

# MarkIII LNG 방열 시스템의 강도평가를 위한 삼각형 충격 하중에 대한 구조응답에 대한 연구

황 세 윤<sup>1</sup> · 김 성 찬<sup>2</sup> · 이 장 현<sup>1\*</sup> · 노 인 식<sup>3</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 조선해양공학과, <sup>2</sup>인하공업전문대학 조선해양과, <sup>3</sup>충남대학교 선박해양공학과

## Study on Structural Strength of Mark III type LNG Cargo Containment System by Idealized Triangular Impulse Load

Se Yun Hwang<sup>1</sup>, Sung Chan Kim<sup>2</sup>, Jang Hyun Lee<sup>1\*</sup> and In Sik Nho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha Univ., Incheon, 402-751, Korea

<sup>2</sup>Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha Tech. Col., Incheon, 402-751, Korea

<sup>3</sup>Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam Univ., Daejeon, 305-764, Korea

### Abstract

It has been well known the sloshing pressure has complex shape and various patterns. The pattern of sloshing pressure is variously characterized by the pressure amplitude, duration time and skewness. The structural response induced by the sloshing pressure is also affected by the pattern of sloshing pressure and the type of structural members. In order to understand the structural response by the perspective view of categorized pattern, it is more efficient to make simple sloshing pressure pattern than to reflect the complex pressure history. In this study, the sloshing pressures obtained by the small scale model test are simplified with respect to their duration and skewness. Dynamic analyses of Mark-III LNG CCS are then parametrically performed with the consideration of various types of sloshing impact. Meanwhile, the failure pressures given the duration and skewness are investigated after parametric calculations are conducted to investigate the effect of pressure parameters on the structural response.

**Keywords** : sloshing impact, LNG CCS, dynamic analysis, idealized triangular impulse, structural response

### 1. 서 론

LNG(liquefied natural gas) 화물은  $-163^{\circ}\text{C}$ 의 냉온상태를 유지하기 위하여 방열시스템을 장착한 탱크에 적재되어 수송되며 LNG 방열시스템은 LNG와 가스의 냉온을 유지하기 위하여 얇은 멤브레인과 plywood 그리고 R-PUF(reinforced poly urethane foam)와 perlite 등의 단열 재료로 구성되어 있다. 또한 방열시스템은 화물 운송 시 다양한 하중에 견딜 수 있도록 설계되는데, 유체 화물 적재상태에서 선체 운동에 의해 발생하는 슬로싱 충격 하중이 대표적인 설계 하중이다(Graczyk *et al.*, 2011). 슬로싱 충격 하중의 특성은 매우 짧은 순간에 극심한 압력을 가지고 작용

하기 때문에 설계단계에서 방열시스템의 안전성 평가를 위해 필히 검토되어야 할 하중조건이다. 따라서 슬로싱 충격 하중을 설계에 반영하기 위해 하중의 특성에 대한 구조응답을 평가할 수 있는 강도평가법 또는 절차를 개발하기 위한 다양한 연구가 진행되었다.

LNG 방열시스템의 강도평가에 관한 연구는 슬로싱 충격 하중에 대한 구조거동에 초점을 맞춰 방열판의 강도평가절차에 대한 연구가 수행되었으며(Graczyk *et al.*, 2006; Lee *et al.*, 2006; 2011; Kim *et al.*, 2007; 2010), 국제 선급(ABS, 2006; BV, 2011; LR, 2009; DnV, 2006) 등에서는 방열시스템 설계에 반영하기 위한 평가절차를 제시하였으며, 조선소에서도 LNG 방열시스템의 구조강도

\* Corresponding author:

Tel: +82-32-860-7345; E-mail: jh\_lee@inha.ac.kr

Received October 30 2014; Revised November 18 2014

Accepted November 21 2014

©2014 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.

를 평가하기 위한 다양한 연구를 발표하였다(Kim *et al.*, 2011; Nam *et al.*, 2006; Ryu *et al.*, 2009; Chun *et al.*, 2011; Ito *et al.*, 2008).

LNG 방열시스템의 설계단계에서는 슬로싱 하중을 반영하기 위해서 일반적으로 기존의 LNG 방열시스템 설계와 비교하여 설계하는 비교평가법(comparative approach) 또는 모형실험이나 슬로싱 수치해석법을 기반으로 하여 강도를 평가하는 직접평가법(direct approach) 등이 사용되고 있다. 직접평가법에서는 슬로싱 설계 하중을 계산하기 위해 수치계산 또는 실험 등을 통해 슬로싱 하중을 산정하고 간략화된 방열시스템 모델을 사용하여 구조거동을 평가하는 방법이다.

또한 슬로싱 충격 하중의 유탄성 효과를 반영하기 위해서 유체구조 연성문제로서 정의하여 해석하는 방법도 다양하게 연구되고 있으나 방대한 계산시간과 문제의 복잡성 그리고 수치해의 불확실성 때문에 구조강도 평가에 직접 적용하기 위한 표준화된 모델은 제시되어 있지 않다.

본 논문에서는 LNG 선의 방열시스템의 초기설계 시 적용하기 위한 모형실험과 선형 동적구조해석을 사용한 간단한 평가 과정을 제안하였다. 슬로싱 충격 압력은 상승시간(rise time)과 하강시간(decay time)으로 구성된 지속시간(duration time)과 최대 압력(peak pressure) 등으로 특징지어 진다 (ABS, 2006). LNG 방열시스템의 구조강도를 평가하기 위하여 슬로싱 충격 압력이 가해졌을 때 발생하는 방열시스템 부재들의 파괴압력을 기준으로 강도평가를 수행하였다. 각 부재들의 파괴압력을 산정하기 위하여 모형실험에서 획득된 슬로싱

충격 압력의 특성을 파악하여 방열시스템의 구조거동에 대한 선형 동적구조해석을 수행하였다. 선형 동적구조해석은 슬로싱 파괴압력을 도출하기 위하여 계통적인 구조해석(parametric FEA) 형태로 수행되었고, 슬로싱 충격 하중에 대한 방열시스템의 구조응답곡면(structural response surface)을 형태로 산정되었다. 계통적인 구조해석은 슬로싱 충격하중의 선정에 영향을 미치는 최대압력(peak pressure), 충격 압력 지속시간(duration time) 및 삼각화된 압력(triangular impulse)의 비대칭성(skewness) 등을 대상으로 수행되었다. 선형 동적구조해석은 유체의 비선형 거동을 고려하지 않았으며, 슬로싱 압력 충격하중이 가해졌을 때 위험한 압력 요소를 추출하기 위하여 사용되었다. 동적구조해석 후 방열시스템의 안전성 평가를 위해서 모형실험에서 구한 슬로싱 압력과 비교하여 판단한다. 여기서 판단기준은 파괴압력이며, 이는 LNG 방열시스템의 파괴 시 작용하는 최소 압력을 의미한다. Fig. 1에서 선형 동적구조해석을 이용한 방열시스템의 안전성 평가과정을 나타내었다.

