

GT-96 멤브레인형 LNGC의 급냉각기간에서의 열해석

이정혜[†] · 최현규^{*} · 최순호^{**} · 오철^{*} · 김명환^{*} · 김경근^{*}

Thermal Analysis for the GT-96 Membrane Type LNGC during the Cool-down Period

Jung-Hye Lee, Hyun-Kue Choi, Soon-Ho Choi, Cheol Oh, Myoung-hwan Kim, Kyung-Kun Kim

Key Words: 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 135,000 m³ class GT-96 membrane type LNG carrier under IMO design condition. The cool-down is performed to cool the insulation wall and the natural gas in cargo tank for six hours to avoid the thermal shock at the start of loading of -163°C LNG. During the cool-down period, the spraying rate for the NG cooling decreases as the temperature of NG falls down from -40°C to -130°C and the spraying rate for the insulation wall cooling increases as the temperature gradient of the insulation wall is large. It was confirmed that there existed the largest temperature decrease at the 1st barrier and 1st insulation, which are among the insulation wall, especially in the top side of the insulation wall. 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.

기호설명

T : 온도 (°C)
 ρ : 밀도 (kg/m³)
 k : 열전도계수 (W/m°C)
 c_p : 정압비열 (J/kg°C)
 h : 열전달계수 (W/m²°C)

$\dot{s}(t)$: 분무율 (m³/hr)
 t : 시간 (hr)
 H_{Jg} : 증발잠열 (J/kg)
 V_g : 탱크의 전체 체적 (m³)
 A : 단면적 (m²)

1. 서론

최근 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.

이러한 LNGC는 평택이나 인천에서 탱크체적

[†] 한국해양대학교

E-mail : ljhicing@bada.hhu.ac.kr

TEL : (051)410-4261 FAX : (051)405-5938

* 한국해양대학교 기관시스템공학부

** (주)쓰리케이엠아이텍

의 1% 정도에 해당하는 LNG를 싣고 중동이나 인도네시아로 항해를 하여 공급기지에서 98% 정도의 LNG를 적재하여 되돌아온다. 이 과정에서 한국가스공사(KOGAS)는 LNG의 구입자 입장에서 1-항차중의 열적 충격 등에 의한 화물탱크 내의 열적 안정성을 확보하고, 적재직후 비정상 열 전달구간에서 화물의 발생 BOG를 최소화하여 경제적 손실을 줄일 필요가 있다.

그러므로, 공선 항해기간동안 화물탱크 및 그 주위 단열재내에 지속적으로 상승된 열로 인하여, 공급기지에서 초저온 LNG를 적하할 때 발생하는 선체의 열충격을 완화하기 위한 급냉각(Cool-down) 과정은 매우 중요하다.

본 연구에서는 GT-96 멤브레인형 LNGC를 대상으로 급냉각과정에서 선체 평판과 단열재의 내부온도변화, 밀폐공간내에서 평균공기온도, 급냉각 소요시간 경과에 따른 분무량 및 기상부의 온도변화를 계산할 수 있는 3차원 비정상상태의 열 해석에 관한 연구결과를 기술하였다.

2. 계산모델

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

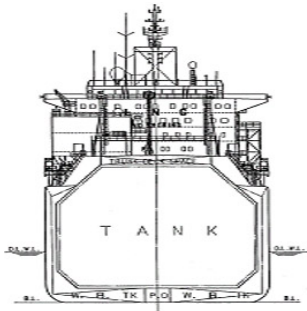


Fig. 1 Midship section of cargo tank

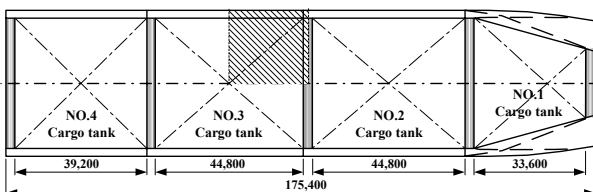


Fig. 2 Cargo tank arrangement in LNGC

의 화물탱크가 있고, No.1 화물탱크의 선수방향, No.4 화물탱크의 선미방향 및 각 화물탱크의 사이에 코퍼담이 존재한다.

