

멤브레인형 LNGC의 열계산에 기초한 안전운항기술에 관한 연구

김창복* · 김경근** · 오 철†

(원고접수일 : 2008년 7월 28일, 원고수정일 : 2008년 8월 1일, 심사완료일 : 2008년 8월 1일)

A Study on the Safe Maneuvering Technology Based on the Thermal Calculation of Membrane Type LNG Carrier

Chang-Fu Jin* · Kyung-Kuen Kim** and Cheol Oh†

Abstract : This paper is concerned with the thermal design of the 138,000m³ class membrane type LNGC. To predict the temperature distribution, BOG and BOR, 3-dimensional numerical calculation was carried-out for the quarter of No.3 LNG tank. These sequence analyses were performed under the standard conditions of IMO ship design condition, USCG ship design condition and the Korean flag LNGC's route condition according to the 6-voyage modes.

As the results, temperature behavior, heat flux, total penetrating heat, BOG and BOR were obtained, and those were compared with the maneuvering results considering the real temperature variation of air and sea water temperature at noon time. For securing the safety of LNGC during the ballast voyage, optimum control patterns of pressure and temperature in LNG tank is suggested in this paper.

Key words : Boil-off gas(BOG, 증발량), Boil-off rate(BOR, 증발율), LNG carrier(LNGC, 액화천연가스 운반선), Safe maneuvering technology(안전운항기술), Thermal calculation(열계산)

Nomenclature

Alphabetic

A : 전열면적 (m²)

BOR : 증발율 (%/day)

c_p : 정압비열 (J/kg °C)

G : 증발량 (kg, ton)

H : 증발잠열 (kJ/kg)

k : 열전도도 (W/m °C)

n : 만재항해일자 (Days)

T : 온도 (°C)

t : 시간 (hr, sec)

Q : 총열량 (w)

q : 열프럭스 (W/m²)

† 교신저자(한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail : ohcheol@hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4268)

* 한국해양대학교 해사대학 열공학연구소 Post Doc.

** 한국해양대학교 기관시스템 공학부

V : 체적 (m³)

Greeks

ρ : 밀도 (kg/m³)

γ : 비중량 (kgf/m³)

Subscripts

BOG : 증발된 NG

L : 액체상태

in : 침입

1 : 출항시

2 : 입항시

1. 서 론

LNG는 1950년대 중반부터 중요한 에너지원으로 관심을 받기 시작하여, 처음에는 고압가스형태로 해상운송이 시작되었으나 압력을 견디기 위한 선체 무게의 증가로, 냉각에 의하여 체적을 1/600로 감소시켜, 극저온(-162℃) 대기압상태로 수송하게 되었다. 이러한 변화는 결국 증발과 폭발 위험성에 대한 확실한 대책과 극저온 화물에 수송에 필요한 많은 조선기술과 운항기술상의 문제 해결을 필요로 하게 되었다.

LNGC(LNG Carrier)의 건조기술은 프랑스에 의하여 개발되어, 1980년대 초 일본에 전하여졌고, 1990년대 초 한국에 기술이전 되었다^[1]. 지금까지 프랑스에서 건조된 LNGC는 30여척, 일본은 80여척, 나머지 대부분은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 한국에서 건조되었다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 2015년경이 되면 전세계적으로 350~500척의 LNGC가 운항될 것으로 예측되는데, 이에 따라 많은 LNGC 전문인력의 부족할 것으로 예상되며, 이에 대한 확실한 대책이 세계적으로 필요한 시점이기도 하다. 왜냐 하면 14만톤급 LNGC가 기술미숙이나 해상테러 등에 의하여 폭발사고가 일어날 경우, 단순히 열량만으로 계산하면 히로시마 투하 원폭(20,000,000 Mcal/hr)의 46배 정도의 열량을^[2] 가지므로, 이

러한 불행한 사고가 LNG 수입지나 특히 수출지에서 발생할 경우, 그 피해는 단순히 해당 선박에만 국한되지 않고 전 세계적인 에너지수급과 이에 따른 전력생산에 심각한 불균형을 초래하기 때문이다.

