

3X-Board를 적용한 멤브레인형 LNGC의 Slim화 설계

류성헌* · 조진래† · 하문근** · 이중남**

Slim Design for Membrane Type LNGC using 3X-Board

Sung-Heon Ryu, Jin-Rae Cho, Mun-Keun Ha and Joong-Nam Lee

Key Words: LNG(액화천연가스), Boil-Off Rate(증발률), Stitched Sandwich Composites(스티칭된 샌드위치 복합재), Polyurethane Foam(폴리우레탄 폼), Finite Element Method(유한요소법)

Abstract

In the development of LNG cargo, the current concern focuses on the slim design of insulation layer to increase the LNG carrying capacity. Not only thermal stability with BOR(Boil-Off Rate) but structural stability against the LNG weight and the sloshing phenomenon must be also considered. In this paper, we applied the stitched sandwich composite called the 3X-Board which is stitched through the core thickness direction using glass fiber to the LNG cargo. We evaluated the thermal and structural characteristics of 3X-Board by changing the core thickness and the material, in order to explore a validity for the slim design through the finite element analysis.

1. 서 론

LNG (Liquified Natural Gas)는 LNG수송선이라 불리는 특수하게 제작된 전용 운반선에 의해 원산지에서 각 수요지로 운송된다. 천연가스는 체적을 최소화하기 위해 대기압 상태에서 -162°C 근처의 낮은 온도로 액화되어 운반된다. 이런 LNG 운송에 있어 온도 상승에 따른 과도한 증발(BOG:Boil-off Gas)은 화물탱크의 구조적 파괴를 야기하여 수송선의 폭발 및 화재를 일으킬 수 있다. 뿐만 아니라 장시간의 수송과정에서 증발에 의해 빠져나가는 LNG의 손실도 중요하게 다루어야 할 문제이다.¹⁾ 따라서 LNG선의 Cargo는 운항 중 외부로부터의 침입 열량을 방지하기 위하여 재질이

다른 여러 개의 단열재로 구성된 단열구조로 되어 있다.

현재 LNG Cargo 제조사의 주요 연구개발 목표는 1회 LNG 운송 적재량을 극대화하는 것에 초점을 맞추고 있다. LNG 적재량을 높이기 위해 LNG선 선체자체를 증가시키는 것은 운하통과시 통관료의 급진적인 증가를 가져오기 때문에 현실적으로 불가능한 상태이다. 따라서, 현재의 LNG선 선체 규모에서 LNG 적재량의 증대는 Cargo 단열구조의 슬림(Slim)화로만 가능하다.

LNG Cargo 단열재의 설계시 단열성능뿐만 아니라 구조적 문제가 고려되어야 한다. 즉, 전술한 바와 같이 LNG 운송중 온도 상승에 의한 과도한 증발 및 LNG의 슬로싱(Sloshing)에 의한 충격이나 LNG자중에 의한 압력에 의해서 구조적 문제를 야기할 수 있다.

지금까지 단열구조에 대하여 실험적, 해석적 방법을 통하여 많은 연구가 진행중에 있으며 최근에는 코아의 양면에 부착된 면재들을 코아의 두께방향을 따라 스티칭함으로써 위쪽 면재와 아래쪽 면재를 서로 결합시킨 스티칭된 샌드위치

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계기술연구소

E-mail : jrcho@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2467 FAX : (051)514-7640

* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

** 삼성중공업(주) 조선사업부

복합재의 개발이 시도되고 있다.²⁾

본 연구에서는 폼 (Foam)의 두께방향으로 유리섬유가 스티칭된 샌드위치 복합재 (Stitched Sandwich Composites, 3X-Board)를 LNG Tank에 적용하여 유한요소법 (Finite Element Method)을 이용한 단열성능 및 구조강도적 측면에서 단열층 슬림 (Slim)화 설계방안 마련 및 그 타당성을 평가하여 보았다.

