

# MARK-III Membrane Type LNG船의 滿載 定常狀態下의 熱解析에 관한 研究

이 정 혜\* · 김 경 근\*\*

## A Study on the Thermal Analysis of the MARK-III Membrane Type LNG Carrier at Steady Laden State

Jung-Hye Lee\* · Kyung-Kun KIM\*\*

### Abstract

This study is focused on the development of a computer program that calculates three dimensional hull temperature distributions and analyzes the BOR which is important for the thermal design of MARK-III membrane type LNG carrier in steady state of the laden voyage.

A quarter of a cargo tank and a cofferdam are considered for the calculation in the present study. The thermal conductivity of the insulation material, R PUF, treated as a temperature-dependent property. And the temperature of LNG in a cargo tank is assumed to be  $-162^{\circ}\text{C}$  and the air temperature of a cofferdam to be  $-5^{\circ}\text{C}$ .

The lowest air temperature in compartments is calculated as  $-21.8^{\circ}\text{C}$  under the USCG condition ( $T_{\text{air}}=-18^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{sw}}=0^{\circ}\text{C}$ ) and the lowest temperature in panels is  $-27.0^{\circ}\text{C}$ . BOR value is 0.1006%/day under the maximum boil-off condition, IMO condition ( $T_{\text{air}}=45^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{sw}}=32^{\circ}\text{C}$ ), which satisfies the requirement, 0.15%/day by KOGAS. The average temperature in panels of inner hull side is about  $14\sim 18^{\circ}\text{C}$  under the real voyage condition ( $T_{\text{air}}=28^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{sw}}=29^{\circ}\text{C}$ ) for Indonesia route. The calculated average temperature of tank panels under USCG condition is at most 4%

\* 한국해양대학교 냉동공조공학과 석사과정 열유체 전공

\*\* 한국해양대학교 기관공학부 교수

less than GTT's results.

## 1. 서 론

전세계적으로 청정에너지에 대한 수요가 점차적으로 증가함에 따라 발열량에 대한 이산화탄소의 발생비율이 비교적 적고 연소시 오염물질의 발생이 비교적 적은 액화천연가스(Liquefied natural gas, LNG)의 사용이 선진국을 중심으로 확대되고 있다.

이러한 LNG를 수송하는 LNG선은 구조 자체가 매우 복잡하고 운항조건의 예측 또한 매우 어렵기 때문에 선체의 건조시에 필요한 단열시스템에 관한 열적 평가 및 설계 기술은 화물탱크의 구조해석, 용접 및 조립기술과 더불어 LNG선의 건조시 가장 핵심이 되는 기술분야 중 하나로, 극히 일부 조선분야 선진국에 의해서만 이루어지고 있으며, 현재 우리 나라에서 건조가 진행중인 LNG선은 각 조선사별로 건조 방식에 따라 선진국으로부터 기술을 제공받고 있는 실정이다.

따라서 LNG를  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체상태로 수송하는 중 화물탱크에서 연속적으로 발생하는 LNG의 증발량을 억제하고, 선체부재의 온도가 최저 허용 한계온도 이하로 강하되는 것을 방지하여야 한다. 이와 같은 LNG선의 기본 열설계에 있어서 선박 운항시 화물저장설비의 온도분포를 미리 예측하고, 액화천연가스의 증발량을 산정하기 위한 단열시스템을 평가하는 것은 매우 중요하다.

그러므로 본 연구에서는 국내의 LNG선 열설계기술의 공학적 발전을 통한 단열 시스템의 보다 나은 해석을 위하여 선체 평판, 단열재 내부의 온도분포 및 각 밀폐공간 내 평균공기온도와 BOR 값을 계산할 수 있는 3차원 정상상태 열해석프로그램을 개발하였다.

## 2. 수치계산

### 2.1 MARK-III Membrane Type LNG선

Fig. 1은 MARK-III Membrane type LNG선의 개략적인 모형을 나타낸 것으로, 그림에서 보는 바와 같이 4개의 화물탱크가 있고 각 화물탱크 사이와 1번 화물탱크의 선수 방향, 4번 화물탱크의 선미 방향에 총 5개의 코퍼담이 존재한다. 코퍼담 내부에는 선체부재의 온도가 허용온도 이하로 떨어지는 것을 방지하기 위하여 포화증기 가열에 의한 가열파이프(Heating coil)가 설치되어 있어서, 선수와 선미측 코퍼담은  $+25^{\circ}\text{C}$ 로, 그 외에는  $+5^{\circ}\text{C}$ 로 일정히 유지되고 있다.

Fig. 2는 화물탱크의 단열방식 중 MARK-III 단열방식을 나타낸 그림으로, 여기서 1차방벽인 멤브레인 시트는 열팽창에 의한 신축성을 주기 위하여 주름진 모양으로 되어 있고 이의 재료는 SUS 304L이다.

