

---

# 멤브레인형 LNGC의 공선행해중 탱크내 압력과 온도 시뮬레이터 개발

이정혜 · 김경근 · 최현규 · 김동혁 · 오 철

Development of the Pressure and Temperature Simulator for Membrane Type LNGC during the Ballast Voyage

*Jung-hye Lee · Kyung-kun Kim · Hyun-Kue Choi · Dong-Hyuk Kim · Cheol Oh*



## Abstract

In this paper, thermal calculation results are reported for the membrane type LNG carrier(LNGC) of 138,000m<sup>3</sup> class. Thermal calculation modes are divided into 6-modes based on the thermal boundary conditions. These modes are unsteady and steady state modes during the ballast voyage, cool-down mode, loading mode, unsteady and steady state modes during the laden voyage.

Temperature distribution and stored energy in the insulation barrier are calculated numerically by the 3-dimensional analysis.

Finally, the simulator for the temperature and the pressure variations in LNG tank is suggested in this paper. These simulation results will be contributed for the development of satellite ship management system(SSMS) to achieve the easy operation and the prevention of explosion accident.

**Key words** : LNG Carrier(액화천연가스 운반선), Ballast voyage(공선행해), LNG tank(화물탱크), Insulation wall(단열벽), Simulator(시뮬레이터)

---

\* 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수

\*\* 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부

\*\*\* 한국해양대학교 공과대학 기계시스템공학부 부교수

\*\*\*\* 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 부교수

## 기호설명

- T : 온도 (°C)  
 k : 열전도율 (kcal/mhr°C)  
 Q : 열량 (kcal/hr)  
 U : 열관류율 (kcal/m<sup>2</sup>hr°C)  
 t : 시간 (hr)  
 V : 체적 (m<sup>3</sup>)  
 γ : 비중량 (kg/m<sup>3</sup>)  
 L<sub>fg</sub> : LNG의 증발잠열 (kcal/kg)

## 1. 서론

LNG 운반선(LNGC, LNG Carrier)에 관한 연구는 1970년대에는 주로 유럽에서, 1980년대에는 일본에서, 그리고 1990년대에는 한국에서 주된 연구가 이루어지고 있는데, 최근 한국에서는 수입기지설비, 저장탱크의 건설, 파이프 네트워크, 냉열의 유효이용, 수송선박을 대상으로 연구가 수행되고 있다. LNG에 관한 연구를 분야별로 살펴보면, LNG 탱크재료 및 물성분야 연구, 용접 및 시공기술분야 연구, LNG탱크의 내압, 구조, 응력 및 피로해석분야 연구, LNG탱크내의 유동 및 유체진동분야 연구, LNG선박의 열해석분야 연구, LNG를 이용한 화력발전용 보일러 및 냉열발전분야 연구, 육상 및 해상의 LNG 설비관련 법규분야 연구로 대별된다.<sup>[1]~[3]</sup>

LNGC의 형태는 크게 모스형과 멤브레인형으로 분류할 수 있는데, Fig. 1에서 보는 바와 같이, 최근에는 제작의 용이성과 제작비의 절감요구에 의하여 점차적으로 멤브레인형의 발주량이 세계적으로 증가하고 있는 추세이다.

현재 세계 최대급의 멤브레인형 LNGC는 13만8천톤급으로서, 주로 한국에서 건조되고 있으며, 그 선가는 척당 2~3억불의 고부가가치 선

박중의 하나이다. 2001년도에 한국의 현대중공업, 대우조선 및 삼성중공업의 대기업 3사가 수주한 LNGC는 약30척이며, 2002년도 연말까지 함께 약100여척의 LNGC가 국내외에서 발주되고 있는 실정이다.

LNGC의 설계를 위한 열해석 프로그램의 개발은 주로 GTT와 미쯔비시중공업의 연구자들에 의해 연구되어 왔던 만재정상항해에 대한 열해석 결과로, 탱크의 단열재내에 축열된 열량이 시간지연을 갖고서 탱크내의 LNG 증발에 영향을 미치기 때문에 기존의 연구결과만으로는 최근 LNG화물의 BOR(Boil-off Ratio) 해석이 불가능하다. 그러므로 이의 해석을 위하여서는 공선항해~쿨다운(Cool-down)~적재(Loading)~만재항해~하역의 전체 1-항차에 대한 정상 또는 비정상의 열해석을 순차적으로 수행이 필요하며, 본 논문에서는 1-항차동안의 완벽한 열수치해석을 통한 공선항해기간중의 탱크내 압력과 온도 시뮬레이터 개발도 가능하게 되었다.

