



## 슬로싱 하중을 받는 한국형 LNG선 화물창(KC-1)의 보냉 판넬에 대한 구조 안전성 평가

†진교국 · 오병택 · 김영균 · 윤인수 · 양영철

한국가스공사 연구개발원 LNG기술연구센터

(2013년 1월 2일 접수, 2013년 4월 16일 수정, 2013년 4월 26일 채택)

## An Assessment of Structure Safety for Basic Insulation Panel of KC-1 LNG Cargo Containment system under Sloshing Load

†Kyo-Kook Jin · Byung-Taek Oh · Young-Kyun Kim

Ihn-Soo Yoon · Young-Chul Yang

LNG Tech Center, R&D Division, KOGAS, Aansan 426-790, Korea

(Received January 2, 2013; Revised April 16, 2013; Accepted April 26, 2013)

### 요약

한국형 LNG선 화물창(KC-1)의 개발은 LNG선의 핵심기술인 화물창시스템의 원천기술을 확보하여 외화절감 및 조선 산업의 경쟁력을 높이는 데 그 목적이 있다. 화물창 내부의 액체가 선박의 모션에 의해 생기는 슬로싱 충격 하중에 대한 LNG선의 화물창의 구조 안전성 평가는 중요한 설계 요소가 되었다. 슬로싱 현상에 의한 구조 안전성을 평가하는 가장 이상적인 방법은 유체 영역과 화물창 구조의 상호 작용을 완벽하게 구현하는 것이다. 그러나 유체-구조 연성해석은 방대한 계산 시간과 결과의 정확성을 보장하기 어렵기 때문에 불규칙적인 슬로싱 압력을 삼각파의 형태로 이상화하여 구조 안전성을 평가하였다. 따라서 본 연구에서는 슬로싱 압력은 15/1000초 동안에 최대 10bar의 압력으로 가정한 삼각파로 고려하였고, 해석 결과 한국형 LNG선 화물창(KC-1)의 보냉 판넬은 슬로싱 하중에 대해 구조적으로 건전한 것으로 평가되었다.

**Abstract** - The purpose of the development of KC-1 LNG cargo containment system is reduction in royalty and increase in competitiveness of shipbuilding industry. An assessment of structure safety for LNG cargo containment system under sloshing load due to ship motion has become an important design element. The ideal way is to implement fully interaction of the fluid domain and the cargo containment system. However the irregular sloshing pressure were idealized in the form of a triangular wave for safety assessment because the fluid-structure interaction analysis is taken the extensive computation time and difficult to ensure the accuracy of the results. In this study, the sloshing load was assumed to be a triangular wave with a maximum pressure of 10 bar during 15/1000 seconds. In the analytic results, the basic insulation panel of KC-1 LNG cargo containment system was assessed to be structurally safe for sloshing load.

**Key words** : KC-1 LNG cargo containment system, insulation panel, sloshing, structure safety

†Corresponding author:kkjin@kogas.or.kr

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

LNG선은 극저온의 액체화물을 안전하게 운송해야 하기 때문에 고도의 정밀한 비선형 구조해석을 필요로 하는 고부가가치선박이다. 최근 에너지원의 다원화와 무공해 에너지 공급을 늘리기 위하여 청정 에너지인 LNG 수요가 급증하여 화물창의 크기가 증가된 LNG선의 대형화가 요구되고 있다. 하지만 이러한 LNG선 화물창의 원천기술은 모두 해외에서 보유하고 있어 선박 건조시마다 매우 큰 로열티를 지불하고 있다[1]. 한국형 LNG선 화물창(KC-1)의 개발은 LNG선의 핵심기술인 화물창시스템의 원천기술을 확보하여 외화절감 및 기술독립성을 높이는 데 그 의의가 있다고 할 수 있다. 또한 LNG선 기술을 응용하는 LNG-RV, LNG-FSRU, LNG-FPSO 화물창 기술개발을 위한 원천기술을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 고려한 KC-1 구조는 Fig. 1과 같이 크게 1, 2차 멤브레인(membrane)과 보냉 판넬(insulation panel)로 이루어져 있다. 멤브레인은 초저온의 열 수축/팽창에 대한 충격 흡수와 LNG 기밀 유지를 위한 것이고, 보냉 판넬은 초저온의 LNG로부터 안쪽 선체(inner hull)를 보호하기 위한 것이다. 기존의 MARKIII와 비교해 보면, KC-1은 두 겹의 멤브레인을 사용함으로써 구조적인 안전성과 기밀성이 한층 높아졌다 할 수 있고 두 단이 아닌 한 단의 보냉 판넬로 구성함에 따라 구조가 간단해져 시공성을 높였다 할 수 있겠다.