2. 문제 정식화

2.1 열전달 해석

2.1.1 지배방정식

공간상의 고정된 영역에서 생성량이 없는 3차원 정상상태 열전달 방정식은 식 (1)과 같다.⁵⁾

$$(kT_{,i})_{,i} = 0 \quad i = x, y, z \quad (1)$$

여기서, T 는 온도(°C), k 는 열전도계수(W/m°C)를 나타낸다. 이때의 경계 S 는 온도경계조건 S_T 와 열유속이 주어지는 S_q 로 구분되며 $S_T \cup S_q = S$, $S_T \cap S_q = 0$ 을 만족한다.

$$\begin{aligned} T(x, y, z) &= T_S(x, y, z) & \text{on } S_T \\ q_n = k_n T_{,n} &= h(T_S - T) & \text{on } S_q \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, T_S 는 표면온도(°C), q_n 는 heat flux (W/m²), h 는 대류열전달계수(W/m²°C)를 나타낸다.

2.1.2 유한요소 정식화

온도 T 와 같은 공간에 속하는 시험함수 Φ 를 식 (1)에 곱하여 적분하면 식 (3)을 얻을 수 있다.⁽¹⁾

$$\int_V [(kT_{,i})_{,i} - \Phi] dV = 0 \quad (3)$$

식 (3)에 divergence theorem 과 식 (2)의 경계조건을 적용시키켜 식 (4)을 얻는다.

$$\int_V [\Phi_{,i}(kT_{,i})] dV = \int_S \Phi h(T_S - T) dS \quad (4)$$

유한요소 정식화를 위해 온도에 대한 형상함수 \mathbf{N} 을 도입하여 온도를 근사화 시키면 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= \mathbf{N}(x, y, z) \bar{\mathbf{T}} \\ \Phi &= \mathbf{N}(x, y, z) \bar{\Phi} \end{aligned} \quad (5)$$

근사화 된 온도식을 이용하여 식 (4)를 유한요소 근사화 하면 식 (6)과 같은 matrix 형태의 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{K} \bar{\mathbf{T}} = \mathbf{Q} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } \mathbf{K} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{k} \mathbf{B} dV + \int_S h \mathbf{N}^T \mathbf{N} dS$$

$$\mathbf{Q} = T_S \int_S h \mathbf{N}^T dS$$

$$\mathbf{B} = \nabla \cdot \mathbf{N}$$

2.2 압축 강도 해석

2.2.1 지배방정식

공간상의 고정된 영역에서 3차원 탄성 모델의 지배방정식은 다음과 같다.⁵⁾

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (7)$$

여기서, f_i 는 체적력이다. 이 때의 경계는 역학경계($\partial \Omega_N$)와 변위경계($\partial \Omega_D$)로 구분되며 $\partial \Omega_N \cup \partial \Omega_D = \partial \Omega$, $\partial \Omega_N \cap \partial \Omega_D = 0$ 을 만족한다.

$$\begin{aligned} t_i &= \sigma_{ij} n_j & \text{on } \partial \Omega_N \\ u_i &= u_i^* & \text{on } \partial \Omega_D \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, t_i 는 표면력이며 u_i^* 는 경계에서 변위이고 n_j 는 단위 법선 벡터이다.

2.2.2 유한요소 정식화

지배방정식을 가상일의 원리에 따라 적분식으로 나타내면 식 (9)와 같은 변분 정식화된 식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \epsilon_{ij}(\mathbf{v}) \sigma_{ij}(\mathbf{u}) d\Omega \\ = \int_{\Omega} f_i v_i d\Omega + \int_{\partial \Omega_N} t_i v_i dS \end{aligned} \quad (9)$$

변위에 대한 형상함수 \mathbf{N} 을 도입하여 변위를 근사화 시키면 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{N}(x,y,z) \bar{\mathbf{u}} \\ \mathbf{v} &= \mathbf{N}(x,y,z) \bar{\mathbf{v}} \end{aligned} \quad (10)$$

