論 文

大 韓 造 船 學 會 論 文 集
第 34 卷 第 4 號 1997年 11月
Journal of the Society of
Naval Architects of Korea
Vol. 34, No. 4, November 1997

멤브레인형 LNG선의 화물창 온도분포 해석

허주호*, 전윤호

Temperature Distribution for a Membrane type LNGC Cargo Tank

by

Joo Ho Heo* and Yoon Ho Jeon

요 약

LNG운반선은 일반 상선과는 달리 경제성 관점에서의 적정 Boil-Off Rate(BOR)과 안전성 관점에서의 Steel Grade 결정을 위한 Cargo tank 온도분포 해석이 필수적이다. Membrane형 LNG선의 경우 이미 여러가지 해석이 수행된 바 있지만 대부분이 상당히 영향을 주는 부재들의 영향을 무시하였다. 본 연구에서는 이전의 연구에 더하여 온도 분포 해석에 가장 중요한 대류 열전달 계수의 산정에 더욱 정확한 상관식을 적용하였고 Longitudinal과 Floor등 주요 부재의 영향을 충분히 고려한 3차원 온도분포 해석과 BOR을 산정하는 program을 개발하였다. 또한 여러 가지 경우에 대해 타당성을 검토한 후 그 결과를 설계에 반영하였다.

Abstract

For the LNG carrier, the calculation of temperature distribution of cargo tank is necessary to select the steel grade and to estimate the boil-off rate(BOR). Since the previous studies with 2-D and 3-D method ignored the effect of several primary members, the effect was included by applying the better equations for the convection coefficient that is the most important item in this kind of study. After evaluating the program considering the primary members, the results are reflected to the design of the concerned LNG carrier.

접수일자 : 1997년 9월 2일, 재접수일자 : 1997년 10월 20일
* 정회원, 대우중공업 선박해양기술연구소

1.서론

LNG 운반선은 일반 선박과는 달리 적재되는 화물이 -163 ℃의 극저온 액체라는 점 때문에 설계시에 많은 요소들을 고려해야 한다. LNG선은 운항때 tank내의 LNG 온도와 외기 온도 차이가 최대 200 ℃가 넘는 매우 불안정한 상태가 되므로 LNG선의 안전성은 매우 중요하며, 또한 화물창의 증발율의 경제성까지 고려해야 한다.

LNG선은 극저온의 액체 화물로 인하여 선체가 저온이 되어 일반적인 강재로는 구조 부재로서의 허용 강도를 만족할 수 없으므로 안전성에 특히 주의를 하여야 한다. 일반적으로 LNG선은 극저온의 조건에서도 견딜 수 있는 선체의 steel grade를 선정하도록 하는데, 선급 등 관련 기관에서 제시되는 온도 조건이 조금씩 다르며, 본 논문에서 적용한 것은 그 중 가장 가혹한 조건인 USCG의 외기조건으로 대기온도 -18 ℃, 해수온도 0 ℃이다.

Boil-Off gas는 화물창 내에서의 증발로서 Steam Turbine을 통해 선박의 추진과 발전에 사용되지만 운항시 일정량 이상이 되면 경제성이 없다고 판단하는데 통상 LNG선의 Boil-Off gas의 발생비율(BOR)은 사양서에 0.15 %/day 이내로 명시되어 있다. 또한 명시된 BOR의 산정을 위한 외기조건은 대기온도 45 ℃, 해수온도 32 ℃, Cofferdam 내부 5 ℃로 정하고 있다.

선체의 온도 분포와 BOR 계산은 위의 외기 조건에서 단열재의 두께를 바꾸면서 계산한다. 단열재(Insulation)는 극저온 화물에 의해 선체의 온도가 낮아지는 것을 막고 선박 설계 속도에서 BOR를 감소시키는 역할을 하므로 단열재(Insulation)의 두께와 열적 성능은 많은 설계 요소들의 결정 기준이 된다[1,2,3].

따라서 여기에서는 3차원 선체 온도분포 계산을 위한 이론을 정립하여 자연대류 및 강제대류 열전달 계수의 계산을 더욱 정확히 하였고, 이를 토대로 ANSYS 상에서 운용될 수 있는 Program을 개발하여 해석을 수행하였다.

2. 대류 열전달 계수의 산정

LNG Cargo Tank의 온도분포 해석에서 가장 중요한 것은 정확한 대류 열전달 계수를 산정하는 것이다. 대류 열전달 계수 h는 표면의 기하학적 형상, 유동의 성질, 유체의 열역학적 물성치 등에 의해 영향을 받는다. 여기에는 많은 상관식들이 있지만 그 중 가장 타당한 식을 경우에 맞게 적용하는 것이 무엇보다 중요하다.

