

멤브레인형 LNG선 Cargo의 만선행해시 열전달 해석 및 BOG 평가

허진욱*·이영주*·조진래†·하문근**·이중남**
(2002년 5월 27일 접수, 2003년 1월 20일 심사완료)

Heat Transfer Analysis and BOG Estimation of Membrane-Type LNG Cargo during Laden Voyage

Jin-Uk Heo, Young-Ju Lee, Jin-Rae Cho, Mun-Keun Ha and Joong-Nam Lee

Key Words: LNG(천연액화가스), FEM(유한요소법), Homogenization(균질화), Laden Voyage(만선행해), Insulation(단열), Boil-Off Gas(증발가스), Boil-Off Ratio(증발율)

Abstract

Excessive generation of BOG during the LNG transportation not only causes the severe financial loss but also leads to the unexpected disaster. Therefore, the carrier cargo insulating interior LNG should be carefully designed based upon an accurate heat transfer analysis. However, it is not simple to analyze heat transfer of LNG cargo, because it is in a complex insulation structure and LNG carrier experiences a complicated heat transfer according to various kinds of voyage conditions. In this paper, we carried out the transient finite element heat transfer analysis for a cargo of Mark-III membrane-type LNG carrier during laden voyage, and we compared heat transfer rates between considering natural convection and considering conduction. For this goal, we developed a PCL program incorporating with a commercial MSC/NASTRAN FEM code.

1. 서론

LNG는 체적을 최소화하기 위해 대기압 상태에서 -162°C 근처의 낮은 온도로 액화되어 운반된다. 이런 LNG 운송에 있어 온도상승에 따른 과도한 증발(Boil-Off)은 화물탱크의 구조적 파괴를 야기하고, 그 결과 LNG선의 폭발 및 화재를 일으킬 수 있다. 따라서, LNG를 원산지에서 각 수요지로 안전하게 운송하기 위해서 LNG선의 화물탱크는 운항규정에 맞도록 신중하게 설계되어야 한다. 특히, LNG 화물선이 만선행해를 거치면서 발생하는 BOG(Boil -Off Gas) 및 BOR(Boil-Off Ratio)의 정확한 예측이 핵심기술로 등장한다. 하

지만, LNG선 화물탱크는 여러 종류의 단열구조물이 매우 복잡한 형태로 구성되어 있으며, 여러 가지 성분들로 혼합되어 있는 LNG 물성치 산출 또한 매우 어렵다.⁽¹⁾

본 연구에서는 이러한 만선행해시 발생하는 BOG 및 BOR의 예측을 위해 다음의 두가지 방안을 설정한 다음, 유한요소법을 적용한 3차원 열전달 해석을 통해 비교분석을 수행하였다.

첫째로, 기존에 연구된 LNG 물성산출 프로그램⁽²⁾을 사용하여 LNG 물성치 산출이 가능해짐에 따라 탱크내부 LNG의 온도변화를 고려한 LNG 자체 물성변화도 반영한다. 하지만, 보름이상의 항해기간을 가지는 LNG선 화물탱크를 대상으로 탱크내부 자연대류에 의한 유동현상을 고려하기가 여러모로 어렵다. 따라서, 탱크내부의 compartment, LNG 및 NG의 대류에 의한 열전달은 무시하고, 전도에 의한 열전달만 고려하여 이 때 발생하는 BOG/BOR을 평가하였다.

다른 하나는 화물탱크 내부의 LNG의 온도를

† 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

-162°C로 일정하게 유지하여 온도변화에 따른 LNG의 물성변화를 무시하고, 자연대류에 의한 탱크구조물의 열전달만을 해석하여 이때 발생하는 BOG/BOR을 평가하였다.

이러한 유한요소해석을 위해 MSC/PATRAN과 MSC/NASTRAN을 기반으로 한 PCL (Patran Command Language) 프로그램을 개발하였다.

2. 문제정식화

2.1 대류 열전달계수 산정

LNG 운반선의 경우에는 선박이 일정한 속도로 운항하기 때문에, 선체의외부와 접하는 공기층 및 해수층에서는 강제대류가 발생한다. 그리고 선체 내부의 compartment 및 LNG와 접하는 부분에서는 자연대류가 발생한다. 이러한 선체의 온도분포를 수치해석하기 위해서, 수치해석상 경계조건에 필요한 미지의 표면온도나 표면에서의 대류 열전달계수 *h* 값을 결정해야 한다.

