

급냉각기간에서 IMO 설계조건과 USCG 설계조건에 대한 LNGC 화물탱크의 열해석 비교

이 정 혜*

(2004년 5월 7일 접수, 2004년 8월 17일 심사완료)

Thermal Analysis Comparison of IMO with USCG Design Condition for the LNGC During the Cool-down Period

Jung-Hye Lee

Key Words: BOG(증발량), Cool-Down(급냉각), LNGC(액화천연가스 운반선), Spraying Cooling (분무냉각), Hull Temperature Distribution(선체온도분포)

Abstract

This study is concerned with the thermal analysis during the cool-down period of 135,000m³ class GT-96 membrane type LNG carrier under IMO and USCG design condition. During the cool-down period, the spraying rate for the NG cooling decreases as the temperature of NG falls down from -4 0°C to -130°C, and the spraying rate for the cooling of the insulation wall increases as the temperature gradient of the insulation wall is large. It was confirmed that there existed the largest temperature decrease at the first barrier and the first insulation, which are among the insulation wall, especially in the top side of the insulation wall under IMO and USCG design condition. Also, as the NG temperature distribution is fixed, the outer temperature condition under the design condition has influence on the temperature variation at the insulation. By the 3-D numerical calculation about the cargo tank and the cofferdam during the cool-down period, the temperature variation in hulls and insulations is precisely predicted under IMO and USCG design condition. From the comparison between two conditions; IMO design condition shows more severe temperature gradient than USCG design condition, therefore, it provides the conservative estimation of the BOG.

기호설명

A : 단면적 (m²)
 c_p : 정압비열 (J/kg°C)
 H_{fg} : 증발잠열 (J/kg)
 h : 열전달계수 (W/m²°C)
 k : 열전도계수 (W/m°C)
 $\dot{s}(t)$: 분무율 (m³/hr)
 T : 온도 (°C)

t : 시간 (hr)
 V_g : 탱크의 전체 체적 (m³)
 ρ : 밀도 (kg/m³)

1. 서론

청정 대체 에너지원으로 각광받고 있는 LNG를 수송하는 수단인 LNGC(Liquefied natural gas carrier)의 국내건조는 1994년 현대중공업에서 모스형 탱크를 탑재한 “현대 유토피아호”를 건조하면서부터 시작되어, 현재 우리나라는 총 17척의 국적 LNGC를 보유하고 있다.

LNGC의 건조량이 급증하고 있는 가운데, 이에 관한 연구는 참고문헌에서 알 수 있는 것처럼,

* 회원, 한국해양대학교 기관시스템공학부
 E-mail : ljhicing@bada.hhu.ac.kr
 TEL : (051)410-4865 FAX : (051)405-5938

LNG의 물성치 연구^(1,2)와 육상용 저장탱크에 관한 연구^(3,4) 및 LNGC의 강도해석 등에 관한 연구^(5~7)가 주를 이루고 있으며, LNGC의 열해석에 관한 연구^(8~11)는 참고문헌에 표기된 것 외에는 매우 미흡한 실정이다.

LNG는 평택이나 인천에서 화물탱크 체적의 1% 정도에 해당하는 LNG를 싣고 공급기지인 중동이나 인도네시아로 항해를 하여 그 곳에서 98% 정도의 LNG를 화물탱크에 적재하여 되돌아온다. 이와 같이 LNGC가 한국을 떠나 화물을 적재하고 다시 한국으로 되돌아오는 것을 “1-항차”로 정의하고, 1-항차에 실어온 화물의 양이 매우 중요한 평가인자가 된다. 이 과정에서 한국가스공사(KOGAS)는 LNG의 화주 입장에서 1-항차중의 열적 충격 등에 의한 화물탱크 내의 열적 안정성을 확보하고, 적재직후 비정상 열전달구간에서 LNG의 증발량(Boil-off gas, BOG)을 최소화하여 경제적 손실을 줄일 필요가 있다.

그러므로, 한국에서 1% 정도의 화물을 적재한 상태로 항해를 하는 공선 항해기간동안 화물탱크 및 그 주위 단열재(Insulation)내에 지속적으로 상승된 열로 인하여, 공급기지에서 -162℃의 초저온 LNG를 적하할 때 발생하는 선체의 열충격을 완화하기 위한 급냉각(Cool-down) 과정은 매우 중요하다.