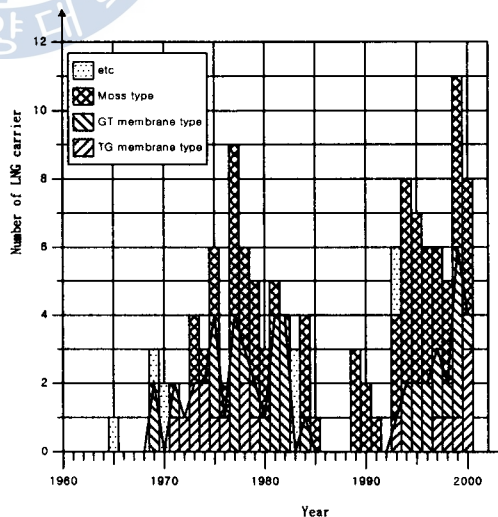


Fig. 1 LNGC constructed in world

또한 최근에는 LNGC에 요구되는 고도의 운

항안정성 확보를 위하여, Fig. 2에서 보는 바와 같이, 인공위성을 이용하여 육상에서 실시간으로 LNGC의 운항상태를 모니터링할 수 있는 시스템이 개발중인데, 본 연구성과에 의한 열적 D/B(Data base)는 장래 LNGC의 육상모니터링시스템 개발에도 결정적으로 공헌하게 될 것이다.

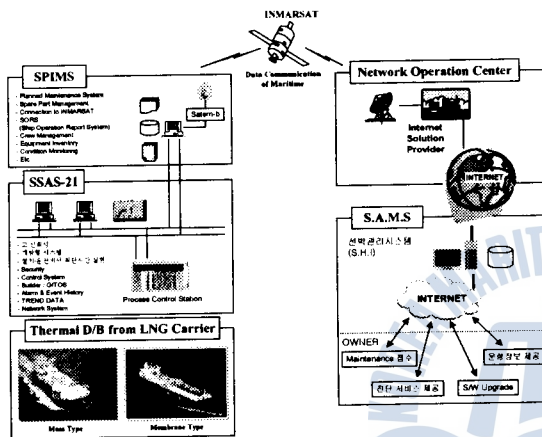


Fig. 2 Basic concept of Satellite Ship Management System for LNGC

°C로 유지되도록 설계된다. 선수로부터 탱크의 번호가 주어지는데, 각각의 탱크 용량으로는, No.1탱크가 24,587 m<sup>3</sup>, No.2와 No.3탱크가 표준형 탱크로 39,454 m<sup>3</sup>, No.4탱크가 35,075 m<sup>3</sup>이다.

Fig. 3은 본 연구대상인 LNGC의 선체 일반배치도를 나타낸다. Fig. 4는 No.2탱크를 포함한 선체외판까지의 횡단면의 치수도를 나타내며, 선폭은 약 42 m, 탱크폭은 약 38 m, 탱크의 높이는 약 27 m이다.

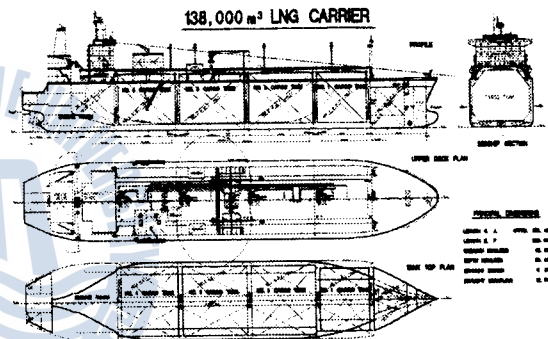


Fig. 3 G.A of GTT LNGC

## 2. 본 론

### 2.1 멤브레인형 LNGC의 설계사양

본 연구의 대상은 MARK-III 멤브레인형 LNGC로서, 선속은 20.3 knots, 화물적재량의 총전율은 98 %, 적재시 -162 °C 상태의 액화천연가스가 약 135,799 m<sup>3</sup>이 적재되며, 또한 공선행해시에는 1.17 %인 1,613 m<sup>3</sup>의 LNG가 적재되어, 공선행해기간중 온도유지 및 쿨다운에 사용되어진다.

설계를 위한 표준온도조건은 IMO설계조건인 대기온도 45 °C, 해수온도 32 °C, 코퍼담내의 온도는 5 °C이며, 이 경우 탱크상부의 기상온도는 -158.0 °C, 하부의 액상온도는 포화온도인 -162.0

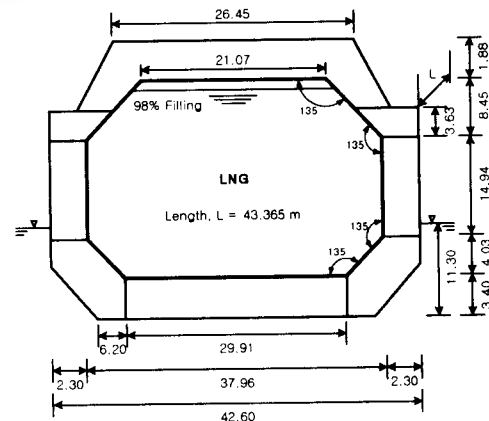


Fig. 4 Cross sectional dimensions of No.2 LNG tank

거대한 LNG탱크에 관한 반복적인 열수치계

산을 수행함에 있어서 계산시간의 절감과 탱크 벽면의 위치에 따른 열적 경계조건의 차이를 고려하여, Fig. 5에서와 같이, No.2탱크에 대한 전개도를 열수치계산에 적용하여, 그 계산결과를 다른 탱크의 열계산에까지 확대적용하였다. 그림에서 "Zone-1"은 탱크가 코퍼담과 접한 격벽을, "Zone-2"는 탱크의 천장부에 해당하는 상부면을, "Zone-3"은 상부면과 측면이 접한 코너부를, "Zone-4"는 측면을, "Zone-5"는 측면과 하부면이 접한 코너부를 각각 나타낸다. 또한 각 Zone의 수량은 "Zone-1/3/4/5는 각 2면씩이며, LNG탱크 상부면 및 하부면에 해당하는 "Zone-2" 및 "Zone-6"이 각 1개면씩이다.<sup>[4]</sup>