공기 및 해수에 의해 강제대류가 일어나는 선체 외판에 대하여는, Whitaker 식을 적용하여 무차원 *Nu*수를 구한 후 대류 열전달계수를 산정하였다.⁽³⁾

$$Nu = 0.029 Re^{0.8} Pr^{0.43} \quad (1)$$

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (2)$$

여기서, *Re*수는 선속 *V*(m/s)을 대표속도로 선체 길이 *L*(m)을 대표길이로 하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, 식 (1)과 식 (2)로부터 대류 열전달 계수가 구해진다.

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} = 0.029kPr^{0.43} \nu^{-0.8} V^{0.8} L^{-0.2} \quad (3)$$

여기서, ν 는 동점성계수(m²/s) 이다.

선체 내부의 자연대류는 수평 평판에 대해서는 McAdam식을, 수직 평판에 대해서는 Warner식을 각각 적용하였다.⁽³⁾

- 수평 평판의 경우:

$$Nu = 0.14 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} = 0.14kPr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{g\beta}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} (\Delta T)^{\frac{1}{3}}$$

- 수직 평판의 경우:

$$Nu = 0.10 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} = 0.10kPr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{g\beta}{\nu^2} \right)^{\frac{1}{3}} (\Delta T)^{\frac{1}{3}}$$

여기서, *Gr*은 Grashof수로 $\frac{L^3 g\beta(\Delta T)}{\nu^2}$, *g*는 중력 가속도(m/s²), β 는 체적팽창계수(1/K)를 나타낸다.

2.2 균질화(homogenization) 기법

화물탱크내 단열재의 구조를 Fig. 1에 나타내었는데 ①primary barrier, ②top plywood, ④triplex와 ⑥back plywood는 각각 길이에 비해서 두께가 매우 얇음을 알 수 있다. 따라서, 이러한 재질을 그대로 모델링할 경우 세장비 오류가 발생하기 쉽다. 따라서, 오류가 발생하지 않는 범위 내에서 등가모델링을 수행하였고, 등가모델링된 각 재질의 물성치는 일반적인 균질화기법인 선형혼합법칙을 사용하여 등가물성치를 산출하였다.⁽⁴⁾

$$\rho = \frac{V_1\rho_1 + V_2\rho_2}{V_1 + V_2}, C_p = \frac{V_1C_{p1} + V_2C_{p2}}{V_1 + V_2} \quad (6)$$

$$k = \frac{V_1k_1 + V_2k_2}{V_1 + V_2}$$

여기서, ρ 는 밀도(kg/m³), *V*는 체적(m³), *C_p*는 비열 (J/kg °C), *k*는 열전도율(W/m °C)을 나타낸다.

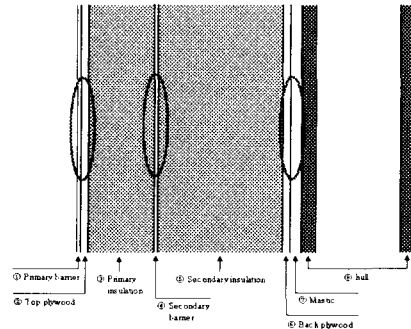


Fig. 1 Insulation structure of Mark-III type cargo

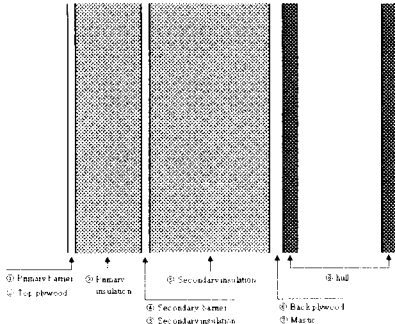


Fig. 2 Homogenized equivalent model for the insulation structure

2.3 BOG 및 BOR 평가법

LNG화물선이 만선항해를 거치는 동안 발생하는 BOG/BOR에 미치는 전도 및 자연대류의 영향을 비교 분석하는 것이 본 연구의 주 관심사다.