근사화 된 변위식을 이용하여 식 (9)를 유한요소 근사화 하면 식 (11)을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{K}\bar{\mathbf{u}} = \mathbf{F} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \mathbf{K} &= \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} \, d\Omega \\ \mathbf{F} &= \int_{\Omega} \mathbf{N}^T \mathbf{f} \, d\Omega + \int_{\partial\Omega_N} \mathbf{N}^T \mathbf{t} \, dS \\ \mathbf{B} &= \nabla \cdot \mathbf{N} \end{aligned}$$

3. 3X-Board의 구조 및 등가 해석 모델

3.1 3X-Board의 구조

3X-Board는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 폴리우레탄 폼 (P. U. Foam)으로 된 코아와 유리섬유직물로 된 면재로 구성되어 있으며 위쪽 면재와 아래쪽 면재는 코아의 두께방향을 따라 유리섬유를 이용하여 스티칭함으로써 일체형으로 결합시키고 에폭시 수지 (Epoxy resin)를 함침 (Impregnation)함으로써 두께방향의 강성을 개선한 것이다. 여기서, 스티칭 간격 (50mm×50mm)은 길이 방향과 폭 방향을 따라 일정하게 고정하였다.²⁾

본 연구에서는 3X-Board를 선행 연구된 Fig. 2의 LNG Tank 1/4 모델에 적용하였다.

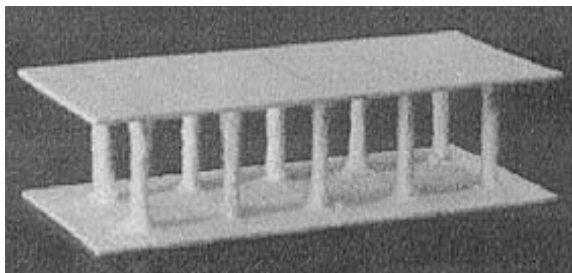


Fig. 1 3X-Board(with foam removed)

3.2 등가 해석 모델의 검증

실제 3X-Board를 LNG Tank에 적용하기 위하여 화물탱크를 구성하는 단열재에 대하여 균질화

기법을 적용하여 등가 모델화 하였고 검증모델에 대하여 열전달 해석 및 압축강도 해석을 통하여 이러한 가정들이 얼마나 영향을 미치는지 검증

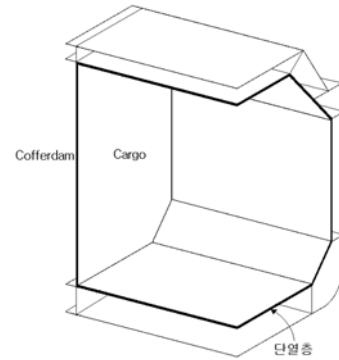
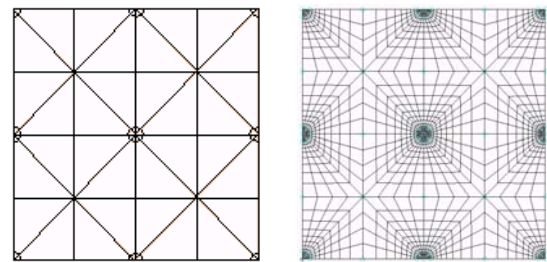


Fig. 2 Geometry of membrane type LNG Cargo

하였다. Fig. 3과 Table 1은 각각 등가 모델의 검증에 사용된 형상 및 물성치를 나타낸다.



(a) Geometric model (b) FE model

Fig. 3 Validation Model of 3X-Board

Table 1 Material properties of 3X-Board

	열전도계수 (W/m · K)	탄성계수 (GPa)
3X-Board (Effective model)	Table 2	0.1140
P. U. Foam	Table 2	0.0575
Stitched glass fiber	0.41	5.0000

3.2.1 열전달 해석

등가모델의 검증에 있어 실제 모델 전체를 모델링 할 수 없기 때문에 전술한 바와 같이 단열층의 일부분을 모델링하여 32시간 동안 비정상상태 열전달해석을 수행하였다.