본 계산에 사용한 선박의 선체 전장은 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 화물탱크가 종방향 및 횡방향으로 대칭을 이루고 있으므로, 그림에서 빗금친 부분에 해당하는 화물탱크와 코퍼담 체적의 각 1/4크기를 계산모델로 채택하였다. Fig. 3은 계산모델인 화물탱크의 치수를 나타낸 것으로, 선수방향으로 화물탱크의 길이는 22.4m이고, 코퍼담은 화물탱크와 동일한 모양이며 선미방향으로 길이는 1.4m이다.⁽³⁾

Fig. 4는 GT-96 방식 LNGC의 외관에서 화물탱크 내벽까지 두께방향의 열계산을 위한 전형적인 치수도를 나타낸 것으로, 1차와 2차 단열재 두께의 합은 530mm이다. Fig. 4의 두께방향으로 단열재를 포함한 각 재료의 열물성치를 도표로 정리한 것이 Table 1이다. 여기에서 단열재를 제외한 재료의 열전도계수 값에 대하여서는 온도에 따른 물성치 변화가 거의 없기 때문에 상수값을 사용하였으나, 단열재의 열전도계수는 그 두께에 따라 온도와 밀접한 관련이 있으므로 보다 정확한

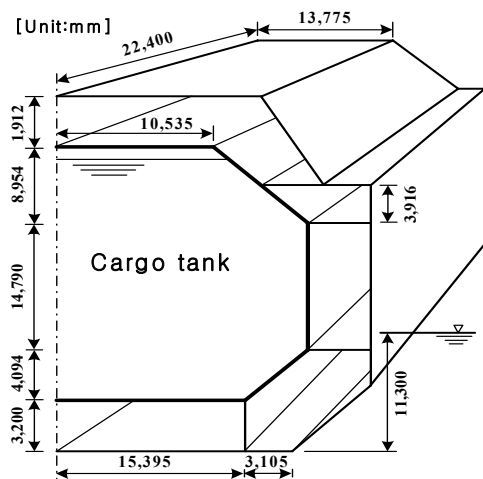


Fig. 3 Cross sectional dimensions of cargo tank

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

계산을 위하여 온도에 따른 함수로 정리하여 계산에 사용하였다.

또한, 화물탱크 주위의 밀폐공간(Compartment)에서 공기의 대표온도는 열적 평형에 의하여 산정하였다.⁽³⁾

3. 기상부의 온도변화

공선항해 완료 즉, 급냉각 직전의 탱크 내 기상부 NG의 평균온도는 -40℃상태로서 6시간에 걸쳐 급냉각을 행하면 적하를 위한 최소 기준온도인 -130℃에 도달한다. 이처럼, 화물탱크 기상부의 평균온도는 급냉각 시간이 경과함에 따라 점진적으로 하강하므로 식(1)과 같이 나타내어진다.⁽¹⁾

$$\begin{aligned}
 T_g = & \left[\frac{T_{sat} - T_{g0}}{t_{eq}(t_{eq} - t_e)} - \frac{T_{ge} - T_{g0}}{t_e(t_{eq} - t_e)} \right] t^2 \\
 & + \left[\frac{T_{ge} - T_{g0}}{t_e} - \frac{t_e(T_{sat} - T_{g0})}{t_{eq}(t_{eq} - t_e)} \right. \\
 & \left. + \frac{T_{ge} - T_{g0}}{t_{eq} - t_e} \right] t + T_{g0} \quad (1)
 \end{aligned}$$

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

Fig. 5는 시간에 따른 높이방향으로의 기상 온도분포에 대한 계산결과를 나타낸 것으로, 기상부를 4개 영역으로 나누어 각 영역에서

의 공간적인 평균온도를 급냉각시간의 경과에 따라 정리하였다. 이 그림에서 화물탱크의 천정에 닿는 NG의 온도를 점선으로, 화물탱크 바닥의 LNG온도를 실선으로 표시하였다. 화물탱크 바닥의 LNG온도가 -163℃이므로, 4번째 영역에서의 온도변화가 가장 작고, 화물탱크 천정부와 닿는 1번째 영역에서의 기상부 온도가 -45.56℃에서 -132.66℃로 하강되어, 온도변화가 가장 크게 나타남을 알 수 있다.⁽²⁾