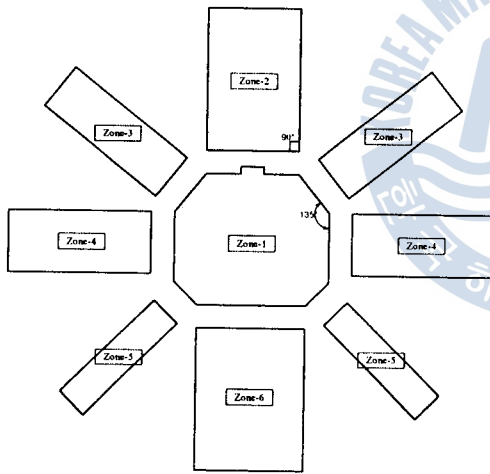


Fig. 5 Spread diagram of inner side tank wall

선체의 외판으로부터 LNG가 직접 접하는 멤브레인벽까지, 화물탱크의 단열재를 포함한 열수치계산에 필요한 단면의 구성과 각부의 치수를 Fig. 6에 나타내었다. 선체 외판(Outer hull)의 두께는 위치에 따라 1~2 mm 정도 차이가 있으나 본 연구에서는 균일하게 18 mm로 간주하였으며, 또 1차방벽(멤브레인 박막)과 2차방벽의 두께는 0.7 mm, 폴리우드 및 마스티를 포함

한 1차 단열재의 두께는 230 mm, 2차 단열재의 두께는 300 mm이다.

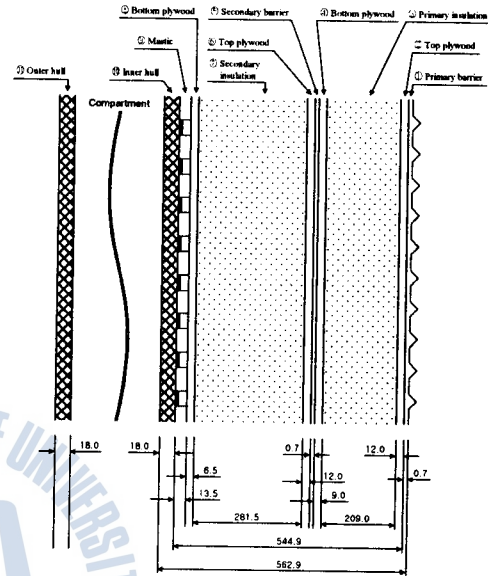


Fig. 6 Thickness direction dimensions

## 2.2 열적 모델화

LNGC의 항해중 정확한 온도분포 $T(x, y, z, t)$ , 탱크 및 단열재로의 출입열량과 BOG를 계산하기 위하여서는 반복계산법에 의한 열수치계산을 수행하여야 하며, 이를 위한 설계상의 경계조건은 USCG 조건(U.S Naval Sea Design Condition)인 공기온도  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 와 해수온도  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 온대지방 조건(Normal Sea Design Condition)인 공기온도  $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 와 해수온도  $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 그리고 IMO 조건(IMO Sea Design Condition)인 공기온도  $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 와 해수온도  $+32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 생각할 수 있는데, LNG는  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 유체이므로 가장 가혹한 조건인 IMO 해상설계기준온도를 택한다. 한국에서 운항되는 LNGC는 주로 말레이시아항로와 중동항로에 취항하는데, Fig. 7은 원유운반선의 운항실적에 기초한 항로의 실제 온

도분포를 나타내며, 연간 평균적으로 공기온도는 +28 ℃, 해수온도는 +29 ℃ 정도로, 실제로는 온대지방조건과 IMO 조건의 중간정도이다.

다음으로 수치계산을 위한 초기조건을 상정하면, 1-항차는 Fig. 8과 같이 구분되어질 수 있다. 먼저 수입기지에서 하역을 마치면, 탱크내의 액상 및 기상 LNG 및 탱크벽면의 온도는 모두 대기압상태에서의 LNG 포화온도인 -162 ℃에 도달하며, 이 조건이 1-항차 동안의 수치계산을 위한 출발점의 열적 초기조건에 해당한다. 공선상태에서 출항을 하면 먼저 “Mode ①-1”에서는, 비정상구간으로서 외부로부터 유입열량에 의한 선체, 단열재 및 액상, 기상상태의 LNG는 점진적인 온도상승을 지속한다.

