

---

# 멤브레인형 액화천연가스 운반선의 열해석에 관한 연구

이정혜\* · 박영승\* · 김성규\*\* · 김경근\*\*

A Study on the Thermal Analysis of the Membrane Type LNG Carrier

J. H. Lee\* · Y. S. Young · S. G. Kim\*\* · K. K. Kim\*\*

## Abstract

This study is about the thermal design program that calculates temperature distributions of hull and insulation and analyzes the Boil-off ratio on the membrane type LNG carrier in the laden voyage. The calculation model is 1/4 of cargo tank and cofferdam on the No.3 parts of LNG carrier. The mesh number is selected 77,890 mesh for the degree of accuracy and time on the calculation. The lowest air temperature in compartments is calculated as  $-21.81^{\circ}\text{C}$  under the USCG condition ( $T_{\text{air}}=-18^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{sw}}=0^{\circ}\text{C}$ ) and the highest temperature in compartment is  $38.02^{\circ}\text{C}$  under the IMO IGC condition ( $T_{\text{air}}=45^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{sw}}=32^{\circ}\text{C}$ ) of the maximum boil-off condition. At now BOR value is 0.1006%/day and it is the lower value than 0.15%/ day required by KOGAS.

Key Words : LNG carrier(액화천연가스 운반선), Cargo tank(화물탱크), Cofferdam(코퍼담), Compartment(밀폐공간), Temperature distribution(온도분포), Boil-off ratio(증발율)

## 1. 서 론

우리나라는 지리적 위치로 볼 때 삼면이 바다로 둘러싸여 있어, 육상보다는 해상을 통한 무역이나 거래가 오래전부터 발달되어 왔다. 따라서 해상의 통로인 선박이 발달되어 왔으며,

최근 우리나라는 조선분야의 기술이 발달하여 세계 수준의 기술로 인정받고 있는 가운데, 조선분야의 꽃이라고 할 수 있는 고부가가치 선박, 즉 액화천연가스 운반선(LNG선)에 대한 건조 기술력 또한 세계수준으로 평가받고 있다.

특히 천연가스 버스의 출현 등, 국내에서도

---

\* 한국해양대학교 대학원

\*\* 한국해양대학교

석유이외의 청정에너지에 대한 관심과 수요가 증가하고 있고, 국내 여러 조선소에서는 2001년 LNG선 수주량 1위라는 타이틀로 국내 LNG선의 기술을 자랑하고 있다.

그러나 이러한 액화천연가스(LNG)를 수송하는 LNG선은 선박 크기 또한 대용량의 선박에 해당할 뿐만 아니라 구조 자체 또한 매우 복잡하고 운항조건의 예측 또한 매우 어렵기 때문에 여러 기술의 조합이라고 할 수 있다.

보다 안정적인 형태의 모스형 LNG선에 비하여 멤브레인형 LNG선에서는 화물탱크의 구조 해석, 용접 및 조립기술과 더불어 선체의 열설계기술이 매우 중요한 부분을 차지하고 있다.

점차적으로 멤브레인형 LNG선의 수요가 증가하고 있으며, 보다 안전하게 LNG를 운송해 오기 위하여서는 일부 조선분야 선진국에 의해서만 이루어지고 있는 멤브레인형 LNG선의 설계기술을 국내에서 개발하여 보유하지 않으면 안된다.

그러므로 본 연구에서는 LNG선의 단일 시스템의 보다 나은 해석을 위하여 LNG선의 98% 적재 항해시의 선체 및 단열재 각부의 온도분포를 산정할 수 있는 열해석 프로그램을 개발하였다.

## 2. 계산모델과 기본 방정식

멤브레인형 LNG선의 개략적인 모형을 Fig. 1에 나타내었으며, LNG선은 크게 LNG를 적재하는 화물탱크(Cargo Tank)와 내부에 가열파이프를 설치하여 선체부재의 온도가 허용온도 이하로 떨어지는 것을 방지하는 코퍼담(Cofferdam)으로 구분되어진다.

LNG선의 화물탱크에 대한 실험을 통하여 열해석을 한다면 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을지도 모르나, 액화천연가스의 물성으로 인한 폭발등의 위험과 장치 제작의 비용이 과다하므로,

이를 모델화하여 수치계산을 수행하고자 한다.