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

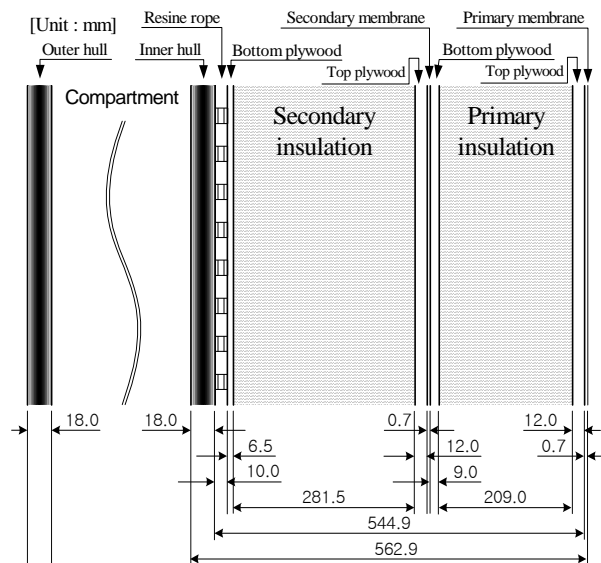


Fig. 4 Dimensions in thickness direction of cargo tank

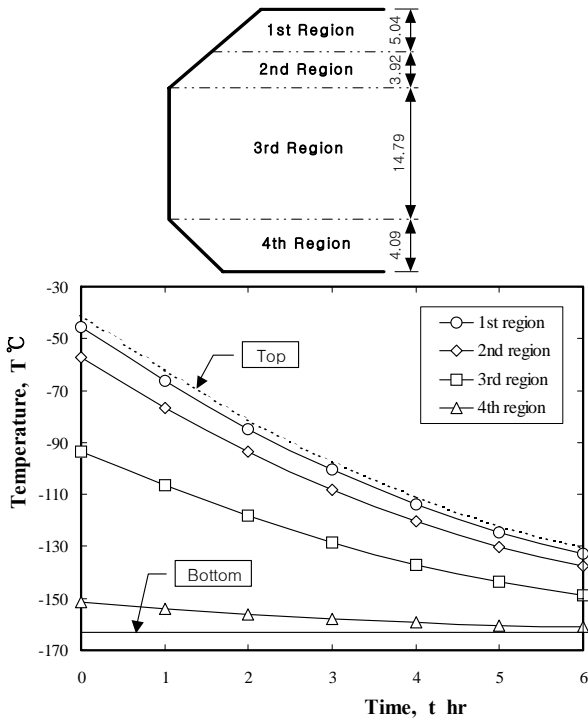


Fig. 5 Mean NG temperature at each region

$$\int_0^{t_e} \rho_l \dot{s}(t) [H_{fg} + c_{lg}(T_{ge} - T_{sat})] \Delta t$$

$$= \rho_g c_{lg} (T_{g0} - T_{ge}) V_g$$

$$+ \sum^i \int^i h_{ms} A_{ms} \{T_w(t) - T_g(t)\} \Delta t \quad (2)$$

위 식은 액상이 갖는 증발잠열과 급냉각이 완료되는 목표온도까지 이용 가능한 현열상태의 냉열량의 합이 화물탱크 내부 기상 of 냉각에 소모되는 열량과 화물탱크벽과 벽 근처의 단열재의 냉각에 소모되는 열량의 합과 같음을 나타낸다.

Fig. 6은 식(2)에 의하여 1/4 화물탱크 용적(약10,109m³)에 대한 계산결과를 나타낸 것으로, 기상의 냉각에 소모되는 열량(◇)은 기상의 온도하강에 비례하여 점차적으로 감소한다. 이에 비하여, 1차 방벽 및 1차 단열재의 급냉각에 소요되는 열량은 1차 방벽과 1차 단열재 내부의 온도구배가 커짐에 따라 점점함을 알 수 있다.

4. 수치계산법

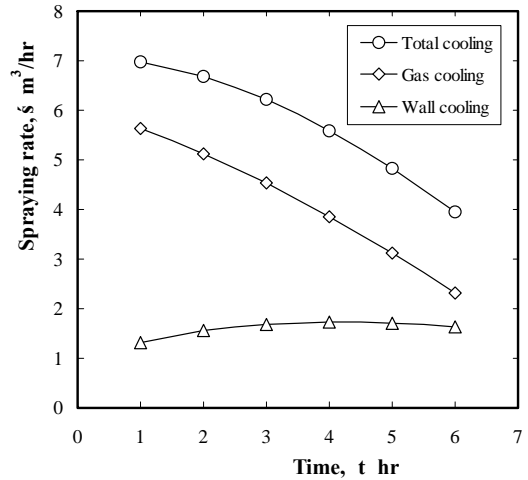


Fig. 6 Variation of spraying rate to cool-down time for 1/4 tank

전술한 바와 같이 분무냉각 기간중 탱크내 높이방향의 기상의 온도가 주어지고, 해수 및 대기 온도가 주어지면, Fig. 4에서 보는 바와 같은, 선체 외판에서 1차 방벽까지의 수치계산이 가능하게 된다.

