

슬로싱 하중을 받는 KC-1 단열시스템의 표면 완충 효과[§]

진교국^{*†} · 윤인수^{*} · 양영철^{*}

* 한국가스공사 연구개발원

An Effect of Surface Dashpot for KC-1 Basic Insulation System Under Sloshing Loads

Kyo Kook Jin^{*†}, Ihn Soo Yoon^{*} and Young Chul Yang^{*}

* R&D Division, KOGAS

(Received January 9, 2015 ; Revised May 8, 2015 ; Accepted August 4, 2015)

Key Words: KC-1 Cargo Containment System(KC-1 화물창), Sloshing(슬로싱), Fluid-Structure Interaction(유체-구조 상호작용)

초록: 슬로싱 하중은 LNG 화물창의 내부 구조물에 강한 충격을 유발시킨다. 이는 슬로싱 하중에 의해 평면이나 구석 부위에 순간 압력을 증가시키기 때문에 멤브레인 타입의 화물창에서는 매우 위험하다. 멤브레인 타입의 화물창은 선체구조에 비해 매우 유연하므로, 유체-구조 상호작용은 슬로싱 하중을 받는 화물창의 구조해석에서 매우 중요한 역할을 한다. 본 연구는 유한요소해석 기법을 이용하여 LNG 유체와 KC-1 단열시스템의 경계에 대시포트를 이용하여 유체-구조 상호작용을 고려한 해석 방법에 대해 다루었다. 결론적으로 표면 완충 효과를 적용하였을 경우, KC-1 단열시스템의 폴리우레탄폼에서 발생하는 최대응력이 약 1.5 배 낮아지는 효과가 있음을 알아내었다.

Abstract: Sloshing of LNG cargo can cause high impact loads on the supporting and containing structures. This is particularly critical for membrane-type tanks since these will have flat surfaces and corner regions which can lead to increased peak pressures for sloshing impacts. The membrane-type containment system is much more flexible compared to the steel hull structure. As a result, fluid-structure interaction plays an important role in the structural analysis of the containment system under sloshing load. This study is based on the direct calculation method of applying sloshing loads to the KC-1 basic insulation system using finite element analysis. The structural analysis of KC-1 basic insulation system considers the dashpot as fluid-structure interaction between liquid cargo and the LNG containment system. The maximum stress of the polyurethane form for KC-1 insulation system is 1.5 times lower than one without dashpot.

1. 서론

LNG(Liquefied Natural Gas) 선은 극저온의 액체화물을 안전하게 운송해야 하기 때문에 고도의 정밀한 비선형 구조해석을 필요로 하는 고부가가치선박이다. 최근 에너지원의 다원화와 무공해 에너지 공급을 늘리기 위하여 청정에너지인 LNG 수요가 급증하여 화물창의 크기가 증가된 LNG 선의 대형화가 요구되고 있다. 하지만 이러한 LNG 선 화물창의 원천기술은 모두 해외에서 보유하고 있어 선박 건조 시 마다 매우 큰 로열티를 지불하고 있다.⁽¹⁾ 한국형 LNG 선 화물창 KC-1(KOGAS Cargo Containment System number-1)의 개발은 LNG 선의 핵심기술인 화물창시스템의 원천기술을 확보하여 외화절감 및 기술독립성

[§] 이 논문은 대한기계학회 2014년도 추계학술대회(2014. 11. 11-14., 김대중컨벤션센터) 발표내용을 토대로 한 논문임.

[†] Corresponding Author, kkjin@kogas.or.kr

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

을 높이는데 그 의의가 있다고 할 수 있다. 또한 LNG 선 기술을 응용하는 LNG-RV(Re-gasification Vessel), LNG-FSRU(Floating Storage Re-gasification Unit), LNG-FPSO(Floating Production Storage and Offloading) 화물탱크 기술개발을 위한 원천기술을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서 고려한 KC-1 화물창 구조는 Fig. 1 과 같이 크게 1, 2 차 멤브레인 방벽과 단열시스템으로 이루어져 있다. 멤브레인 방벽은 초저온의 열 수축에 대한 충격 흡수와 LNG 의 기밀 유지를 위한 것이고, 단열시스템은 초저온의 LNG 로부터 선박의 안쪽 선체를 보호하기 위한 것이다. KC-1 화물창의 이점은 근접한 두 겹의 멤브레인 방벽을 사용함으로써 구조적인 안전성과 기밀성이 한층 높아졌다 할 수 있고 단층의 단열시스템으로 구성함에 따라 구조가 단순해져 시공성을 높였다 할 수 있겠다.