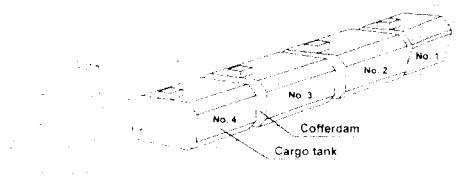


Fig. 1 General arrangement of cargo tank and cofferdam

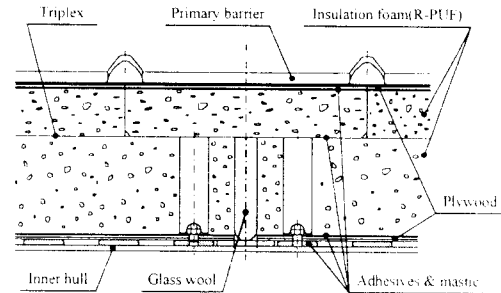


Fig. 2 Insulation system of MARK-III type

## 2.2 지배방정식과 이산화방정식

생성항이 없는 정상상태 3차원 열전도의 미분방정식은 식(1)과 같으며, 식에서 좌변의 각 항은  $x$ ,  $y$ ,  $z$  방향으로의 온도변화에 따른 출입열량을 나타낸다. 여기서  $k$ 는 열전도계수를,  $T$ 는 온도를 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

식(1)을 제어체적법에 의하여 이산화하면 다음식과 같고, 여기서  $k_e, \dots, k_b$ 는 각 경계면에서의 열전도계수이다.

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + a_N T_N + a_S T_S + a_U T_U + a_B T_B \quad (2)$$

$$a_E = k_e \frac{dy dz}{\delta x_e}, \quad a_W = k_w \frac{dy dz}{\delta x_w}, \quad a_N = k_n \frac{dx dz}{\delta y_n},$$

$$a_S = k_s \frac{dx dz}{\delta y_s}, \quad a_U = k_u \frac{dx dy}{\delta z_u}, \quad a_B = k_b \frac{dx dy}{\delta z_b},$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + a_U + a_B$$

그리고 재질이 다른 복합 재료가 서로 접하고 생성항이 없는 정상 해석에 대하여 x 방향으로의 열전도계수,  $k_e$ 는 아래와 같이 정의되는 식을 사용하였다. 여기서  $k_P$ ,  $k_E$ 는 격자점 P와 E에서의 열전도계수이며, 보간계수  $f_e$ 는 거리의 항으로 정의된 비율이다.

$$k_e = \left( \frac{1-f_e}{k_P} + \frac{f_e}{k_E} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$f_e = \frac{\delta x_e^+}{\delta x_e}$$

### 2.3 계산조건과 모델링

계산모델은 계산하고자 하는 2번 화물탱크가 종방향으로나 횡방향으로 대칭을 이루고 있으므로 계산의 간편화와 시간절약을 위하여 Fig. 3과 같이 화물탱크와 코퍼담 체적의 1/4 크기로 설정하였다. 그리고 Fig. 4와 Table 1은 이러한 계산모델에 대하여 선체의 각부 치수를 나타낸 것으로, Table 1에서  $Z_1$ 과  $Z_2$ 는 화물탱크와 코퍼담에 있어서 z방향으로의 길이를 나타내며, S.W.L은 선체 저면에서부터 해수면까지의 높이를 나타낸 것으로 만선 항해시의 설계치는 11,300mm이다.

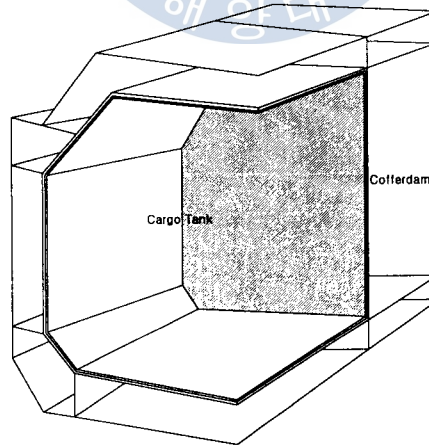


Fig. 3 Calculation model

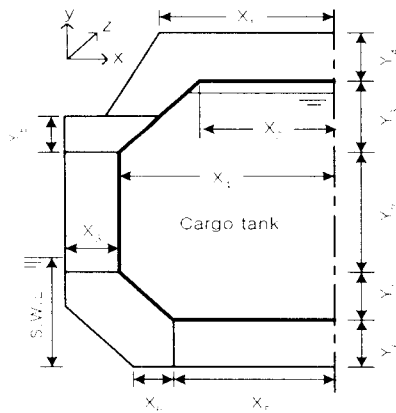


Fig. 4 The arrangement of symbols for dimension

(mm)