본 연구는 한국형 LNG선 화물창(KC-1)의 설계에 대한 안전성을 검증하기 위하여 수행한 동적 구조해석에 대한 내용을 다루었다. 본 연구에서 고려한 안전성 검토대상은 보냉 판넬(insulation panel)중 앵커가 없는 곳이며 이 때, 자중, 내부압력 및 온도하

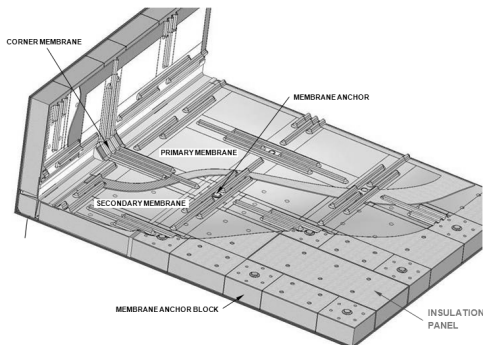


Fig. 1. Structure of the KC-1 cargo system.

중과 더불어 슬로싱 하중이 주요한 하중이다.

## II. 해석방법

### 2.1. 유한요소해석 모델

본 연구에서 고려한 보냉 판넬은 Fig. 2에서 보이는 것처럼 윗면과 아랫면에 합판(plywood)이 설치되고 그 사이에 폴리우레탄폼(PUF)로 채워져 있는 구조물이다. 그리고 윗면에는 초저온에 의해 발생하는 수축의 충격을 최소화하기 위한 가로와 세로의 슬릿(slit)이 존재한다.

Fig. 3은 보냉 판넬의 동적구조해석을 하기 위한 유한요소해석모델로 상용프로그램 ABAQUS 6.10을 사용하였고, 본 연구에서는 유한요소해석 시간을 최소화하기 위해 전체구조물의 1/4 모델을 사용하여 구조적 거동을 고찰하였다.

### 2.2. 해석조건

유한요소해석에 적용한 물성치는 Table 1에 나타

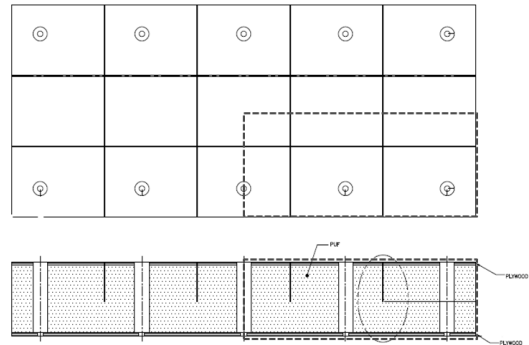


Fig. 2. Structure of the basic insulation panel.

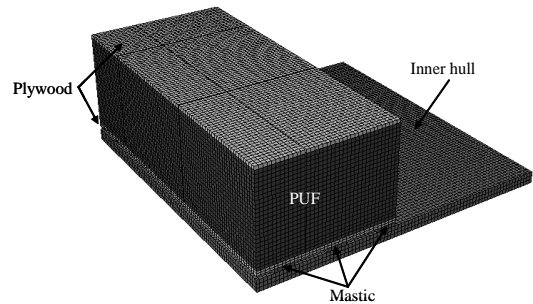


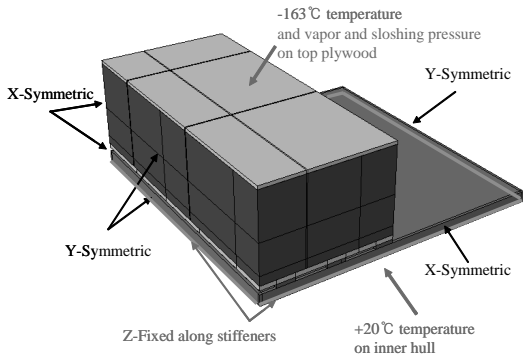
Fig. 3. Finite element model of basic insulation panel.

