험에서 가장 큰 충격압력이 나타난 하나의 조건에 대하여 계측 위치에 따른 충격압의 크기를 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 높은 적재율 실험과 마찬가지로 낮은 적재율 조건 실험에서도 압력센서가 위치한 높이에 따라서 발생하는 충격압의 크기가 현저한 차이를 보였다. 가장 큰 충격압이 나타난 B지역의 압력센서는 0.15H 적재 높이보다 조금 아래에 위치하고 있다. A 지역과 C 지역에서 나타나는 충격압력 비교결과를 통해 수직방향 높이 뿐만 아니라 수평방향의 위치에 따라서도 발생하는 충격압의 크기가 민감하게 달라짐을 알 수 있다.



(a) 3hours probable extreme pressure



(b) Location of particular region

Fig. 11 Comparison of sloshing load for different region [Filling=0.15H, Heading=90°, Tz=7.5sec]

본 연구에서 충격압력이 거의 나타나지 않은 C 지역은 내부재가 없는 탱크의 슬로싱 모형 실험의 낮은 적재율 조건에서 큰 충격압력이 나타난 위치이다 (Fillon, et al., 2011, Kim, et al., 2012). 하지만 본 연구에서 고려된 내부재가 있는 독립형 탱크의 경우 C 지역에서 충격압력이 전혀 발생하지 않았다.

### 4.3.3 충격압력의 크기에 대한 고찰

Table 2은 본 연구에서 수행된 독립형 화물창의 슬로싱 모형 실험 중 각 적재율별로 가장 큰 슬로싱 충격 압력이 발생한 조건과 나타난 충격압의 크기를 정리한 것이다. 0.95H, 0.80H, 0.50H 등의 높은 적재율에서는 180° 혹은 150°의 선수각에서 큰 슬로싱 충격압이 발생하지만 이보다 낮은 적재율에서는 대부분 90°의 선수각조건에서 큰 슬로싱 충격압이 나타났다. 가장 큰 슬로싱 충격압이 나타난 조건은 적재율 0.15H, Tz=7.5sec, Hs=8.3m 조건으로 3시간 기준 최대 충격압은 무차원화된 값 기준 3.71이다.

내부재가 없는 화물창에서 나타나는 슬로싱 충격압력과의 크기 비교를 통해 독립형 화물창에서 나타나는 슬로싱 충격압 감소

효과를 살펴보았다. Table 3은 서울대학교에서 수행한 145K m3 LNG선 화물창에 대한 슬로싱 모형실험 요약결과이다(AMEC, 2010). Table 2와 마찬가지로 수행된 모형실험 중 각 적재율별로 가장 큰 슬로싱 충격 압력이 발생한 조건과 나타난 충격압의 크기를 정리하였다. 두 실험 모두 공통적으로 0.15H 적재율에서 가장 큰 충격압이 나타났으나 충격압력의 크기에 있어 큰 차이가 있었다. 독립형 화물창에서 나타난 충격압력의 크기가 내부재가 없는 화물창에 비하여 절반 이하로 작았다.

위의 결과를 통해 독립형 화물창을 실선에 적용할 경우 확실한 슬로싱 억제효과가 나타날 것으로 예상할 수 있다. 하지만 지속적인 슬로싱 충격으로 인한 내부재의 피로파괴 가능성을 고려할 필요가 있다. 최근 독립형 화물창 내부재의 피로강도에 대한 슬로싱 하중에 대한 연구가 2차원 탱크 모형실험을 통해 수행된 바 있으나(Song, 2012), 3차원 탱크에 대한 연구는 소개된 바 없기 때문에 체계적 실험 연구가 절실한 상황이다.

Table 2 Statistical pressures in present model tests

Filling[H]	0.95	0.80	0.50	0.15	0.10
Heading[°]	180	180	150	90	90
Tz[sec]	12	15	12	7.5	10.5
Hs[m]	15.8	14.5	15.8	8.3	11.8
Normalized 3hours extreme pressure	2.06	2.86	1.53	3.71	0.28

Table 3 Statistical pressures in the conventional membrane tank model tests

Filling[H]	0.95	0.80	0.50	0.15	0.10
Heading[°]	135	90	90	135	135
Tz[sec]	9.5	7.5	9.5	9.5	9.5
Hs[m]	12.63	8.1	11.05	12.63	12.63
Normalized 3hours extreme Pressure	7.60	6.54	5.20	7.82	4.33

## 5. 결론

본 연구에서는 STX 조선해양에서 설계한 B-type 독립형 LNG 탱크에 대한 1/50 축척비의 3차원 슬로싱 모형실험을 수행하였다. 탱크 벽면 전반에 걸쳐 압력센서를 분포하여 다양한 적재율과 해상조건에서 나타나는 슬로싱 압력을 계측하고 이에 대한 통계해석을 수행하여 하중을 추정하였다. 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구에서 적용된 해상상태와 독립형 화물창에서는 심각한 내부유동이 발생하지 않았다. 이러한 내부유동은 직접적으로 슬로싱 충격압이 작아지는 효과를 가져왔다.