먼저, KOGAS에 의한 BOG/BOR 평가법에 의하면 만선직후와 입항시의 LNG 적하체적, 비중량, 온도변화등을 실제로 측정하여 식 (7)과 식 (8)에 대입하여 평가한다.⁽⁵⁾

$$BOG \text{ (kg)} = \frac{(V_1 \gamma_1 - V_2 \gamma_2)L + V_2 \gamma_2 C_p (T_1 - T_2)}{L} \quad (7)$$

$$BOR \text{ (%) } = \frac{(V_1 \gamma_1 - V_2 \gamma_2)L + V_2 \gamma_2 C_p (T_1 - T_2)}{V_1 \gamma_1 L t} \times 100 \quad (8)$$

- 여기서, V_1 는 만선직후의 LNG 적하체적(m^3)
- γ_1 는 만선직후의 LNG 비중량(kg/m^3)
- T_1 는 만선직후의 LNG 온도(C)
- V_2 는 입항시 LNG 적하체적(m^3)
- γ_2 는 입항시 LNG 비중량(kg/m^3)
- T_2 는 입항시 LNG 온도(C)
- L 는 LNG 증발잠열(kJ/kg)
- C_p 는 LNG 비열($kJ/kg C$)
- t 는 측정시간(days)

하지만, 수치해석상 이렇게 실제로 측정할 때

이터를 사용한 BOG 및 BOR 평가법을 적용할 수 없다. EK라서, 아래 식 (9)와 같이 탱크에 침입하는 총열량 $Q_T(W)$ 을 계산하여 하루동안 발생하는 BOG/BOR을 산정하였다.^(5,6)

$$BOG = \frac{24Q_T}{L} \text{ (kg/day)} \quad (9)$$

$$BOR = \frac{24Q_T}{V \gamma L} \times 100 \text{ (%/day)}$$

여기서, V 는 98%적재시 차지하는 체적으로 $38664.92(m^3)$, γ 는 $455(kg/m^3)$, L 은 $142(kJ/kg)$ 을 적용하였다.

3. 유한요소 정식화

3.1 지배방정식

공간상의 고정된 영역에서 열생성이 없는 3차원 비정상상태 열전달 방정식은 식 (10)과 같다.⁽⁶⁾

$$(kT, ,)_i = \rho c \dot{T}, \quad i = x, y, z \quad (10)$$

여기서, T 는 온도(C), ρ 는 밀도(kg/m^3), c 는 비열($J/kg C$), k 는 열전도계수($W/m C$)를 나타낸다.

표면 경계영역 S 는 온도 경계영역 S_T 와 열유속이 주어지는 경계영역 S_q 로 구분되며, $S_T \cup S_q = S$ 과 $S_T \cap S_q = 0$ 을 만족한다.⁽⁷⁾

$$\begin{aligned} T &= T_0 & \text{in } \Omega \\ T &= T_S & \text{on } S_T \\ q_n &= k_n T_{n, n} = h(T_S - T) & \text{on } S_q \end{aligned} \quad (11)$$

여기서, T_0 는 초기온도(C), T_S 는 표면온도(C), q_n 는 heat flux(W/m^2), h 는 대류 열전달 계수($W/m^2 C$)를 나타낸다.

3.2 유한요소 정식화

온도 T 와 같은 공간에 속하는 검증함수 ϕ 를 식 (10)에 곱하여 적분하면 식 (12)을 얻을 수 있다.

$$\int_{\Omega} [(kT, ,)_i - \rho c T] \phi dV = 0 \quad (12)$$

식 (12)에 divergence theorem과 식 (11)의 경계 조건을 적용시켜 식 (13)을 구한다.

$$\int_V [\phi_{,i}(kT_{,i}) + \phi \rho c \dot{T}] dV = \int_S \phi h (T_S - T) dS \quad (13)$$

유한요소 정식화를 위해 온도에 대한 형상함수 N 을 도입하여 온도장을 근사화 시키면 식 (14)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= \mathbf{N}(x, y, z) \bar{T} \\ \phi &= \mathbf{N}(x, y, z) \bar{\phi} \end{aligned} \quad (14)$$