$X_1$	$13.225 \times 10^3$	$Y_1$	$4.030 \times 10^3$
$X_2$	$10.535 \times 10^3$	$Y_2$	$14.940 \times 10^3$
$X_3$	$2.320 \times 10^3$	$Y_3$	$8.450 \times 10^3$
$X_4$	$18.980 \times 10^3$	$Y_4$	$1.880 \times 10^3$
$X_5$	$14.955 \times 10^3$	$Y_5$	$3.630 \times 10^3$
$X_6$	$3.100 \times 10^3$	$Y_6$	$3.400 \times 10^3$
$Z_1$	$21.6825 \times 10^3$	$Z_2$	$1.355 \times 10^3$

Table 1 Dimensions of quarter of LNG tank

Fig. 5는 계산모델에 있어서 화물탱크와 코퍼담 사이의 다층평판(Transverse bulkhead)에 적용된 격자를 나타내었고, 화물탱크 주위로 둘러싸고 있는 단열재와 방벽이 포함된 다층평판과 Fig. 5와 같은 다층평판이 직각으로 교차하는 부분에서 생성되는 격자의 모양은 Fig. 6과 같다.

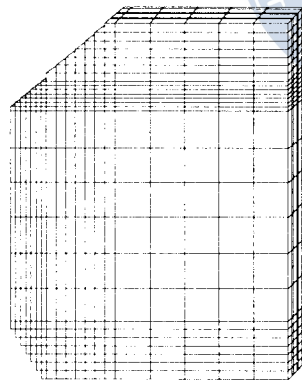


Fig. 5 Meshes constructed in the panel of transverse bulkhead

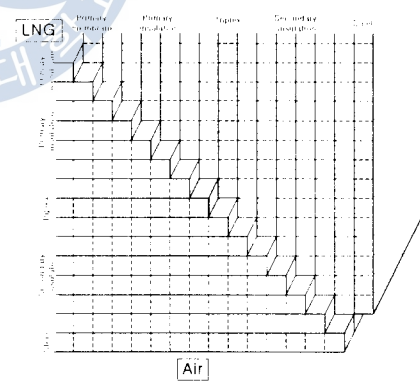


Fig. 6 Meshes of multi-panel crossed other multi-panel

실제 LNG선에서 선체 평판의 두께는 16~19mm의 분포를 가지고 있으나 계산의 편리를 위하여 본 연구에서는 선체 평판의 두께를 18mm로 모두 균일하게 두었고 이의 열전도계수  $k$ 는  $54W/m^{\circ}C$ 로 설정하였다. 1차와 2차 단열재의 두께는 각각 80mm, 170mm로

설정하였으며, 이의 열전도계수는 그 두께에 따라 온도와 밀접한 연관이 있으므로 보다 정확한 계산을 위하여 Fig. 7에서 보는 바와 같이 영국의 Southampton 대학에서 측정한 결과로부터 단열재의 열전도계수,  $k_{ins}$ 를 단열재 온도에 대한 함수로 표현하여 본 연구에 적용하였다.