높은 적재율 상태에서는 해상상태에 따라 충격하중의 크기가

다소 민감한 계측결과가 관찰되었다. 이러한 민감도는 화물창의 구조강도 안정에 있어 중요한 요인으로 작용할수 있다.

0.15H 이하의 낮은 적재율 조건에서는 적재율에 따라 슬로싱 충격압의 크기가 민감하게 변화함이 관찰되었다. 즉, 0.15H 적재율에서는 전체 실험결과에서 가장 큰 슬로싱 충격압이 발생하였으나, 0.10H 조건에서는 충격압이 거의 발생하지 않았다.

큰 슬로싱 충격압의 발생위치에 있어 내부재가 없는 화물창과 독립형 화물창의 경우에 차이가 있음이 관찰되었다. 따라서, 독립형 화물창에 대한 슬로싱 해석의 기준이 되는 부재 혹은 위치의 결정은 보다 엄밀하게 이루어져야 한다.

본 연구에서는 탱크 내벽에서의 충격압력만을 측정하였다. 화물창에 작용하는 유체 하중을 보다 엄밀히 살펴보기 위해서는 향후 내부재에 작용하는 충격압을 측정할 필요가 있다.

## 후 기

본 연구는 STX 조선해양(주)의 ‘Independent LNG Tank of STX 내 슬로싱 하중 추정을 위한 모형실험’ 과제로 진행되었으며, 지식경제부에서 지원하는 국가산업원천기술개발사업(과제번호: 10033670)을 통해 구축된 슬로싱 실험장비를 활용하였습니다. 두 기관의 지원에 감사드리며, 서울대학교 공학연구소와 해양시스템연구소의 행정지원에도 감사드립니다.

## References

- Advanced Marine Engineering Center(AMEC), 2010. *Consortium Project for Sloshing Experiment, Project Report*, Seoul: Seoul National University.
- American Bureau of Shipping(ABS), 2006. *Guidance notes on strength assessment of membrane-type LNG carriers*. Guidance Note. American Bureau of Shipping: Houston.
- Ahn, Y. Kim, S.Y. Kim, K.H. Lee, S.W. Kim, Y. & Park, J.J., 2012. Study on the Effect of Density Ratio of Liquid and Gas in Sloshing Experiment. *Proceedings of the 22th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, June 17–22 2012, pp.311–317.
- Det Norske Veritas(DNV), 2006. *Sloshing Analysis of LNG Membrane Tanks. Classification Notes No30.9*, Det Norske Veritas: Oslo.
- Faltinsen, O.M. & Timokha, A.N., 2009. *Sloshing*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Fillon, B. Diebold, L. Henry, J. Derbanne, Q. Baudin, E. & Parmentier, G., 2011. Statistical Post-Processing of Long-Duration Sloshing Test. *Proceedings of the 21th International Offshore and Polar Engineering*



Conference, Maui, Hawaii, June 19–24 2011, pp.46–53.

Gavory, T. & de Seze, P.E., 2009. Sloshing in Membrane LNG Carriers and its Consequences from a Designer's Perspective. *Proceedings of the 19th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan, June 21–26 2009, pp.13–20.

Hamlin, N.A., 1990. Liquid Slosh Loading in Slack Ship Tanks; Forces on Internal Structure & Pressures. *A Ship Structure Committee Report No SSC-336*, Ship Structure Committee: Washington, D.C.

Kim, S.Y. Kim, K.H. & Kim, Y., 2012. Comparative Study on Model-Scale Sloshing Tests, *Journal of Marine Science and Technology*, 17(1), pp.47–58.

Lloyd's Register(LR), 2009. Sloshing Assessment Guidance Document for Membrane Tank LNG Operations. *Sloshing Assessment Guidance Document for Membrane Tank LNG Operations*. Lloyd's Register: London.

Maillard, S. & Brosset, L., 2009. Influence of Density Ratio Between Liquid and Gas on Sloshing Model Test Results. *Proceedings of the 19th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Osaka, Japan, June 21–26 2009, pp.167–174.

Nitin, R. Tam, T. Krish, T. Dominique, R., Robert, KM., & Timothy, F., 2010. The Effect of Sampling Rate on the Statistics of Impact Pressure. *Proceedings of the 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Shanghai, China, June 6–11 2010, pp.1–8 (paper no. OMAE2010-20883).

Ryu, M.C. Jung, J.H. Jeon, S.S. Hwang, Y.S. Han, S.K. Kim, Y.S. Cho, T.I. & Kwon, S.H., 2009. Reference Load for a Conventional 138K CBM LNG Carrier in a Comparative Approach. *Proceedings of the 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Honolulu, Hawaii, USA, May 31 – June 5 2009, pp.1–12 (paper no. OMAE2009-79192).

Song, M.J., 2012. *Study on Effects of Sloshing Loads on Fatigue Strength of Independent B-Type LNG Tank*, Ph.D. Seoul: Seoul National University.