생성항이 없는 비정상 3차원 열전도 방정식은 다음 식과 같다.

$$\rho c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

위 식을 시간 t~t+Δt에 대하여 적분하고, 가중계수 f를 이용하여 차분화 하면 비정상 3차원 열전도의 이산화방정식을 구할 수 있다.⁽⁴⁾

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 시간중분 Δt를 아주 작게 하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 고체 부분인 3차원 격자에 대하여서는 반복계산이 요구되나 시간중분 Δt를 임의로 선택할 수 있는 완전 암시도식(Fully implicit scheme)을 채용하였다.

급냉각 기간동안은 LNGC가 공선향해중이므로 탱크상부와 선체 측벽의 대부분이 대기와 접촉하고

있고, 선체 저면에서 해수면까지 9.3m의 측벽과 선저측은 해수와 접하고 있다. 따라서 수치계산 시 필요한 선체외부측 경계조건으로서는 BOG 발생량이 가장 많은 대기온도 +45℃, 해수온도 +32℃인 IMO(International Maritime Organization) 설계조건을 택하였다. 그리고 탱크내부의 경계조건으로서 높이방향 기상온도는 전술한 Fig. 5의 결과를 참조하였으며, 시간증분은 $\Delta t=50\text{sec}$ 를 취하였다.

5. 화물탱크의 열해석 결과

Fig. 7은 IMO 조건하에서 6시간의 급냉각 과정이 완료되었을 때, 화물탱크와 코퍼담측의 각 선체평판의 온도분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 화물탱크측에

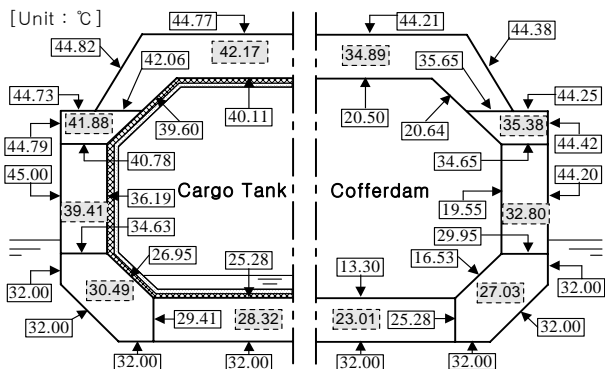


Fig. 7 Temperature distribution around cargo tank and cofferdam after cool-down

서 가장 높은 평판의 평균온도는 측벽의 외판 온도가 45.0℃로 외부의 대기온도와 동일하며, 가장 낮은 평판의 온도는 바닥쪽의 평판으로 25.28℃이다. 대기에 접하고 있는 외부 평판의 온도는 대기온도와 그 차이가 1℃ 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.

Fig. 8 ~ Fig. 11은 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.