계산모델은 Fig. 1에서 종방향으로나 횡방향으로 대칭을 이루고 있는 3번 화물탱크와 3번 코퍼담으로 설정하였으며, 각 화물탱크와 코퍼담은 그 모양이 좌우 대칭이므로 Fig. 2와 같이 계산영역을 화물탱크와 코퍼담 체적의 각 1/4로 설정하였다.

본 수치계산에서는, 액화천연가스의 적재량이 98%이므로 적재된 액화천연가스의 유동변화가 단열재 및 선체의 온도에 미치는 영향은 미미한 것으로 간주하였다. 따라서 제어체적법을 이용하여 생성항이 없는 정상상태 3차원 열전도의 미분방정식을 계산에 적용하였으며 식(1)에 나타내었다.

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

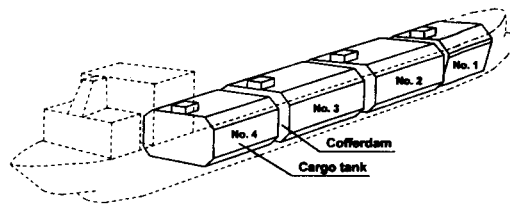


Fig. 1 General arrangement of cargo tank and cofferdam

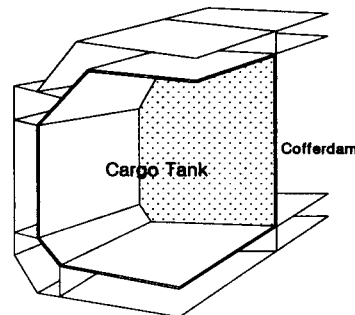


Fig. 2 The calculation model

### 3. 계산조건

본 계산에 사용된 계산모델의 선체 각부에서의 치수를 Fig. 3에 나타내었다. 선박의 길이방향인 z방향으로 화물탱크의 길이는 21.6825 m 이고, 코퍼담의 길이는 1.355m이다. 그림에서 S.W.L은 선체 저면에서부터 해수면까지의 높이를 나타낸 것으로, 98% 적재시 그 설계치는 11.300m이다.

주어진 계산모델에 대하여 일거에 수치계산을 수행하기 위하여서는 2개의 판이 만나는 선체 Edge부와 3개의 판이 서로 만나는 Corner부에서 각 격자점들이 일치하여야 한다. 또한 격자점의 수는 계산의 정확도와 계산에 소요되는 시간에 중요한 변수로 작용하므로, 계산모델 전체에서 격자점의 생성을 자동 생성하도록 설정하였다. 이러한 격자점의 개수 결정은 본 계산에 사용한 SUN계열 Ultra-1 UNIX시스템을 이용하여 격자점의 수가 변함에 따른 계산의 정확도와 계산시간을 검토하였다.

이 중에서 적도지방 최대중발조건인 대기온도 45°C, 해수온도 32°C에서의 결과를 Table 1에

Table 1. BOR deviation according to mesh numbers (Tair=45°C, Tsw=32°C)

Case	Mesh Num.	BOR (%/day)	Deviation (%/day)	Cal.time (hr)
Case 1	12,248	0.144423	+0.0064	2
Case 2	36,546	0.138585	+0.0005	6
Case 3	77,890	0.135928	-0.0021	10
Case 4	142,490	0.138681	+0.0006	24
Case 5	199,932	0.138052	0.0	36

나타내었고, 본 계산에서는 case 3의 격자점 개수를 선택하였다.

실제 LNG선에서 선체 평판의 두께는 각 부위별로 16~19mm의 분포를 가지고 있으나 본 계산에서는 계산의 편리를 위하여 모두 18mm의 평판으로 가정하였고 이때 평판의 열전도계수 k는 54W/m°C로 설정하였다.

1차 단열재의 두께는 80mm로 계산의 편의를 위하여 Top plywood를 포함한 두께이며, 2차 단열재의 두께는 Back plywood를 포함하여 169mm로 설정하였고, 이 R.PUF의 열전도계수 (k<sub>ins</sub>)는 단열재 온도에 대한 함수로 표현하여 식(2)에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 k_{ins} = & -1.0339 \times 10^{-25} T^6 - 5.2939 \times 10^{-23} T^5 \\
 & + 9.2656 \times 10^{-11} T^4 + 3.4697 \times 10^{-8} T^3 \\
 & + 3.4721 \times 10^{-6} T^2 + 7.2862 \times 10^{-5} T \\
 & + 2.0037 \times 10^{-2}
 \end{aligned} \quad (2)$$

그리고 1, 2차 방벽의 두께는 각각 1.0mm, 1.2mm로 하고 이의 열전도계수는 45W/m°C, 21.9W/m°C로 하여 계산에 이용하였다. 그리고 LNG의 밀도와 중발잠열은 각각 425kg/m<sup>3</sup>, 510kJ/kg으로 설정하였다.