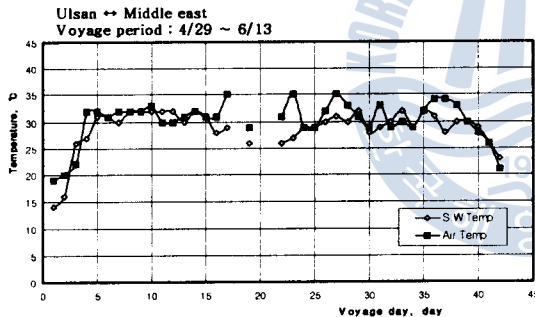


Fig. 7 Temperature variation of air and sea water during 1-voyage

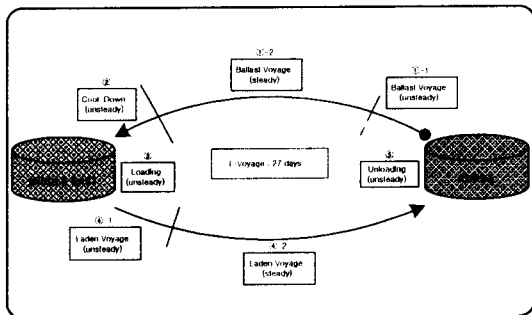


Fig. 8 Thermal modes during 1-Voyage

“Mode ①-2”는 공선 정상상태 구간으로서, 더 이상 선체 및 단열재의 온도상승없이 유입한 열량은 전부 LNG의 증발에 소모되며, 증발된 LNG가스의 일부는 선박추진을 위한 에너지로 사용되므로, 이들의 열적 평형에 의하여 탱크내의 온도 및 압력이 결정된다. BOR을 최대한 억제하기 위하여서는, 이 기간 동안의 탱크내의 압력과 온도를 높여, 외기와 탱크내의 온도차를 적게 함으로써 결과적으로는 BOR을 화물인수자(KOGAS)의 계약조건에 맞추기가 용이하다. 따라서 본 LNG시뮬레이터의 개발이 필요하다.

“Mode ②”는 쿨다운기간으로서, 하역펌프(Stripping Pump)를 이용하여, 탱크 하부의 LNG를 30 m<sup>3</sup>/hr의 속도로, 탱크상부의 기상온도가 -130 ℃가 되도록 6시간 동안 분무하는데, 탱크 벽면과 벽면근방의 단열재 온도가 비정상적으로 급속하게 하강한다. “Mode ③”은 12시간의 적하기간으로서, 비정상적인 온도하강이 지속된다.

“Mode ④-1”은 적하(출항)후 온도하강이 지속되는 기간으로, 약6일이 소요되며, 이 기간이 지나야 비로소 공선행해중 선체 및 단열재에 축열된 잉여열량이 완전히 제거된다. 이 기간에 제거되는 잉여열량이 부가적으로 BOG발생량을 증가시키므로, 1-항차의 BOR산정이 매우 중요하다.

“Mode ④-2”는 만재 정상항해기간으로서 각 부의 온도가 일정하게 유지되며, 유입열량 전부는 LNG증발에 소모되며, 발생한 증기는 선박추진에 사용된다. 각 모드에서 계산의 말단조건은 다음 계산에서의 초기조건으로 이용되어 수치계산이 진전된다.

### 2.3 수치계산법

항해중 LNGC의 외부에서는 해수 또는 공기

에 의한 강제대류 열전달과 갑판상에서는 복사 열전달이 일어나며, 선체내에서는 열전도에 의한 열전달이 진행된다. 생성항을 갖는 1차원 정상상태 열전도방정식은 (1)과 같고, 이산화하면, (2)와 같다.

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (1)$$

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + b \quad (2)$$

여기에서,  $a_E = \frac{k_e}{(\delta x)_e}$ ,  $a_W = \frac{k_w}{(\delta x)_w}$

$$a_P = a_E + a_W \quad b = S \Delta x$$

본 연구에서는 수치계산에 소요되는 시간을 단축하기 위하여 표준형 탱크인 No.2 탱크를 주 대상으로 하여, 이 탱크의 1/4을 주계산 영역으로 하였다. Fig. 9는 대표적인 수치계산용 격자 생성결과를 나타낸 것으로, 세심한 검토를 통하여 확인한 결과, 계산의 정도를 손상하지 않는 최저 격자수는 약 78,000개로서, 이 경우, 평균적으로 한 모드의 계산에 소요되는 시간은 약 10시간 정도이었다.

전술한 Fig. 6에서 보는 바와 같이, 선체 외판과 내판 사이에는 평균폭 약 2.3 m의 소위 밀폐 공간(Compartment)이 존재하며, Fig. 10에서와 같이, 이 공간에서는 자연대류에 의한 열전달이 일어나므로 열계산을 위해 필요한 공간의 대표온도를 반복적으로 구해야 하는 점은 수치계산에서 치명적인 시간지연요소로 작용할 수 있다.