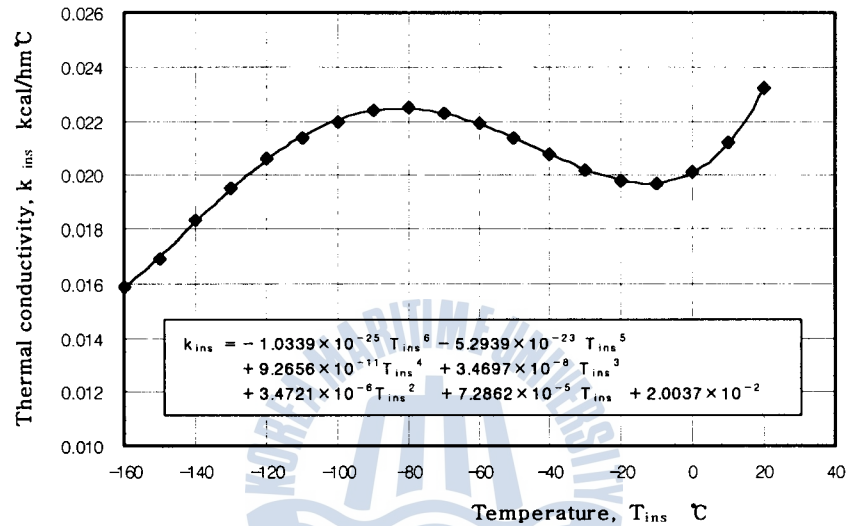


Fig. 7 Thermal conductivity of R-PUF from Korean production

1, 2차 방벽의 두께는 각각 1.0mm, 1.2mm로 하고 이의 열전도계수는  $45\text{W/m}^\circ\text{C}$ ,  $21.9\text{W/m}^\circ\text{C}$ 로 하여 계산에 이용하였다. 그리고 LNG의 밀도와 증발잠열은 각각  $425\text{kg/m}^3$ ,  $510\text{kJ/kg}$ 으로 두었고, 화물탱크 내부의 액화천연가스의 온도는  $-162^\circ\text{C}$ 로, 화물탱크 최상부의 천연가스의 온도는  $-158^\circ\text{C}$ 로 일정하다고 가정하였으며, 코퍼담 내의 공기온도는 설계온도값인  $+5^\circ\text{C}$ 로 일정하게 가열된다고 가정하였다. 선속은  $19.5\text{knot}$ 로 두었고, 화물탱크내 LNG의 Filling ratio는  $98.0\%$ 로 설정하여 계산하였다.

그리고, 마스틱 사이에는 일반적으로 공기가 채워져 있으나, 본 연구에서는 프로그램의 간단화를 위하여 Plywood와 마스틱을 R-PUF에 포함하여 계산하였으며 재료와 재료사이의 접촉의 정도에 따른 접촉 저항의 영향을 무시하여 계산하였다.

천연가스가 접하는 화물탱크 상부의 평판으로 유입하는 열량은 LNG의 증발에는 사용되지 않는다고 가정하였으며, LNG 표면과 천연가스가 접하는 1차 방벽 사이의 복사 열교환은 무시하였다.

그리고 화물탱크 상부의 증발한 천연가스의 온도분포  $T_{ng}$ 는 아래 식과 같이 기액경

계면으로부터의 수직거리  $y$ 에 따른 지수함수의 형태로 변화한다고 가정하였다. 여기서 상수  $T_{lng}$ 는 LNG의 온도를,  $T_{ing}$ 는 화물탱크 최상부에서의 천연가스의 온도를 나타낸다.

$$T_{ng} = T_{lng} \cdot e^{y \ln\left(\frac{T_{ing}}{T_{lng}}\right)} \quad (4)$$

## 2.4 각 밀폐공간의 계산

선체 외측의 고온 유체인 해수 및 대기와 LNG선 탱크내의 저온 유체인 LNG의 온도 구배에 의하여 LNG선의 선체내 밀폐공간에서는 3차원의 자연대류가 일어난다. 그러나 밀폐공간 내의 체적이 매우 크고 유체와 밀폐공간을 형성하는 선체평판 사이의 온도 구배가 작은 LNG선의 경우에는 밀폐공간내의 유체의 온도 구배는 그렇게 크지 않다고 판단되므로 본 계산에서는 밀폐공간내 온도분포를 대표온도로서 균일하다고 간주하고 계산을 수행하였다.

Fig. 8과 같은 밀폐공간의 주위를 둘러싸고 있는 평판은 많은 격자로 나누어져 있고, 각 격자에서의 열관류율, 열량 등은 다르게 나타난다. 그리고 정상상태하에서는 밀폐공간 내의 평균 공기온도와 이를 구성하는 각각의 평판을 통과하는 열량이 항상 일정하므로, 평판의 한 격자  $i$ 에 대하여 열량,  $Q_{ci}$ 를 구하는 식은 식(5)와 같고, 이 때 열관류율,  $U_i$ 는 식(6)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $t$ 는 각 격자의 두께를,  $k$ 는 열전도계수를,  $h$ 는 대류열전달계수를 나타낸다.

$$\begin{aligned} Q_{ci} &= \int^i U_i \cdot (T_{air} - T_{c3}) \cdot dA_i \\ &= \int^i U_i \cdot T_{air} \cdot dA_i - \int^i U_i \cdot T_{c3} \cdot dA_i \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_{air}} + \frac{t}{k_p} + \frac{1}{h_{c3-i}} \quad (6)$$

각 격자마다 위와 같은 수식으로 나타낼 수 있는데, 유입열량의 합과 유출열량의 합이 같게 되는 것으로부터 밀폐공간내 공기의 평균온도,  $T_{c3}$ 을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$T_{c3} = \frac{\int^i U_i \cdot T_{air} \cdot dA_i + \dots + \int^m U_m \cdot T_{c4} \cdot dA_m}{\int^i U_i \cdot dA_i + \dots + \int^m U_m \cdot dA_m} \quad (7)$$

그리고 멤브레인 방식 LNG선 선체에 있어서 각 밀폐공간을 둘러싸고 있는 선체 평판에 부착된 휨(Fin) 모양의 각종 보강재의 영향을 무시하였으며, 화물탱크의 밀폐공간과 코퍼담의 밀폐공간 사이에 있는 평판에 대하여 각종 배관이나 사람이 통과하기 위한 맨홀 등은 격자생성에 고려하지 않았다.