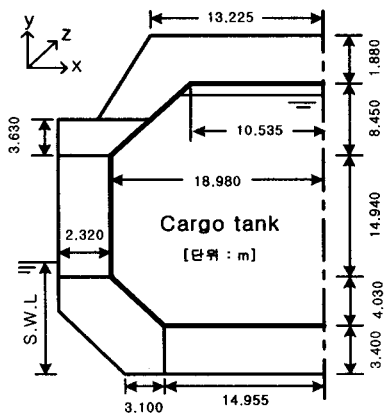


Fig. 3 The arrangement of symbols for dimension

화물탱크 내부의 적재된 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. 또한 선속은 19.5knots로 일정값을 사용하여 계산하였다.

또한 재료에 있어서 접촉 저항의 영향을 무시하였고, 선체 각부의 각종 보강재의 영향을 무시하였다.

화물탱크 상부의 천연가스가 접하는 평판으로 유입하는 열량은 액화천연가스의 증발에는 사용되지 않는다고 가정하였으며, 적재된 액화천연가스 표면과 상부의 천연가스가 접하는 1차 방벽 사이의 복사열교환은 무시하였다.

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 적은 LNG선의 경우에는 밀폐공간내의 유체의 온도 구배는 그렇게 크지 않다고 판단되므로 본 계산에서는 밀폐공간내 온도분포를 대표온도로서 균일하다고 간주하고 계산을 수행하였다.

LNG선의 경우, 대기 및 해수에 접하고 있어 강제대류 열전달이 이루어지는 선체 외측과 공기에 접한 밀폐공간이나 화물탱크 내에서의 자연대류 열전달이 나타나는 선체 내측으로 구분 지을 수 있으며, 이에 따른 각각의 대류 열전달 계수를 계산하기 위하여 본 연구에서는 아래와 같은 수식을 사용하였다.

자연대류(수평평판) :

$$Nu = 0.13 (Gr Pr)^{1/3} \quad (3)$$

자연대류(수직평판) :

$$Nu = 0.10 (Gr Pr)^{1/3} \quad (4)$$

강제대류 :

$$Nu = 0.029 Re^{0.8} Pr^{0.43} \quad (5)$$

Fig. 4는 본 연구에서 개발한 프로그램의 계산 흐름도를 나타낸 것이고, 하루동안 증발한 액화천연가스를 총화물량으로 나눈 BOR(Boil-off rate, %/day) 값을 계산하는 식은 아래와 같고, 여기서  $Q_{BOR}$ 는 화물탱크로 들어오는 총침입 열량을,  $\gamma_{meth}$ 는 포화 메탄액의 증발잠열을,  $\rho_{meth}$ 은 포화 메탄액의 밀도를,  $V_{98\%}$ 는 화물탱크의 98% 체적을 나타낸다.

