COSEIK J. Comput. Struct. Eng., 26(5)
pp.327~333, October, 2013
http://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2013.26.5.327

pISSN 1229-3059 eISSN 2287-2302
Computational Structural
Engineering Institute of Korea

모형수조 슬로싱 하중을 이용한 LNG 탱크 코너블럭(Corner Block) 구조물의 구조강도 평가

박 준 형[1] · 박 시 종[1] · 김 성 훈[1] · 최 재 민[1] · 전 인 기[1†]

[1]브이피코리아(주) 응용기술팀

The Evaluation of Strength for the Corner Block Structure in the LNG Tank using Sloshing Pressure of the Scaled Tank

Jun Hyeong Park[1], Si Jong Park[1], Seong Hoon Kim[1], Jae Min Choi[1] and In Ki Jun[1†]

[1]VP KOREA, INC., Applied Technology Research Team, Seongnam, 463-825, Korea

Abstract

The purpose of this study is to predict sloshing pressure of a actual tank by using measured pressure in scaled down tank and to evaluate with structural strength of LNG Corner Block. For this purpose, we performed sloshing analysis about 138K class tank by using Ansys CFX program, and were measured both average pressure and maximum peak pressure according to scaled tank ratio. Also, measured pressure was converted to pressure of the actual tank by Froude scale law, and we conducted the evaluation of structural strength about the conner block of actual size KC-1.

Keywords : *LNG Cargo Containment System(CCS), scaled tank, sloshing pressure, scale ratio, corner block, structural strength assessment*

1. 서 론

슬로싱(Sloshing)은 유체가 임의의 형상을 가지는 탱크내에 부분적으로 차 있는 경우에 이 탱크의 운동으로 인해 발생하는 유동현상을 말한다. 이 현상은 로케트나 자동차 등의 연료탱크는 물론 원유 혹은 액화가스를 수송하는 선박의 화물창, 그리고 지진으로 인한 석유저장 용기 내의 유동현상에서 다양하게 나타나고 있다. 슬로싱은 이를 유발시키는 가진력의 주기와 탱크내 액체화물의 주기가 비슷한 공진지역에서 탱크내에 심한 비선형 파가 발생하여 탱크 벽이나 탱크 천장에 충격압력을 유발시키는데, 이로 인한 충격하중은 순간적이고 국부적이지만 정수압 수두로 환산하면 수십 미터를 넘는 하중이 가해지기도 한다. 충격압력의 발생으로 인한 구조적인 손상방지를 위해 화물창 내의 칸막이(baffle)를 설치하거나 화물창의 슬로싱 고유주기를 변화시켜 액체의 유동억제 및 충격하중을 줄이는 방법을 사용한다(Sin *et al.*, 2005). 특히 최근 이중 선체구조의 유조선과 액화가스 운반선의 국내 건조가 활발히 이루어지는 점을 감안하면 보다 정확하게 슬로싱 문제를 해석할 수 있는 수치계산법이 필요하다고 하겠다.

슬로싱 연구분야에서는 주로 비압축성 유체의 충격하중에 대한 특성 및 탱크형상, 크기 등의 다양한 매개변수에 따른 슬로싱 하중에 대한 영향을 분석하기 위한 많은 연구가 이루어져 왔다(Lee *et al.*, 2007). 모형실험법은 LNG선의 건조가 활발했던 1970년대 유럽과 일본 등 조선 선진국에서 활발한 연구가 진행되어 많은 실험 결과들이 발표된 바가 있고 최근에도 사용되고 있다(Bass *et al.*, 1985). 그러나 이 방법은 많은 장비와 비용이 소요되는 문제뿐 아니라 모형실험 결과를 실선으로 확장하는데 있어 모형수조의 크기가 138K급 실선 크기의 1/100배 이상으로 축소되었을 때에 슬

† Corresponding author:
Tel: +82-31-710-7100; E-mail: ikjun@vp-korea.co.kr
Received March 26 2013; Revised June 4 2013;
Accepted July 5 2013
©2013 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

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.

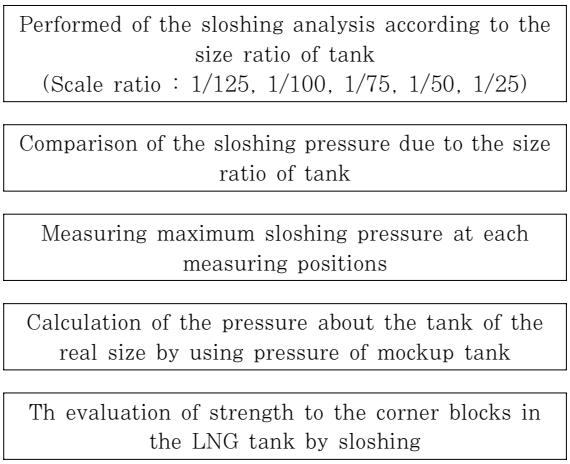

Fig. 1 Flow chart of sloshing analysis

로싱 압력이 달라지는 등의 적지 않은 문제가 있다(Jeon *et al.*, 2008).