이에 관하여 본 연구에서는 임의 높이방향 j 번째의 밀폐공간에서 i번째의 면에 대한 총괄열관류율,  $U \text{ kcal/m}^2\text{hr}^\circ\text{C}$ 의 개념을 다음 식과 같이 도입하여 밀폐공간의 대표온도를 구할 수 있다.<sup>[5]</sup>

$$\int^{(i,j)} Q_i = U_i (T_{ii} - T_{io}) dA_{(i,j)} \quad (3)$$

$$T_{ob} = \frac{\int^i U_i \cdot T_{air} \cdot dA_i + \dots + \int^m U_m \cdot T_{cl} \cdot dA_m}{\int^i U_i \cdot dA_i + \dots + \int^m U_m \cdot dA_m} \quad (4)$$

다음으로, 액상온도는 모드에 관계없이 지속적인 증발에 의하여 포화온도로 일정히 유지되거나 기상온도는, 특히 공선비정상구간과 쿨다운기간중에 높이방향으로 변화를 하게 되며, 이 온도분포를 정밀히 추적하는 것은 LNGC의 열계산에서도 매우 중요한 고려인자에 속한다.

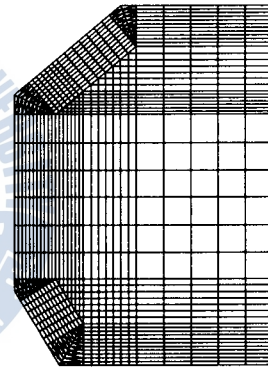


Fig. 9 Standard meshes for calculation

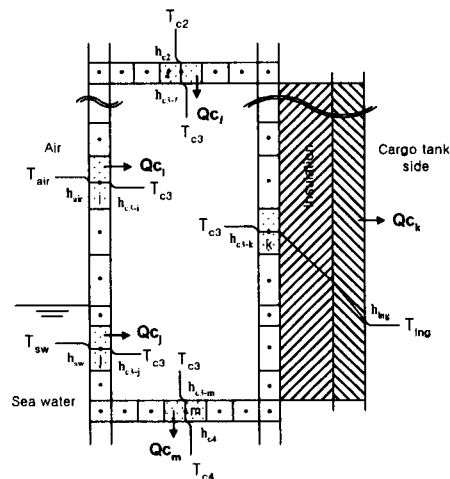


Fig. 10 Heat balance in compartment

이에 관하여서는 S중공업에서 상당한 규모의 대형 Mock-up 실험장치를 제작하여 실험을 수행하였으며, 그 결과, 높이방향 기상의 온도분포에 관하여 다음과 같은 실험식으로 제시하고 있다.<sup>[6]</sup>

$$T_{ng} = T_{lng} \cdot e^{y \cdot \ln\left(\frac{T_{mg}}{T_{lng}}\right)} \quad (5)$$

여기서,  $T_{ng}$ 는 화물탱크 상부의 기상의 온도를,  $T_{lng}$ 는 LNG의 대기압에서 포화온도인  $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를,  $T_{mg}$ 는 화물탱크 최상부에서의 가스의 최고 온도인  $-158\text{ }^{\circ}\text{C}$ 를 나타낸다.

주어진 경계조건과 초기조건하에서, 항해 모드별로 선체 외판에서 탱크내부까지의 수치계산상의 각 절점(Nodal point)에서 온도를 구할 수 있으므로, 임의의 x-방향으로  $x = L$ 의 위치에서 유입하는 열량과  $x = L + \Delta L$  위치에서 유출하는 열량은 각각 다음 식과 같이 표현된다.

$$q_{in} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} \quad (6)$$

$$q_{out} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L+\Delta L} \quad (7)$$

그러므로 x-방향 구간  $L \sim \Delta L$  사이(예를 들어 단열재내부)에 축열되는 열량,  $q_{net}$  kcal/  $\text{m}^2\text{hr}$ 는 위 두 식의 대수합으로서,

$$q_{net} = q_{in} - q_{out} \quad (8)$$

(6)~(8)을 이용하여, 임의의 시간간격  $t \sim t + \Delta t$ 까지 다음 식들과 같이 적분하면, 정해진 구간(예를 들어 단열재 내부)에 축열되는 열량을 구할 수 있으며, 이를 1-항차에 확대적용하면 모드별로, 영역별로 축열량, BOG등을 구할 수 있다.

$$Q_{in} = \int_t^{t+\Delta t} q_{in} \Delta t \quad (9)$$

$$Q_{out} = \int_t^{t+\Delta t} q_{out} \Delta t \quad (10)$$

$$Q_{net} = \int_t^{t+\Delta t} q_{net} \Delta t \quad (11)$$

## 2.4 열거동 계산결과

Fig. 11은 GTT의 기본설계로 된  $138,000\text{ m}^3$ 급 멤브레인형 LNGC가 공선상태로 중동을 향하여 한국의 인수기지를 출항한 경우, 선체의 횡방향에서 볼 때, 해수에 닿는 외판~밀폐공간~내판~단열재~탱크벽~탱크내부 사이의 시간경과에 의한 온도변화를 보여준다. 이 그림에서 알 수 있는 것과 같이 공선출항시부터 온도는 점점 상승하여, 어떤 일정온도에 도달할 때까지 공선향해를 계속하고, 또 만선향해후에도 시간경과에 따라 점차 하강한 후 어떤 일정한 온도로 수렴하는 것을 알 수 있다.