해석 결과 Table 3에서 보는 바와 같이 침입열

량 분포가 거의 일치함을 볼 수 있다.

Table 2 Thermal Conductivity of P. U. Foam and 3X-Board(Equivalent model)

Temp.(°C)	Thermal Conductivity(W/mk)	
	P. U. Foam	3X-Board
-160	0.019	0.023
-120	0.022	0.026
-80	0.022	0.026
-40	0.022	0.026
-20	0.023	0.027
20.0560	0.026	0.030

Table 3 Comparison of Heat Transfer rate

Time(s)	침입 열량(W)	
	상세 모델	등가 모델
900	38796.24	38796.22
1013	23607.91	23607.89
1125	14365.99	14365.97
1238	8742.36	8742.34
1350	5320.40	5320.38
4241	3863.50	3863.46
58961	3154.32	3154.30
116561	2575.83	2575.82

3.2.2 압축강도 해석

앞서 설명된 검증모델에 대하여 압축강도 해석을 실시하였다. 해석조건으로는 Hull 부분에 변위를 구속하고 1차 내벽 (Primary barrier)에 LNG의 자중을 고려한 압력 122.3 kpa를 적용하여 정해석 후 해석결과를 비교하여 보았다.

Table 4 Results of Numerical Analysis for Compressive Strength

	상세 모델	등가 모델
Max. displacement(M)	1.46×10^{-4}	1.10×10^{-4}
Max. Effective strain	5.27×10^{-4}	3.14×10^{-4}

구조 강도적 검증 결과 상세 모델에서 국부적 변형으로 인하여 약간의 차이를 보이고 있다.

4. 3X-Board의 두께변화에 따른 BOR 특성

4.1 해석 방안

일반적으로 단열층의 두께가 두꺼울수록 열전달률은 낮아지지만 경제적인 측면에서 높은 부담이 될 수 있다. 그래서 본 연구의 목적인 단열층의 슬림 (Slim) 화를 위하여 단열층의 두께감소에 따라서 얼마만큼의 단열성능 저하를 가져오는지 파라메트릭 특성분석을 통하여 3X-Board의 운항경로별 BOG (Boil-Off Gas) 및 BOR (Boil-Off Rate)을 평가하여 보았다.

해석 모델은 앞서 설명한 바와 같이 3X-Board의 폼과 스티칭된 유리섬유를 등가 모델화 하였고, 선행 연구의 LNG Tank 1/4에 적용하였다. 경계조건은 전 항해구간에 대하여 부여하였다.¹⁾

4.2 수치해석 결과

Table 5는 3X-Board를 적용한 LNG Tank의 2차 단열층의 두께변화에 따른 만선허해시 BOR을 나타낸다. 여기서, case1~case4는 각각 0, 10, 20, 30 %의 두께변화를 나타내고, 기존의 폼 (Foam)만으로 구성된 단열층과 비교하였다.

Table 5 BOR of 3X-Board according to change of thickness during laden voyage

		BOR(%/day)	KOGAS
기존 단열층		0.1360	0.150
3X-Board	case1	0.1657	
	case2	0.1765	
	case3	0.1833	
	case4	0.2574	

수치해석 결과에서 알 수 있듯이 기존 단열층의 BOR, 0.136 %/day보다 두께감소가 없는 3X-Board에서 약 24 % 높게 나타났고, 두께를 감소시킴으로써 증가하는 양상을 보인다. 그리고, case1~case4의 평균 BOR값이 KOGAS 요구조건 0.15 %/day를 만족하지 못하는 것을 확인 할 수 있다.

3X-Board는 스티칭된 유리섬유와 폴리우레탄 폼으로 구성되어 있으며, 스티칭된 유리섬유는 상대적으로 높은 열전도계수를 가진다. 따라서, 기존의 폴리우레탄 폼으로만 구성된 단열층보다 BOR값이 높게 나타난다고 판단된다.