2.1 자연대류 (Natural Convection)

자연대류는 덥고 가벼운 유체가 상대적으로 차고 무거운 유체쪽으로 수직 상향 운동을 하며 일어난다. 그러면서 유동에서 교란이 증폭되어 층류로부터 천이를 거쳐 난류에 이른다. 자연대류 경계층에서의 천이는 유체 내에서의 부력과 점성력의 상대적인 크기에 따라 좌우된다. 이 천이의 발현 여부는 Grashof수(Gr_L)와 Prandtl수(Pr)의 곱인 Rayleigh수(Ra_L)로 판단한다. Grashof수는 속도 경계층 내에서 점성력에 대한 부력의 비율이며 Prandtl수는 열확산 계수 α에 대한 운동량 확산계수 ν에 대한 비로서 기체의 경우 Prandtl수는 거의 1이다.

$$Ra_L = Gr_L \cdot \Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} \cdot \frac{\nu}{\alpha}$$

$$= \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu\,\alpha} \qquad (1)$$

여기서

β : 체적팽창계수 K^{-1}
ν : 동점성계수 m^2/s
α : 열 확산율 m^2/s
T_s : 판 표면의 온도 K
T_∞ : 유체의 온도 K
L : 특성길이 m
g : 중력 가속도 m/s^2

적절한 실험식들을 요약하면 대류 열전달의 척도인 Nusselt수는 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{Nu_L} = \frac{\overline{h}L}{k} \propto Ra_L^{n} \quad (2)$$

여기서

k : 열전도 계수 W/m · K

$\overline{h}$: 평균 대류 열전달 계수 W/m^2 · K

n : 지수 (적용 수식에 따라 다름)

Ra_L의 변수인 β, ν, α와 Pr는 각 유체의 온도만의 함수이므로 Table 1[4,5,6]에서 부터 curve fitting하여 상관식을 구하였다[7].

Table 1 Properties of air at atmospheric pressure

Tair (K)	Tair=t (°C)	$k\times10^3$ (W/mK)	$\beta\times10^3$ (K^{-1})	$\nu\times10^6$ (m^2/s)	Pr
100	-173.15	9.34	10.0	2.0	0.786
150	-123.15	13.8	6.7	4.4	0.758
200	-73.15	18.1	5.0	7.6	0.737
250	-23.15	22.3	4.0	11.4	0.720
300	26.85	26.3	3.3	15.9	0.707
350	76.85	30.0	2.9	21.0	0.700

* 공기의 β는 이상기체와 같이 $1/T_{air}$ 로 표현된다.

2.1.1 수직판

Churchill과 Chu[8]는 전 영역의 Ra_L에 대하여 적용할 수 있는 실험식을 제시했다.

$$\overline{Nu_L} = \left\{0.825 + \frac{0.387\,Ra_L^{1/6}}{[1+(0.492/\mathrm{Pr})^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2 \quad (3)$$

이 경우 수직평판의 자연대류에 대한 평균 대류 열전달 계수 $\overline{h}$는 아래 식(4)로 구해진다.

$$\overline{h} = \frac{\overline{Nu_L}\cdot k}{L} \quad (4)$$

2.1.2 수평판

일반적으로 수평판의 대류현상은 고온판과 저온판이 각각 아래와 위에 위치하여 밀도차에 의한 부력에 의해 일어난다. 그러나 Trunk deck부의 수평판의 경우는 Double Bottom부와는 반대로 고온판이 위쪽에, 저온판이 아래쪽에 위치하여 Double Bottom부 보다 대류가 적게 일어난다. 그러므로 Bottom부에 적용되는 상관식을 그대로 Trunk deck에 적용할 수 없으므로 다음의 경우로 나누어 다른 식을 적용하여야 한다.

- 판의 온도가 주위 유체보다 높은 경우 또는 낮은 경우
- 상방향(upward)인 경우 또는 하방향 (downward)인 경우

이에 따른 관계식은 다음과 같다[4,5,7].

● 가열판의 윗면 또는 냉각판의 아랫면

$$\overline{Nu_L} = 0.54\,Ra_L^{1/4} \quad (10^4 \le Ra_L \le 10^7) \quad (5)$$

$$\overline{Nu_L} = 0.15\,Ra_L^{1/3} \quad (10^7 \le Ra_L \le 10^{11}) \quad (6)$$

● 가열판의 아랫면 또는 냉각판의 윗면

$$\overline{Nu_L} = 0.27\,Ra_L^{1/4} \quad (10^5 \le Ra_L \le 10^{10}) \quad (7)$$

2.2 강제 대류(Forced Convection)

강제대류는 가장 널리 사용되는 McAdams식[9,10]을 사용하여 대류 열전달 계수를 산정하였다.

$$\overline{Nu_L} = 0.037\,Re_L^{4/5}\,\mathrm{Pr}^{1/3} \quad (8)$$

여기서

$$Re_L = \frac{VL}{\nu} \quad (9)$$

V : 선박의 속도 m/s

Reynolds수 Re_L은 자연 대류에서의 Grashof 수의 역할과 유사하다. 또 Table 2[4,5,6]로 부터 온도에 따른 함수를 자연대류와 같은 방법으로 구하였다.