본 연구에서는 GT-96 멤브레인형 LNGC를 대상으로 급냉각과정에서 선체 강판과 단열재의 내부온도변화, 선체 외부 강판과 내부 강판 사이에 있는 밀폐공간(Compartment) 내에서 평균공기온도, 급냉각 소요시간 경과에 따른 분부량 및 기상부의 온도변화를 계산할 수 있는 3차원 비정상상태의 열해석에 관하여, 표준설계조건으로 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)와 미국해안경비대(United States Coast Guard, USCG)에서 규정하는 각 설계조건하에서 수행한 계산결과를 기술하였다.

2. 계산모델

연구대상인 135,000m³급 GT-96 멤브레인형 LNGC의 화물탱크의 단면을 Fig. 1에 나타내었고, 화물탱크의 배열도를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보면 LNGC에는 4개의 화물탱크가 있고,

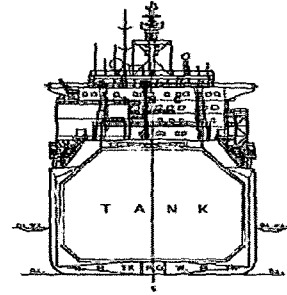


Fig. 1 Midship section of cargo tank

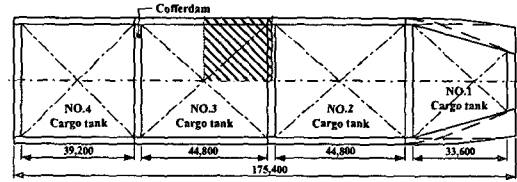


Fig. 2 Cargo tank arrangement in LNGC

No. 1 화물탱크의 선수방향, No. 4 화물탱크의 선미방향 및 각 화물탱크의 사이에 코퍼담(Cofferdam)이 존재하는데 그림에 회색으로 표시하였다.

본 계산에 사용한 선박의 선체 전길이는 277.0m이고, 선체의 최대폭은 43.4m로, 선박의 화물 최대 적재량은 138,017m³이다.

이처럼 거대한 LNGC의 화물탱크 4개를 모두 계산하게 되면 계산의 양이 지나치게 방대해지고 계산에 소요되는 시간도 길어진다. 따라서 Fig. 2에서 보면 No. 1 화물탱크를 제외하고는 나머지 화물탱크가 종방향 및 횡방향으로 대칭을 이루고 있으므로, 그림에서 빗금친 부분에 해당하는 화물탱크와 코퍼담 체적의 각 1/4크기를 계산모델로 채택하였다. Fig. 3은 계산모델인 1/4 화물탱크의 단면치수를 나타낸 것으로, 화물탱크는 폭이 19.5m, 높이가 27.8m, 길이는 22.4m이고, 코퍼담은 화물탱크와 동일한 모양으로 길이가 1.4m이다.

Fig. 4는 연구대상 LNGC의 선체 외판에서 화물탱크 내벽까지 두께방향의 열계산을 위한 전형적인 치수도를 나타낸 것으로, 1차와 2차 단열재 두께의 합은 530mm이다. Fig. 4에 나타낸 각 재질의 열물성치를 도표로 정리하여 Table 1에 나타내었다. 여기에서 단열재를 제외한 재질의 열전도계수 값에 대하여서는 온도에 따른 물성치 변화가 거의 없기 때문에 상수값을 사용하였으

Table 1 Thermal properties of wall and insulation materials

	Material	Thickness th (mm)	Density ρ (kg/m ³)	Specific heat c _p (J/kgK)	Thermal conductivity k (W/mK)
Primary barrier	Invar	0.7	8,120.0	385.0	11.395
Top plywood	Plywood	12.0	707.0	1,255.0	0.085
Primary insulation	Perlite	209.0	60.0	837.0	-
Bottom Plywood	Plywood	9.0	707.0	1,255.0	0.085
Secondary barrier	Invar	0.7	8,120.0	385.0	11.395
Top Plywood	Plywood	12.0	707.0	1,255.0	0.085
Secondary insulation	Perlite	281.5	60.0	837.0	-
Bottom Plywood	Plywood	6.5	707.0	1,255.0	0.085
Inner hull	Steel	18.0	7,900.0	400.0	45.3
Outer hull	Steel	18.0	7,900.0	400.0	45.3