내었고 경계 조건은 1/4 모델이기 때문에 그 경계에서는 대칭조건을, 선체 바닥은 보강재(stiffener)가 위치한 곳에 구속조건을 주었다. 하중은 IMO 규칙에 의거한 선박 거동에 의한 가속도, 화물창 안에 있

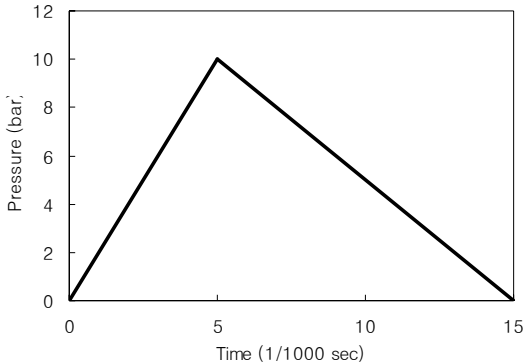
는 LNG 및 가스압력, 온도분포에 의한 열하중 및 슬로싱이 고려되었다. 위의 하중과 경계조건들은 Fig. 4와 같이 도식화할 수 있으며 특히, 슬로싱 하중은 Fig. 5와 같이 총 15/1000초 동안에 5/1000초에 최대 10bar의 압력을 갖는 삼각형 형태의 단위충격량으로 고려하였다.

**Table 1.** Material properties

	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion (e-6/°C)	Thermal conductivity (W/m°C)
Inner hull	206	0.3	11	15
Mastic	2.9	0.3	60	0.4
Plywood	8.9	0.17	5.5	0.17
Insulation	0.035	0.30	60	0.029
Bolt	201	0.30	14	14.6



**Fig. 4.** Loads and boundary conditions.



**Fig. 5.** Triangle shaped sloshing pressure.

### III. 수치적 해석결과 및 고찰

KC-1 화물창의 유한요소모델에 슬로싱 하중을 적용했을 때, 전체적인 구조물의 응력 분포를 Fig. 6에 나타내었다. 또한, 매스틱(mastic), 합판(plywood), 폴리우레탄폼(PUF) 및 볼트(bolt)에 대한 각 부재들의 최대 응력값은 Table 2에 정리하였고, 자세한 응력분포는 Fig. 7~10에 나타내었다. 모든 응력값과 분포는 값의 최대값을 보여주는 6/1000 초에서의 결과를 나타낸 것이다. 각 부재의 허용응력기준은 항복강도에 매스틱과 합판은 2.0을, 폴리우레탄폼과 볼트에는 1.5를 적용하였다.

Table 2를 보면, 매스틱, 합판, 폴리우레탄폼 및 볼트는 모두 최대응력이 허용응력보다 낮아 안전계수가 1.0보다 크기 때문에 건전함을 알 수 있다. 다만, 합판과 그 아래 매스틱이 만나는 경계의 모서리 부분에서 수직방향의 큰 압축응력이 걸리는데 실제 매스틱의 단면형상이 현재 유한요소모델처럼 직사각형이 아닌 타원형에 가까워 해석결과처럼 큰 압축응력이 걸리지 않을 것으로 판단된다.