Table 2 Properties of water at atmospheric pressure

Tw (K)	Tw=t (°C)	k (W/m °K)	$\nu \times 10^6$ (m^2/s)	Pr
273.15	0.0	0.552	1.788	13.6
293.15	20.0	0.597	1.006	7.02
313.15	40.0	0.628	0.658	4.34

2.3 총합 열전달 계수 (overall heat transfer coefficient)

Fig. 1에서와 같이 이중 선체와 Insulation이 복합적으로 구성되어 있는 계에서 임의의 벽 i를 통과하는 열량은 총합 열전달 계수 U_i를 구해서 쉽게 계산할 수 있다.

$$Q_i = U_i A_i \Delta t \tag{10}$$

여기서

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + \frac{t_h}{k}} \tag{11}$$

k : 벽 재질의 열전도 계수
Ai : 벽면의 면적
Δt : 벽 i를 경계로 한 양 유체의 온도 차이
h_1, h_2 : 벽 양 측면의 대류 열전달 계수
t_h : 벽의 두께

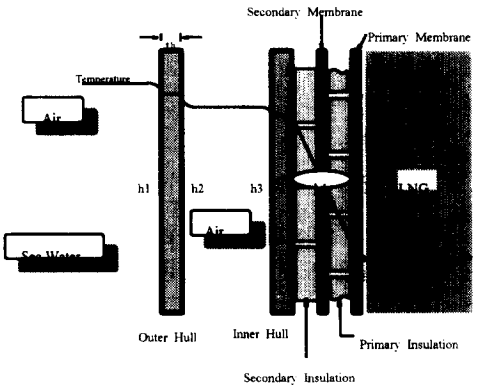

Fig.1 Heat transfer through the insulation and double hull

이 총합 열전달 계수를 매개로 하여 Fig. 2에서와 같이 밀폐된 선체 내부의 공기온도가 결정되므로 본 연구에서는 이 계수의 정확도에 따라서 최종 결과의 신뢰도가 결정된다고 할 수 있다.

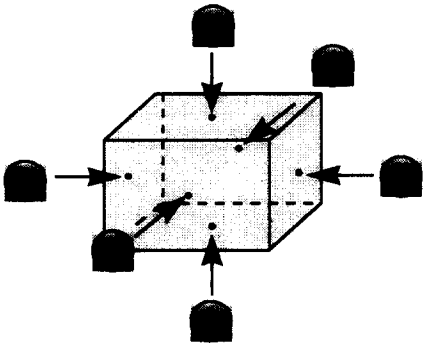

Fig. 2 Temperature calculation for an enclosed compartment no. i

3. 해석절차 및 모델링

본 연구에서는 범용 package인 ANSYS를 이용하여 선체의 온도분포를 계산하였다. ANSYS 상에서 선체의 온도를 계산할 수 있는 조건은 표면에 인접한 유체의 온도와 대류 열전달 계수 h, 그리고 선체 재질의 열전도 계수 k이다. 대상선은 설계중인 138K급 LNG선으로 4개의 Hold를 가지고 있고 선속은 19.5 Knots이다. 화물은 98% 만재시로 가정하여 이에 따른 경계조건을 설정하였다. 해당 선박은 그대로 모델링 하지 않고 여러 보강재들의 열전달율 증가량을 구해서 그 효과를 고려하였다. 그러나 ANSYS program 내에서 전열면적 증가량을 단순히 면적 증가 효과로써 제어하기에는 까다로운 문제가 있기 때문에, 본 연구에서는 각 평판의 대류 열전달 계수 h값에 전달면적 증가효과를 반영하므로써 그 효과를 고려하였다. 전체적인 해석의 절차는 Fig. 3에 나타내었다.

3.1 모델링

해석을 수행한 모델은 2번 tank의 1/4의 형상으로 Fig. 4에 나타나 있다. 여기에는 Longi Girder와 Floor를 추가로 modeling 하여 참고문헌 [1],

[2]보다 compartment 수를 늘리면서 전열량 증가 효과가 자연적으로 추가되었다. 여기서 pipe나 기계류 등과 같은 발열 요소들의 영향, Cargo tank 내에서의 복사 열교환이나 tank내의 일차 방벽인 Invar와 LNG사이의 대류현상은 무시하였다.

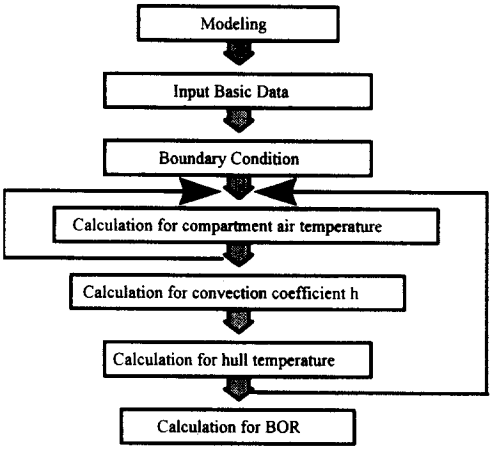

Fig. 3 Flow chart for hull temperature and BOR calculation

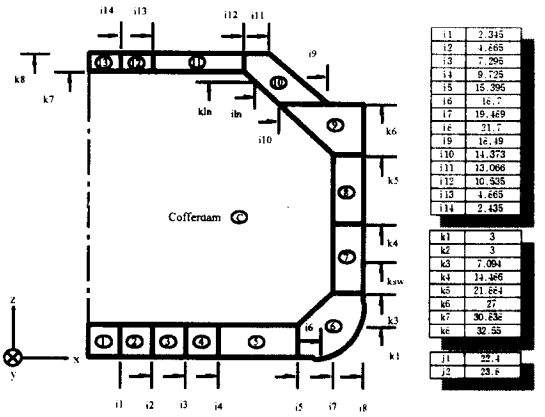

Fig. 4 Dimension of an 138K LNG carrier

3.2 기초 입력 조건

대류 열전달 계수를 구하기 위해서 Cargo tank를 구성하는 각각의 plate에 대해 다음과 같은 경우에 대한 조건을 설정한다.