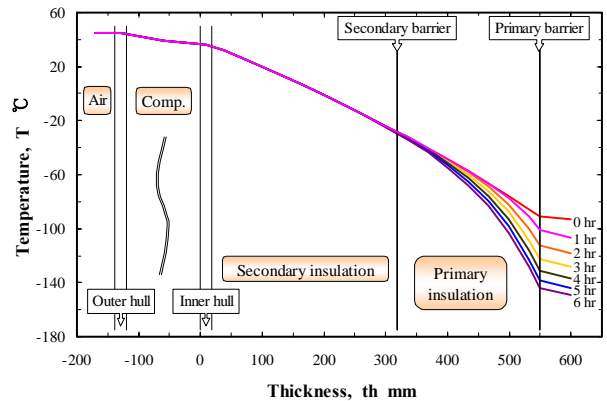


Fig. 9 Temperature variation at hull side during cool-down

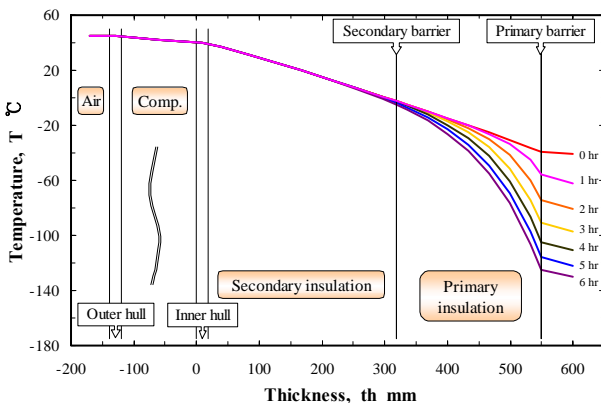


Fig. 8 Temperature variation at top side during cool-down

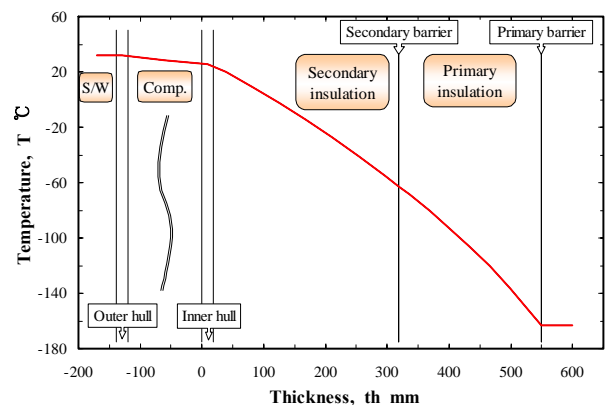


Fig. 10 Temperature variation at bottom side during cool-down

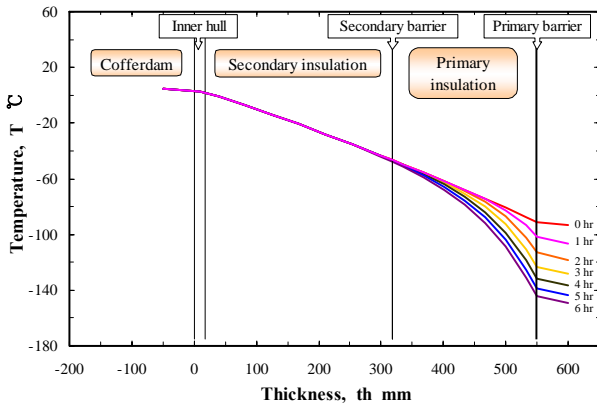


Fig. 11 Temperature variation at cofferdam side during cool-down

Fig. 8은 전술한 기상부의 온도분포에서와 같이 가장 높은 온도영역에 접한 화물탱크 상부의 온도거동을, Fig. 9는 선체측면에서, Fig. 10은 선체 하부에서, 그리고 Fig. 11은 코퍼담 방향에서의 선체외관을 포함한 화물탱크 단면의 온도거동을 각각 나타낸 것이다.

선체 하부가 LNG와 접해 있어 항상 -163°C 를 유지하고 있는 Fig. 10의 선체하부를 제외하고는, 전술한 바와 같이 급냉각시 분무에 의하여 주로 1차 단열재 내의 온도차만큼 냉각되었음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 GT-96방식 멤브레인형 LNGC를 대상으로, 수입기지에서 화물을 적재하기 전에 냉열충격을 완화하기 위하여 필수적으로 실시하여야 하는 급냉각과정에 대한 비정상상태의 열전달해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 분무냉각 기간동안 시간경과에 따른 기상부의 평균온도를 도출함으로써 6시간내에 1차 방벽의 온도가 -40°C 에서 -130°C 까지 급냉각하기에 필요한 분무율의 예측이 가능하였다.

(2) 분무냉각에 의한 냉열은 1차 방벽, 1차 단열재 및 기상의 온도강하에 소모되는데 기상의 냉각에 소모되는 열량은 분무시간의 경과에 따라 점감하는데 비하여 벽면의 온도강하에 소모되는 열량은 점증함을 확인하였다.

(3) 6시간 동안의 급냉각 과정중 화물탱크의

각부 단열벽내의 온도거동을 계산한 결과, 2차 단열벽내의 온도는 거의 변화가 없고, 1차 단열벽내의 온도는 약 $53\sim 86^{\circ}\text{C}$ 로 강하되어, 주로 1차 단열벽내에서 온도가 하강됨을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) J.H.Lee, K.K.Kim, S.T.Ro, H.S.Chung and S.G.Kim, 2003, "A Study on the Thermal Analysis of Spray Cooling for the Membrane Type LNGC during the Cool-down Period", J.KSME, Vol.27, No.1, pp.125~134.
- (2) K.K.Kim, S.S.song, D.Y.Choi and S.B.Moon, 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.
- (3) S.S.Song, J.H.Lee, H.P.Jun, B.Y.Seong, K.K.Kim and S.G.Kim, 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.
- (4) Suhas V. Patankar, 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, Washington D.