우리나라에서 LNGC 건조시장을 석권하기 전까지 LNGC는 45만톤급이 주를 이루었으나, 현재 한국의 조선소에서는 주로 14만톤급 대형 LNGC를 건조하게 되었다. 이와 같은 대형 LNGC는 공선행해와 만재항해 과정에서 탱크 내부와 외부 대기나 해수와의 온도차가 크기 때문에 끊임없이 열이 침입하므로, BOG가 다량 발생하게 되는데 이를 재액화하기 위한 재액화설비비가 막대하므로 불가불 주기관의 연료로 사용하게 된다. 이와 같은 문제는 화물의 운송계약상 새로운 문제를 야기한다. 즉 화주(한국의 경우는 KOGAS)가 구입한 LNG의 일부가 증발하여 소모되게 되므로 화주의 입장에서는 이에 대한 제한의 필요성을 갖게 된다.

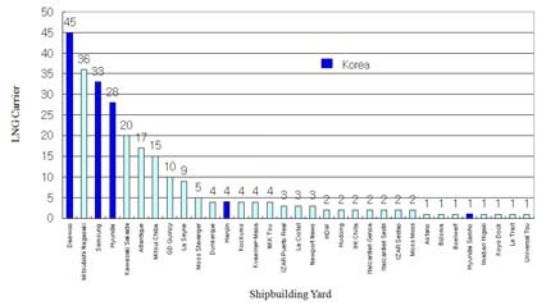


Fig. 1 Numerical statement of LNGC shipbuilding by the each yard

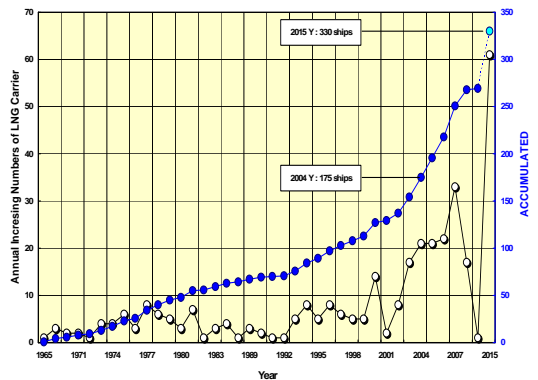


Fig. 2 Prediction of increasing of LNGC crew through the world

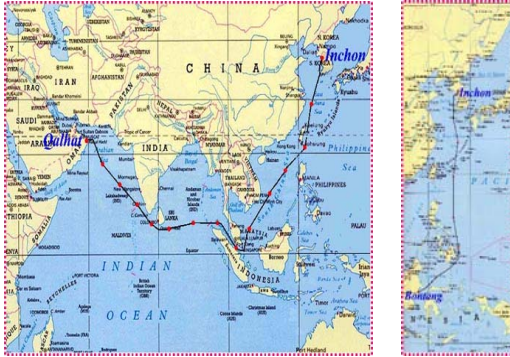


Fig. 3 Transport routes of Korean flag LNGC

이에 관하여 화주와 운송선사간에는 1항차 동안에 증발하여 LNGC의 추진연료로 소모되는 증발 LNG량 전체를 만재항해 일수(편도)로 나누어, 총 화물량에 대하여 BOG량이 0.13 %/day 이하로 되도록 계약하고 있다. 우리나라의 경우 LNG의 주 수입은, Fig. 3에서 보는 바와 같이 말레이시아와 카타르에서 수입되는데, 말레이시아의 경우는 편도 약 6일, 카타르 경우는 약 14일이 소요된다.

LNGC를 성공적으로 건조하기 위하여 많은 조선기술의 축적을 필요로 한다. 즉, 선체강도, 내극저온 재료, 특수용접, 화물창 제작, 주기관 설계, 양하역 설비, 운항기술, 극저온 단열재 등에 관한 최고의 기술을 필요로 한다. 특히 선체의 강도를 유지하고, BOG를 최소화 하여 화물운송계약을 만족시키기 위한 기술은 프랑스도 개발하지 못하던 기술로서, 한국에서 BOG에 관한 문제가 화주-조선소-운항선사 간에 첨예화 되면서, 절실하게 기술적 해결이 필요하게 되었다.