## 2. 모델실험에서의 설계압력

슬로싱 압력 평가시 사용한 데이터는 Fig. 2와 Fig. 3에서 보인 것과 같이 팔각형 형태의 LNG 탱크 모형이며 서울대학교 AMEC(Advance Marine Engineering Center)에

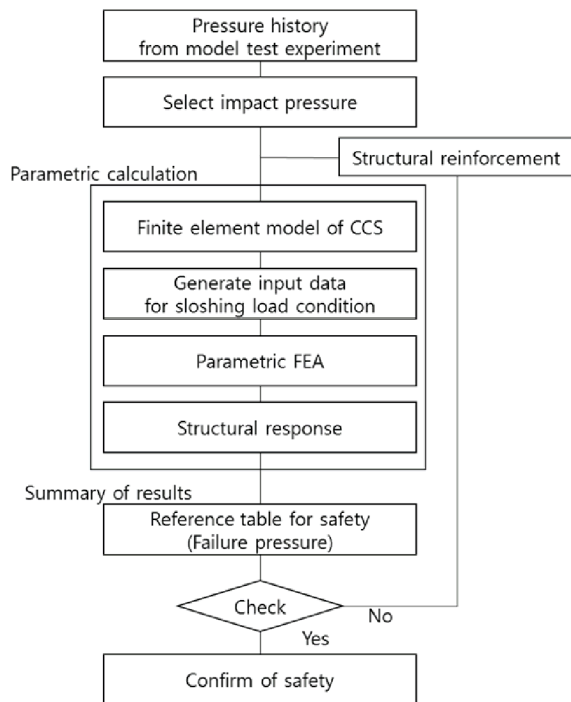


Fig. 1 Schematic procedure of present approach

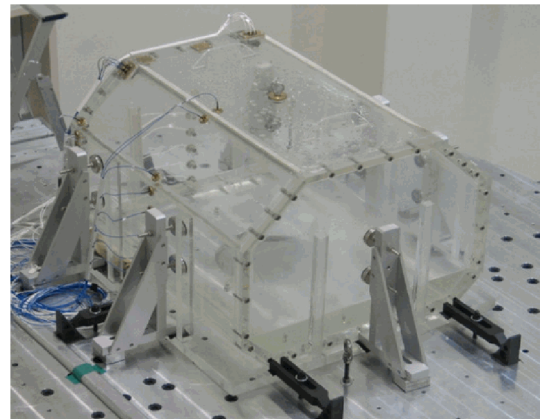


Fig. 2 Apparatus of model(Kim, 2010)

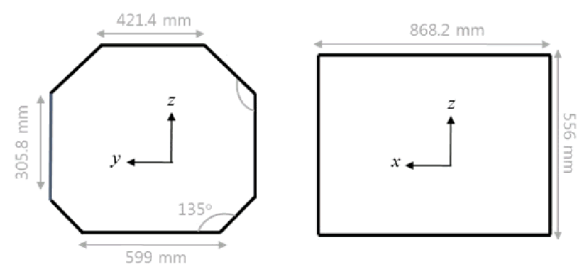


Fig. 3 Dimension of model(Kim, 2010)

Table 1 Experimental condition(Kim, 2010)

	Values
Ship model	HHI 140K LNG carrier
Filling level	10%
Motion	Irregular motion
Simulation time	5 hours(real scale)

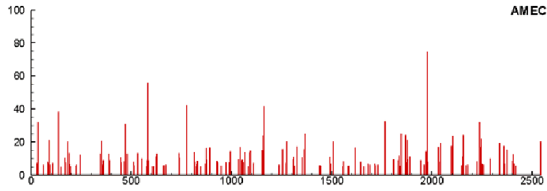


Fig. 4 Example of pressure(kPa) history(Kim, 2010)

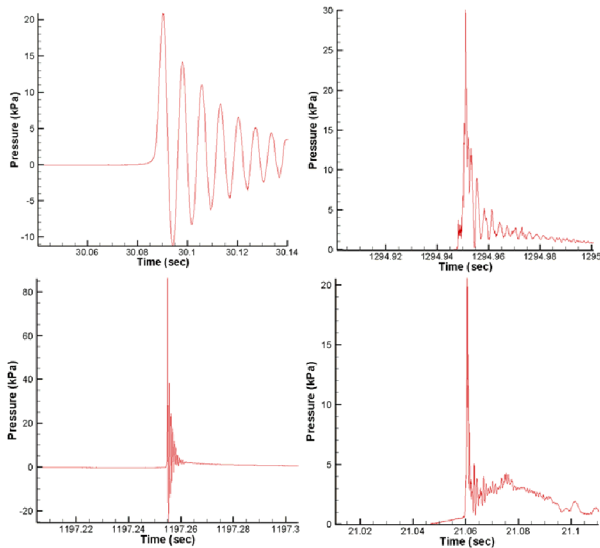


Fig. 5 Typical sloshing pressures

서 사용하여 계측한 결과이다. 실험은 50분의 1 축적에서 수행하였으며, 실험조건은 Table 1과 같다. 실험 데이터 및 관련된 슬로싱 압력은 수평 거동과 다양한 적재조건을 대상으로 기록된 것이다(Kim, 2010). 모형실험 결과는 압력파형을 결정하기 위한 슬로싱 하중 산정을 위해서 사용되었기 때문에 상세한 센서 형태 및 운동조건 등은 생략하였다.