조선공학 분야에서 슬로싱 현상에 대한 정확한 이해가 필요한 이유는 무엇보다도 액체 화물로 인한 충격압력의 발생을 정확히 추정함으로써 이로 인한 구조적 손상을 방지하기 위해서라고 할 수 있다. 슬로싱에 의해 발생되는 동적압력은 비충격압력 및 충격압력으로 구분되는데, 비충격압력은 비교적 심하지 않은 유체유동에 의한 것이며, 충격압력은 탱크내에 발생하는 비선형 수면파로 인한 충격력이 탱크 벽면이나 탱크 천장에 부가될 때 기인하는 것으로 이로 인한 구조적 피해는 심각하다. 그러나 이러한 충격압력에 대해서는 아직 정확한 현상의 설명이나 크기를 추정하는 것이 어렵다.

본 연구에서는 Fig. 1에 제시된 프로세스와 같이 화물창의 크기비율(Scale Ratio)에 따른 슬로싱 압력의 연관성을 분석하여 화물창 축소 모델의 슬로싱 실험에서 실선 크기의 압력을 제시하기 위한 방법을 검토하고, 향후 모형수조 실험 진행시 신뢰도 확보 및 적용 가능한 해석 프로세스 확립을 목적으로 한다. 모형수조를 통해 산출되어진 슬로싱 충격하중을 동적 비선형 해석방법을 사용하여 LNG 화물창의 코너블럭 및 멤브레인 시스템에 대한 구조안전성을 수치해석으로 평가함으로써 LNG 단열 시스템 설계에 유용한 정보를 제공하고자 한다.

2. 크기 비율에 따른 슬로싱 해석

본 연구에서는 138K LNG CCS(Cargo Containment System)에 대한 일정한 크기 비율을 갖는 5개의 유한요소 모델을 구성하였으며, 상세 제원을 Table 1에 나타내었다. 선박 운행 시 요구되는 유체의 적재 높이(Filling Level)는 LNG를 해상에서 안전하게 운송하기 위한 국제적인 표준인

Table 1 Dimensions of the scaled tank model

Scale Ratio	Length(m)	Breadth(m)	Height(m)
1/125	0.3498	0.028	0.2141
1/100	0.4372	0.035	0.2676
1/75	0.5829	0.0467	0.3568
1/50	0.8744	0.07	0.5352
1/25	1.7488	0.14	1.0703
1/1(138K)	43.72	3.5	26.7575

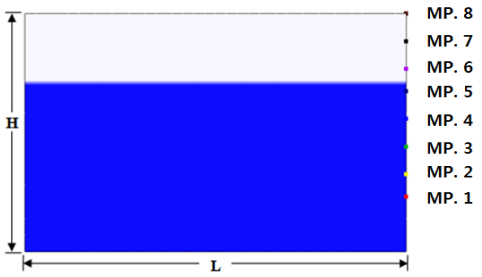

Fig. 2 Measuring Points of Tank

IGC Code에서 10%미만, 70%이상 규정하고 있으며, 이를 기준으로 본 연구에서는 각 수조 높이에 70% 기준으로 유체 적재 높이를 구성하여 슬로싱 해석을 수행하였으며(Lee *et al.*, 2011), 슬로싱 압력측정 위치(Measuring Point; MP)는 Fig. 2와 같이 수조 모델의 높이별 비율에 따라 일정한 간격으로 MP.1~MP.8까지 8곳에 배치하여 구성하였다.