LNG 선의 대형화 추세에 따라 멤브레인 화물창의 크기도 증대되고 있는데 구조건전성 측면에서 슬로싱 하중에 대한 관심이 높아지고 있다. 슬로싱은 파도에 의한 선박의 거동에 의해 화물창 내부의 LNG 액체가 화물창 내벽으로 가해지는 충격하중으로 정의할 수 있다. 이러한 슬로싱 하중은 실제 선박에서 유추할 수 없기 때문에 화물창의 축소 모형을 통해 실험적으로 얻거나 유체동적해석을 통해 이론적으로 계산되어 진다.

멤브레인 화물창의 슬로싱 평가는 ABS 선급사의 기준에 의거하면 3 단계를 통해 이루어진다. 슬로싱 하중이 실험적으로나 이론적으로 정의되었다고 가정한다면, 1 단계는 슬로싱 하중을 정적 하중으로 화물창에 가하여 정적해석을 통해 구조건전성을 판단하는 것이다. 1 단계를 만족하지 않으면 2 단계에서는 슬로싱 하중을 충격 하중으로 화물창에 가하여 동적해석을 통해 평가하는 방법이다. 이 때, LNG 와 화물창 경계에는 유체와 구조물의 상호관계를 고려하도록 하고 있다. 2 단계를 만족하지 않으면 3 단계에서는 슬로싱 하중을 LNG 액체를 모델링하여 유체-구조 연성해석을 통해 평가하는 방법이다.

본 연구는 KC-1 화물창의 단열시스템에 대한 슬로싱 하중 평가 중 앞서 살펴본 2단계의 평가 방법을 적용하여 LNG와 단열시스템의 경계면에서의 유체-구조 상호관계를 대시포트(dashpot)를 이용하여 구현하였으며, 그 표면 완충 효과의 내용을 다루었다.

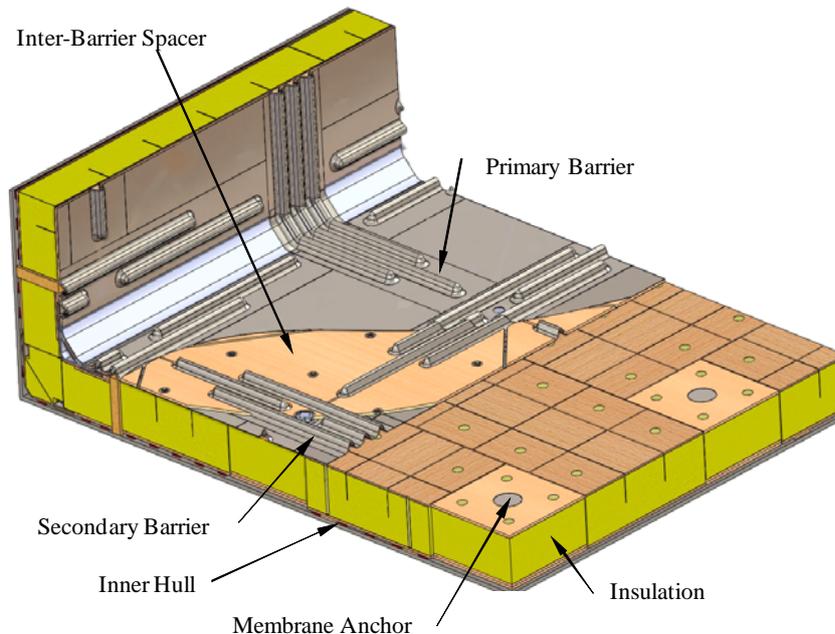


Fig. 1 Structure of KC-1 cargo containment system

2. 유한요소해석

2.1 유한요소모델

본 연구에서 고려한 KC-1 단열시스템은 Fig. 2와 같이 윗면과 아랫면은 9mm와 12mm의 두께를 가진 합판이고 그 사이에는 단열을 위한 폴리우레탄폼으로 채워져 있다. 그리고 윗면에는 초저온에 의한 열수축의 충격을 최소화하기 위한 가로와 세로의 슬릿이 존재한다. 또한, 이러한 단열시스템과 선체 사이에는 단차 보정용 마스틱이 있으며 이 마스틱은 선체에 붙어 있지 않는다.