모형실험에서 계측된 슬로싱 압력 신호는 Fig. 4에서와 같으며, 이를 분류한 슬로싱 충격압력 파형은 Fig. 5에서와 같다. 실험에서 관측된 슬로싱 압력의 형태를 통계분석 또는 적당한 하중평가를 통해 분석되었으며, 최대 압력, 상승시간, 지속시간 및 압력의 비대칭성으로 표현되었다. 슬로싱 충격 압력에 대한 구조거동의 특징을 정확히 분류하기 위해서는 실제의 복잡한 압력 이력을 사용하기 보다는 간단한 압력 패턴을 사용하는 것이 효과적이다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 6에서 보인 것과 같이 전형적인 압력을 중첩하여 나타내어 모형 축적에서의 압력의 형태에 대한 압력의 지속시간과 비

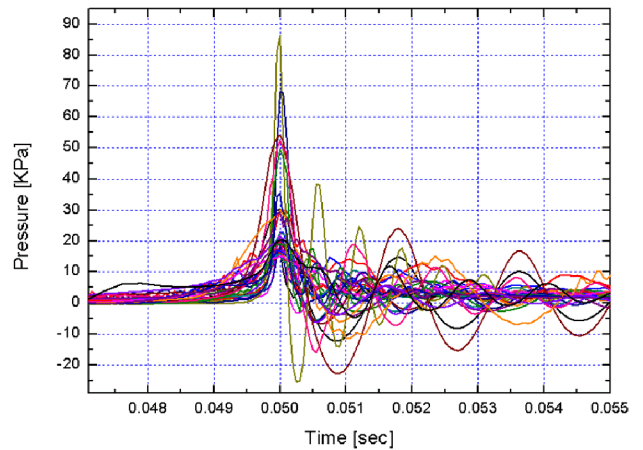


Fig. 6 Overlapped significant sloshing pressures

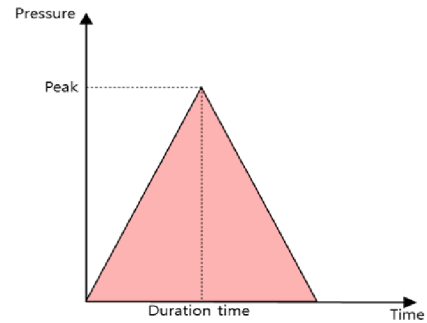


Fig. 7 Simplified load pattern assumed from significant pressures

대칭성의 범위를 다음과 같이 결정하였다.

- Duration time: 1/1000~1/100 sec
- Skewness: less than 2.0

모형 축적에서 산정된 값들은 Froude 상사법칙에 의해 실선 축적으로 확장하여 구조해석에 적용하였다. Froude 상사법칙은 비압축성, 비점성, 표면장력이 없다고 가정하여 적용된 것이며, 일반적으로 최대 압력 결정시에는 보수적인 결과를 준다고 알려져 있으나 슬로싱 설계압력 산정 시 일반적으로 사용된다. Froude 상사법칙의 압력과 지속시간은 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{p_r}{p_m} = \frac{\rho_r L_r}{\rho_m L_m}, \quad \frac{t_r}{t_m} = \sqrt{\frac{L_r}{L_m}} \quad (1)$$

여기서  $p$ ,  $L$ ,  $t$ 는 압력(pressure), 길이(length) 및 시간(time)을 의미하며, 첨자  $r$ 와  $m$ 은 실제 축적과 모델 축적을 각각 의미한다.

구조해석은 모델실험에서 구한 지속시간을 식 (1)을 이용하여 실선 축적으로 확장된 범위에서의 값을 반영하였으며 Fig. 7과 같이 삼각형 형태의 압력으로 정의하였다.

### 3. 선형 동적구조응답 해석

#### 3.1 유한요소모델

슬로싱 충격 압력에 의한 구조응답 해석은 물리적으로 유체 구조 연성 문제로 접근해야 하나 방대한 계산시간과 수치 결과에 대한 불확실성 때문에 설계에 적용하는데 어려움이 있다. 따라서 실용적인 관점에서 단순화된 평가기법이 필요하다. 본 논문에서는 방열시스템 설계 시 극한 슬로싱 압력을 구하는 것에 국한하여 선형 동적구조응답 해석을 통해 슬로싱 압력하의 구조거동을 구하였다. 구조해석은 다양한 충격압에 대한 선형 모델을 사용하였으며 Mark III 방열시스템에 대해 수행하였다. 구조해석은 상용 코드인 MSC.Patran/Nastran을 사용하여 수행하였다. 방열시스템의 유한요소모델은 plywood, R-PUF와 mastic으로 구성되어 있고 요소의 분할은 8절점 입체요소를 사용하고, 선급에서 권고하는 Mark III 유한요소 모델의 요소크기에 따라 국부적인 변형을 검토하기 위하여 mastic과 하부 plywood는 5mm의 크기로 분할하였고, R-PUF와 상부 plywood는 mastic 간격으로 2개 이상의 요소가 생성될 수 있도록 하고 두께에서는 5개 이상의 요소가 생성되도록 분할하여 총 68,800개의 요소를 사용하여 모델을 구성하였다 (ABS, 2006, DNV, 2006). 본 구조해석에 사용된 모델은 기존 연구에서 그 해의 타당성이 검토된 모델로서 동일한 모델을 사용하였다(Yoo, *et al.*, 2011).

하중조건은 Fig. 7과 같이 삼각형 형태의 하중이며, 10 kPa의 단위 최대압력을 가지며 모형실험에서 획득된 결과를 기반으로 0.001~0.07sec의 지속시간과 0.2~1.9의 비대칭성을 가지도록 선정하였다. 압력은 시간 이력의 효과만 고려하였으며 슬로싱 압력의 공간적 분포는 고려하지 않고 균일한 압력으로 적용하였다. Fig. 8과 Fig. 9에서는 Mark III 방열시스템의 유한요소해석 모델과 경계조건을 보여주고 있다. 구조해석 시 구조적 감쇠는 고려하지 않았으며 시간 변화에서 최대 응력과 최대 변형량을 검토하였다. 또한 손상지수(damage index)로 사용될 수 있는 처짐 및 응력에서 지속시간과 비대칭성의 영향을 검토하였다.