2.1 슬로싱 고유 주기

선형이론을 적용하여 유추되어진 직육면체 탱크의 슬로싱 고유주기는 식 (1)과 같다. g는 중력가속도, L은 탱크의 길이, h는 유체의 적재 높이로서 각 조건에 따라 슬로싱 고유주기(ω)를 계산하여 유체의 유동 특성을 검토하게 된다.

$$\omega = \sqrt{\frac{g\pi}{L} tanh(\frac{\pi h}{L})} / 2\pi \qquad (1)$$

탱크를 가진하기 위해서 필요한 입력 변수에는 고유주기와 가진 변위가 있다. 고유주기는 Table 1의 변수를 식 (1)에 적용하여 구할 수 있으며, 탱크의 가진 변위는 일반적으로 종방향(Longitudinal direction)의 슬로싱인 경우 탱크 길이의 5%이내 수치값을 기준으로 사용되고 있고 횡방향(Transverse direction)의 슬로싱인 경우 탱크 폭의 10% 이내 수치 값을 기준으로 사용되고 있다. 본 연구에서 고려된 탱크의 실크기 길이는 43.72m이며, 종방향의 슬로싱 가진 변위 조건은 1.5m로 Table 2에 유체의 적재 높이 70%에서의 탱크 크기 비율에 대한 공진주기 조건 및 가진 변위 결과를 각각 나타내었다.

Table 2 Cases of test condition

Scale Ratio	Filling Ratio	ω(Hz)	Amplitude(mm)
1/125	70%H	1.3958	12
1/100	70%H	1.2486	15
1/75	70%H	1.0813	20
1/50	70%H	0.8829	30
1/25	70%H	0.6243	60

2.2 슬로싱 응답 해석결과

슬로싱 해석을 수행하기 위해 상용 유한요소해석 소프트웨어인 Ansys CFX의 Finite Volume Method를 사용하였으며, 유체 적재 높이 70%인 모형수조의 크기비율에 따른 종

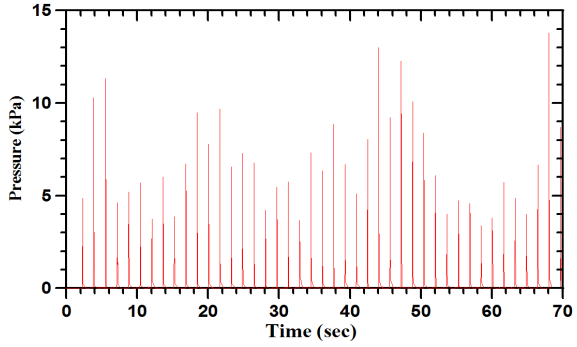

Fig. 3 Pressure time history: MP.8
(1/25 scale ratio, 70% filling ratio)

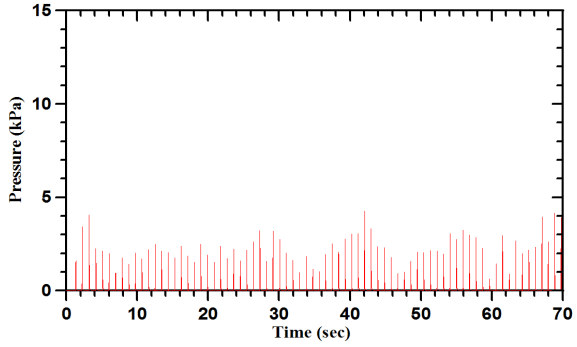

Fig. 4 Pressure time history: MP.8
(1/50 scale ratio, 70% filling ratio)

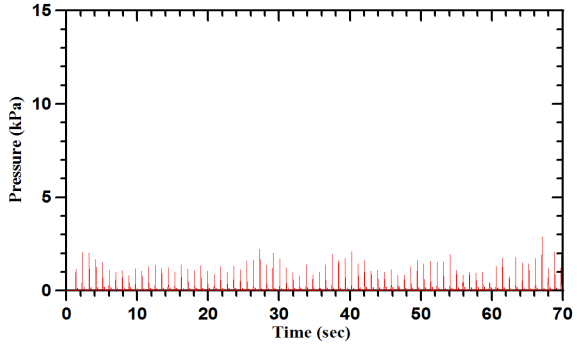

Fig. 5 Pressure time history: MP.8
(1/75 scale ratio, 70% filling ratio)

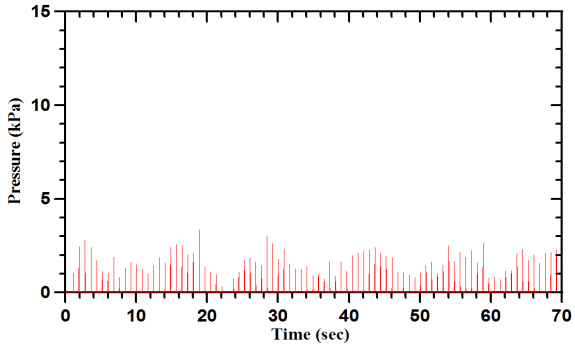

Fig. 6 Pressure time history: MP.8
(1/100 scale ratio, 70% filling ratio)