Fig. 3은 KC-1 단열시스템의 동적구조해석을 하기 위한 유한요소모델로 해석 시간을 최소화하기 위해 전체 구조물의 1/4 모델을 사용하였다. 슬로싱 하중에 대한 평가를 위해 동적구조해석을 하였고 상용프로그램인 ABAQUS 6.10-1을 사용하였다. 요소는 삼차원의 8개의 점을 갖는 것을 사용하였고 요소의 크기는 5~20mm로 이는 변형량과 응력값 등의 구조적 거동이 충분히 신뢰를 갖는 것이다.

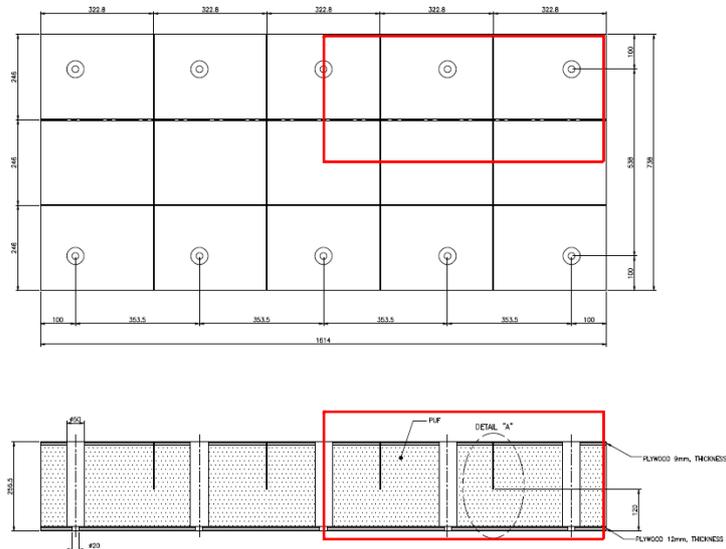


Fig. 2 Structure of basic insulation system

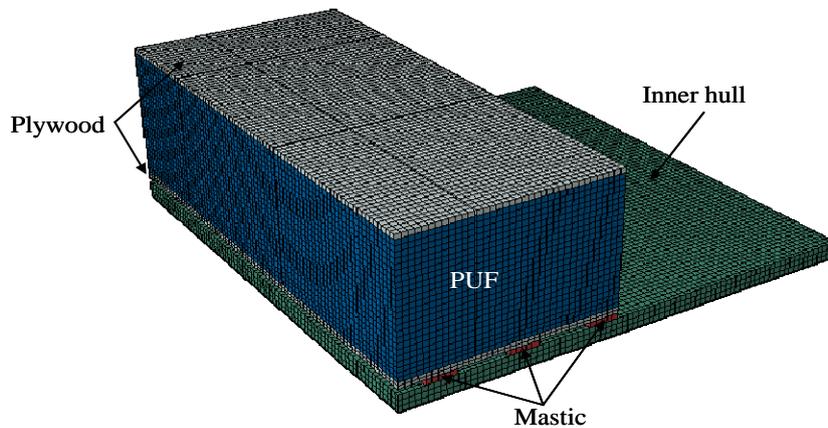


Fig. 3 Finite element model of basic insulation system

2.2 물성치

본 연구에서 적용한 물성치는 Table 1 에 나타내었다.

2.3 하중조건

본 연구에서 고려한 모든 하중조건은 170K급 선박에 대한 NO.2 화물창에 대한 것이다. 선박의 운동에 의해 생기는 가속도는 관성힘으로 KC-1 단열시스템에 작용한다. 각 방향 가속도의 최대값은 IMO 기준에 의해 결정되었고 Table 2에 나타내었다. 위의 최대 가속도들은 현재의 유한요소모델에 적용되었으며 이는 매우 보수적인 접근이라 할 수 있다. 또한, 수직방향의 가속도는 중력이 포함되어 있어 KC-1 단열시스템의 자중은 자연스럽게 고려되었다.