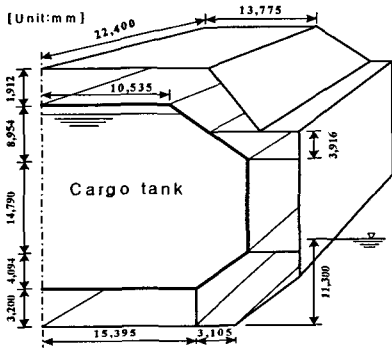


Fig. 3 Cross sectional dimensions of 1/4 cargo tank

나, 단열재의 열전도계수는 그 두께에 따라 온도와 밀접한 관련이 있으므로 보다 정확한 계산을 위하여 다음과 같이 단열재의 온도에 따른 함수로 정리하여 계산에 사용하였다.

$$k = 0.189 + 0.0004 \times T - 0.4e^{-14} \times T^2 - 0.3e^{-16} \times T^3 - 9e^{-20} \times T^4 - 2e^{-22} \times T^5 \quad (1)$$

또한, 화물탱크 주위의 밀폐공간에서 공기의 대표온도는 열적 평형에 의하여 산정하였다.⁽⁹⁾

3. 기상부의 온도변화

공선항해 완료 즉, 급냉각 직전의 탱크 내 기상부 NG(Natural gas)의 평균온도는 -40℃상태로서 6시간에 걸쳐 급냉각을 행하여 적하를 위한 최소 기준온도인 -130℃에 도달시킨다. 이처럼, 화물탱크 기상부의 평균온도는 급냉각 시간이 경

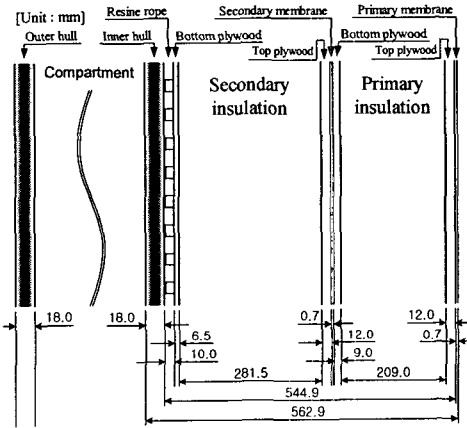


Fig. 4 Dimensions in thickness direction of cargo tank

과함에 따라 점진적으로 하강하므로 식 (2)와 같이 표현된다.⁽¹¹⁾

$$T_g = \left[\frac{T_{sat} - T_{g0}}{t_{eq}(t_{eq} - t_e)} - \frac{T_{ge} - T_{g0}}{t_e(t_{eq} - t_e)} \right] t^2 + \left[\frac{T_{ge} - T_{g0}}{t_e} - \frac{t_e(T_{sat} - T_{g0})}{t_{eq}(t_{eq} - t_e)} + \frac{T_{ge} - T_{g0}}{t_{eq} - t_e} \right] t + T_{g0} \quad (2)$$

여기서, T_{g0}는 시각 t=0에서 기상부의 평균온도를, T_{ge}는 급냉각이 완료되는 시각 t_e에서의 기상부 평균온도를, t_{eq}는 기액이 열평형상태에 도달하였을 때의 시각을 나타낸다.

Fig. 5는 시간에 따른 높이방향으로의 기상 온도분포에 대한 계산결과를 나타낸 것으로, 기상

부를 4개 영역으로 나누어 각 영역에서의 공간적인 평균온도를 급냉각시간의 경과에 따라 정리하였다. 이 그림에서 화물탱크의 천정에 닿는 NG의 온도를 점선으로, 화물탱크 바닥의 LNG온도를 실선으로 표시하였다. 화물탱크 바닥의 LNG온도가 -163°C 이므로, 4번째 영역에서의 온도변화가 가장 작고, 화물탱크 천정부와 닿는 1번째 영역에서의 기상부 온도가 -45.56°C 에서 -132.66°C 로 하강되어, 온도변화가 가장 크게 나타남을 알 수 있다.

분무냉각에 의한 냉열은 결국 LNG 탱크내 기상부의 냉각과 1차 방벽(Barrier) 및 1차 단열재의 냉각에 사용된다. 따라서 분무냉각시간 동안의 열평형 방정식은 다음과 같이 된다.⁽¹¹⁾

$$\int_0^{t_c} \rho_l \dot{s}(t) [H_{fg} + c_{pg}(T_{ge} - T_{sat})] \Delta t = \rho_g c_{pg}(T_{g0} - T_{ge}) V_g + \sum_i \int_0^{t_c} h_{ins} A_{ins} \{T_w(t) - T_g(t)\} \Delta t \quad (3)$$