LNG선의 경우, 대기 및 해수에 접하고 있어 강제대류 열전달이 이루어지는 선체 외측과 공기에 접한 밀폐공간이나 화물탱크 내에서의 자연대류 열전달이 나타나는 선체 내측으로 구분지을 수 있으며 이에 따른 각각의 열전달계수를 결정하여야 한다. 또한 선체평판의 온도분포를 수치계산하기 위하여서는 수치계산상의 경계조건에 해당하는 미지의 값인 전열면의 표면온도나 표면에서의 대류 열전달계수를 알아야 한다.

이러한 점에 비추어 본 연구에서는 아래와 같은 수식을 사용하여 대류 열전달계수를 계산하였다.

$$\text{자연대류(수평평판)-McAdams} : Nu = 0.13 (Gr Pr)^{1/3} \quad (8)$$

$$\text{자연대류(수직평판)-Waner} : Nu = 0.10 (Gr Pr)^{1/3} \quad (9)$$

$$\text{강제대류-Whitaker} : Nu = 0.029 Re^{0.8} Pr^{0.43} \quad (10)$$

Fig. 9는 본 연구에서 개발한 프로그램의 계산흐름도를 나타낸 것으로, 각 격자에서 이전에 계산된 값과 새로 계산된 값과의 차를 계산모델에 설정된 총 격자의 개수로 나누었을 때의 값이 일정한 값보다 작거나 같으면 수렴하도록 되어있다. 그리고 하루동안 증발한 LNG를 총화물량으로 나눈 BOR(Boil-off rate, %/day) 값을 계산하는 식은 아래와 같고, 여기서  $Q_{BOR}$ 는 화물탱크로 들어오는 총침입열량을,  $\gamma_{meth}$ 는 포화 메탄액의 증발잠열을,  $\rho_{meth}$ 은 포화 메탄액의 밀도를,  $V_{98\%}$ 는 화물탱크의 98% 체적을 나타낸다.

$$BOR = \frac{24 \times Q_{BOR}}{\gamma_{meth} \times \rho_{meth} \times V_{98\%}} \times 100 \quad (11)$$



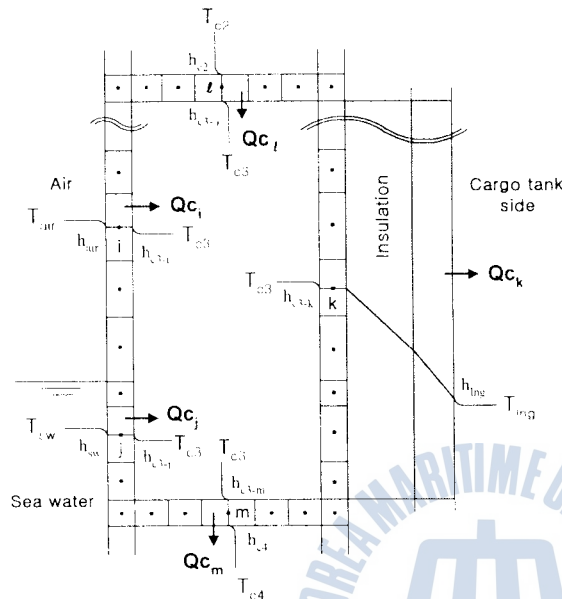


Fig. 8 Determination method of compartment temperature

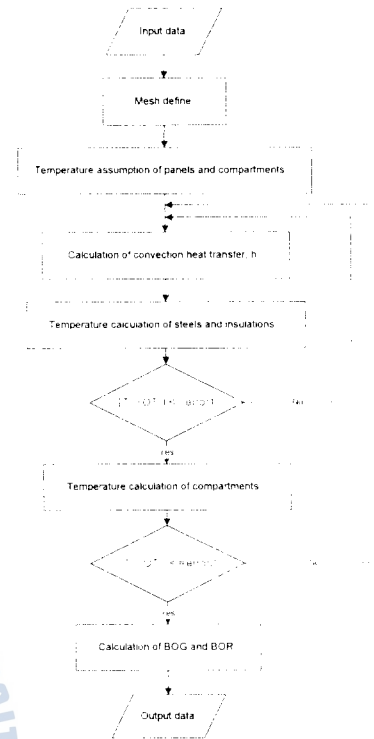


Fig. 9 Flow chart

### 3. 만재 정상상태하의 수치해석결과

대기 및 해수의 온도에 대한 외부 계산조건으로는, 가장 낮은 온도조건으로서 선체의 저온취성을 고려한 USCG(United states coast guard) 조건( $T_{air} = -18^{\circ}C$ ,  $T_{sw} = 0^{\circ}C$ )과, 가장 고온조건으로서 적도지방에서 최대 증발조건인 IGC 코드(International code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk)에서 제시된 IMO(International maritime organization) 조건( $T_{air} = 45^{\circ}C$ ,  $T_{sw} = 32^{\circ}C$ )으로 나눌 수 있는데, 본 연구에서는 HJ 중공업에서 건조되어 현재 운항중인 GT 96 멤브레인 방식 LNG선의 인도네시아 항로에 대한 실운항 조건( $T_{air} = 28^{\circ}C$ ,  $T_{sw} = 29^{\circ}C$ )을 전술한 두 조건에 추가하여 계산하였다.