LNG 화물창은 가스에 의한 내압이 항상 작용하고 있고 그 값은 25 kPa 이다. 단열시스템의 표면 위는 초저온의 LNG와 맞닿아 있기 때문에 열 수축/팽창이 불가피하며 이러한 열하중은 매우 중요한 하중조건 중 하나이다. 단열시스템의 온도분포를 구하기 위해 단열시스템 표면의 온도는 -163°C , 안쪽 선체의 바깥 온도는 $+20^{\circ}\text{C}$ 로 가정하여 열전달 해석을 수행하였다. Fig. 4는 열전달 해석의 결과인 단열시스템의 온도분포를 나타내며, 추후 이를 반영하여 구조해석을 수행하였다.

Table 1 Material properties

	Elastic modulus (GPa)			Poisson's ratio			Coefficient of thermal expansion ($\text{e-6}/^{\circ}\text{C}$)			Thermal conductivity ($\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$)
	E_1	E_2	E_3	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	α_1	α_2	α_3	
Inner hull	206	206	206	0.3	0.3	0.3	11	11	11	15
Mastic	2.9	2.9	2.9	0.3	0.3	0.3	60	60	60	0.4
Polyurethane foam	0.035	0.035	0.035	0.3	0.3	0.3	60	60	60	0.03
Plywood	8.9	7.5	4.1	0.17	0.17	0.17	5.5	5.5	35	0.17

Table 2 Acceleration

Direction	Acceleration (m/s^2)
Longitudinal	1.49
Transverse	7.96
Vertical	14.41

Table 3 Dashpot coefficient

Definition	Value
Maximum sloshing pressure (P)	1.24 MPa
Area for 3X3 Cluster(A)	2.48 m ²
Force (F = P X A)	3,076 kN
Velocity (V)	1,700 m/s ⁽²⁾
Dashpot coefficient (= F / V)	1809 N-s/m

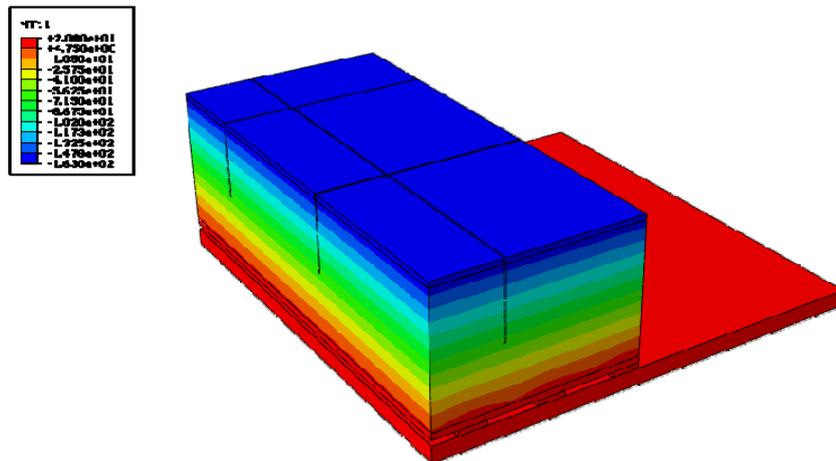


Fig. 4 Temperature distribution of insulation system

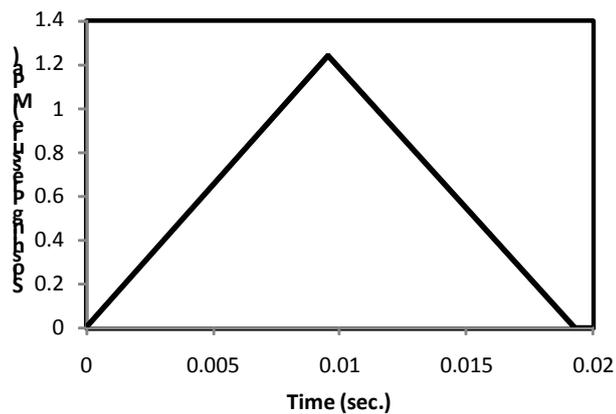


Fig. 5 Triangle shaped sloshing pressure

슬로싱 하중은 실제 170K급 화물창의 1/50 모형의 슬로싱 시험에 의한 결과이며, Fig. 5와 같이 삼각형 모양의 시간-압력 관계로 0.0096 초 동안에 최대 압력 1.24 MPa 에 도달하여 0.0097 초 후에 0 MPa 압력으로 떨어진다.