**Table 2.** Summary of stress results

	Material	Maximum Stress (MPa)	Allowable Stress (MPa)	Safety Factor
Mastic	Mastic	6.8	15	2.2
Plywood	Plywood	12 <sup>(1)</sup>	50	4.2
		9 <sup>(2)</sup>	40	4.5
		1.71 <sup>(3)</sup>	2.0	1.2
		6.56 <sup>(4)</sup>	4.5	0.7
		2.54 <sup>(5)</sup>	3.5	1.4
Insulation	PUF	1.15	1.15	1.0
Bolt	STS304L	48	206	4.3

- (1) horizontal tensile stress
- (2) horizontal compressive stress
- (3) perpendicular tensile stress
- (4) perpendicular compressive stress
- (5) shear stress

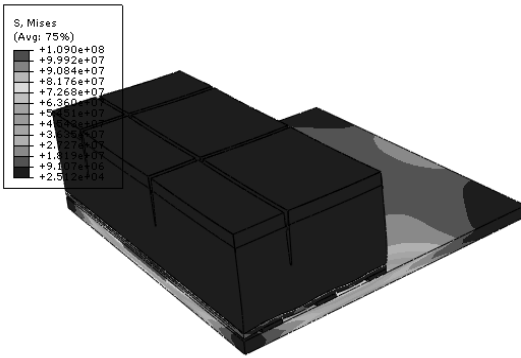


Fig. 6. Stress contour of the whole model at 6/1000 seconds

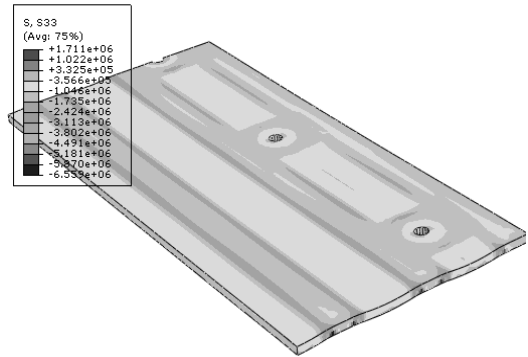


Fig. 8. Vertical stress (S33) of the plywood at 6/1000 seconds.

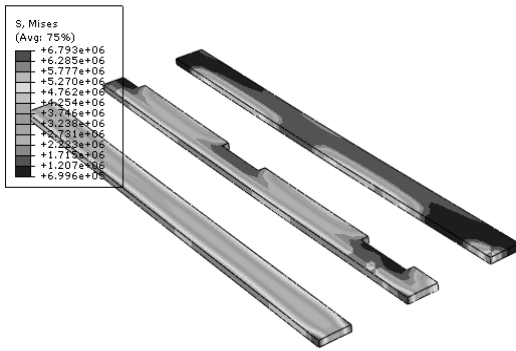


Fig. 7. von-Mises stress of the mastic at 6/1000 seconds

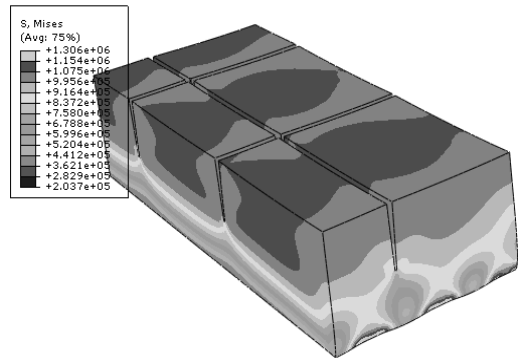


Fig. 9. von-Mises stress of the PUF at 6/1000 seconds.

Fig. 7은 6/1000초에서의 매스틱 응력분포이다. 최대응력은 매스틱의 가장자리에서 나타나며 최소응력은 볼트 체결을 위한 합판이 자리하는 곳에서 나타난다. 현재 매스틱의 모델링이 사각단면으로 표현되어 있어 모서리에 응력집중이 발생한 것으로 판단되며 실제 타원형의 단면일 경우 이러한 응력집중은 해소되리라 사료된다. 그럼에도 불구하고, 응력집중에 의한 매스틱의 최대응력(6.8MPa)은 허용응력(15.0MPa)의 절반수준으로 구조적으로는 안전하다.

합판은 평면과 두께방향, 그리고 전단방향의 항복강도가 다르기 때문에 각 성분의 응력 검토가 필요하다. 각 성분의 허용응력과 최대응력을 비교하면 두께방향의 응력이 가장 취약하고 그 분포는 Fig. 8에 도시하였다. 두께방향의 최대 응력값은 매스틱과 연결되는 부위에서 나타나며 이러한 응력집중은 앞서 살펴본 매스틱의 사각단면에 의한 것으로 판단된다.