근사화된 온도식을 이용하여 식 (13)을 유한요소 근사화하면 식 (15)와 같은 행렬형태의 미분방정식을 얻을 수 있다.⁽⁸⁾

$$\mathbf{C} \dot{\bar{T}} + \mathbf{K} \bar{T} = \mathbf{Q} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \mathbf{C} &= \int_V \rho c \mathbf{N}^T \mathbf{N} dV \\ \mathbf{K} &= \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{k} \mathbf{B} dV + \int_S h \mathbf{N}^T \mathbf{N} dS \\ \mathbf{Q} &= T_S \int_S h \mathbf{N}^T dS \\ \mathbf{B} &= \nabla \cdot \mathbf{N} \end{aligned}$$

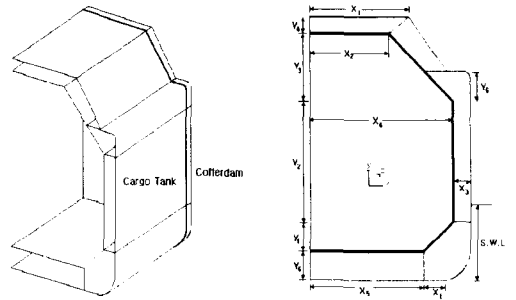
한편, 시간 이산화룰 위해 사다리꼴 공식 (generalized trapezoid rule)⁽⁹⁾을 적용하면 다음 식 (16)을 얻을 수 있다.

$$\bar{T}_{n+1} = \bar{T}_n + [(1-\beta) \dot{\bar{T}}_n + \beta \dot{\bar{T}}_{n+1}] (\Delta t) \quad (16)$$

여기서, \bar{T}_n 은 시간 t_n 에서 온도상태, \bar{T}_{n+1} 은 시간 t_{n+1} 에서 온도상태를 나타내며, 파라메터 $\beta (0 \leq \beta \leq 1)$ 는 사용자에게 의해 결정된다.

식 (16)을 시간 t_n 과 t_{n+1} 인 경우로 각각 정리하여, 전자의 식에 $(1-\beta)$ 를 후자의 식에 β 를 곱한 다음 두 식을 더해 정리하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{C} [(1-\beta) \bar{T}_n + \beta \bar{T}_{n+1}] + \mathbf{K} [(1-\beta) \bar{T}_n \\ + \beta \bar{T}_{n+1}] = (1-\beta) \mathbf{Q}_n + \beta \mathbf{Q}_{n+1} \end{aligned} \quad (17)$$



(a) geometry (b) dimension

Fig. 3 Numerical analysis model

식 (17)에 식 (16)을 대입하면 시간 미분항들을 소거할 수 있다.

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{\Delta t} \mathbf{C} + \beta \mathbf{K} \right) \bar{T}_{n+1} = \left[\frac{1}{\Delta t} \mathbf{C} \right. \\ \left. - (1-\beta) \mathbf{K} \right] \bar{T}_n + (1-\beta) \mathbf{Q}_n + \beta \mathbf{Q}_{n+1} \end{aligned} \quad (18)$$

따라서 최종적으로 초기조건 (식 (11))과 time step Δt 를 적용하면 미분방정식의 해를 구할 수 있다.

4. 수치해석 및 결과

4.1 수치해석 모델

Mark-III membrane-type LNG선은 총 4개의 화물탱크로 구성되어 있으며, 각각의 화물탱크 사이에 선체가 허용온도 이하로 떨어지는 것을 방지하기 위하여 heating coil이 설치된 cofferdam이 설치되어있다.

Cofferdam을 포함하여 화물탱크의 종방향 및 횡방향의 열적 경계조건이 대칭 되기 때문에, 수치해석모델로 화물탱크 즉 1/4과 cofferdam 즉 1/4을 취하였다. 또한 선체평판에 부착된 각종 보강재의 영향을 무시하였고, 화물탱크를 구성하는 복잡한 형태의 단열재도 단순화하였다. 수치해석 모델의 형상과 치수를 Fig. 3과 Table 1에 나타내었다.