5. 3X-Board의 열전도계수 산정 및 압축강도 평가

5.1 3X-Board의 열전도계수 산정

앞서 수행된 3X-Board의 두께변화에 대한 열전달 해석 결과에서 BOR이 KOGAS기준을 만족하지 않는 결론을 얻었다. 이는 스티칭된 유리섬유의 열전도계수가 상대적으로 높기 때문이라고 전술한 바 있다.

본 절에서는 앞서 수행된 두께변화를 유지한 상태에서 단열층의 물성 파라메트릭 해석을 실시하였다. 즉, 열전도계수를 감소시킴으로써 KOGAS 기준에 만족하는 열전도계수를 산정하였다.

Table 6 Estimation of Insulation Thermal Conductivity

	두께 감소율 (%)	열전도계수 감소율 (%)	BOR (%/day)	KOGAS 기준
case1	0	15	0.1497	0.15
case2	10	20	0.1500	
case3	20	28	0.1482	
case4	30	65	0.1496	

해석 결과 **Table 6**에서 알 수 있듯이 두께감소에 대하여 열전도계수를 각 경우에 대하여 15, 20, 28, 65 % 감소시킴으로써 KOGAS 기준을 만족하였다.

5.2 압축강도 평가

이상으로 단열층의 두께감소에 의한 침입열량의 증가를 단열층을 구성하는 보냉층의 물성변경으로 요구하는 BOR값을 얻을 수 있었다. 하지만, 전술한 바와 같이 운항 중 슬로싱 (Sloshing)에 의한 충격이나 LNG의 자중에 의한 압력에 의하여 단열층의 파손이 일어날 수 있다. 즉, 구조 강도적 측면에서 검증이 되어야 한다.

본 절에서는 앞서 진행된 3X-Board의 두께 및 물성치 변화에 대한 수치해석 결과를 바탕으로 압축강도 해석을 실시하여 두께의 감소에 따라 3X-Board의 구조적 안정성을 평가하였다.

5.2.1 3X-Board의 탄성계수 산정

3X-Board는 폴리우레탄 폼과 스티칭된 유리섬유로 구성된다. 여기서 폴리우레탄 폼은 다공성 구조로 되어 있으며, 고체 물질과 공기 혹은 다른 가스로 채워진 공간의 조합으로 구성되어 있다. 이와 같은 단열재의 물성치들은 공기의 체적분율 (Volume fraction)에 의존된다. 따라서 본 연구에서는 단열재 내의 공기층의 영향을 고려하였다^{3),4)}

앞서 진행된 물성 파라메트릭 해석에서 열전도계수의 감소는 폴리우레탄 폼의 밀도를 감소를 의미한다. 즉, 등가물성 산출 식 (12)에서 폴리우레탄 폼의 체적분율의 감소를 뜻한다. 이와 같이 폴리우레탄 폼의 체적분율의 감소량을 이용하여 각 case별 탄성계수의 계산이 가능하다.

열전도계수의 등가물성 산출식은 다음과 같다.⁴⁾

$$k_c = k_f V_f + k_g V_g + k_v V_v$$

$$V_f + V_g + V_v = 1 \tag{12}$$

여기서, 첨자 *c*는 composite, *f*는 P. U. Foam, *g*는 Stitched glass fiber, *v*는 공기층 나타내며 *V*는 각각의 체적분율을 나타낸다.

Table 6을 참조하여 열전도계수의 감소량을 식 (12)에 대입하면 각 case별 폼의 체적분율, *V_f*이 계산된다. 여기서, 공기층은 진공 (Void)으로 가정한다. 앞서 계산된 폼의 체적분율을 식 (13)의 등가 탄성계수 산정식에 대입하면 각 case별 탄성계수가 계산된다.

$$E_c = E_f V_f + E_g V_g + E_v V_v \tag{13}$$

Table 7은 기존의 단열층과 앞서 산출된 3X-Board의 기계적 물성치를 비교하였다. 표에서 알 수 있듯이 기존의 폼만으로 구성된 단열층에 비하여 두께방향으로 보강된 3X-Board에서 높은 강성을 가지며 열전도계수의 감소 즉, 밀도의 감소에 의하여 폼 (Foam)의 체적분율 감소에 따라서 탄성계수가 감소한다.