공선향해중 단열재에 축열되는 열량은 쿨다운과정과 적하과정에서 전부 방출되지 못하고 만재항해의 초기에 지속적인 방출이 이루어지며, 이에 의하여 만재정상항해에 대한 BOR을 기준으로 부가적인 BOR을 증대시킨다. 이와 같은 잉여축열은 주로 단열재 내부에 축적되며, 따라서 단열재 내부의 1-항차 동안의 온도변동에 대한 정보를 상세히 알 필요가 있으며, Fig. 12는 이를 나타낸다.

Fig. 13은 공선향해중 시간경과에 따른 밀폐공간과 탱크상부의 기상LNG의 온도변화를 보여준다. 주목하여야 할 점은 공선향해중 기상부의 온도가 어떻게 유지되어야 할 것인가 하는 것으로, 이는 BOR의 제어에 중요한 문제가 된다. 왜냐하면 기상온도를 과도하게 낮게 유지하면, 외기 또는 해수의 온도와 탱크내부와 온도차가 크게 되어, 유입열량이 증대하고, 결과적으로 BOR이 증가하게 되기 때문이다.

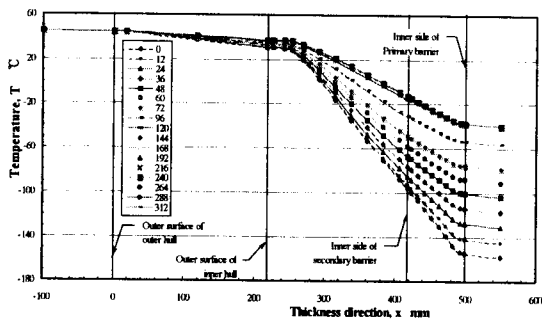


Fig. 11 Temperature history during ballast voyage

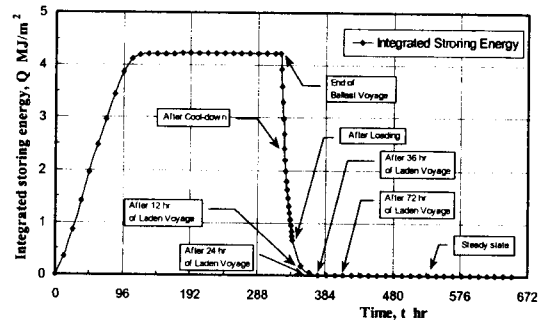


Fig. 14 Integrated energy stored in wall during 1-voyage

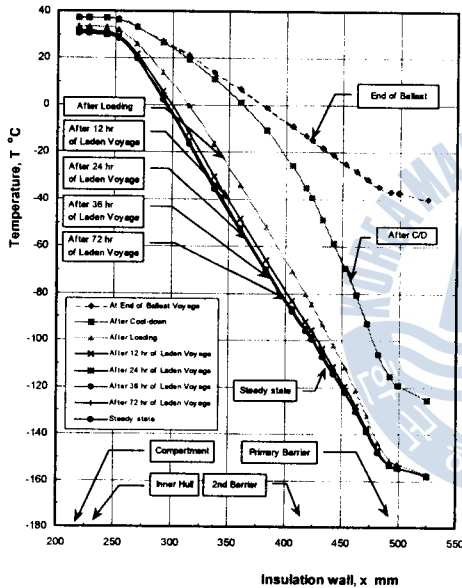


Fig. 12 Temperature cycle in top side wall

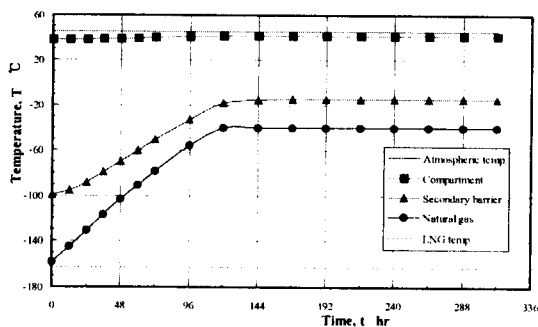


Fig. 13 Gas temp. in the tank during ballast voyage

기상부의 온도는 결국 유입열량중에 주기판에서 소모되는 BOG가 갖는 열량을 제외한 잔류 열량의 열평형에서 평균적으로 결정된다. 그러나 실제로는 주야간의 온도차와 탱크의 온도와 압력을 낮추기 위하여, 약12시간의 주기적인 분무냉각제어를 하므로, 후술하는 Fig. 16과 같이, 주기성을 갖고 변한다.

Fig. 14는 (11)에 의하여 단열재의 단위면적당 만재 정상항해를 기준으로 하여 1-항차 동안의 축열된 잉여열량의 변화를 나타낸다. 전술한 Fig. 5에서와 같이 각 영역별로 확대 적용하면 1/4 탱크의 전 단열재에 축열되는 잉여열량은 물론 궁극적으로는 BOG와 BOR의 추정이 가능하다.