또한, 이렇게 단순화된 화물탱크를 Table 1에 기술한 각 치수변수에 대해 파라메트릭 모델링이 가능하도록 Fig. 5에 예시한 PCL 프로그램을 개발한 다음, MSC/ PATRAN에 적용하여 유한요소

Table 1 Geometry dimensions of model

X ₁	13.225m	Y ₁	4.030m
X ₂	10.535m	Y ₂	14.94m
X ₃	2.320m	Y ₃	8.45m
X ₄	18.98m	Y ₄	1.88m
X ₅	14.955m	Y ₅	3.63m
X ₆	3.1m	Y ₆	3.4m
Z ₁	21.6825m	Z ₁	1.355m

Table 2 Properties of insulations

	Thickness (m)	Specific Gravity (kg/m ³)	Specific Heat (kcal/kg °C)	Thermal Conductivity (kcal/mh °C)
Primary Barrier	0.0012	8137.0	0.11	39.0
Top Plywood	0.012	710.0	0.26	0.094
Primary Insulation	0.068	120.0	0.2199	실험치
Triplex	0.001	1780.0	0.24	18.9
Secondary Insulation	0.16	120.0	0.2199	실험치
Back Plywood	0.009	710.0	0.34	0.1022
Mastic	0.0125	495.0	0.25	0.1444
Hull	0.018	7833.0	0.111	46.5

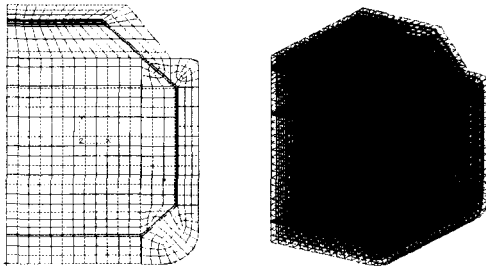


Fig. 4 Finite element mesh

Table 3 Thermal conductivities of insulations

Temperature (°C)	thermal Conductivity (kcal/mh °C)	Temperature (°C)	Thermal Conductivity (kcal/mh °C)
-160	0.01634	-40	0.01892
-120	0.01892	-20	0.01978
-80	0.01892	20	0.02236

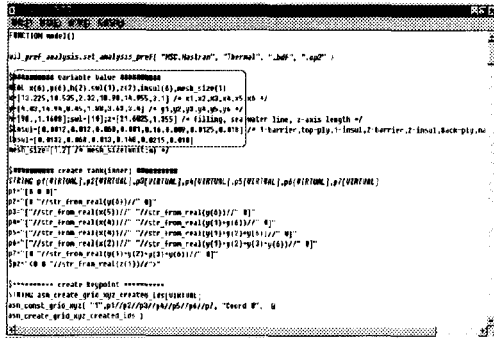


Fig. 5 PCL program for parametric modeling

격자를 생성하였다. 유한요소 및 절점의 총 개수는 각각 40,587개, 44,076개이며, 요소의 평균크기는 1.2×1.2×1.2(m³)이다.

4.2 해석 조건

만선시 LNG의 적재율은 98.0%로 이때 차지하는 탱크용량은 38,664.92m³이며, 선체 외부는 대기와 해수에 의한 강제대류가 발생하는데, 대기 및 해수온도는 실제 LNG선이 운항하는 인도네시아 항로를 기준으로 하여 각각 28°C와 29°C로 설정하였다. 그리고, 선속은 19.5knots, 선체 저면에서 해수면까지 높이는 10m이며, cofferdam내의 공

기온도는 +5°C로 일정하게 유지하였다.

또한, 공선항해(ballast voyage), 쿨다운(cool down), 적재(loading) 과정을 거친 직후의 탱크온도분포를 초기온도로 두고 시간해석을 수행해야 한다. 하지만, 앞서 기술한대로 본 연구에서는 만선항해 기기에 한정하여 LNG온도 및 물성변화를 고려하여 전도에 의한 열전달과, 내부 LNG의 온도 및 물성변화를 고려하지 않고 탱크구조물의 자연대류만을 고려한 경우와의 차이를 비교분석한다. 이를 위해 초기온도 설정으로 내부 LNG는 -162°C로 그리고 탱크 구조물 전체는 임의로 0°C로 두고 7일 동안의 시간해석을 수행하였다.