2.4 경계조건

경계 조건은 유한요소모델이 1/4 모델이기 때문에 그 경계에서는 대칭조건을, 선체 바닥에 보강재가 위치한 곳에 구속조건을 주었고 이를 Fig. 6 에 나타내었다.

마스틱과 선체는 붙지 않기 때문에 이 둘 사이는 접촉 조건을 적용하였다. LNG액체를 대체하여 유체-구조물 경계에 대한 효과를 고려하기 위해 표면완충 효과를 갖는 등가 대시포트 시스템을 고려하였고 Table 3과 같이 대시포트 계수를 가정하였다. 본 연구에서는 표면완충효과를 살펴보기 위해 대시포트를 적용하지 않은 모델과 대시포트 계수를 450 및 1800을 고려한 두 가지 모델에 대해 해석을 진행하였다.

3. 해석 결과

Fig. 7은 KC-1 단열시스템의 표면 변위를 대시포트 계수 값에 따라 시간이력적으로 표현한 것이다. 대시포트를 적용하지 않았을 경우 최대 슬로싱 하중이 가해지는 0.0096 초에서 최대 9mm까지 표면이 내려가고 슬로싱 하중이 끝나는 0.02초에서부터 출렁거림을 알 수 있다. 대시포트 계수가 1800 N-s/m 일 때에는 0.016 초에서 최대 3.8mm까지 표면이 내려가고 슬로싱 하중이 끝난 후에 표면 완충 효과로 인해 출렁거림이 없음을 알 수 있다.