### 2.5 BOR의 평가

이상과 같이 1-항차중 4개의 LNGC 화물탱크에 유입한 열량의 합계가 계산되므로, (12)에 의하여 발생한 BOG량도 계산된다.

$$G_{BOG} = \frac{(V_1\gamma_1 - V_2\gamma_2)L + V_2\gamma_2 C_{pL}(T_2 - T_1)}{L_{fg}} \quad (12)$$

BOG량으로부터 다음 식에 의한 만재항해기간의 일평균 BOR도 결정한다.



$$BOR = \frac{(V_1\gamma_1 - V_2\gamma_2)L + V_2\gamma_2 C_{pL}(T_2 - T_1)}{V_1\gamma_{1L}L_{fg}t} \times 100 \quad (13)$$

위 식에서  $Vm^3$ 는 입출항시 전체 LNG와 NG의 적하체적의 합을,  $\gamma \text{ kg/m}^3$ 는 입출항시의 전체 LNG, NG의 평균적인 비중량을,  $T^\circ\text{C}$ 는 입출항시 평균적인 화물온도를,  $L_{fg} \text{ kJ/kg}$ 는 LNG 증발잠열을 각각 나타낸다. 또 (12), (13)에서 첨자"1"은 입항시를, 첨자"2"는 출항시를 의미한다.

(13)에서 볼 때, 한국가스공사(KOGAS)는 생산지에서 구매한 LNG량과 실제로 인수한 량으로부터 인수자의 입장에 따라 실제 BOR도 계산할 수 있다.

LNG는 열역학적으로 볼 때 일종의 혼합가스이므로, 산지에 따라 그 조성비도 다르나, 대부분의 성분은 메탄가스이므로, 외부에서의 유입 열량에 따라 메탄 성분만이 증발한다고 가정한다면 환산치(%/day)는 (13)으로부터 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$BOR_m = \frac{511(V_1\gamma_{1L} - V_2\gamma_{2L}) + 3.5V_2\gamma_{2L}(T_2 - T_1)}{425 \times 511 \times V_1 \times t} \times 100$$

$$= \frac{146(V_1\gamma_{1L} - V_2\gamma_{2L}) + V_2\gamma_{2L}(T_1 - T_2)}{620.5 \times V_1 \times t} \quad (14)$$

## 2.6 LNG 화물탱크에서 온도와 압력의 시뮬레이션

공선항해 개시후 LNG 탱크내 기상의 온도는 참고문헌[4]와 [6]에서 보는 바와 같이 점진적으로 상승하여, 약 4.5일이 경과하면 일정치에 도달한다. 그러나, 실제의 항해에서는 탱크내 기상의 온도상승에 의한 탱크내 압력의 과도한 상승을 억제하기 위하여 정오에 Spray Cooling을 실시한다. 이러한 Spray Cooling시 열평형에 기초한 기상온도 예측에 관한 실험식에 대하여는 참고문헌[8]에 기 발표한 바가 있다.

Fig. 15는 실운항중 LNGC 1-항차에서 계측한

항해일자에 따른 화물탱크 상부의 평균적인 LNG 기상온도, 액상온도 그리고 평균적인 압력 변화를 나타낸 것이다. LNG 기상온도는 -120~-160  $^\circ\text{C}$ 의 범위에서 진동하고, 평균압력은 대기압보다 다소 높은 절대압력 800~900 mmHg의 범위에서 진동하는 것을 알 수 있다. 그림에서 탱크내 압력과 기상온도의 변동은 실운항 실적에 근거한 탱크내의 압력과 온도의 계측결과이므로, 당연히 액체 LNG의 Spray량과 온도, 그리고 밤낮의 외부 온도차, 해기사의 수련도에 의한 영향도 받게되어 매우 불규칙함을 알 수 있다.

공선출항후 LNGC 화물탱크의 상부 기상온도는 평균적으로 Fig. 13에서 전술한 것과 같이 -162  $^\circ\text{C}$ 에서 약5일이 걸려 가장 높게 상승하여 -38.38 $^\circ\text{C}$ 에서 안정된다. 그러나 실제 운항에서는 Fig. 15와 같이 주기적으로 LNGC 화물탱크의 내부온도와 압력이 진동하여, 이는 과도한 탱크내의 온도상승과 압력상승을 막기 위한 것으로 주기적인 분무냉각과 발생증기의 주기관용 보일러에서의 소모에 의한 것이다.

따라서 표준설계조건인 IMO 설계조건하의 일정한 외부온도조건(대기/해수)하에 공선항해를 지속할 경우의 탱크내 압력과 온도의 변동에 주의 필요하다.