보냉 판넬에서 단열제 역할을 하는 폴리우레탄폼의 두께는 BOG(Boil of Gas)를 결정하는 중요한 설계인자이며 이는 화물창의 전체 설계에 영향을 주게 되는데 그 두께가 슬로싱 하중조건에서 구조적 안전성이 확보되도록 결정한다. Fig. 9는 6/1000초에서 폴리우레탄폼의 응력분포를 나타낸 것이다. 상단의 전 표면에서 슬로싱 하중을 받고 있고, 아래 매스틱과 연결되는 곳에서 응력집중이 나타나는 것을 알 수 있고, 최대응력과 허용응력이 동일하게 폴리우레탄폼의 두께를 결정하였다. 또한, 상단의 슬릿은 슬로싱 하중에 의한 응력집중은 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 6/1000초에서 볼트의 응력분포를 나타낸다. 볼트는 와셔와 결합된 형태로 합판과 선체를 연결하여 전체적인 보냉판넬과 선체를 결합하는데 사용한다. 볼트에서 나타난 최대응력은 48MPa으로

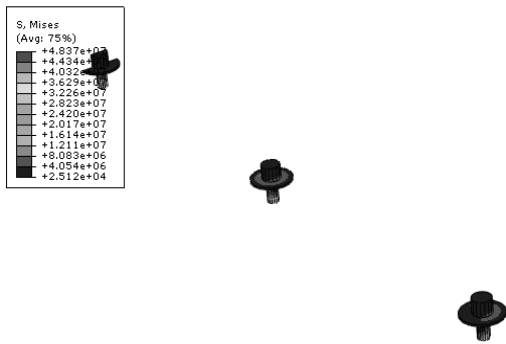


Fig. 10. von-Mises stress of the bolt at 6/1000 seconds.

허용응력인 206MPa 보다 1/4수준으로 구조적으로 안전한 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 한국형 LNG선 화물창(KC-1)의 보냉판넬에 대해 슬로싱 하중에 대한 응력 및 구조적 거동을 유한요소법으로 해석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 최대 10bar의 압력을 갖는 삼각형 형태의 슬로싱 하중을 받는 보냉 판넬의 각 부재의 응력을 검토한 결과 매스틱, 폴리우레탄폼 그리고 볼트는 최대응력이 허용응력보다 낮아 구조적으로 안전한 것으로 판단된다.
2. 보냉 판넬에서 가장 중요한 설계인자인 폴리우레탄폼의 두께는 슬로싱 하중조건에서 최대응력이

허용응력 내에 있도록 설계되었고, 구조적으로 안전하다고 판단된다.

3. 합판의 최대응력은 허용응력보다 높아 구조적으로 취약하다 할 수 있으나, 이는 현재 모델링된 사각단면의 매스틱 형상에 의한 응력집중으로 판단되며 추후에는 매스틱과 합판과의 관계를 고려한 매스틱 형상에 대한 연구가 이루어져 좀 더 정확한 해석이 이루어져야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 LNG플랜트사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- [1] a S.W. Park, S.H. Kim, "Analysis of Technology Patents for High Value-added Ship", The Society of Naval Architects of Korea, Vol. 48, No. 1, 11-16, 2011.
- [2] IACS, Common Structural Rules for Bulk Carriers, Ch 7, (2005)
- [3] J.H. Kim, I.S. Yoon, "Stability Evaluation of Closed Mock-up Tank for Developing Korean LNG Carrier Cargo Containment System", The Korean Society of Mechanical Engineers conference, Vol. 9, 469-474, 2009.
- [4] M.H. Oh, T.H. Park, J.S. Moon, W.S. Shim, H.S. Shin, M.S. Lee, "Dynamic Structural Safely Evaluation Procedure of FLNG Cargo Containment for Sloshing", KAOSTS conference, 825-831, 2012.