본 연구에서 검토하는 삼각형 충격하중에 대한 선형 구조 동적 해석응답을 수행하기 위해서는 압력의 지속시간 13개의 경우 그리고 압력의 비대칭성 19개의 경우인 총 247개 경우에 대해서 해석을 수행하기 때문에 각각의 구조해석을 위한 데이터 작성 및 실행 후 후처리 등의 작업에 많은 시간이 소요된다. 따라서 초기 방열시스템 구조해석 모델을 작성하고 그 input data를 작성으로 각 압력 지속시간 및 비대칭성 변화에 따라 자동적으로 구조해석을 수행하고 결과를 출력할

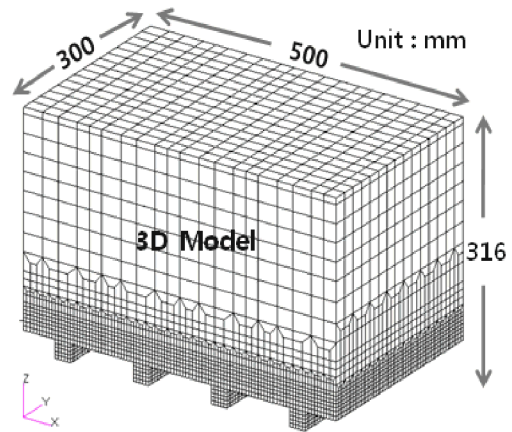


Fig. 8 Finite element model

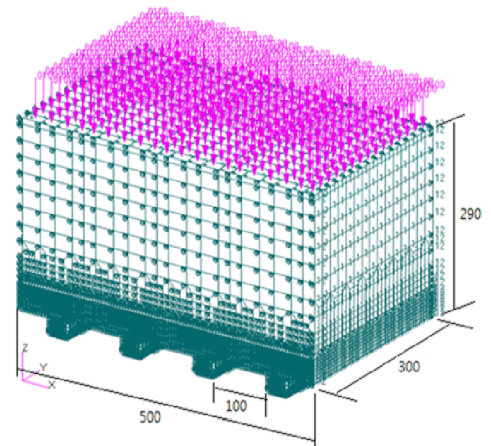


Fig. 9 Boundary conditions for finite element analysis

Table 2 Material properties for analysis(ABS, 2006)

Material properties	Plywood (Orthotropic)	R-PUF (Isotropic)	Mastic (Isotropic)
Density(kg/m <sup>3</sup> )	710	120	1,500
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.8
Elastic Coefficient (MPa)	E1=E2=8,900 E3=520	84	2,880
Shear Modulus (MPa)	G12=3,803 G13=G23=196	-	-

수 있도록 프로그램을 작성하여 수행하였다.

사용된 재료 물성 데이터는 Table 2와 같이 ABS(2006)에서 제안한 값을 사용하였으며, plywood는 이방성 재료로 mastic은 등방성 재료로 이상화하였다.

동적 구조해석을 적용하여 압력의 지속시간과 비대칭성을 대상으로 계통적인 구조해석을 수행했을 때 발생한 최대 변형량은 Table 3에서와 같이 정리하고 이를 3차원으로 가시화 하면 Fig. 10에서와 같이 최대 변위의 거동면(response surface)을 확인할 수 있다. 변형량 결과는 압력의 지속시간이 상대적으로 짧은 시간대에서 크게 변화하는 것을 확인할

Table 3 Maximum displacements obtained by FEA

DT SK	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.008	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.070
0.20	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0060	-0.0071	-0.0094	-0.0103	-0.0125	-0.0146	-0.0138	-0.0136	-0.0135	-0.0133
0.30	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0060	-0.0071	-0.0095	-0.0104	-0.0126	-0.0143	-0.0136	-0.0130	-0.0126	-0.0123
0.40	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0060	-0.0071	-0.0095	-0.0105	-0.0126	-0.0138	-0.0133	-0.0123	-0.0120	-0.0119
0.50	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0060	-0.0072	-0.0096	-0.0106	-0.0126	-0.0132	-0.0129	-0.0119	-0.0118	-0.0119
0.60	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0060	-0.0072	-0.0097	-0.0107	-0.0125	-0.0128	-0.0124	-0.0117	-0.0118	-0.0117
0.70	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0060	-0.0072	-0.0097	-0.0107	-0.0123	-0.0123	-0.0123	-0.0117	-0.0117	-0.0113
0.80	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0061	-0.0072	-0.0097	-0.0108	-0.0121	-0.0119	-0.0121	-0.0117	-0.0114	-0.0106
0.90	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0061	-0.0072	-0.0098	-0.0108	-0.0119	-0.0115	-0.0118	-0.0115	-0.0109	-0.0099
1.00	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0061	-0.0072	-0.0098	-0.0107	-0.0116	-0.0113	-0.0117	-0.0112	-0.0102	-0.0089
1.10	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0061	-0.0072	-0.0097	-0.0107	-0.0117	-0.0115	-0.0118	-0.0112	-0.0095	-0.0081
1.20	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0061	-0.0072	-0.0097	-0.0107	-0.0120	-0.0117	-0.0121	-0.0110	-0.0087	-0.0075
1.30	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0060	-0.0072	-0.0097	-0.0106	-0.0122	-0.0121	-0.0123	-0.0104	-0.0084	-0.0069
1.40	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0060	-0.0072	-0.0096	-0.0105	-0.0124	-0.0127	-0.0125	-0.0103	-0.0084	-0.0068
1.50	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0060	-0.0072	-0.0095	-0.0104	-0.0126	-0.0132	-0.0130	-0.0106	-0.0086	-0.0067
1.60	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0060	-0.0071	-0.0095	-0.0103	-0.0127	-0.0136	-0.0133	-0.0114	-0.0089	-0.0076
1.70	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0060	-0.0071	-0.0094	-0.0101	-0.0128	-0.0138	-0.0135	-0.0120	-0.0098	-0.0086
1.80	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0059	-0.0070	-0.0093	-0.0100	-0.0128	-0.0140	-0.0136	-0.0123	-0.0104	-0.0103
1.90	-0.0016	-0.0032	-0.0047	-0.0059	-0.0070	-0.0091	-0.0098	-0.0127	-0.0141	-0.0135	-0.0125	-0.0109	-0.0116

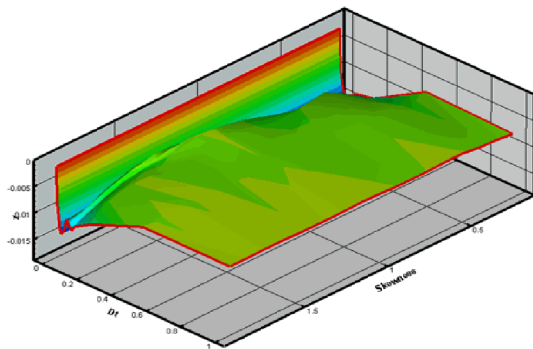


Fig. 10 Response surface of maximum displacement according to the duration time and skewness

수 있으며 압력의 지속시간이 증가할수록 그 영향이 적어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 해당 지속시간에 대한 압력의 비대칭성에 대한 영향은 적은 것을 확인할 수 있다.