위 식은 액상이 갖는 증발잠열과 급냉각이 완료되는 목표온도까지 이용 가능한 현열상태의 냉열량의 합이 화물탱크 내부 기상부의 냉각에 소모되는 열량과 화물탱크의 벽과 벽근처의 단열재의

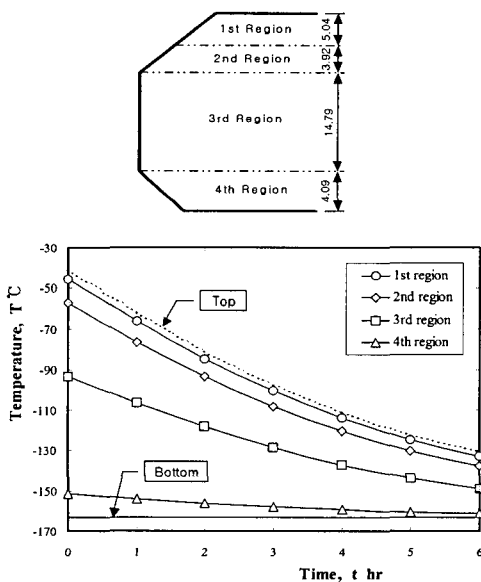


Fig. 5 Mean NG temperature at each region

냉각에 소모되는 열량의 합과 같음을 나타낸다.

Fig. 6은 식 (3)에 의하여 1/4 화물탱크 용적(약 $10,109\text{m}^3$)에 대한 계산결과를 나타낸 것으로, 기상의 냉각에 소모되는 열량(\diamond)은 기상의 온도하강에 비례하여 점차적으로 감소한다. 이에 비하여, 1차 방벽 및 1차 단열재의 급냉각에 소요되는 열량(\triangle)은 1차 방벽과 1차 단열재 내부의 온도구배가 커짐에 따라 점증함을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이, Fig. 5로부터 기상부 냉각에 소모되는 열량이 결정되어져 두 설계조건에 대하여 같은 분무율을 나타내며, IMO 설계조건에서의 단열재 냉각에 소모되는 분무율이 USCG 설계조건에 비하여 $0.13\sim 0.17\text{m}^3/\text{hr}$ 정도 많음을 알 수 있었다.

4. 수치계산법

전술한 바와 같이 분무냉각 기간중 탱크내 높이방향의 기상의 온도가 주어지고, 해수 및 대기온도가 주어지면, Fig. 4에 나타낸, 선체 외판에서 1차 방벽까지의 수치계산이 가능하게 된다.

생성항이 없는 비정상 3차원 열전도 방정식은 다음 식과 같다.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (4)$$

위 식을 시간 $t \sim t + \Delta t$ 에 대하여 적분하고, 가중

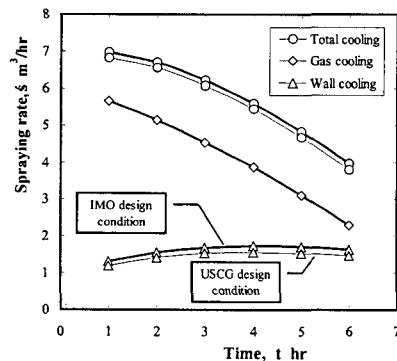


Fig. 6 Variation of spraying rate to cool-down time for 1/4 tank

계수 f 를 이용하여 차분화 하면 참고문헌(8)에 나타난 바와 같이 비정상 3차원 열전도의 이산화방정식을 구할 수 있으며, 이에 따라 강판과 밀폐공간의 온도가정으로부터 열전달계수, 강판과 단열재의 온도 및 밀폐공간의 온도를 순차적으로 오차범위 내에서 반복계산할 수 있다.⁽⁸⁾

계산모델인 LNGC의 선체평판 및 단열재 내부의 각 격자가 3차원으로 구성되어 있기 때문에 3차원 격자에 대하여 현시도식(Explicit scheme) 또는 크랭크-니콜슨도식(Crank-Nicolson scheme)을 적용하면 반복계산을 하지 않는 대신에, 해의 안정성을 위하여 시간증분 Δt 를 아주 작게 하여야 한다.⁽¹²⁾ 따라서 본 연구에서는 고체 부분인 3차원 격자에 대하여서는 반복계산이 요구되거나 시간증분 Δt 를 임의로 선택할 수 있는 완전 암시도식(Fully implicit scheme)을 채용하여, C언어로 직접 프로그램을 작성하였다.