Table 7 Evaluation of 3X-Board Elastic Modulus

		두께 감소율 (%)	열전도계수 감소율 (%)	탄성계수 (Gpa)
기존 단열층				0.0575
3X-Board	case1	0	15	0.1040
	case2	10	20	0.1000
	case3	20	28	0.0954
	case4	30	65	0.0705

5.2.2 압축강도 평가

앞서 산출된 탄성계수를 적용하여 각 case별 압축강도해석을 수행하였다. 여기서, 프아송 비 (Poisson's ratio)는 일정하다고 가정하였다.

해석 모델로는 단열층 1개를 모델화 하였으며, LNG와 접하는 1차 내벽 (Primary barrier)에 자중을 고려한 하중경계조건과 Hull 부분에 변위경계 조건을 부여하였다.

Table 8 Comparison of max. effective strain

		Max. effective strain
기존 단열층		2.25×10^{-3}
3X_Board	case1	1.05×10^{-3}
	case2	1.06×10^{-3}
	case3	1.10×10^{-3}
	case4	1.41×10^{-3}

Table 8에서 최대 등가변형률을 비교하였고 해석결과에서 알 수 있듯이 유리섬유가 스티칭된 3X-Board는 두께의 감소에도 불구하고 기존 단열층에 비해 우수한 압축강성을 가진다.

6. 결 론

본 연구에서는 선행 연구된 LNG 화물탱크의 열전달해석 기법을 이용하여 LNG 적재용량 증대를 목표로 단열층의 슬림 (Slim)화를 위한 물성 및 구조적 최적설계 방안을 마련하였다. 수치해석을 위하여 범용 유한요소 프로그램인 MSC/PATRAN과 MSC/NASTRAN을 기반으로 한 PCL프로그램을 사용하였다.^(6,7)

유리섬유가 스티칭된 폴리우레탄 폼으로 구성

된 3X-Board를 기존 LNG Tank에 적용하여 물성 및 구조적 설계변수를 고려하여 본 연구의 목적인 단열층 슬림 (Slim)화 설계 및 그 타당성을 검증하였다.

해석 결과 3X-Board의 두께감소로 인한 BOR 증가의 문제점을 폼 (Foam)의 열전도계수 감소로 KOGAS 요구조건에 만족하는 결론을 얻었다. 그리고, 두께감소에도 불구하고 충분한 압축강도를 보장하였다.

본 연구에서 제안된 3X-Board의 보다 정확한 검증 및 실용화를 위하여 저밀도 3X-Board의 제조 가능성 및 경제성 분석, 그리고 정확한 물성치 산출을 위한 실험이 수행되어야 하며, 끝으로 본 연구에서 적용하지 않은 슬로싱 (Sloshing)과 같은 동 하중에 의한 강도해석이 필요하다고 사료된다.

후 기

본 연구는 삼성중공업(주) 조선사업부의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) J. U. Heo, Y. J. Lee, J. R. Cho, M. K. Ha, and J. N. Lee, 2002, "Heat transfer Analysis and BOG Estimation of Membrane Type LNG Gargo during Laden Voyage," *Korean Society of Mechanical Engineers*.
- (2) S. H. Yoon, S. J. Lee, and S. H. Cho, 1999, "Impact Bagaviors of Stitched Sandwich Composites Under Low Energy Impact Using Drop Weight Impact Tester," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, pp 54-64.
- (3) P. I. Frank, P. D. David, 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, New York.
- (4) Christensen, R. M., 1979, *Mechanics of Composite Materials*, Wiley/Interscience.
- (5) K. J. Bathe, 1996, *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, New Jersey.
- (6) Patran User's Manual, Ver. 2000(r2), MSC. Software.
- (7) Nastran User's Manual, Ver. 70.5, MSC. Software.