화물탱크를 구성하는 각각의 재질에 대한 물성치는 **Table 2**과 **Table 3**에 나타내었다. 이 물성치들은 (주)삼성중공업에서 제공한 자료이다.

4.3 해석 결과

만선항해시 시간에 따라 화물탱크 내부로 침입하는 열량과 BOG/BOR을 산정하여 자연대류를 고려한 경우에는 **Table 4**에, 전도를 고려한 경우에는 **Table 5**에 각각 나타내었다. 아울러 BOR의 시간에 따른 변화를 **Fig. 6**에 비교하여 두 경우에

대한 차이를 도식적으로 이해하도록 하였다. 전도를 고려한 경우 보다 자연대류를 고려한 경우가 탱크내부로의 침입열량이 평균 1.179배 정도 높게 발생하며, 그 차이는 만선항해시간이 길어져도 계속 유지되고 있음을 알 수 있다.

또한, 전도를 고려한 경우나 자연대류를 고려한 경우 모두 평균 BOR이 0.07411%/day, 0.08736%/day로 실측치보다 낮게 평가되었다. 한 요인으로 실제 LNG선은 공선항해, 쿨다운, 적재과정을 거치면서 화물탱크 내부의 온도가 계속 변화하여 탱크내부로 침입하는 열량이 높게 나타난다. 하지만, 이러한 과정 없이 만선항해를 시작함으로써 초기 화물탱크 내부의 온도변화가 없었기 때문에 침입열량은 시간이 지날수록 점차 감소하여 발생하는 BOG/BOR도 낮게 평가된다.

침입 열량분포를 자연대류를 고려한 경우는 Fig. 7에 전도를 고려한 경우는 Fig. 8에 각각 도시하였다. 전도를 고려한 경우에는 침입열량이 화물탱크의 코너 부위에서 집중되고 있는 것에 비해, 자연대류를 고려한 경우에는 비교적 탱크 전 영역에서 고르게 침입하고 있음을 확인할 수

있다. 이는 자연대류의 경우, 내부 LNG의 온도가 -162°C로 균일하게 가정되었기 때문이다.

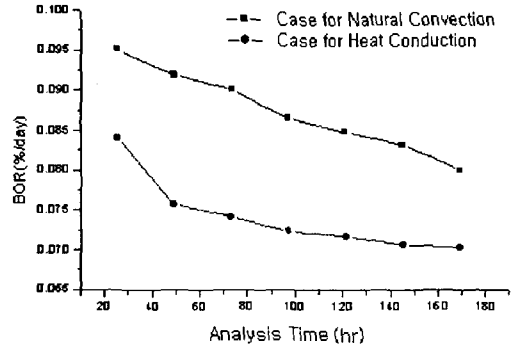


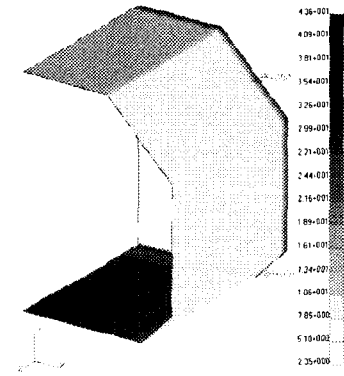
Fig. 6 Comparison of BOR

Table 4 BOG/BOR considering natural convection

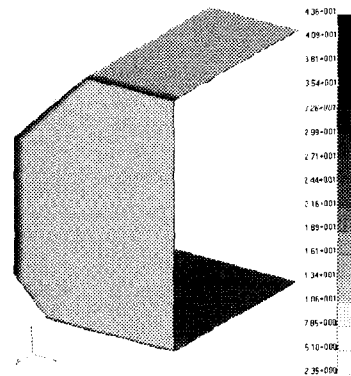
Time (hr)	Heat Amount (W)	BOG (kg/day)	BOR (%/day)
25.25	99664.97	16844.78	0.09512
57.25	96299.05	16275.90	0.09191
73.25	94385.95	15952.55	0.09008
105.25	90637.34	15318.99	0.08650
121.25	88831.27	15013.74	0.08478
137.25	87095.45	14720.36	0.08312
169.25	73706.89	14164.55	0.07998
Average	91531.56	15470.12	0.08736