### 3.2 압력파형과 변형량의 상관관계

구조해석의 결과에서 지속시간과 비대칭성에 대한 구조응답을 분석하면 다음과 같다. 슬로싱 압력이 가해졌을 때 방열시스템의 최대변위에서 압력의 지속시간과 비대칭성의 영향은 Fig. 11과 Fig. 12가 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이때 구조해석 결과와의 연관성을 검토하기 위해 충격압 지속시간과 비대칭성을 최대 변형량과의 분산도로 나타내면 Fig. 13과 Fig. 14에서와 같다.

Fig. 13에서 압력 지속시간이 0.01초 이하인 경우에 압

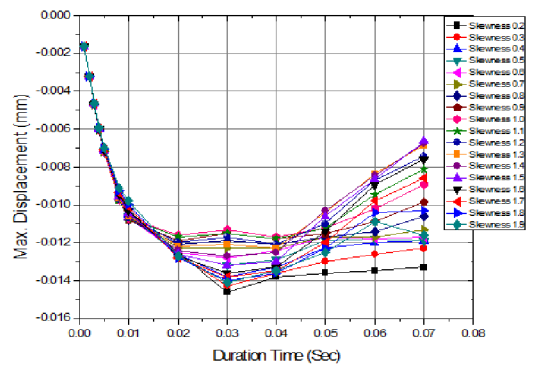


Fig. 11 Maximum displacement according to the duration time

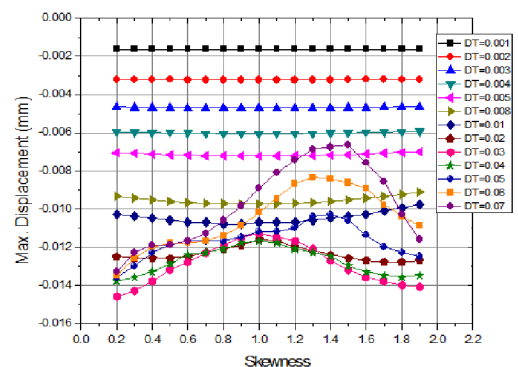


Fig. 12 Maximum displacement according to the skewness

력의 비대칭성에 상관없이 상대적으로 큰 변형량과 응력이 나타나며, Fig. 14에서는 압력 지속시간과 변위 사이에서의

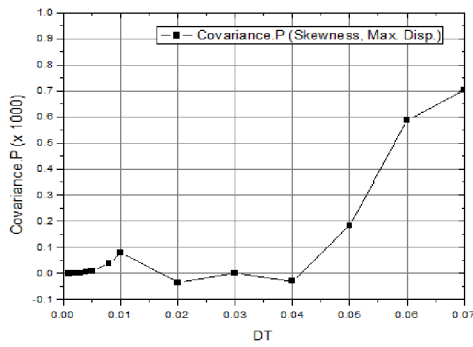


Fig. 13 Covariance between skewness and maximum displacement versus duration time

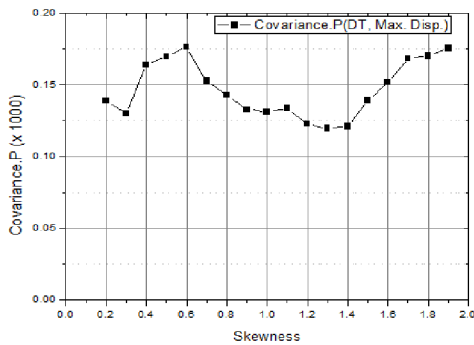


Fig. 14 Covariance between DT and maximum displacement versus skewness

분산도를 나타내고 있다. 결과를 살펴보면 압력의 비대칭성이 0.01초 이상의 구간에서는 압력의 크기와 상관없이 영향을 미치고 있는 것을 확인할 수 있으나, 0.01초 이하에서는 구조응답에서 비대칭성의 영향이 거의 없음을 알 수 있다.

### 3.3 단일 시스템의 파괴압력

실제 LNG 단일 시스템의 구조강도 평가는 LNG 탱크 내부의 단일 시스템 설치 위치에 따라 달라지기 때문에 damage index를 구할 수 없는 경우가 많고, 다양한 형태에 대한 전체 구조에 대한 평가는 실제적이지 않다. 또한 단일 시스템의 파괴압력을 구하기 위해 전체 구조에 대한 구조해석을 수행하는 것 또한 비경제적이기 때문에 단순화된 모델에 대한 파괴압력 과 damage index를 구할 수 있다(ABS, 2006).

따라서 단일 시스템의 강도평가를 위해서 슬로싱 충격 하중은 매우 짧은 하중 지속시간을 갖는 슬로싱 충격 압력의 동적 특성에도 불구하고 구조물에서의 충격하중의 영향이 충격 압력의 크기와 지속시간 및 비대칭성으로 표현된다고 가정하고 구조응답을 계산할 때 각각의 충격 압력의 영향도는 응력의 크기로 평가될 수 있으며, 이는 membrane, plywood 그리고 mastic 부재들의 강도를 나타낼 수 있다.

파괴압력을 구하기 위한 과정은 다음과 같다. 선형 탄성해석

Table 4 Acceptance criteria of plywood

Acceptance Criteria	Plywood			Mastic
	Vertical tension	Vertical compression	Shear	Every stress
Failure criteria	Mises Stress	Mises Stress	Shear stress	Mises Stress
Allowable stress	90% of (18MPa)	90% of (1.8MPa)	90% of Max. shear stress (2.52MPa)	90% of (13.5MPa)

Table 5 Failure pressures(MPa) at mastic reciprocally estimated from FEA results res(MPa) at mastic reciprocally estimated from FEA results