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

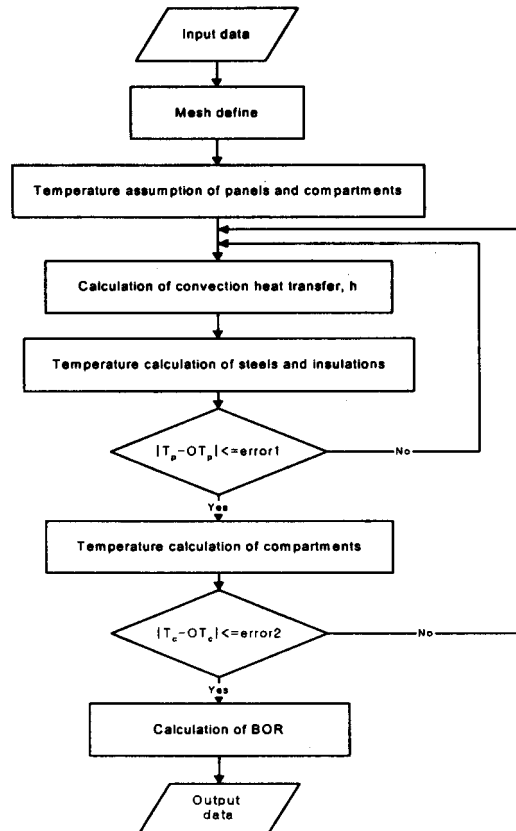


Fig. 4 Flow chart

### 4. 계산결과

본 계산을 위한 입력 조건에서 대기 및 해수의 온도에 대한 외부 계산조건이 가장 큰 영향을 미치는 요소인데, 본 연구에서는 3가지 조건에 대하여 검토하였다. 가장 낮은 온도조건으로서 선체의 저온취성을 고려한 USCG조건( $T_{air} = -18^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{sw} = 0^{\circ}\text{C}$ )과, 가장 고온조건으로서 적도 지방에서 최대 증발조건인 IGC코드에서 제시된 IMO조건( $T_{air} = 45^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{sw} = 32^{\circ}\text{C}$ )이 있으며, 실운항조건( $T_{air} = 28^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{sw} = 29^{\circ}\text{C}$ )으로는 HJ 중공업에서 건조되어 현재 운항중인 GT-96 멤브레인 방식 LNG선의 인도네시아 항로에 대하여 계산하였다.

선체의 이중구조로 인하여 화물탱크와 코퍼담의 주위에 위치한 각 밀폐공간내 공기의 평균 온도를 계산하여 그 결과를 Fig. 5~7에 나타내었다. 화물탱크측 밀폐공간내 평균 공기온도를 검토해 보면, 저온조건인 USCG조건에서는 외부 공기가 가장 많이 접하는 상부의 밀폐공간이  $-21.81^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮은 온도분포를 나타내었으며, IMO조건에서도 외부 공기가 가장 많이 접하는 상부의 밀폐공간의 온도가  $38.02^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높게 나타났다.

코퍼담 측의 밀폐공간내 평균 공기온도는 USCG조건에서는  $-14.30^{\circ}\text{C}$ 가 가장 낮은 온도였으며, IMO조건에서도 같은 부분의 밀폐공간 온도가  $34.49^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높게 나타났고, 실운항 조건에서 코퍼담 측의 밀폐공간내 공기의 평균온도는  $23.38^{\circ}\text{C}$ 인 밀폐공간 온도를 제외하면 대략  $20^{\circ}\text{C}$  정도의 온도를 나타내고 있다.

선체의 저온취성파괴 등으로 인한 선박의 안전성 문제가 우려됨에 따라 선체의 온도분포가 중요한 USCG 저온조건에서 계산한 결과를 Fig. 8에 단열재 바깥의 Inner hull에서의 온도와 Outer

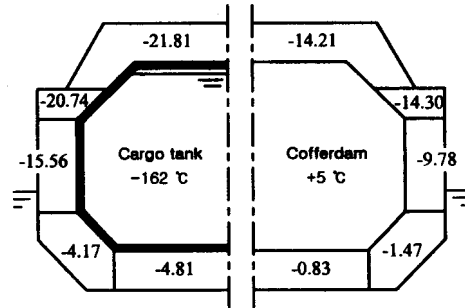


Fig. 5 The mean air temperatures in compartments at USCG condition

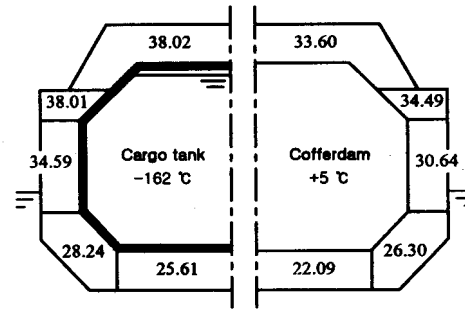


Fig. 6 The mean air temperatures in compartments at IMO condition

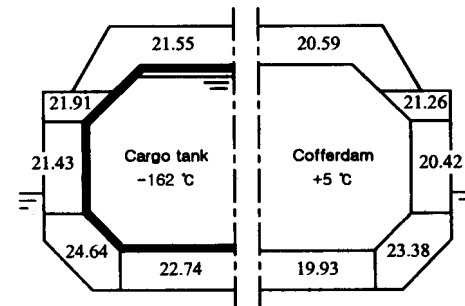


Fig. 7 The mean air temperatures in compartments at real condition

hull에서의 온도를 나타내었다.