먼저, 선체의 이중구조로 인하여 화물탱크와 코퍼담의 주위에 위치한 각 밀폐공간내 공기의 평균온도를 나타내는 기호( $T_{t1} \sim T_{t5}$ ,  $T_{c1} \sim T_{c5}$ )를 Fig. 10에 표시하였으며, 각 조

건에 따른 계산결과로서 화물탱크 측과 코퍼담 측의 밀폐공간내 공기의 평균온도를 Table 2에 나타내었다. Table 2에 나타낸 것처럼 저온조건인 USCG 조건에서는 공기가 접하는 밀폐공간  $T_{t1}$ 이  $-21.81^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮은 온도분포를 나타내고 있으며, IMO 조건에서는 밀폐공간  $T_{t1}$ 의 온도가  $38.02^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높고, 실운항 조건에서 화물탱크 측의 밀폐공간  $T_{t1} \sim T_{t5}$ 까지의 평균 공기온도는 대략  $21 \sim 25^{\circ}\text{C}$  정도의 온도분포를 보여준다. 코퍼담 측은 USCG 조건에서는 밀폐공간  $T_{c2}$ 가  $-14.30^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮은 온도분포를 보이며, IMO 조건에서는 밀폐공간  $T_{c2}$ 의 온도가  $34.49^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높고, 실운항 조건에서 코퍼담 측의 밀폐공간내 공기의 평균온도는  $23.38^{\circ}\text{C}$ 인 밀폐공간  $T_{c4}$ 를 제외하면 대략  $20^{\circ}\text{C}$  정도이다.

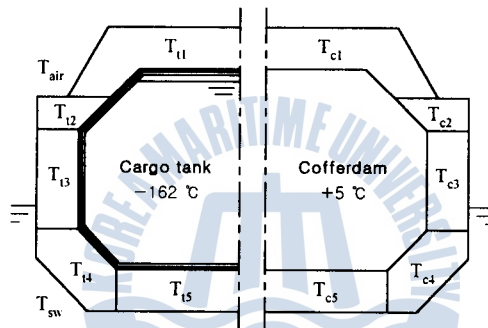


Fig. 10 Symbols of mean air temperatures in compartments

Table 2 Mean air temperature in compartment

	Cal. cond.		$T_{t1}$	$T_{t2}$	$T_{t3}$	$T_{t4}$	$T_{t5}$	$T_{c1}$	$T_{c2}$	$T_{c3}$	$T_{c4}$	$T_{c5}$
	$T_{air}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{sw}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )										
USCG	-18	0	-21.81	-20.74	-15.56	-4.17	-4.81	-14.2 1	-14.3 0	-9.78	-1.47	-0.83
IMO IGC	45	32	38.02	38.01	34.59	28.24	25.61	33.60	34.49	30.64	26.30	22.09
Real voyage	28	29	21.55	21.91	21.43	24.64	22.74	20.59	21.26	20.42	23.38	19.93

선체의 저온취성파괴 등으로 인한 선박의 안전성 문제가 우려됨에 따라 선체의 온도 분포가 중요한 USCG 저온조건에서 계산한 결과로 Fig. 11에 단열재 바깥의 Inner hull에서의 온도와 Outer hull에서의 온도를 표시하였다. 이러한 평판의 평균적인 대

표온도분포를 살펴보면 전술한 바와 같이  $-21.81^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮은 온도분포를 보여준 화물탱크 측의 밀폐공간  $T_{II}$ 을 구성하고 있는 평판도  $-27.02^{\circ}\text{C}$ ,  $-26.04^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮은 평판의 온도를 포함하여 대체로 낮은 온도분포를 보여주고 있고 화물탱크 상부의 평판은 약  $-26 \sim -27^{\circ}\text{C}$  정도의 온도분포를, 하부의 평판은 약  $-10^{\circ}\text{C}$  정도의 온도분포를 나타낸다. 그리고 코퍼담 측 평판의 온도는 상부에서 약  $-6^{\circ}\text{C}$ , 하부에서 약  $1^{\circ}\text{C}$  정도이다. 또한, 선체 외판의 온도분포를 살펴보면 대기에 접한 평판의 온도는 대기온도와 최대  $2^{\circ}\text{C}$  정도의 온도차이가 나며, 해수에 접하고 있는 평판의 온도는 해수온도와 동일한 온도분포를 나타낸다.