DT \ SK	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.008	0.010	0.020	0.030	0.040	0.050	0.060	0.070
0.2	9.2	4.8	3.3	2.6	2.1	1.4	1.2	0.9	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9
0.3	9.2	4.8	3.3	2.6	2.1	1.4	1.2	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9
0.4	9.2	4.7	3.3	2.6	2.1	1.4	1.2	0.9	0.8	0.9	0.9	0.9	0.9
0.5	9.2	4.7	3.3	2.6	2.1	1.4	1.2	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
0.6	9.2	4.7	3.3	2.5	2.1	1.4	1.2	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9
0.7	9.2	4.7	3.3	2.5	2.1	1.4	1.2	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
0.8	9.2	4.7	3.3	2.5	2.1	1.4	1.2	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0
0.9	9.2	4.7	3.2	2.5	2.1	1.4	1.2	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.1
1	9.2	4.7	3.2	2.5	2.1	1.4	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2
1.1	9.2	4.7	3.2	2.5	2.1	1.4	1.2	1.0	1.0	0.9	1.0	1.2	1.4
1.2	9.2	4.7	3.2	2.5	2.1	1.4	1.2	1.0	1.0	0.9	1.0	1.3	1.5
1.3	9.2	4.7	3.2	2.5	2.0	1.4	1.2	1.0	0.9	0.9	1.1	1.3	1.6
1.4	9.2	4.7	3.2	2.5	2.0	1.4	1.2	1.0	0.9	0.9	1.1	1.3	1.7
1.5	9.2	4.7	3.2	2.5	2.0	1.4	1.2	0.9	0.9	0.9	1.0	1.3	1.7
1.6	9.2	4.7	3.2	2.5	2.0	1.4	1.2	0.9	0.8	0.9	1.0	1.3	1.5
1.7	9.2	4.7	3.3	2.5	2.0	1.4	1.2	0.9	0.8	0.8	1.0	1.2	1.3
1.8	9.2	4.7	3.3	2.5	2.0	1.4	1.2	1.0	0.8	0.8	0.9	1.1	1.1
1.9	9.2	4.8	3.3	2.5	2.0	1.4	1.2	1.0	0.8	0.8	0.9	1.1	1.0

을 통해 방열시스템 각 부재들의 위험 압력(critical pressure)과 압력이 발생하는 위치(critical position)를 단순하게 계산할 수 있고, 초기설계 단계에서 하중평가를 위해 모형실험 결과와 함께 유용하게 사용될 수 있다. 또한 이를 통해 식 (2)와 같이 극한 손상조건(critical damage condition)의 역계산이 가능하다.

$$\sigma_{\max} = K(\text{Skewness}, DT) \times P_{\max} \quad (2)$$

여기서  $\sigma_{\max}$ 와  $K(\text{Skewness}, DT)$ 는 구조해석에서 발생하는 최대 응력과 강도전달계수(strength transferring coefficient)이다. 여기서 각 부재의 허용응력( $\sigma_{\text{allowable}}$ )을 적용하면 식 (3)과 같이 파괴압력을 얻을 수 있다.

$$P_{\text{failure}} = \sigma_{\text{allowable}} / K(\text{Skewness}, DT) \quad (3)$$

파괴압력( $P_{\text{failure}}$ )은 Table 4에서 기술한 방열시스템 재료의 허용응력에 해당하는 극한 압력(critical pressure)을 의미한다. 따라서 방열시스템의 손상지수(damage index)는 구조응답에서 충격에 대한 영향도를 검토하였을 때 파괴압력에 의해 표현 가능하다. 이론적으로 손상지수는 충격 압력의 크기와 구조물의 파괴를 유발하는 충격 압력 최소값의 비로 정의된다. 슬로싱 충격하중은 방열시스템의 상부 plywood에 작용하여 R-PUF와 하부 plywood를 통해 mastic까지 전달되며, 이때 방열시스템의 각 재료에 대한 극한상태가 검토된다. plywood와 R-PUF의 경우 수직인장 및 압축응력 그리고 전단응력으로 판단하고 mastic은 von-Mises 응력으로 판단된다. Table 5에서는 mastic 부재에 대해서 식 (3)에 적용하였을 때 항복강도의 90%를 가지는 허용응력에 대한 파괴압력을 보여주고 있다.

### 3.4 단일 시스템의 구조 안전성 평가

슬로싱 충격 압력의 지속시간 및 비대칭성의 영향에 대해서 모형실험 결과를 대상으로 일련의 선형 동적구조해석을 수행하였고, 이를 통하여 구조응답을 계산하였다.

방열시스템에서 안전성 판단을 위한 손상기준은 항복과 파괴로 단순히 분류될 수 있는데 mastic과 plywood의 파괴모드를 항복응력을 기준으로 가정하였다. 이때, mastic은 등방성재료이므로 von-Mises 응력으로 판단하였고, plywood는 이방성재료이기 때문에 각 방향의 성분별 응력으로부터 판단하였다. 각 부재별로 안전성 판단을 수행하여 Table 4에서

는 재료의 허용응력을 기준으로 한 파괴기준을 보여주고, Table 5는 mastic에서의 지속시간과 비대칭성에 대한 파괴압력을 보여주고 있다. 이를 가시화하면 Fig. 15와 Fig. 16에서와 같다.

Table 6에서는 plywood에서 파괴모드에 해당하는 파괴압력을 보여주고 있다. 이를 가시화 하면 Fig. 17에서와 같다.

LNG 단일 시스템의 강도는 시스템이 파괴되기 전까지 안전성을 유지될 수 있는 최대하중으로 정의될 수 있으며, 슬로싱 설계하중 선정과정 및 LNG 단일 시스템의 강도평가 과정에서 본 연구에서 수행한 계통적인 구조해석을 통해서 단순화될 수 있다.

본 과정을 통해 산정된 파괴압력들에서 가장 작은 파괴압력이 LNG 단일 시스템에서의 대표적인 파괴압력으로 선정될 수 있으며 이를 나타내면 식 (4)와 같다.

$$P_{\text{failure}} = \min(P_{\text{failure}}(\text{Mastic}), P_{\text{failure}}(\text{Plywood})) \quad (4)$$

계산 예로 사용된 방열시스템에서는 plywood의 전단파괴가 가장 작은 값을 나타내었고, 이 값들이 방열시스템의 파괴압력이 된다. Fig. 18에서 Mark III 방열시스템의 지배적인 파괴압력을 기준으로 방열시스템의 파괴압력 곡선을 나타

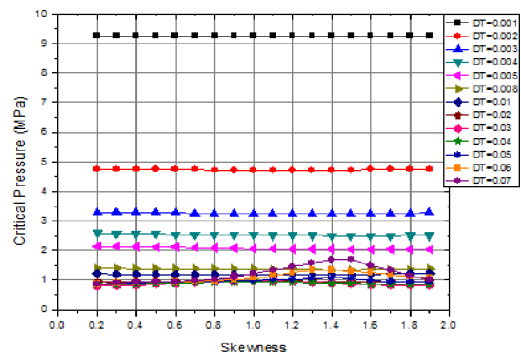


Fig. 15 Critical pressures at mastic for allowable stress(90% of  $\sigma_f$ ) and skewness