급냉각 기간동안은 LNGC가 공선향해중이므로 탱크상부와 선체 측벽의 대부분이 대기와 접하고 있고, 선체 밑바닥면에서 해수면까지 9.3m의 측벽과 선체 바닥면은 해수와 접하고 있다. 따라서 수치계산시 필요한 선체의부측 경계조건으로서는 BOG 발생량이 가장 많은 대기온도 $+45^{\circ}\text{C}$, 해수 온도 $+32^{\circ}\text{C}$ 인 IMO 설계조건과 BOG 발생량이 가장 적으나 선체강도가 중요시되는 대기온도 -18°C , 해수 온도 $+0^{\circ}\text{C}$ 인 USCG 설계조건을 택하여 비교하였다. 그리고 탱크내부의 경계조건으로서 높이방향 기상온도는 전술한 Fig. 5의 결과를 참조하였으며, 시간증분은 이전에 수행된 연구결과와 계산경험으로부터 $\Delta t=50\text{sec}$ 를 취하였다.⁽¹¹⁾

5. 화물탱크의 열해석 결과

Fig. 7은 IMO 조건하에서 6시간의 급냉각 과정이 완료되었을 때, 화물탱크와 코퍼담측의 각 선체평판의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 화물탱크측에서 가장 높은 평판의 평균온도는 측벽의 외판 온도가 45.0°C 로 외부의 대기온도와 동일하며, 가장 낮은 평판의 온도는 바닥쪽의 평판으로 25.28°C 이다. 대기에 접하고 있는 외부 평판의 온도는 대기온도와 거의 차이가 1°C 이내이며, 해수에 접하고 있는 외부 평판의 온도는 해수온도와 거의 동일함을 확인할 수 있다. 또한, 그림에서 점선사각형 내부의 온도는 급냉각이 완료된 시점에서 각 밀폐공간 내부 공기의 평균온도를 나타낸 것이다.

마찬가지로, Fig. 7에서와 같이 급냉각 과정이 완료되었을 때, USCG 조건하에서의 계산결과를 Fig. 8에 나타내었는데, 화물탱크의 상부측 평판의 온도가 -18.60°C 로 가장 낮게 나타났으며 코퍼담측의 하부 평판온도가 2.56°C 로 가장 높게 나타났다.

Fig. 9~Fig. 12는 IMO 설계조건에서, Fig. 13~Fig. 16은 USCG 설계조건에서, 급냉각 시간경과에 따라 화물탱크 각 부에서 단열벽 두께방향으로 단열벽 내의 온도거동을 1시간 간격으로 나타낸 것이다. 그림에서 x축은 Fig. 4에 나열된 화물탱크의 단면배열과 같은 순서로 나열된 재질의 두께를 나타낸다.

Fig. 9와 Fig. 13은 코퍼담 방향에서의 선체 외판을 포함한 화물탱크 단면의 온도거동을, Fig. 10

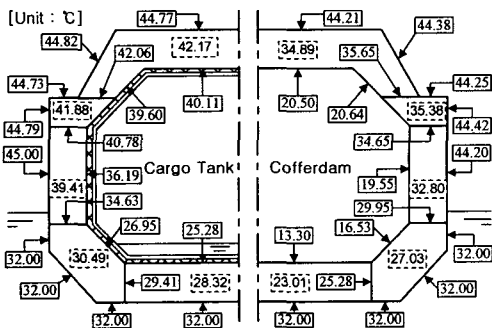


Fig. 7 Temperature distribution around cargo tank and cofferdam after cool-down under IMO condition

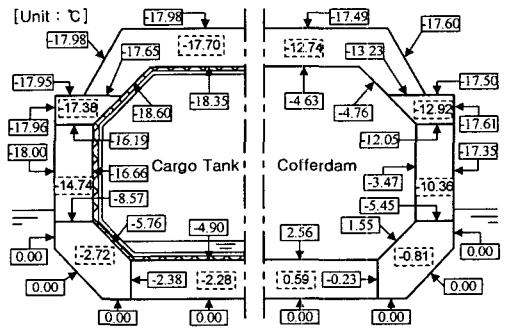


Fig. 8 Temperature distribution around cargo tank and cofferdam after cool-down under USCG condition

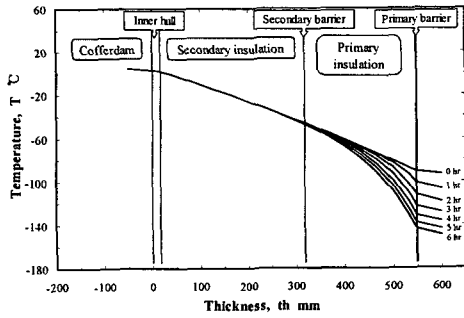


Fig. 9 Temperature variation at cofferdam side during cool-down under IMO condition