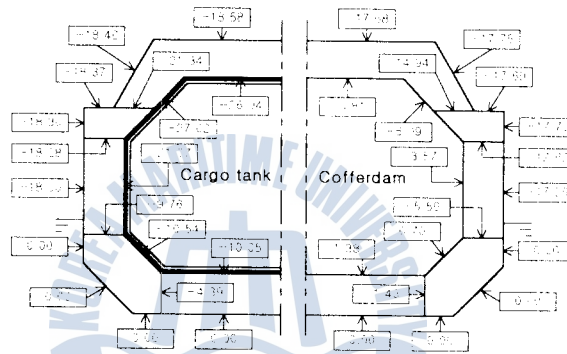


Fig. 11 Temperature distribution of steel plate under USC condition

그리고 각 계산조건에 대하여 단열재를 포함한 선체 측면 평판의 두께방향 온도분포와 화물탱크 내로 유입되는 열량, 평균 대류열전달계수 및 평균 열관류율을 Fig. 12에 나타내었다. 그림에서 2차 단열재(Inner hull ~ Triplex)와 1차 단열재(Triplex ~ Primary barrier)는 그 재질이 R PUF로 같으나 기울기가 다르게 나타나는 것은 전술한 바와 같이 단열재의 열전도계수가 온도의 함수로 표현되어졌기 때문이다. 그리고 그림에서 Outer hull에서 Inner hull 사이가 밀폐공간이며,  $h_{o,s}$ 와  $h_{i,s}$ 는 선체 외판의 외부와 밀폐공간 측의 평균 대류열전달계수를,  $U_s$ 는 선체 외판의 평균 열관류율을 나타낸다.

전술한 온도분포로부터 각 조건에서 계산된 화물탱크 내로 들어오는 총열량, BOG 및 BOR 값을 Table 3에 나타내었는데, 한국가스공사(KOGAS)에서는 현재 LNG선이 만재상태로 운항하는 경우 LNG의 증발율인 BOR 값을 일일 평균  $0.15\%$ 이하로 규정하고 있다. IMO 조건인 최대증발조건에서는 침입열량이  $29.297\text{kW}$ 이고 BOR은 약  $0.1006\%/day$ 로 본 연구에서 설정한 계산모델에 대하여 최대증발조건에서 계산한 BOR 값이 KOGAS에서 규정하는 값보다 훨씬 낮은 값을 나타내고 있다.

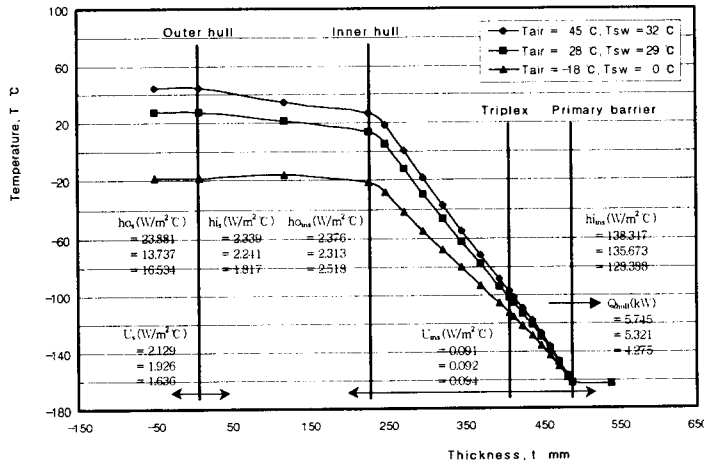


Fig. 12 Temperature gradient at the hull side of cargo tank

Table 3 Total heat duty, BOG and BOR in each condition

Condition	Heat duty(kW) (For 1/4 Tank)	BOG(kg/hr) (For 1/4 Tank)	BOR(%/day)
IMO IGC	29.297	172.838	0.1006
Real voyage	27.893	166.058	0.0966
USCG	23.845	144.431	0.0840

Fig. 13은 코퍼담 내 공기의 평균온도가 +5°C로 일정한 경우로 대기온도의 범위는 -18~45°C이고 해수온도의 범위가 0~32°C일 때 BOR을 그래프로 나타낸 것으로 대기 및 해수온도의 증가에 따라 직선적으로 증가함을 알 수 있다.