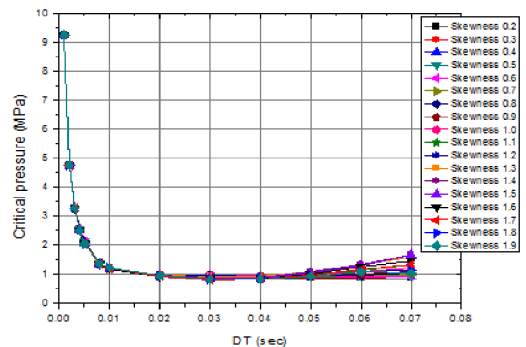
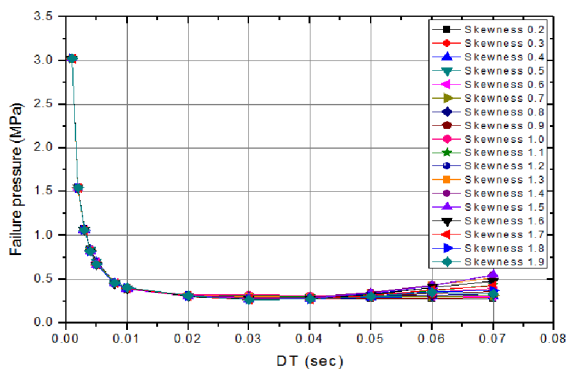


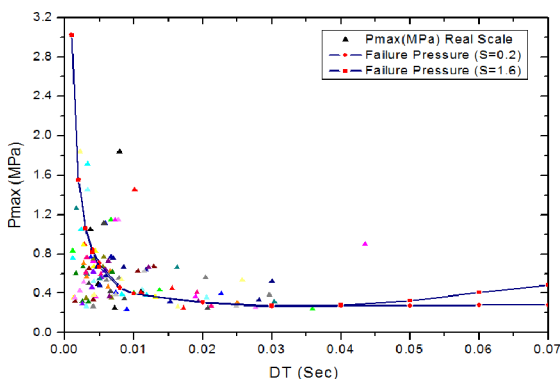
Fig. 16 Critical pressures at mastic for allowable stress(90% of  $\sigma_f$ ) and duration time

**Table 6** Comparison of failure pressures(MPa) at mastic and plywood

SK	DT=0.001		DT=0.005		DT=0.01		DT=0.05		DT=0.07	
	Mastic	Plywood (Vert.Comp)	Mastic	Plywood (Vert.Comp)	Mastic	Plywood (Vert.Comp)	Mastic	Plywood (Vert.Comp)	Mastic	Plywood (Vert.Comp)
0.2	9.25	31.47	2.14	7.09	1.21	3.97	0.85	2.76	0.86	2.79
0.3	9.25	31.41	2.14	7.09	1.19	3.95	0.88	2.86	0.91	2.94
0.4	9.25	31.41	2.13	7.06	1.19	3.93	0.91	2.97	0.94	3.03
0.5	9.25	31.41	2.12	7.03	1.19	3.92	0.94	3.06	0.94	3.04
0.6	9.25	31.41	2.11	7.00	1.18	3.91	0.95	3.09	0.94	3.06
0.7	9.25	31.41	2.10	6.95	1.18	3.91	0.96	3.09	0.98	3.16
0.8	9.25	31.41	2.09	6.92	1.18	3.90	0.96	3.09	1.03	3.33
0.9	9.25	31.41	2.08	6.90	1.18	3.90	0.96	3.13	1.12	3.59
1.0	9.25	31.41	2.07	6.87	1.18	3.89	0.99	3.21	1.23	3.96
1.1	9.25	31.41	2.06	6.84	1.18	3.89	1.00	3.25	1.35	4.35
1.2	9.25	31.41	2.05	6.84	1.17	3.88	1.02	3.32	1.47	4.75
1.3	9.25	31.41	2.05	6.82	1.17	3.89	1.07	3.47	1.59	5.14
1.4	9.25	31.41	2.04	6.79	1.18	3.89	1.08	3.50	1.68	5.44
1.5	9.25	31.41	2.04	6.79	1.18	3.90	1.05	3.41	1.69	5.49
1.6	9.25	31.41	2.04	6.79	1.19	3.93	0.99	3.24	1.49	4.83
1.7	9.25	31.41	2.03	6.77	1.21	3.96	0.96	3.11	1.32	4.29
1.8	9.25	31.41	2.03	6.77	1.22	4.01	0.94	3.06	1.14	3.71
1.9	9.25	31.47	2.04	6.79	1.23	4.05	0.94	3.06	1.03	3.37



**Fig. 17** Critical pressures at plywood for allowable shear stress of 90%σ<sub>y</sub> versus duration time



**Fig. 18** Design reference of failure pressure P<sub>failure</sub>

내었다. 이 결과에서 충격하중 지속시간이 매우 짧은 경우 압력의 비대칭성은 파괴 압력에 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있고 약 0.05초 이후의 지속시간에서는 영향이 발생하

는 것을 알 수 있다.

방열시스템의 안전성 평가를 위해서 모형실험에서 계측된 슬로싱 압력을 식 (1)에 의해 실선 축척비로 확장시키고, Fig. 18에서와 같이 선정된 슬로싱 충격 하중과 파괴압력 곡선을 비교하여 슬로싱 하중에 대한 방열시스템의 안전성을 판단할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문은 제시된 강도평가 과정이 방열시스템의 구조응답 관점에서 슬로싱 충격 압력의 다양한 파라미터를 규명하기에는 충분하지 않지만 선형 동적해석 모델을 사용하여 주어진 압력의 최대값, 지속시간, 비대칭성의 충격파에 대한 구조 안전성 평가에 주안점을 두고 기술하였다. 또한 멤브레인 구조의 허용기준과 슬로싱 압력에 관련된 간략화된 파괴압력에 대해 검토하고, 슬로싱 충격 압력의 지속시간과 비대칭성으로 특징 지워진 이상화된 삼각파 형상의 압력을 고려한 일련의 선형 동적해석을 수행하여 설계기준으로 사용할 파괴압력을 도출하였다. 본 연구 결과를 통해서 방열시스템 구조 요소의 안전성을 평가하기 위한 파괴 압력을 선정할 수 있고 모형실험을 통한 슬로싱 압력과의 비교를 통하여 방열시스템의 구조안전성을 평가할 수 있으며 이를 검토하기 위해서 모형실험을 통해 얻은 슬로싱 압력과 방열시스템의 일련의 강도 평가를 통해 안전성을 검증하는 과정을 수행하였다. 마지막으로 해석결과를 통해 방열시스템에서의 최대 응력은 매우



짧은 순간의 충격하중 하에서는 압력의 비대칭성 보다는 하중 지속시간에 많은 영향을 받고 있음을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구에서 사용된 실험정보는 서울대학교 AMEC에서 지원을 받아 수행되었으며, 산업통상자원부 해양플랜트특성화 대학사업 및 KEIT의 산업융합원천기술개발사업(10045212, 해양플랜트 통합 운영 및 유지보수를 위한 예지보전 시스템 개발)의 지원을 받아 수행되었습니다.