그리고 각 계산조건에 대하여 단열재를 포함한 선체 측면 평판의 두께방향 온도분포와 화물탱크 내로 유입되는 열량, 평균 대류열전달계수

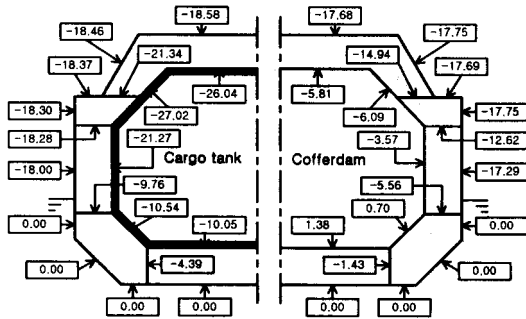


Fig. 8 Temperature distribution of steel plate under USCG condition

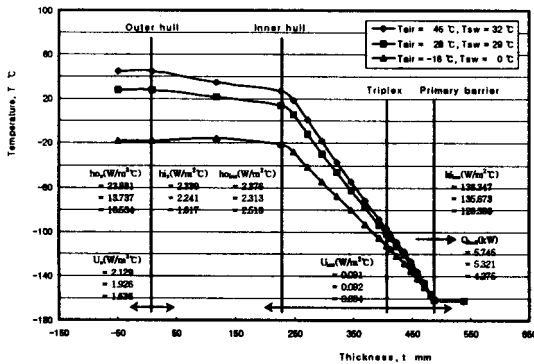


Fig. 9 Temperature gradient at the hull side of cargo tank

및 평균 열관류율을 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 Outer hull에서 Inner hull 사이가 밀폐공간이며,  $h_o$ 와  $h_i$ 는 선체 외판의 외부와 밀폐공간 측의 평균 대류열전달계수를,  $U_o$ 는 선체 외판의 평균 열관류율을 나타낸다.

각 조건에서 계산된 화물탱크 내로 들어오는 총열량, BOG 및 BOR 값을 Table 2에 나타내었다. 한국가스공사(KOGAS)에서는 LNG선이 만재상태로 운항하는 경우 LNG의 증발율, BOR을 일일 평균 0.15%이하로 규정하고 있는데, 본 연구의 최대증발조건에서 계산한 BOR 값은 약 0.10%/day로 규정치보다 훨씬 낮은 값을 나타내고 있다.

Table 2. 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 Voy.	27.893	166.058	0.0966
USCG	23.845	144.431	0.0840

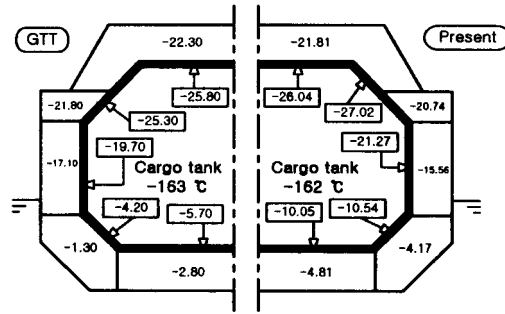


Fig. 10 Comparison of the present temperature results with the GTT's in USCG condition

그리고 Fig. 10에 본 계산의 타당성을 입증하기 위하여 USCG 조건하에서 GTT사에서 개발하여 사용하고 있는 계산프로그램의 결과와 본 계산프로그램에서 계산한 결과 중 화물탱크를 둘러싸고 있는 단열재 밖의 평판에서의 온도와 밀폐공간에서의 평균온도를 비교한 것이다. 상부보다는 하부 평판에서의 온도 차이가 크게 나타나는데, 이는 최대 약 4%의 온도차로서 대체적으로 온도가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 액화천연가스 운반선의 98% 적재 운항시

선체 각 부의 온도분포와 밀폐공간내 공기의 평균온도분포, 그리고 화물탱크 내로 유입되는 침입열량 및 BOR을 계산할 수 있었다.

- (2) IGC 코드의 최대증발조건에서 계산한 BOR 값이 0.1006%/day로서, KOGAS에서 요구하는 0.15%/day 이하임을 확인하였다.
- (3) USCG 조건에 대하여 GTT사에서 계산한 데이터와 비교한 결과, 일부에서 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] 이정혜, 천병일, 송성옥, 김경근, "Membrane Type LNG선의 3차원 정상상태의 온도분포 및 BOR 계산 프로그램 개발에 관한 연구", 공조화 냉동공학회 하계학술논문집, pp.1224~1228, 1998
- [5] 日本機械學會編, "流體熱物性値集", 日本機械學會, pp.163~488, 1986