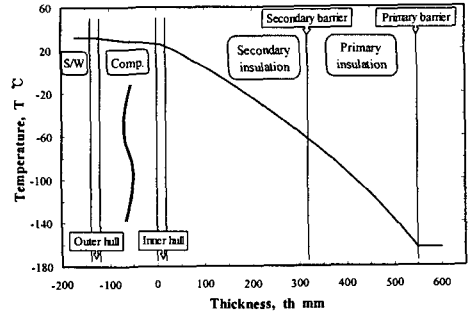


Fig. 12 Temperature variation at bottom side during cool-down under IMO condition

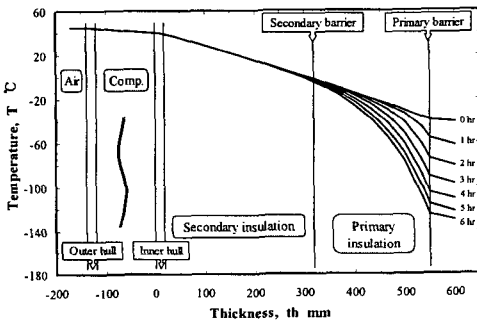


Fig. 10 Temperature variation at top side during cool-down under IMO condition

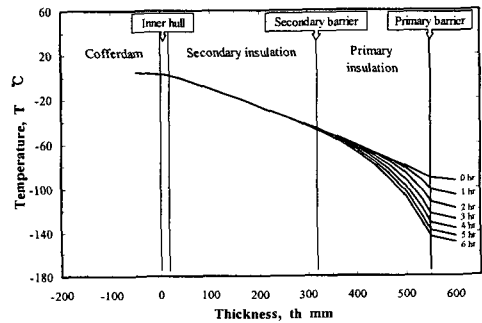


Fig. 13 Temperature variation at cofferdam side during cool-down under USCG condition

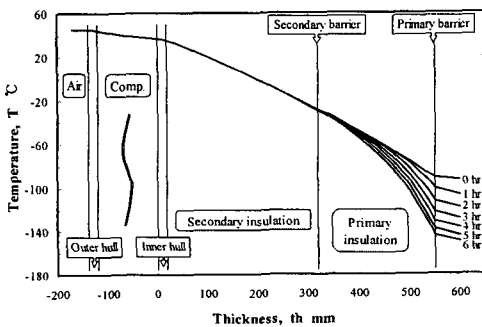


Fig. 11 Temperature variation at hull side during cool-down under IMO condition

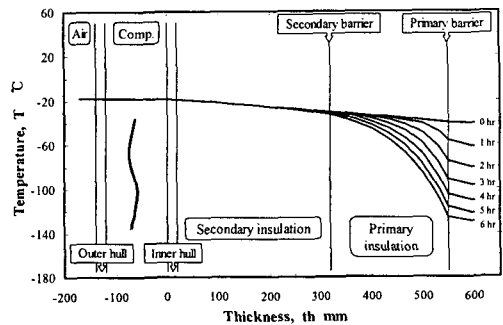


Fig. 14 Temperature variation at top side during cool-down under USCG condition

과 Fig. 14는 전술한 기상부의 온도분포에서와 같이 가장 높은 온도영역에 접한 화물탱크 상부의 온도거동을, Fig. 11과 Fig. 15는 선체측면에서, 그리고 Fig. 12와 Fig. 16은 선체 하부에서의 온도거동을 각각 나타낸 것이다.

선체 하부가 LNG와 접해 있어 항상 -163°C 를 유지하고 있는 Fig. 12와 Fig. 16의 선체하부를 제외하고는, 전술한 바와 같이 급냉각시 분부에 의하여 주로 1차 단열재 내의 온도차만큼 냉각되었음을 알 수 있다.