그리고 본 계산의 타당성을 입증하기 위하여 GTT사에서 계산한 결과와 비교한 그림을 Fig. 14에 나타내었는데, 이는 USCG 조건에 대하여 GTT사에서 개발하여 사용하고 있는 계산프로그램의 결과와 본 계산프로그램에서 계산한 결과 중 화물탱크를 둘러싸고 있는 단열재 밖의 평판에서의 온도와 밀폐공간에서의 평균온도를 비교한 것이다. 계산결과를 비교해 보면 밀폐공간의 온도는 0.49~2.87°C 정도의 차를 보이며, 각 평판의 온도는 약 0.24~6.34°C의 차를 보이는데, 상부보다는 하부에서의 온도 차이가 크게 나타난다. 그러나, 이러한 결과는 최대 약 4%의 온도차로서 대체적으로 온도가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상에서와 같은 온도 차이는 계산 모델의 차이와 계산 방법의 차이 등으로 판단되어진다. 특히, GTT사에서는 정상상태하에서의 LNG선에 대한 간이열해석을 함에 있어

서, 한 단면에 대하여 열이 선체외부에서 화물탱크 내부로, 즉 한 방향으로만 흐른다고 가정하였고 하나의 평판을 하나의 영역으로 설정하여 1차원 계산을 수행하였기 때문에 본 연구에서 계산한 결과와 차이가 나는 것은 당연한 것으로 사료된다.

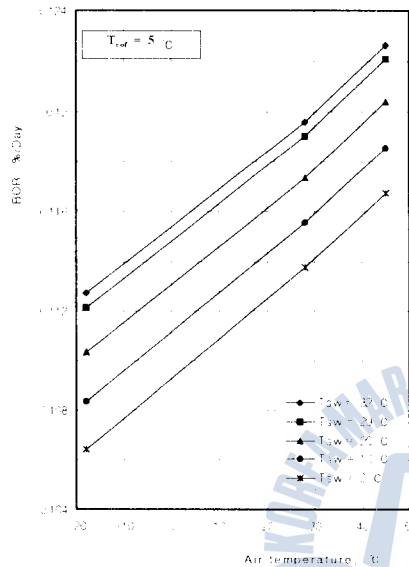


Fig. 13 Boil-off rate( $T_{\text{coff}}=5^{\circ}\text{C}$ )

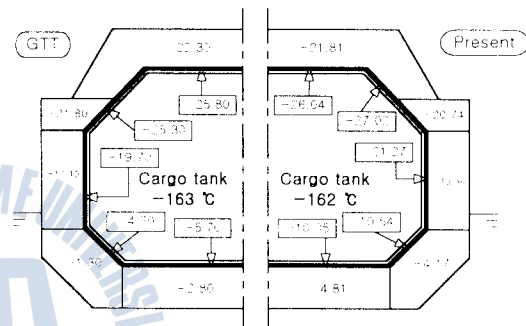


Fig. 14 Comparison of the present temperature results with the GTT's in USCG condition

## 4. 결 론

본 연구에서는 GTT MARK-III Membrane type LNG선의 열설계에 있어서 중요한 3차원 정상상태 열해석을 위한 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) LNG선의 3차원 정상상태 선체 온도분포와 밀폐공간내 공기의 평균온도분포를 미리 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였다.
- (2) 본 계산프로그램을 통하여 탱크 각 부의 온도분포, 화물탱크 내로 유입되는 침입열량 및 BOR을 계산할 수 있었다.
- (3) IGC 코드의 최대증발조건인 해수온도  $45^{\circ}\text{C}$ , 대기온도  $32^{\circ}\text{C}$  및 코퍼담온도  $5^{\circ}\text{C}$ 에서 계산한 BOR 값이  $0.1006\%/day$ 로서, KOGAS에서 요구하는 BOR 값인  $0.15\%/day$

이하임을 확인하였다.

- (4) USCG 조건에 대하여 GTT사에서 계산한 데이터와 비교한 결과 측면과 하반부의 철판 온도에서 다소 차이를 보이거나 대체적으로 근사한 값이므로 본 프로그램의 타당성을 입증할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- (1) 이재현 역, “열전달 및 유체유동 수치해법”, 대한교과서, 1988
- (2) Roger Ffooks, “Natural gas by sea”, Gentry books, London, 1993
- (3) Pierre Jean, Henri Petit, “Quand le Methane prend la mer(Methane by sea)”, P.Tacussel Editeur Marseille, 1998
- (4) 최인규, 조성환, 노승탁, “열전달”, 보성문화사, 1992, pp.329~442
- (5) 이정혜, 천병일, 송성욱, 김경근, “Membrane Type LNG선의 3차원 정상상태의 온도분포 및 BOR 계산 프로그램 개발에 관한 연구”, 공기조화 냉동공학회, '98하계 학술발표논문, 1998, pp.1224~1228
- (6) 日本機械學會編, “流體熱物性値集”, 日本機械學會, 1986, pp.163~488