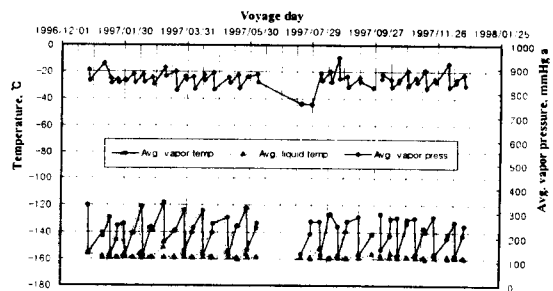


Fig. 15 Temperature and pressure vibration in LNG tank

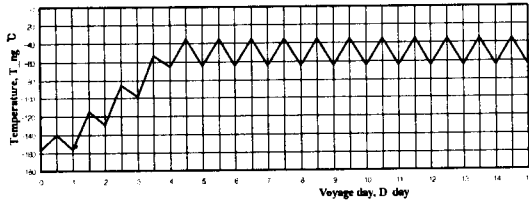


Fig. 16 Temperature simulation of LNG gas during ballasting voyage

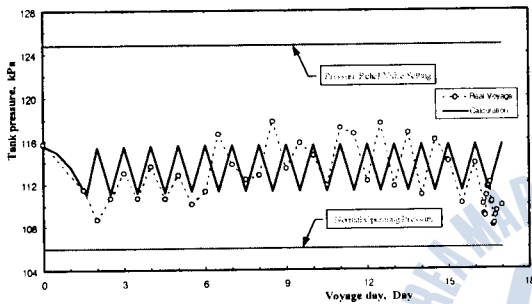


Fig. 17 Pressure simulation in LNG tank during ballast voyage

Fig. 16은 이상의 결과를 고려하여 조정한 공선항해중의 LNGC 화물탱크의 기상온도를 시뮬레이션한 결과로서, 공선항해 출항후 4일이 경과한 후, 매일 정오에 최적의 Spray Cooling을 할 경우 기상의 평균온도의 변동에 관한 계산결과를 나타낸다. 그러므로 실제의 공선항해에서는 외부의 대기온도와 해수온도 그리고 선속이 시시각각 변화하지만, Fig. 13의 결과를 참조하여 탱크내 기상온도를  $-40 \sim -60^{\circ}\text{C}$ 로 유지될 수 있도록 Spray Cooling을 제어한다면, 결국 KOGAS가 운송계약상 요구하는 BOR값(0.15%/day, 만재항해일수 기준)을 만족시키기가 용이하게 된다.

LNG 탱크내의 액상화물과 기상화물은 열역학적으로 평형상태이어야 하나, 탱크가 매우 거대하고, 특히 탱크의 상부 즉 갑판측에서 침입

하는 열량으로 인하여 탱크내 상부측은 과열상태가 된다. 따라서 Fig. 16에 의한 기상의 온도에 의하여 공선항해중 탱크에 압력변동을 예측하는 것은 불가능하다. 이에 관하여는 S중공업에서 Mock-up 탱크를 제작하여 액체질소를 이용한 축소실험결과<sup>6)</sup>와 Fig. 15의 실운항실적을 토대로 하여, 출항후 공선항해중의 LNGC 화물탱크의 압력변동 시뮬레이션결과를 실운항치와 비교하여 Fig. 17에 나타내었다. 그림에서 시뮬레이션 결과와 실측치는 정량적으로도 잘 일치하며, 그 진동주기도 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는  $138,000 \text{ m}^3$ 급의 멤브레인형 LNGC를 대상으로 하여, 종래의 만재정상항해만을 고려하여 BOR을 계산한 것과 비교하여, 1-항차를 열적 경계조건으로 하여 모드별로 나누고, 각각에 대한 반복적 수치계산을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 1-항차를 열적 경계조건에 의하여 나누어 보면, 공선비정상, 공선정상, 쿨다운, 적재, 만재비정상, 만재정상으로 구분할 수 있다.
- 2) 각 모드별로 각부의 온도변화와, 특히 단열재내의 온도변동사이클을 포함한 단열재에서의 축열량 변화를 구할 수 있다.
- 3) 단열재내의 잉여축열량을 고려함으로써, 좀더 정확한 BOR의 계산이 가능하다.
- 4) 공선항해중의 평균적인 기상온도변화를 기초로 하여 압력과 온도의 시뮬레이션이 가능하므로, 장래 인공위성을 위한 육상감시용 시뮬레이터의 개발에 기초가 된다.
- 5) LNG 탱크내 압력과 기상온도의 변화주기는 기본적으로 12시간이다.

#### 4. 참고문헌

- 1) 천병일, 김용모, 김경근, "MRV형 LNG선의 선체온도분포 및 증발률 산정에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제18권 제4호, pp.986~996, 1994
- 2) 정한식, 정효민, 김경근, 노승탁, "멤브레인형 LNG선박의 코파담내의 자연대류에 관한 수치해석적 연구", 대한기계학회 추계학술논문집B, pp.215~221, 1997
- 3) 김경근, 최순호, 이정혜, 최두열, 송성욱, "LNG선 주중기계통의 열평형산정용 전산프로그램 개발", 한국박용기관학회지, 제22권 제6호, pp.854~861, 1998
- 4) 김경근 등, "LNG선용 탱크의 열설계 및 제작기술", 산업자원부 공기반사업 연구보고서, 1997~1998
- 5) 송성욱, 이정혜, 전현필, 성부용, 김경근, 김성규, "Membrane Type LNG선의 3차원 정상상태 온도분포 및 BOR 계산 프로그램 개발에 관한 연구", 한국박용기관학회지, 제23권 제2호, pp.140~149, 1999
- 6) 노승탁 등, "GIT MARK-III Membrane Type LNG선 열설계 기술개발", 삼성중공업 연구보고서, 1998
- 7) IMO, "International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied gases in Bulk", London, pp.47~57, 1993
- 8) 이정혜, 김경근, 노승탁, 정한식, 김성규, "급냉각기간에서 멤브레인형 LNGC의 분무냉각 열해석에 관한 연구", 대한기계학회논문집B, 제27권 제1호, pp.125~134, 2003