Table 5 BOG/BOR considering conduction

Time (hr)	Heat Amount (W)	BOG (kg/day)	BOR (%/day)
25.25	88089.76	14888.41	0.08407
57.25	79314.54	13405.28	0.07570
73.25	77694.90	13131.53	0.07415
105.25	75794.55	12810.35	0.07234
121.25	75081.32	12689.80	0.07166
137.25	73924.56	12494.29	0.07055
169.25	73674.60	12452.04	0.07031
Average	77653.46	13124.53	0.07411

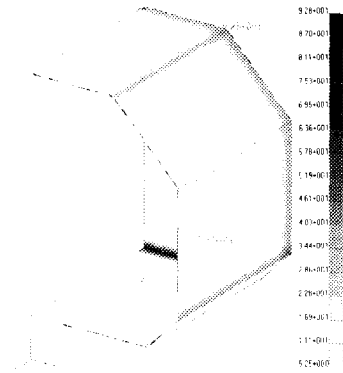


(a) Cargo side (a quarter model)

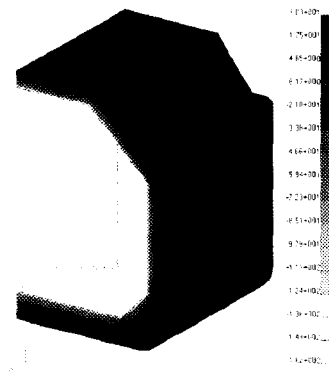


(b) Cofferdam side (a quarter model)

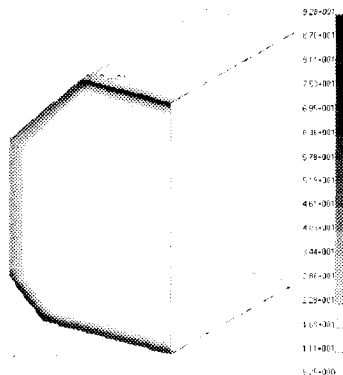
Fig. 7 Heat flux distribution considering natural convection (unit: W/m^2)



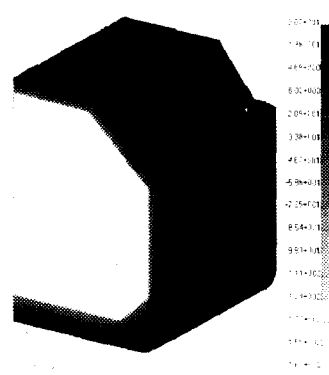
(a) Cargo side (a quarter model)



(a) Considering natural convection



(b) Cofferdam side (a quarter model)



(b) Considering conduction

Fig. 8 Heat flux distribution considering conduction (unit: W/m^2)

Fig. 9 Comparison of temperature distributions (unit: $^{\circ}C$)

그리고, 만선행해 7일이 경과한 후의 화물탱크 전체 온도분포를 자연대류를 고려한 경우와 전도만 고려한 경우에 대해 각각 Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)에 도시하였다. 그림상으로는 그 차이를 구별하기 힘들 정도로 비슷하지만, 자연대류를 고려한 경우가 전도를 고려한 경우에 비해 전체적으로 낮은 온도를 나타내었다. LNG와 접하는 내면에서는 최대 $12^{\circ}C$ 의 차이를 그리고 탱크 구조물 외면에서는 최대 $0.4^{\circ}C$ 의 차이를 보였다. 이렇게 자연대류를 고려한 경우에서 구조물이 전체적으로 낮은 온도분포를 나타내는 것은, 내부 LNG의 온도를 $-162^{\circ}C$ 로 균일하게 그리고 일정하게 설정하였기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 Mark-III membrane-type LNG선의 만선행해기간 동안의 열전달 해석을 수행하였다. 이러한 유한요소해석을 위해 MSC/PATRAN과 MSC/NASTRAN을 기반으로 현장 실무자가 효과적으로 BOG/BOR을 평가하기 위한 PCL 프로그램을 개발하여, 화물탱크의 모델링과정 및 수치해석절차를 전문화하였다.