- Convection type (Free, Forced)
- Plate type (Vertical, Horizontal)
- Adjacent fluid type (Air, Water, LNG)
- Number of Longitudinals

BOR과 선체 온도분포 계산시 경계조건은 다음과 같다. 여기서 tank내의 온도는 화물이 98% 만재 상태이고 일정하게 -163 ℃라 가정한다.

- BOR 계산시 : 대기 45 ℃, 해수 32 ℃, Cofferdam 5 ℃
- 강재 등급 결정시 : 대기 -18 ℃, 해수 0 ℃

3.3 Compartment내 공기온도 계산

Compartment내 공기 온도는 각 plate의 총합 열전달 계수 U를 계산하여 3차원 에너지 평형식으로써 구한다[1,9]. Fig. 2와 같이 n개의 단판으로 둘러 싸인 임의의 공간 i에 대해 출입하는 모든 열량의 합은 영이라는 개념에서 다음과 같은 식을 쓸 수 있다.

$$\sum_{j=1}^{n} q_j = 0, \quad j = 1,2,\ldots,n \tag{12}$$

$$q_j = U_j A_j (T_i - T_j) \tag{13}$$

$$T_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} U_j A_j T_j}{\sum_{j=1}^{n} U_j A_j} \tag{14}$$

3.4 대류 열전달 계수 h 계산

가장 적합한 상관식을 조건에 맞게 적용하고 이 값을 ANSYS Solver에 Input하여 선체 온도를 구한다. 선체의 Compartment들은 원칙적으로는 밀폐된(enclosed) 형태로 봐야 더 타당하다고 할 수 있으나, 이 경우에 적용할 수 있는 상관식들의 제한 조건인 Ra_L의 크기가 범위를 벗어나므로 마땅한 상관식이 없다. 또 밀폐된 형태에 대해 제시된 상관식들은 모두 상하 혹은 좌우 두면의 열교환에 대해서 한정하고 있으나 본 연구의 대상이 되는 선박의 compartment는 육면에서 열교환이 있어서 이 경우로 고려할 수 없다. 따라서 본 연구는 이 밀폐된 compartment들을 외부 유동에 노출된 단판들로 구성되었다고 가정하여 해석을 수

행하였다.

ANSYS Solver에 필요한 경계조건으로 h를 Input 할 때는 부재 영향을 고려하여 다음 절에서와 같은 방법으로 미리 계산된 Longitudinal의 전열면적 증가 효과를 고려한 값을 적용하였다.

3.5 주요 부재의 영향 고려

선체에는 많은 부재들이 있지만 모두를 실제 형상 그대로 modeling 해서 해석할 수는 없다. 본 연구에서는 이전의 연구[1,2]에 대해 Girder와 Floor등 주요 부재는 추가로 modeling하고[7] Longitudinal은 Fig. 5 처럼 선체 온도 분포에 영향을 주는 fin으로 생각하여 계산하였다. 이 Longitudinal은 판재 표면으로부터 열전달을 증가시키기 때문에 전열량 증가량을 고려할 수 있는 fin 유용성 ε_f 를 fin이 없을 때의 열전달 율에 대한 핀의 열전달 율로 정의하여 도입한다.

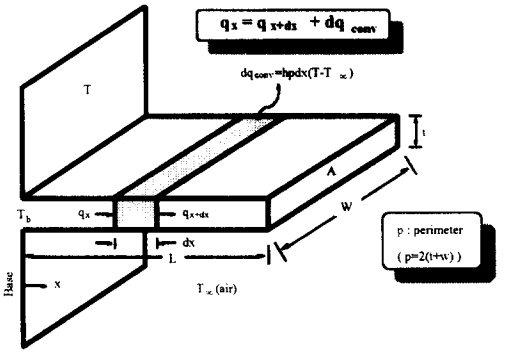

Fig. 5 Energy balance of finned surface

$$\varepsilon_f = \frac{q_f}{hA_c\theta_b} \tag{15}$$

여기서

q_f : fin의 열전달율

h : 유체의 대류 열전달 계수

A_c : fin의 단면적

$\theta_b = T_b - T_\infty$

중간 유도과정은 참고문헌 [8],[9],[10]에 자세히 있으며 fin 끝단에서 대류 현상이 있는 상태의 결과식만을 쓰면 fin 하나의 열전달 율은 다음과 같다.

$$q_f = \sqrt{hpkA_c}\,\theta_b \frac{\sinh mL + (h/mk)\cosh mL}{\cosh mL + (h/mk)\sinh mL} \tag{16}$$

여기서

$$m^2 = \frac{hp}{kA_c} \tag{17}$$

p : fin의 주변길이

그러므로 fin 유용성은 아래 식(18)로 표현된다.

$$\varepsilon_f = \sqrt{\frac{kp}{hA_c}}\,\frac{\sinh mL + (h/mk)\cosh mL}{\cosh mL + (h/mk)\sinh mL} \tag{18}$$

열전달율의 증가효과는 h값에 따라서, 즉 compartment 내의 공기의 온도에 따라 변하는 함수이다. 그러므로 각 평판에 부착된 fin의 수와 그 주위 온도가 주어져야만 정확한 값을 계산할 수 있다.