### References

- ABS (2006) Guidance Notes on Strength Assessment of Membrane-Type LNG Containment Systems Under Sloshing Loads, American Bureau of Shipping.
- BV (2011) Strength Assessment of LNG Membrane Tanks under Sloshing Loads - Guidance Note NI 564 DT R00 E, Bureau Veritas.
- Chun, S.E., Hwang, J.H., Chun, M.S., Lee, J.M., Suh, Y.S., Hwangbo, S.M. (2011) Direct Assessment of Structural Capacity against Sloshing Loads using Nonlinear Dynamic FE analysis including Hull structural Interactions, *Proc. 12st Int. Ocean & Polar Eng. Conf.*, Hawaii, USA, ISOPE, 3, pp.191~199.
- DNV (2006) Sloshing Analysis of LNG Membrane Tanks DNV Classification Notes No.30.9, Det Norske Veritas.
- Graczyk, M., Moan, T. (2011) Structural Response to Sloshing Excitation in Membrane LNG Tank, *J. Offshore Mech. & Arctic Eng.*, 133(2), pp.133~144.
- Graczyk, M., Moan, T., Rognebakke, O. (2006) Probabilistic analysis of characteristic pressure for LNG tanks, *J. Offshore Mech. & Arctic Eng.-Trans. ASME*, 128(2), pp.133~144.
- Ito, H., Suh, Y.S., Chun, S.E., Satish Kumar, Y.V., Ha, M.K., Park, J.J., Yu, H.C., Wang, B. (2008) A Direct Assessment Approach for Structural Strength Evaluation of Cargo Containment System under Sloshing Inside LNGC Tans based on Fluid Structure Interaction, *Proc. 27th Int. Conf. Offshore Mech. & Arctic Eng.*, Estoril, Portugal, 5, pp.835~845.
- Kim, J.W., Kim, K. (2007) Response-based Evaluation of Design Sloshing Load for Membrane-type LNG Carriers, *26th OMAE Conf.*, San Diego, USA.
- Kim, S.Y., Kim, Y.H., Ryu, M.C., Kim, Y.S. (2010) Prescreening and Statistical Evaluation of Sloshing-Induced Impact Pressure, *Proc. Soc. Naval Archi. Korea*, pp.514~523.
- Kim, Y. (2010) Repo of research activities and sloshing model test of rtAdvanced Marine Engineering Center at Seoul National University (in Korean)
- Kim, Y.I., Jang, C.H., Kang, J.K. (2011) Development of the Response-based Strength Assessment Procedure of the LNG Cargo Containment System under Sloshing Impact Load, *Proc. 12st Int. Ocean & Polar Eng. Conf.*, Hawaii, USA, ISOPE, 3, pp.170~176.
- Lee, S.J., Yang, Y.S., Kim, S.C., Lee, J.H. (2011) Strength Assessment Procedure of LNG CCS under Sloshing Load Based on the Direct Approach, *Proc. Int. Offshore & Polar Eng. Conf.*, ISOPE, Hawaii, USA, pp.183~190.
- LR (2009) Sloshing Assessment Guidance Document for Membrane Tank LNG Operations LR Guidance Notes, *Lloyd Register*.
- Nam, S.K., Kim, W.S., Noh, B.J., Shin, H.C., Choi, I.H. (2006) The Parametric Study on the Response of Membrane Tanks in a Mark III Type LNG Carrier Using Fully Coupled Hydro-elastic Model, *Proc. Int. Conf. Ship & Offshore Tech.*, ISCOT, Busan, Korea.
- Ryu, M.C., Hwang, Y.S., Jung, J.H., Jeon, S.S., Kim, Y.S. (2009) Sloshing Load Assessment for LNG Offshore Units with a Two-Row Tank Arrangement, *Proc. 19th Int. Offshore & Polar Eng. Conf.*, Beijing, China, ISOPE, 3, pp.284~294.
- Yoo, M.J., Lee, S.J., Kim, S.C., Lee, J.H., Nho, I.S. (2011) Characteristics of Dynamic Response of Mark III LNG Containment Subjected to Idealized Triangular Sloshing Impact, *Proc. Int. Offshore & Polar Eng. Conf.*, ISOPE, Hawaii, USA, pp.177~182.

---

## 요 지

LNG 방열 시스템의 선형 동적해석 모델을 사용하여 슬로싱 충격 압력을 구조해석에 적용 시 사용되는 이상화된 삼각파 압력에 대해서 검토하였다. 삼각파 압력의 최대값, 지속시간, 비대칭성의 충격과에 대한 구조 안전성 평가를 위해서 멤브레인 구조의 허용기준과 슬로싱 압력에 관련된 간략화된 파괴압력에 대해 검토하고, 슬로싱 충격 압력의 지속시간과 비대칭성으로 특징 지워진 이상화된 삼각파 형상의 압력을 고려한 일련의 선형 동적해석을 수행하여 설계기준으로 사용할 파괴압력을 도출하였다. 본 논문에서 제시한 방법을 통해서 방열시스템 구조 요소의 안전성을 평가하기 위한 파괴 압력을 선정할 수 있고 모형실험을 통한 슬로싱 압력과의 비교를 통하여 방열시스템의 구조안전성을 평가할 수 있을 것이라 판단된다. 또한 해석결과를 통해 방열시스템에서의 최대 응력은 매우 짧은 순간의 충격하중 하에서는 압력의 비대칭성 보다는 하중 지속시간에 많은 영향을 받고 있음을 검토하였다.

**핵심용어** : LNG 화물창, 슬로싱 강도평가, 슬로싱 충격, 삼각 하중, 선형 동적 해석.