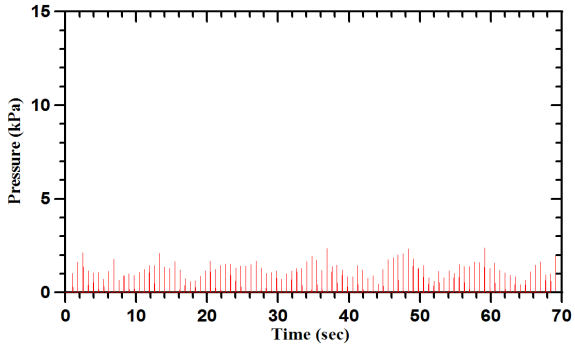

Fig. 7 Pressure time history: MP.8
(1/125 scale ratio, 70% filling ratio)

방향 운동에서의 자유수면 압력 변화를 70sec동안 시뮬레이션하였다. 그 결과를 Fig. 3~Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 3은 1/25 크기 모델의 압력 측정 위치 MP.8에서의 압력 결과를 나타내고 있다. 압력 주기가 비교적 규칙적으로 나타났으며, 자유수면의 슬로싱에 의한 최대압력은 3kPa에서 13kPa까지로 약 10kPa의 차이가 발생하였다.

Fig. 4는 1/50 크기 모델의 압력 측정 위치 MP.8에서의 압력 결과를 나타내고 있다. 압력 주기가 불규칙적으로 나타났으며, 자유수면의 슬로싱에 의한 최대압력은 2kPa에서 5kPa로 약 3kPa의 차이가 발생하였다.

Fig. 5는 1/75 크기 모델의 압력 측정 위치 MP.8에서의 압력 결과를 나타내고 있다. 압력 주기가 불규칙적으로 나타났으며, 자유수면의 슬로싱에 의한 최대압력은 1kPa에서 3kPa로 약 2kPa의 차이가 발생하였다.

Fig. 6은 1/100 크기 모델의 압력 측정 위치 MP.8에서의 압력 결과로 평균 1kPa에서 3.6kPa의 불규칙적인 압력으로 나타났으며, Fig. 7은 1/125 크기 모델의 압력 측정 위치 MP.8에서의 압력 결과로 평균 1kPa에서 2.5kPa의 불규칙적인 압력이 나타났다.

Table 3은 탱크 모델의 크기 비율에 따른 슬로싱 해석결과 각 압력 측정 위치에서의 최대 압력 결과를 나타내었다. 각 압력 측정 위치에서의 압력 차이는 모형수조 모델의 크기

Table 3 The results of pressure at measuring point, respectively

Scale Ratio	Pressure at measuring point(kPa)							
	MP.1	MP.2	MP.3	MP.4	MP.5	MP.6	MP.7	MP.8
1/25	7.23	6.43	5.74	5.27	5.25	5.98	8.95	13.9
1/50	3.75	3.34	2.88	2.82	3.23	2.47	3.80	6.88
1/75	2.45	2.21	1.98	1.82	1.82	2.04	2.87	4.25
1/100	1.87	1.67	1.45	1.49	1.30	1.53	2.42	3.35
1/125	1.61	1.41	1.28	1.36	1.12	1.02	1.53	2.37

가 클수록 크게 나타났으나, 크기 비율에 대한 압력 차이 비율은 비슷한 수치를 나타내고 있다.

Fig. 8와 Fig. 9는 종방향 운동 시에 유체 적재 높이 70%에서 70초 동안 모형수조 크기비율에 따른 자유수면 압력의 변화를 실제 138K 탱크의 압력으로 환산하여 나타낸 결과이다. Fig. 8은 MP.1~MP.8까지 탱크 크기비율에 따른 평균압력 결과를 138K 탱크의 압력으로 환산하였을 때 동일한 압력 결과를 나타내었으며, 이는 작은 모형수조의 슬로싱에 따른 평균압력을 이용하여 실제 크기 탱크의 슬로싱 평균압력을 예측가능 하다는 것을 나타낸다.

Fig. 9는 탱크 크기비율에 따른 슬로싱 해석결과 측정위치 MP.1~MP.8에서의 최대 피크(Max. Peak) 압력을 나타낸 결과이다. MP.1~MP.3까지는 동일한 크기의 최대 피크압력을 나타내었으나 MP.4~MP.8에서는 최대 피크압력이 수조의 크기와 상관없이 불균일하게 나타났다. 이는 작은 모형수조 슬로싱 해석으로부터 실제 크기 탱크의 최대 피크압력을 정확하게 예측하는 것은 어렵지만, 평균압력 예측은 가능하며 실제 선체 구조강도를 평가하는데 있어 충분히 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 본 논문에서는 화물창의 구조 안전성을 최대한 확보하기 위해 슬로싱의 평균압력 대신 최대 피크압력을 사용하여 탱크 코너블럭의 구조강도 평가를 수행하였다.