3.6 선체 온도분포 계산

ANSYS에서 선체 온도분포 계산시 필요한 입력 자료인 인접한 유체의 온도 즉, 선체 내부의 공기 온도를 모르므로 에너지 평형식으로 열량 출입을 계산하여 평균 온도를 구한다. 외기 온도는 경계조건으로 주어지나 내부 공기의 온도는 알지 못하므로 충분한 Iteration을 통해 얻어진 값이 입력되어 선체의 온도계산이 수행된다. 이때 주요부재의 영향이 고려되어 온도 상승 효과가 함께 계산되어 진다.

3.7 증발율(BOR) 계산

Cargo tank내의 LNG는 tank내로 들어오는 열량에 의해 증발하므로, 액상의 LNG 온도를 포화온도라 가정하면, 총 입열량은 모두 LNG의 증발에 기여하므로 BOR은 다음과 같이 계산되어진다.

$$BOR = \frac{24 Q_T}{\gamma \rho V_{LNG}} \times 100\ \%/day \qquad (19)$$

여기서

Q_T : tank 내로 들어온 총 열전달량 W

γ : LNG의 증발잠열 142 Wh/kg

ρ : LNG의 밀도 425 kg/m^3

V_{LNG} : LNG의 부피 m^3

4. 계산 결과 및 고찰

4.1 선체 온도 분포

최적의 steel grade를 선정하기 위해서는 전술한 바와 같이 정확한 선체의 온도 분포를 자세히 알 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 전 장에서 기술한 내용에 입각하여 주요 부재들을 추가로 모델링 하였고 그에 따른 영향도 고려하여 온도 분포를 계산하였다.

4.1.1. Case 1(대기: -18 ℃, 해수: 0 ℃, Cofferdem : No Heating)

본 연구에서는 기 수행한 연구와 달리 주요 부재들의 영향을 계산에 고려하였는데 Double bottom에서는 그 영향이 그리 크지 않으나 Trunk deck에서는 상당한 온도 상승 효과를 일으킨다. 그 이유는 저온판이 아래에 위치하고 고온판이 위에 위치하여 자연대류가 일어나기 힘든 층이 형성된 상태에서 주요 부재들의 영향이 다른 부분의 전열효과보다 상대적으로 커지기 때문이다. 실제 계산 예로서 대기 온도 -18 ℃, 해수 온도 0 ℃의 경우, 주요부재의 영향을 무시한 경우 약 -27 ℃ 였으나, 부재의 영향을 고려하였더니 -22 ℃로 5 ℃ 정도의 온도 상승을 일으켰다. 화물창 전반과 Cofferdam 및 Web frame에 대한 자세한 온도 분포도는 Fig. 6 - 8 에 각각 표시되어 있다. 아래 Table 3의 본 계산은 주요 부재의 영향을 고려한 선체 온도분포의 결과이며, Fig. 9에 종합적으로 표현해 두었다.

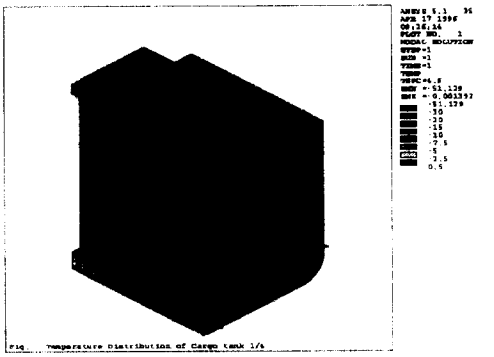

Fig. 6 Temperature distribution of cargo tank 1/4 (case 1)

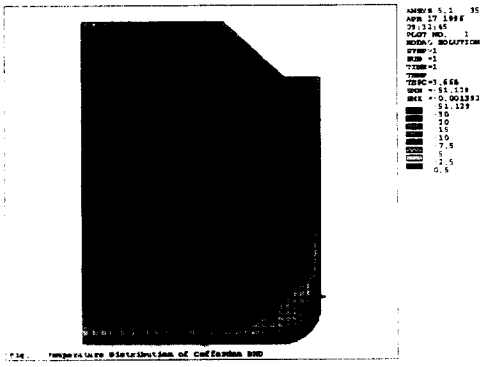

Fig. 7 Temperature distribution of cofferdam bhd (case 1)

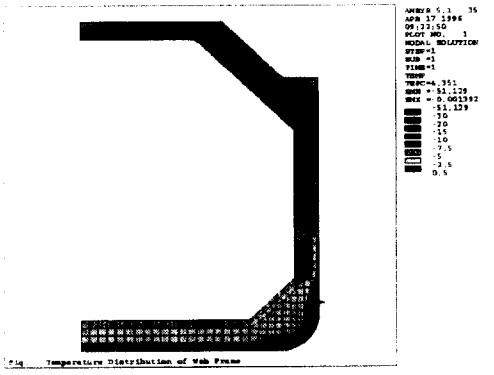

Fig. 8 Temperature distribution of web frame (case 1)

Table 3 Temperature Distribution (℃)
(Air : -18 ℃, Sea Water : 0 ℃)