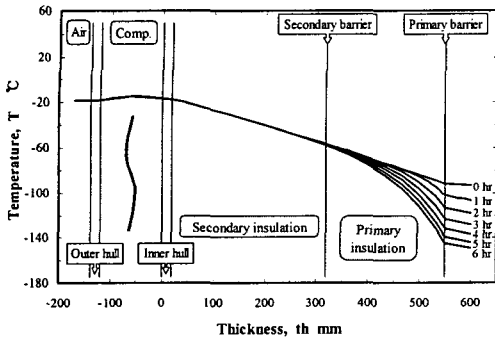


Fig. 15 Temperature variation at hull side during cool-down under USCG condition

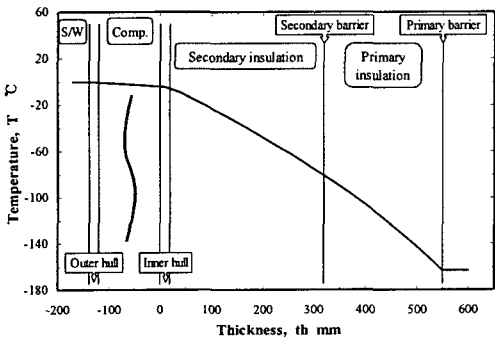


Fig. 16 Temperature variation at bottom side during cool-down under USCG condition

코퍼담에서의 온도결과인 Fig. 9와 Fig. 13은 코퍼담의 온도가 +5°C로 일정하고, 탱크내부의 기상부의 온도변화가 일정하므로 거의 같은 온도거동을 보이고 있음을 알 수 있다. 선체 하부인 Fig. 12와 Fig. 16은 선체 외부의 해수온도가 각각 +32°C, 0°C이나 내부의 LNG온도가 -163°C로 단열재내에서의 온도거동이 일정하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 14와 Fig. 15를 각각 Fig. 10과 Fig. 11에 비교하여 Fig. 17과 Fig. 18에 나타내었다. 이들 그림에서 알 수 있듯이, 탱크내부의 기상부 온도분포는 전술한 Fig. 5의 결과를 사용하였기에, 단열벽내에서의 온도거동은 선체외부의 온도조건에 따라 결정되어짐을 알 수 있다. 또한, 이의 영향으로, IMO 설계조건에 비하여 USCG 설계조건에서의 온도구배가 훨씬 완만하게 나타나, USCG 설계조건에서의 단열재 냉각에 필요한 열량이

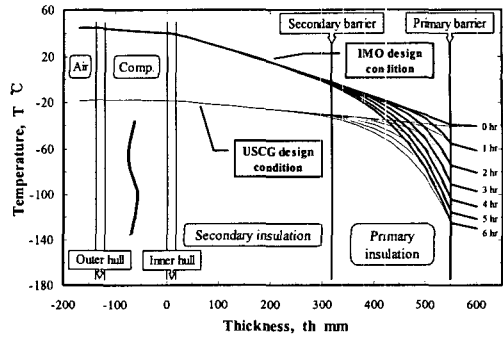


Fig. 17 Comparison of IMO with USCG condition at top side temperature variation during cool-down

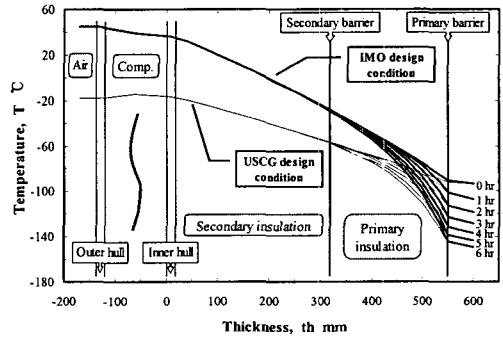


Fig. 18 Comparison of IMO with USCG condition at hull side temperature variation during cool-down

IMO 설계조건에 비하여 매우 적음을 확인할 수 있었다.

6. 결론

GT-96방식 멤브레인형 LNGC를 대상으로 표준 설계조건인 IMO 및 USCG 설계조건에 대하여, 공급기지에서 LNG를 적하하기 전에 선체 화물탱크의 냉열충격을 완화하기 위하여 필수적인 급냉각과정에 대한 비정상상태의 열전달해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 급냉각 기간동안 기상부의 높이별, 시간경과에 따른 기상부의 온도거동을 도출함으로써 급냉각 6시간동안에 1차 방벽의 온도가 -40°C에서 -130°C까지 급냉각하기에 필요한 분무율의 예측이 가능하였다.

(2) LNG의 분무냉각에 의한 냉열은 단열벽의

온도강하와 기상부의 온도강하에 소모되는데, 기상부의 냉각에 소모되는 열량은 분무시간의 경과에 따라 점차 감소하는데 비하여 단열벽면의 온도강하에 소모되는 열량은 점차 증가함을 확인하였다.