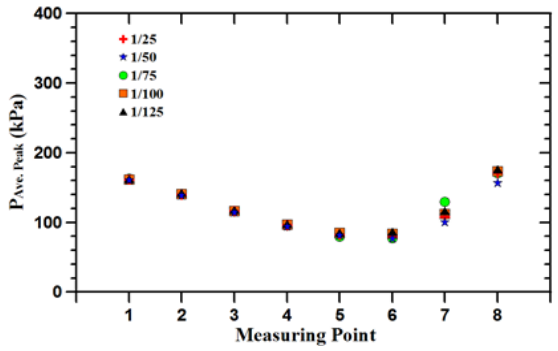

Fig. 8 Average Peak Pressure history: MP.1~MP.8 (full scale ratio, 70% filling ratio)

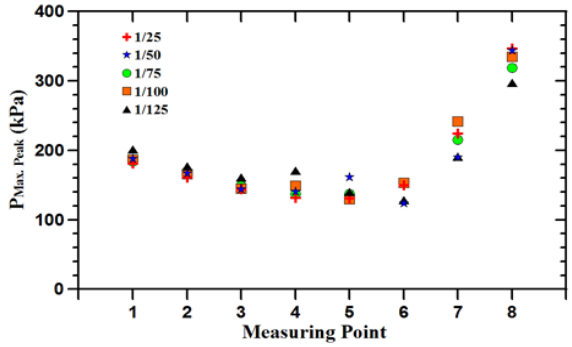

Fig. 9 Max. Peak Pressure history: MP.1~MP.8 (full scale ratio, 70% filling ratio)

3. LNG 탱크 코너블럭의 구조강도 평가

3.1 LNG 코너블럭 형상

슬로싱으로 인한 파손 문제는 주로 코너블럭 부근에서 발생된다. Fig. 10은 실제 화물창 내부 모델 코너블럭의 횡방향 및 종방향의 슬로싱에 대하여 손상이 발생할 수 있는 위험 위치를 나타내고 있다.

일반적으로 종방향 슬로싱에서 가장 큰 압력이 발생하는 것으로 알려져 있는 A지점의(Fig. 10, Quarter model A 지점) 구조강도를 평가하기 위해 국부적으로 코너블럭 Model을 선정하였으며, 그 형상을 Fig. 11에 도시하였다. KC-1의 코너블럭 모델은 코로게이션 판넬과의 용접 시 열변형 위험을 완화하기 위한 접착제(Mastic), 단열효과를 높이기 위한 폴리우레탄

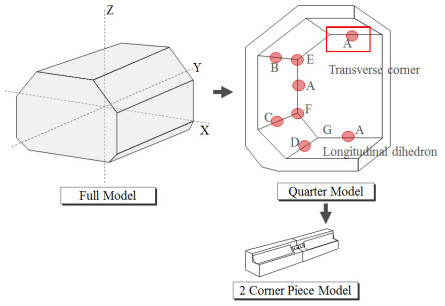

Fig. 10 The Position of Piece for Corner Block Models in LNG Tank

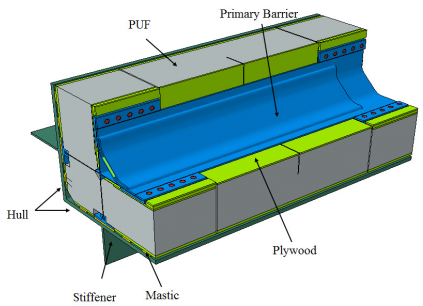

Fig. 11 The Schematic of Corner Block Model

폼(PUF) 및 구조 안전성을 높이기 위한 합판(Plywood), 보강재(Stiffener), 선체(Hull) 등의 복잡한 구조로 구성되어 있다.

3.2 유한요소모델의 구성 및 재료물성

열 변형시 파손의 위험이 많은 코너블럭의 모델 구성 조건을 Fig. 12에 나타내었다. 해석을 위해 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 하이퍼메쉬를 사용하였으며, 53,578개의 절점(Node)과 45,336개의 솔리드(Solid: Hexahedron) 및 쉘(Shell) 요소로 모델을 구성하였다. Table 4에 해석 수행을 위한 코너블럭의 물성치를 나타내었다(미국선급협회: ABS, 2006).