No.	3-D [1]		2-D [2]	GT [3]		본계산	
	T_C	T_H	T_H	T_C	T_H	T_C	T_H
1	-5.2	-10.3	-6.2	-1.9	-3.9	-3.9	-7.5
2							-7.7
3							-7.7
4							-7.7
5							-7.8
6	-4.1	-9.6	-6.3	-0.9	-3.0	-3.0	-7.9
7	-16.8	-21.3	-14.8	-13.4	-15.3	-10.8	-15.1
8						-21.3	-24.8
9	-22.1	-25.7	-23.5	-19.9	-22.4	-22.1	-26.0
10	-22.2	-26.2	-22.9	-20.6	-23.1	-21.1	-25.2
11						-20.6	-27.7
12							-26.7
13							-26.1
Cof	-44.9		·	-42.6	-44.7	-47.4	-49.5

* T_C : Compartment Air Temperature
T_H : Hull Temperature
Cof : Cofferdam

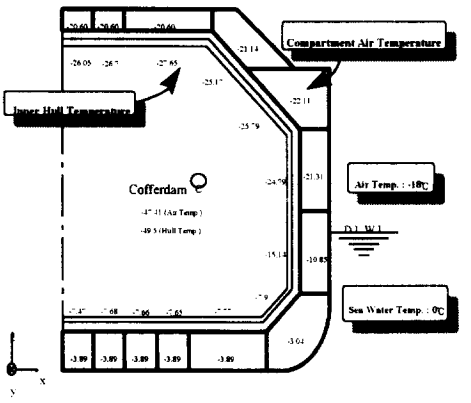

Fig. 9 Temperature distribution for an 138K LNG carrier

4.1.2 Case 2(대기:45 ℃, 해수:32 ℃, Cofferdam : 5 ℃)

Case 2는 BOR을 계산하기 위한 경계조건으로 강재의 등급 결정용은 아니지만, 본 연구 내용의 검증을 위해서 참고자료의 결과와 비교하여 Table 4 에 정리하였다.

Table 4 Temperature distribution(℃)
(Air : 45 ℃, Sea Water : 32 ℃)

No	3-D [1]		GT [3]		본계산 (Cofferdam : No Heating Condition)		본계산 (Cofferdam : Heating Condition)	
	T_C	T_H	T_C	T_H	T_C	T_H	T_C	T_H
1	30	20	30	28	27.6	23.1	27.7	23.2
2						22.9		23.0
3						22.9		23.0
4						22.9		23.0
5						22.8		22.9
6	31	23	31	29	28.9	23.6	29.0	23.9
7	38	27	38	36	31.5	26.1	31.5	26.2
8					37.5	31.5	37.5	31.6
9	42	30	42	38	38.7	32.9	38.7	34.1
10	41	32	41	38	40.1	34.0	40.1	34.3
11					37.3	26.5	39.7	26.7
12						27.9		28.1
13						28.5		28.6
Cof	-10		-8	-11	-13.2	-16.1	5.0	0.99

* T_C : Compartment Air Temperature
T_H : Hull Temperature

위의 Table 4에서도 보듯이 본 연구의 결과로서 대부분의 compartment 온도분포는 GT에서의 계산결과와 추이가 비슷하나 hull의 온도분포가 차이가 난다. 특히 Trunk deck의 hull의 온도가 차이가 많이 나는데 그 이유는 다음과 같다. 즉, 본 연구의 경우는 comprtment 내부공기 온도와 hull의 온도 차이가 약 5~6 ℃정도 되지만 GT의 경우는 대략 3~4 ℃ 밖에 차이가 나지 않는데, Trunk deck의 compartment 온도에서 본 연구와

GT의 결과 차이가 약 4 ℃가 되므로 결국 Inner hull의 온도가 약 10 ℃ 정도까지 차이가 난다.

그러나 [1]의 경우 Trunk deck compartment 공기 온도는 41 ℃로 GT의 결과와 일치하나 hull의 온도분포가 역시 차이가 난다. 그 원인은 물론 Insulation의 두께 차이도 있지만 본연구와 달리 주요부재의 영향을 고려하지 않음으로 인해 Double Bottom내의 대류열전달 계수가 작게 계산되어 졌기 때문이다. 참고로 Fig. 10에 화물창 전반의 온도 분포를 나타내었다.

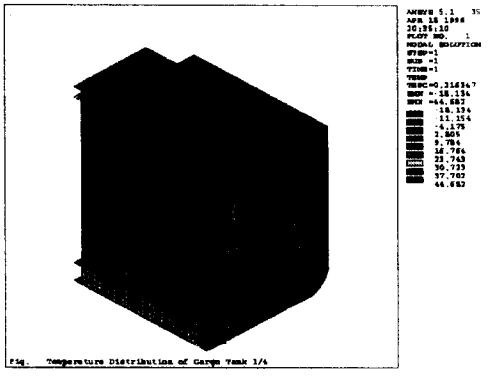

Fig. 10 Temperature distribution of cargo tank 1/4 (case 2)

4.2 Boil-Off Rate

Cargo tank내의 LNG의 온도(-163 ℃)와 compartment 의 온도 차이에 의해 tank내로 들어오는 열량에 기인하여 증발하는 LNG gas량을 식(19)에 따라 계산한 결과는 Table 5에 정리되어 있다.