실제 LNG화물선이 만선행해를 거치는 동안 얼마만큼의 BOG/BOR이 발생하느냐는 중요한 문제이지만, 본 연구에서는 만선행해기간에 얼마만큼

의 BOG/BOR이 발생하느냐보다는 BOG/BOR의 평가에 있어 전도 및 자연대류의 영향을 비교분석하는데 있다. 따라서 이러한 목적을 위해 화물탱크 내부의 LNG의 온도 및 물성변화는 고려하였지만 자연대류를 무시한 전도의 경우와, LNG의 온도 및 물성변화를 무시하고 자연대류만을 고려한 경우에 대해 만선험해 동안의 침입열량을 비교하였다. 그 결과 자연대류를 고려한 경우의 침입열량이 평균 1.179배 높게 나타나며, 그 결과 BOG/ BOR도 만선험해 동안 그 차이를 나타낼 수 있었다.

따라서, LNG의 온도 및 물성변화를 고려하되 전도만에 의한 열전달 해석을 하는 경우, 본 연구에서의 자연대류 영향을 고려한 해석결과에 따른 보정이 이루어져야 할 것으로 사료된다. 하지만 본 연구에서의 BOR 예측치는 두 경우 모두 현장에서의 실측치에 비해 다소 낮게 평가되고 있다.

보다 신뢰성있는 BOG 및 BOR 평가를 위해 다음의 보완이 필요할 것으로 생각한다. 첫째, 본 연구에서 단순화시킨 LNG선 운항단계인 공선험해, 쿨다운, 적재과정을 열전달 해석에 포함하여 만선험해전 화물탱크의 현실적인 온도분포가 필요하다. 둘째, LNG선은 실제 운항시 다양한 요동운동을 겪게 되어 내부 LNG의 온도변화는 자연대류 이상의 난류영향을 받게된다.⁽¹³⁾ 이는 선체요동에 따라 내부 LNG가 슬로싱(sloshing) 운동⁽¹⁴⁾을 일으키기 때문이며, 이에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- (1) Kim, Y. J., Yeo, S. D. and Kim, S. I., 1996, "Building of GAZ Transport and Technigaz Membrane(Mark-III) Type LNG Carrier," *Bulletin of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 33, No. 6, pp. 42~49.
- (2) Lee, Y. J., Ko, S. S. and Cho, J. R., 2000, "Upgrade of Program for Evaluating LNG Material Properties," *Samsung Technical Report*.
- (3) Özişik, M. N., 1985, *Heat Transfer*, McGraw-Hill.
- (4) Cho, J. R. and Ha, D. Y., 2001, "Averaging and Finite-Element Discretization Approaches in the Numerical Analysis of Functionally Graded Materials," *Materials Science and Engineering A* Vol. 302, pp. 187~196.
- (5) Chauvin, J. M., 1992, "Mark III Containment System," *Technical Report of S. N. Technigaz*.
- (6) Jeon, J. H. and Heo, J. H., 1997, "Temperature Distribution for a Membrane type LNGC Cargo Tank," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 34, No. 4, pp. 108~117.
- (7) Frank, P. I. and David, P. D., 1996, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, New York.
- (8) Bathe, K. J., 1996, *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, New Jersey.
- (9) Logan, D. L., 1993, *A First Course in the Finite Element Method*, PWS Publishing Company, Boston.
- (10) Holman, J. P., 1986, *Heat Transfer*, McGraw-Hill.
- (11) Patran User's Manual, 2000, Ver. 2000(r2), MSC. Software.
- (12) Nastran User's Manual, 2000, Ver. 70.5, MSC. Software.
- (13) Chung, H. S., Jeong, H. M., Kim, K. K. and Ro, S. T., 1999, "The Turbulent Natural Convection in Membrane Type LNG Carrier Cofferdam," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 23, No. 2, pp. 281~287.
- (14) Cho, J. R. and Lee, S. Y., 2003, "Dynamic Analysis of Baffled Fuel-Storage Tanks Using the ALE Finite Element Method," *Int. J. for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 41, pp. 185~208.