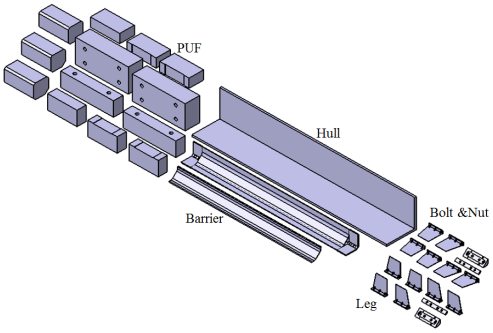

Fig. 12 Components of Corner Block

Table 4 Material Properties of Corner Block

Material	Temp (℃)	E (MPa)	μ (-)	Density (kg/mm^3)	K (W/m℃)
Mastic	-25	3,930	0.3	1.5E-6	0.4
	30	2,880	0.3	1.5E-6	0.4
Ply-Wood	-180	10,500	0.17	7.1E-7	0.17
	20	8,900	0.17	7.1E-7	0.17
PUF	-170	213	0.3	1.2E-7	0.029
	20	142	0.3	1.2E-7	0.029
Steel	20	00	0.3	7.85E-6	15

3.3 하중 및 경계조건

코너블럭의 열하중 및 동적압력에 대한 구조 안전성을 평가하기 위하여 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAQUS 3D Explicit Code를 사용하였다. Fig. 13에 슬로싱 동특성의 영향을 평가하기 위한 탱크의 초기 온도 상태와 내부 하중 적용 위치를 나타내었으며, 경계조건은 모델의 길이방향 양끝단을 대칭경계조건(Symmetric Boundary Condition)으로 부여하였으며, 바깥쪽 선체의 경계조건은 판넬의 축방향에 대한 변위를 각각 구속하였다. 탱크의 초기 온도조건은 안쪽 선체에 LNG의 액화상태에서의 온도인 -163℃를 부여

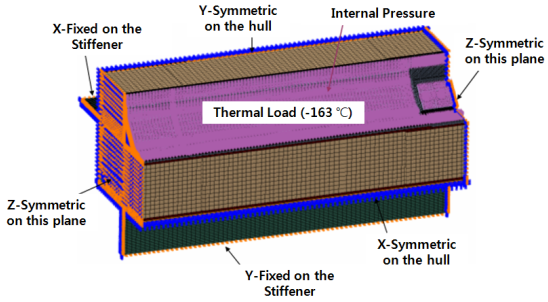

Fig. 13 The Load and Boundary Conditions of Corner Block

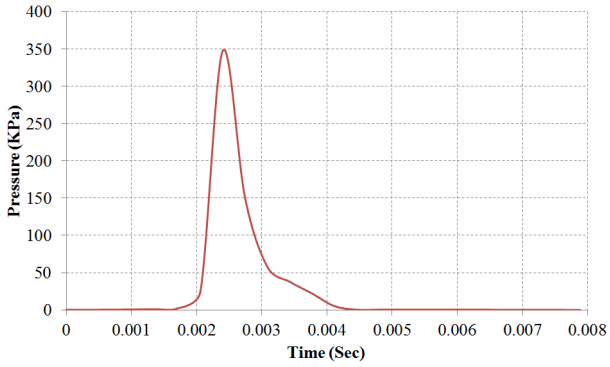

Fig. 14 The Curve of Time-Pressure at occurring Maximum Pressure in LNG Tank

하고 바깥쪽 선체에 상온 23℃의 온도 조건을 부여하여 열해석을 진행하였다(Choi *et al.*, 2011). 열 해석결과는 슬로싱 동하중 해석을 수행하기 전 초기입력 조건으로 부여되며, 슬로싱 최대 압력값은 Table 3의 1/25크기 비율의 MP.8 측정 위치에서 발생된 최대 피크압력인 13.9kPa을 시간 이력에 대하여 구한 후 식 (2)의 프루이드 법칙(Froude scale law)을 사용하여 실선 크기의 압력으로 환산하여 적용하였다. 환산된 최대 피크압력은 350kPa로 Fig. 9의 MP.8의 결과와 같다. Fig. 14에 코너블럭에 적용된 동하중 압력을 시간에 대한 그래프로 나타내었으며, 0.001초에 짧은 시간동안 350kPa의 최대 압력이 코너블럭 모델의 안쪽 선체에 적용되었다(Lee *et al.*, 2011).

$$P_f = P_m\left(\frac{\rho_f L_f}{\rho_m L_m}\right) \quad t_f = t_m \times \sqrt{\frac{L_f}{L_m}} \tag{2}$$

P_f =실제 탱크의 슬로싱 압력

P_m =모형 탱크의 슬로싱 압력

ρ_f =실제 탱크의 유체밀도

ρ_m =모형 탱크의 유체밀도

L_f =실제 탱크의 길이, L_m =모형 탱크의 길이

t_f =실제 탱크의 주기, t_m =모형 탱크의 주기

3.4 LNG 탱크 코너블럭 해석결과

코너블럭의 슬로싱 동하중 작용 시 변위결과를 Fig. 15에 도시하였고, 코너블럭의 구성 요소별 상세 응력을 Fig. 16~Fig. 19에 도시하였다.