Table 5 Result of BOR calculation

계산 \	선박 용량 (m^3)	Tank No.	Tank 용량 (m^3)	열전달율 (W)	BOR (%/day)
3-D[1]	130K	2,3번	37,050	93,748	0.102
GT[3]	130K	2번	37,050	128,056	0.140
		3번	38,740	128,056	0.134
본계산	138K	2,3번	40,449	130,870	0.129

본 연구에서 138K 선박에 대한 BOR의 계산 결과는 Table 5와 같이 0.129 %/day로서 규정치 0.15 %/day 보다 작게 나온다. 138K 선박의 경우 Cargo tank용량은 130K 선박보다 약 12% 증가하나 tank내로 들어오는 열량의 증가는 약 2% 증가에 불과하다. 또한 cargo tank의 용량이 커지면 일반적으로 cargo tank 용량에 비해서 BOR이 줄어든다고 알려져 있고[3,11], 138K 선의 경우 Insulation이 130K 선보다 10mm더 두꺼우므로 [3]의 결과보다는 작게 나올것이라는 추측을 할 수 있다. 그러므로 본 연구의 계산결과가 상당한 타당성을 가지고 있다고 할 수 있다.

4.3 Steel Grade 선정

IMO에서 제정한 IGC Code[12]는 선체의 온도에 따라 steel grade를 규정하여 안전성을 보장하고 있는데, 그 규정에는 아래의 Table 6과 같이 최저 -30 ℃까지의 steel grade를 규정하고 있다.

Table 6 IGC code for steel grade in accordance with temperature

Min. design temperature of hull(℃)	Max. thickness (mm) for steel grades						
	A	B	D	E	AH	DH	EH
0 and above -5 and above	Normal practice						
down to -5	15	25	30	50	25	45	50
down to -10	×	20	25	50	20	40	50
down to -20	×	×	20	50	×	30	50
down to -30	×	×	×	40	×	20	40

그러나 Cofferdam의 내부 온도는 Table 3에서 보듯이 -40 ℃ 이하가 되며 이 온도에서는 충분한 강도를 유지할 수 있는 steel이 없으므로, 별도의 가열장치가 필요하고 이에 대한 정확한 해석 또한 필요하다.

본 연구에서는 사양서에서 제시된 온도에 따른 Hull Plate의 steel grade를 기준으로, 현재 수행한

해석 결과에 따른 steel grade와 설계중인 138K LNG선의 도면과 비교하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 IMO나 선급 등에서는 대기 5 ℃, 해수 0 ℃ 조건을 사용해도 되는 것으로 되어 있으나, 본 연구에서는 안전 관점으로 강재 등급을 강화시킨 사양서 규정인 USCG의 대기 -18 ℃, 해수 0 ℃, 조건을 적용하였다. 본 계산의 결과 추출된 온도 분포와 그에 따라 Cofferdam BHD와 Trans Web에 대해 추천되는 강재의 등급은 Fig. 11 과 12에 각각 표시되어 있다.

설계중인 도면의 강재 등급은 전반적으로 본 계산에 의한 결과 보다 온도 차원에서 보강되어 있는 것으로 판단할 수 있으나, 몇 부분은 본 연구와 의견을 달리하는 부분이 있어서 아래의 Table 7에 나타내었다.

Table 7 Designed steel grade and the results of calculation

도면상 위치 및 강재재질			GT 계산상 본 연구 의견	본 계산상 의견 (Fig. 11,12 참조)
Typ. Cofferdam BHD.	◆ No.1 STR. ~ No.2 STR.	D	D 가능	평균 -23.67 ℃로 E 등급 (강화 필요)
	◆ Bilge 부분	B	B	평균 -5.89 ℃로 B등급
Typ. W.T. BHD.	◆ Bilge 부분	D		D
	◆ No.1 STR. ~ No.2 STR.	D	D 가능	평균 -23.09 ℃ 로 E등급
	◆ No.2 STR. ~ No.3 STR.	E	D	평균 -13.33 ℃ 로 D등급
Typ. Trans. Web	◆ No.1 STR. ~ No.2 STR.	D	D 가능	평균 -21.04 ℃로 E 등급 (강화 필요)
Midship Section	◆ No.1 STR. ~ No.2 STR. 의 Inner Hull	E	D	평균 -24.79 ℃로 E 등급
	◆ No.2 STR. ~ No.3 STR. 의 Inner Hull	E	D	평균 -15.14 ℃로 D 등급