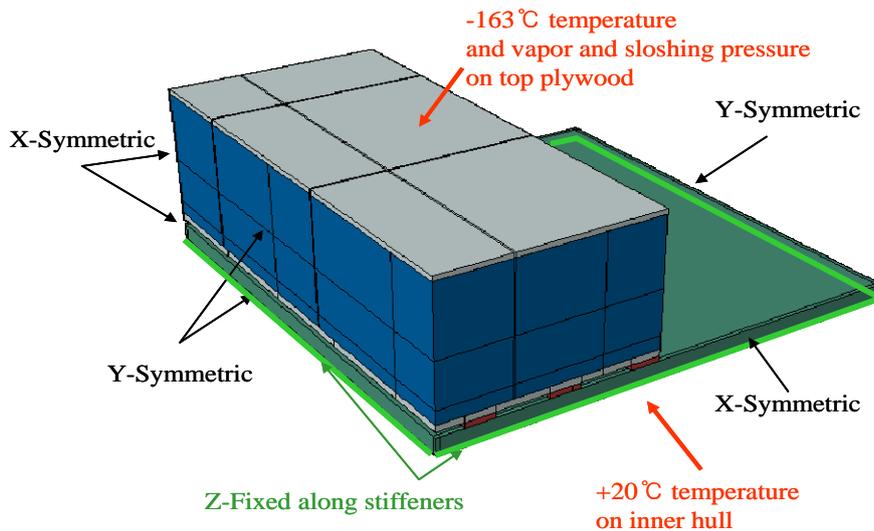


Fig. 6 Loads and boundary conditions

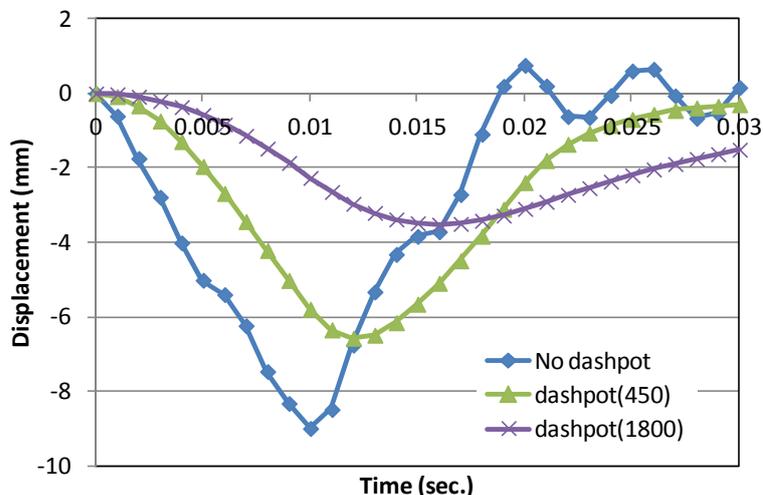


Fig. 7 Displacement and time history of top surface for insulation system

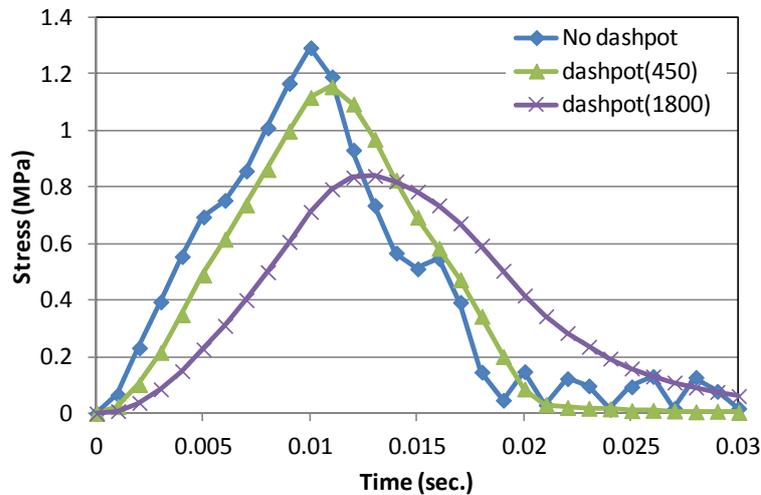


Fig. 8 Stress and time history for polyurethane foam

Fig. 8은 KC-1 단열시스템 중 폴리우레탄폼의 최대응력이 나타나는 노드의 응력을 시간이력으로 표현한 것이다. 대시포트를 적용하지 않았을 경우 최대 슬로싱 하중이 가해지는 0.0096 초 근처에서 최대응력 1.3 MPa이 나타나며 슬로싱 하중이 끝나는 0.02초 근처 이후부터 응력의 변화 추세가 급격히 변화하는 것을 알 수 있다. 대시포트 계수가 1800 N-s/m 일 때에는 0.013 초에서 최대응력 0.85 MPa 로 이는 표면 완충 효과로 인하여 낮아짐을 알 수 있다. 대시포트를 적용하지 않은 경우에는 최대응력이 폴리우레탄폼의 압축강도인 0.97 MPa 보다 높아 파손의 위험이 있는 것으로 사료되며 이는 KC-1 단열시스템의 수면낙하시험(wet drop test)의 결과에 비추어 볼 때 적합하지 않은 것으로 판단된다. 그러므로 슬로싱 하중에 대한 단열시스템의 안전성 평가시 LNG와 단열시스템의 경계면에 표면완충효과를 고려해야 할 것이다.

4. 결론

유한요소해석을 이용하여 KC-1 단열시스템의 슬로싱 하중에 의한 LNG 와 단열시스템 경계면의 표면 완충 효과를 알아보았다. 표면 완충 효과를 적용할 경우 그렇지 않은 경우와 비교하면 시스템의 변위는 약 2.4 배 정도 작아졌으며 최대응력은 약 1.5 배 정도 낮아지는 효과가 있는 것으로 판단된다. 향후 LNG 액체와 시스템의 경계에 표면완충효과를 고려하면 더 경제적인 시스템 개발이 이루어질 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국토해양부 LNG 플랜트사업단의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) 박성우, 김상현, 2011, “고부가가치 선박 분야 기술 특허 분석”, *BSNAK*, Vol. 48, No. 1, pp. 11~16.
- (2) Wang, B., Kim, J. W. and Shin, Y., 2006, “Strength Assessment of Membrane-Type LNG Containment Systems,” *ABS Technical Papers*.
- (3) ABS, 2006, “Guidance Note on Strength Assessment of Membrane-Type LNG Containment Systems Under Sloshing Loads.”