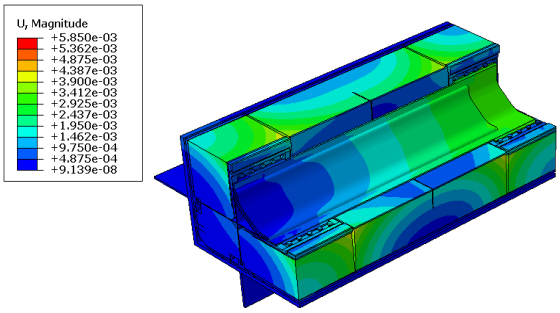

Fig. 15 The Result of Displacement at Corner Block (Max. Displacement=0.0058m)

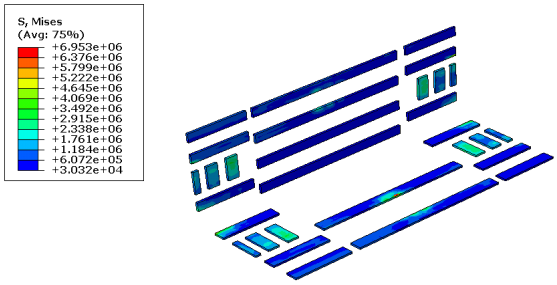

Fig. 16 The Result of Stress at Mastic (Max. Stress=7MPa)

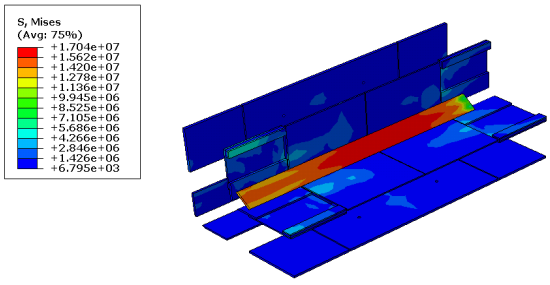

Fig. 17 The Result of Stress at Plywood (Max. Stress=17MPa)

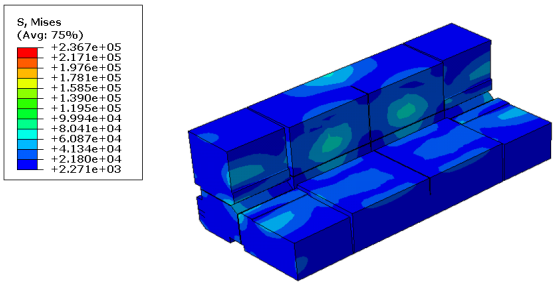

Fig. 18 The Result of Stress at PUF (Max. Stress=0.23MPa)

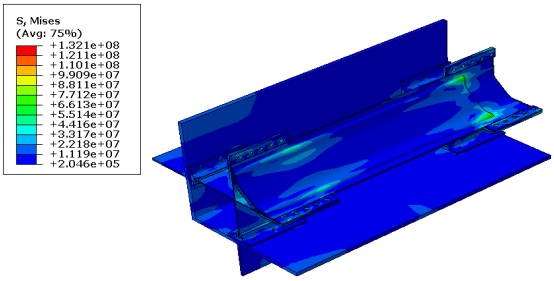

Fig. 19 The Result of Stress at Steel (Max. Stress=132MPa)

Table 5 Dynamic Strengths of Insulation System

Unit(MPa)		Mastic	Ply Wood	PUF	Steel
Yield Stress	DNV	14.99	39.98	2.25	220
	GTT	N/A	54.76	2.92	N/A
Analysis Results		6.95	17.04	0.23	132.10

Table 5에 슬로싱 하중을 부가한 열구조 연성해석 결과를 나타냈으며, 선급에서 제시하는 설계 기준에 적합하게 나타났다(노르웨이선급협회: DNV, 2006).