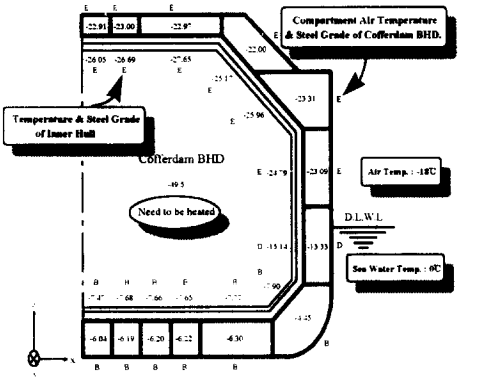

Fig. 11 Temperature and steel grade for cofferdam bhd

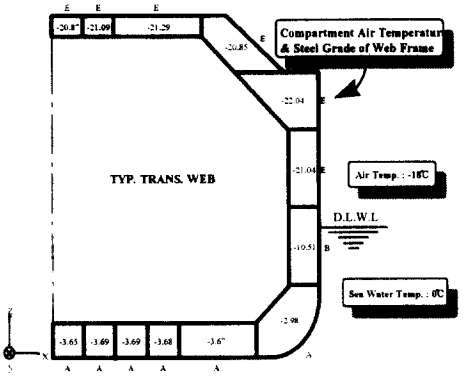

Fig. 12 Temperature and steel grade for transverse web

여기서 인용한 GT 보고서[3]의 온도분포 계산은 기존의 130K 급 선박에 대해서 계산을 수행하였고 본 연구와는 달리 Double hull 내의 compartment들을 크게 나누어 계산하였다. 따라서 GT보고서만으로는 온도 구배가 매우 심한 측면 hull의 온도를 자세히 알 수가 없으므로 그 결과를 기준으로 하여서는 steel grade를 각각의 plate마다 정확히 결정할 수 없다.

Table 7의 GT보고서에 의한 의견은 절대적이지는 못하지만 비교의 차원에서 결정한 것으로서 대기 -18 ℃, 해수 0 ℃에서 내부 이중격벽 사이의 공기 온도보다 선체 표면의 온도가 2~3 ℃정

도 낮다고 생각하여 등급을 판단한 것이다.

본 계산과 GT계산 결과가 일치하는 것으로는 USCG의 선체 온도 분포 해석 조건 하에서 LNG선의 온도 분포는 Double Bottom에서 Trunk deck로 올라갈 수록 온도가 낮아진다는 점이다.

선박의 안전성 측면에서 도면상의 강재 등급을 낮추는 것은 위험한 요소가 많기 때문에 무리라고 하더라도, Table 7에 표시된 부분중에서 등급을 높여 온도 차원에서의 강화가 필요하다고 제안한 부분은 충분한 고려가 필요하다.

5. 결론

본 연구는 기 수행된 연구들의 내용에 더 하여 주요 부재들의 영향을 고려하였고 대류 열전달 계수의 산정시 좀 더 정확한 상관식을 적용하여 설계개발한 138K급 LNG선에 대하여 Boil-Off Rate와 선체 온도분포를 구하였다. 또한 산출된 선체 온도분포에 의해 선체구조의 steel grade를 IGC Code에 준하여 결정해 보았다. 본 연구의 수행 결론은 다음과 같다.

1) 선체의 온도분포를 더욱 자세하게 알 수 있고 설계시 steel grade 결정에 많은 도움이 될 수 있는 program을 개발하였다.
2) 개발한 program의 계산 결과로 설계 개발된 138K급 LNG선의 BOR 값은 사양서의 규정치를 충분히 만족하였다.
3) Steel grade 결정에 기준이 되는 온도 분포를 각 부위별로 자세히 알 수 있었고, 계산결과를 바탕으로 설계 중인 LNG선 도면상의 강재 등급을 비교하고 몇 개 부분에 대해서는 선정된 재질의 강화도 제안하였다.

아직 실선 계측 data와의 비교가 없기 때문에 신뢰도를 언급하기는 곤란하지만 참고문헌 [3]과 비교해 보면 그 추이가 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그러나, 선체 온도 분포와 BOR계산의 핵심인 대류 열전달 계수를 순수히 이론적 계산으로 구한 값과 실제 계측 data를 비교 검토하여 정확한 값을 얻는 과정을 거치는 것이 당 연구결과를 설계에 실제 적용할 수 있게 하는 관건으로 되기 때문에, 추후 이에 대한 연구가 더 필요하다.

참 고 문 헌

[1] 천병일, "LNG선의 3차원 선체 온도분포에 관한 연구," 대우중공업 선박해양기술연구소, 1995.
[2] 김영찬, "LNG선의 cargo tank내의 Heat Balance 연구," 대우중공업 선박해양기술연구소, 1992.
[3] Gaz Transport Report, "Thermal calculation of 130K m3 LNG Carrier," 1991.
[4] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE Hand-book of Fundamentals, ASHRAE, New York, 1981.
[5] Vargaftik, N. B., Tables of Thermophysical Properties of Liquids and Gases, 2nd ed., Hemisphere Publishing Corp., New York, 1975.
[6] Eckert, E. R. G., and R. M. Drake, Analysis of Heat and Mass Transfer, McGraw-Hill, New York, 1972.
[7] 허주호, 전윤호, "주요 부재의 영향을 고려한 LNG선 화물창 온도 분포와 BOR 산정," 대한조선학회, 춘계 학술대회 논문집, pp. 238-241, 1996.
[8] Churchill, S. W. and H. H. S. Chu, "Correlating Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate," Int. J. Heat Mass Transfer, 18, p.1323, 1975.
[9] 이택식, 이재헌, 이준식 공역, 열전달, 喜重堂, 1989.
[10] Holman, J. P., Heat Transfer, McGraw- Hill, 1986.
[11] Howard, J. L.,"Future Improvements In Operating Economy of Spherical Tank LNG Vessels," LNG · PG - ROK '82 Symposium, Seoul Korea, 1982.
[12] International Maritime Organization, International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk IGC Code, IMO, 1993.