(3) 기상부의 온도거동이 결정되어짐에 따라 기상부의 냉각에 소모되는 분무율이 결정되어져, IMO 설계조건에서의 단열재 냉각에 필요한 분무율이 USCG 설계조건에 비하여 $0.13 \sim 0.17 \text{m}^3/\text{hr}$ 정도 많고 전체 분무율도 이에 해당하는 양만큼 증가하였음을 확인하였다.

(4) IMO 조건 및 USCG 조건에 대하여, 6시간의 급냉각 과정중 화물탱크의 각부 단열벽내의 온도거동을 계산한 결과, 2차 단열벽내의 온도변화는 거의 없으나, 1차 단열벽내의 온도강하폭이 약 $53 \sim 86^\circ\text{C}$ 로, 주로 1차 단열벽내에서 온도가 크게 하강됨을 확인할 수 있었다.

(5) 표준설계조건인 IMO 설계조건과 USCG 설계조건에서 급냉각과정 동안의 선체외부에서 선체내부까지의 온도거동을 계산한 결과, 기상부의 온도거동이 설정되면 표준설계조건에서 주어지는 선체외부의 온도조건에 따라 화물탱크의 단열벽내 온도거동이 결정되어짐을 알 수 있었다. 또한, IMO 설계조건에서 온도구배가 USCG 설계조건보다 크게 나타나, 이는 BOG 발생량에 영향을 주는 주요인으로 작용함을 예측할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Nasrifar, Kh. and Moshfeghian, M., 2002, "Vapor-Liquid Equilibria of LNG and Gas Condensate Mixtures by the Nasrifar-Moshfeghian Equation of State," *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 200, Issue 1, pp. 203~216.
- (2) Kim, S.Y., Cho, C.H., Kim, H., Lee, J.H. and Mok, Y.I., 1994, "A Study on the Calculation of Basic Thermodynamic Properties of LNG/NG," *Energy Engg. J.*, Vol. 3, No. 2, pp. 256~264.
- (3) Oh, B.T., Kim, Y.K., Yoon, I.S., Seo, H.S. and Hong, S.H., 2002, "The Development of KOGAS Membrane for LNG Storage Tank," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 6, pp. 1203~1208.
- (4) Kim, Y.C., 1994, "The Construction and Operation of LNG Receiving Terminal," *J. KSME*, Vol. 34, No. 11, pp. 836~844.
- (5) Kim, H.S., 2001, "The Evaluation of Mechanical Properties and Fatigue Life for Domestic 304 Stainless Steel Used as Membrane Material in LNG Storage Tank," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 25, No. 10, pp. 1644~1650.
- (6) Kim, Y.G., Jun, I.K., Yoon, I.S., Lee, Y.W., Hong, S.H. and Kim, C.K., 1994, "Finite Element Analysis of Membrane for LNG Storage Tank," *Trans. of the KSME*, Vol. 18, No. 10, pp. 2797~2804.
- (7) Lee, J.H. and Maekawa, I., 1995, "A Study on Temperature Rising Near Fatigue Crack Tip at Cryogenic Temperature," *Trans. of the KSME*, Vol. 19, No. 1, pp. 79~86.
- (8) Kim, K.K., Song, S.S., Choi, D.Y. and Moon, S.B., 1999, "A Study on the Unsteady State Thermal Analysis of the MARK-III Type LNG Tank During Ballast Voyage," *Proceedings of the KSME 1999 Spring Annual Meeting*, pp. 171~176.
- (9) Song, S.S., Lee, J.H., Jun, H.P., Seong, B.Y., Kim, K.K. and Kim, S.G., 1999, "A Study on the Three-Dimensional Steady State Temperature Distributions and BOR Calculation Program Development for the Membrane Type LNG Carrier," *J. of the Korean Society Marine Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 140~148.
- (10) Lee, J.H., Choi, H.K., Oh, C., Kim, M.H. and Kim, K.K., 2004, "Thermal Analysis for the GT-96 Membrane Type LNGC During the Cool-Down Period," *Proceedings of the KSME 2004 Spring Annual Meeting*, pp. 1346~1351.
- (11) Lee, J.H., Kim, K.K., Ro, S.T., Chung, H.S. and Kim, S.G., 2003, "A Study on the Thermal Analysis of Spray Cooling for the Membrane Type LNGC During the Cool-Down Period," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 27, No. 1, pp. 125~134.
- (12) Patankar, Suhas V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow," *Hemisphere, Washington D.*