4. 결 론

본 연구에서는 길이 방향의 2차원 화물창 모델을 사용하여 크기 비율에 따른 슬로싱 압력을 분석한 결과 측정위치에 따라 최대 압력 편차가 상이하게 나타났으며, 탱크 자유수면 아래에 위치하는 MP.1~MP.5에서 보다 자유수면 상단에 위치하는 MP.6~MP.8까지 압력 편차가 크게 발생하였고 자유수면 상단으로부터 측정 거리가 멀어질수록 높게 나타났다.

수조 모델의 크기 비율을 달리 하더라도 가진 주기를 맞춰주면 시간 이력에 따른 평균 슬로싱 압력은 예측 가능함을 확인하였으나(Fig. 8), 크기 비율에 따른 최대 피크압력은 상이한 결과가 나타나 모델의 크기가 작을 경우 실 크기의 슬로싱 최대 피크압력을 예측하기 위해서는 다양한 크기의 모형수조에 대한 슬로싱 해석을 통해 최대 압력을 검토할 필요가 있다. 이를 통해 산출되어진 슬로싱 최대 피크압력을 실선크기의 동하중으로 환산하여 KC-1 코너블럭에 대한 구조안전성을 평가하였으며, 평가결과 선급에서 제시하는 설계 기준에 적합한 것으로 확인되었다. 또한 향후 실제 모형수조 슬로싱 실험으로 계측된 압력을 실선 크기의 압력으로 환산하였을 시 발생되는 문제를 본 연구 수행을 통해 사전에 예측할 수 있었다.

실제 모형 수조실험에서는 유체의 버블효과로 인해 해석결과 보다 낮은 압력이 발생할 수 있기 때문에 모형수조의 크

기 비율에 따라 압력편차가 발생할 수 있다. 따라서 개발하고자 하는 멤브레인 LNG 탱크의 슬로싱 하중 구조강도를 평가하기 위해서는 유체의 점성이 슬로싱 압력에 미치는 영향 및 버블효과의 영향에 대한 연구가 필요하다. 또한 향후 더 정확한 슬로싱 동적압력 산출을 위하여 유탄성 효과가 고려된 해석방법의 개발이 필요하다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부의 플랜트기술고도화사업 지원을 받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

ABS. (2006) Strength Assessment of Membrane-type LNG Containment System under Sloshing Loads.

Bass, R.L. (1985) Modeling Criteria for Scaled Lng Sloshing Experiments, *Journal of Fluids Engineering*, 107, pp.272~280.

Choi, S.W. (2011) Thermal Analysis of Two Main Ccs(Cargo Containment System) Insulation Box by using Experimental Thermal Properties, *Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 24, pp.429~438.

DNV. (2006) Classification Notes No. 30.9.

Jeon, S.S. (2008) Experimental Investigation of Scale Effect in Sloshing Phenomenon, 27th Symposium on Naval Hydrodynamics, 2, pp.1165~1177.

Lee, D.H. (2007) A Parametric Sensitivity Study on Lng Tank Sloshing Loads by Numerical Simulations, *Ocean Engineering*, 34, pp.3~9.

Lee, J.M. (2011) Evaluation of Sloshing Resistance Performance of LNG Carrier Insulation System by Fluid-Structure Interaction Analysis, *Computational Structural Engineering Institute of Korea.*

Lee, S.G. (2011) Local Zooming Analysis of LNGC CCS under Sloshing Impact Loading, *Computational Structural Engineering Institute of Korea.*

Shin, J.R. (2005) An Analytic Solution to Sloshing Natural Periods for a prismatic Liquid Cargo Tank with Baffles, *The Korean Society of Ocean Engineers*, 19, pp.16~21.

요 지

이 연구의 목적은 축소된 탱크 모델에서 측정되어진 슬로싱 압력을 이용하여 실제 크기의 탱크 모델에서의 압력을 예측하는 것이며, 또한 예측된 압력으로 LNG 코너 블럭의 슬로싱 하중에 의한 구조 강도를 평가하는 것이다.

이 목적을 위하여, Ansys CFX 프로그램을 이용하여 138K급 LNG 화물창 시스템의 크기 비율에 따른 슬로싱 해석을 수행 하였으며, 크기 비율에 따른 슬로싱 평균 압력 및 최대 피크 압력을 측정하였다. 또한, 측정된 압력은 프루드 법칙에 의해 실제 138K 크기의 압력으로 변환하여 실선 크기의 KC-1 코너블럭에 대한 구조강도 평가를 수행하였다.

핵심용어 : LNG 화물창 시스템, 모형수조, 슬로싱 압력, 크기 비율(Scale Ratio), 코너블럭, 구조강도평가