종래 연구로 14만톤급 모스형 LNGC에 대한 열해석^[3]과 멤브레인형 LNGC에 대한 열해석을 학술적으로 수행^{[4]-[6]}하였는데, 특히 BOG 문제해결이 심각해지면서, 정부의 지원으로 S중공업과 이에 대한 집중적인 연구를 수행^{[7],[8]}함으로써, 1항차 동안에 대하여 연속적으로 탱크내부 화물창~탱크벽~단열재~내부선체~선체외판의 전 영역에 대하여 완전한 온도거동을 해석하고, BOG를 정확하게 예측하는 기술을 완성하였고, 선체 강도상의 안정성도 충분히 확인하게 되었다. 이 결과로 인하여 LNGC에 관한 가장 어려운 기술적 난제를 우리나라

가 해결하게 되었으며^[9], 현재 우리나라는 LNGC에 관한 최고의 기술 경쟁력을 확보함으로써, 현재 전 세계 LNGC 조선시장의 85%를 석권하고 있다.

모스형 LNGC의 경우는 탱크가 기하학적인 구조와 수축 팽창시의 특성이 매우 우수하지만 제작기간이 길고, 고가인 단점이 있어 최근에는 대부분 멤브레인형 LNGC를 건조하고 있다. 멤브레인형 LNGC에 대한 1항차 동안의 열해석은 LNGC의 설계단계에서는 물론 확실한 안전향해와 BOG 제어를 위하여 운항기술상에도 매우 중요하다. 이와 같은 관점에서 본 논문에서는 14만 8천톤급 LNGC의 1항차 동안의 열해석 결과를 기초로 한 매우 중요한 몇 가지 운항기술상의 연구결과에 관하여 기술하기로 한다.

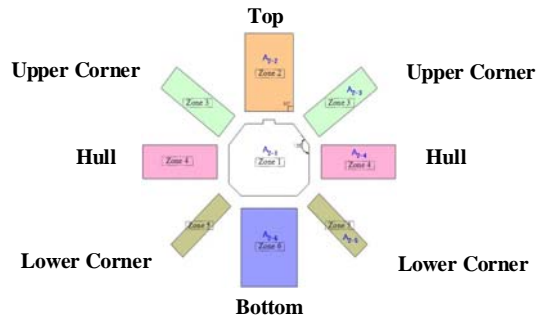


Fig. 4 Spread diagram of LNG tank for thermal analysis

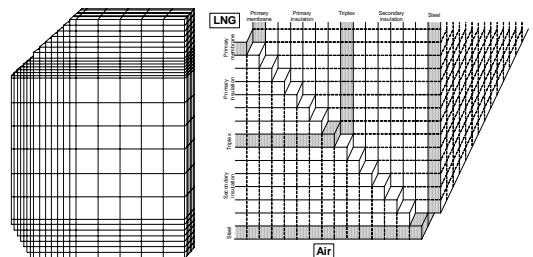


Fig. 5 Mesh generation for tank wall for numerical thermal calculation

2. 열설계 이론

LNGC 열해석을 하기 위한 중심은 LNG 탱크

로서, 본 연구에서는 GTTT사에서 취한 방법과 동일하게, 탱크 내부벽 LNG측 표면을 기준 전열면적으로 하여, Fig. 4와 같이 커퍼담(Cofferdam)을 중심으로 위아래의 측면과 각각의 코너부 포함 9개의 면으로 구성된다. 14만톤급 LNGC는 4개의 탱크로 구성되는데, 탱크 사이에는 선체의 강도를 유지하기 위하여 폭 5m의 커퍼담이 설치된다. 따라서 #2, #3 탱크는 외부의 열적 경계조건과 구조가 똑같은 표준탱크이지만, #1과 #4탱크는 양단에 존재하므로, Fig. 4로 표현되는 각 면의 전개면적이 다르기도 하다. 통상 열수치계산에는 막대한 계산시간이 소요되는 것이 보통으로, 계산의 정확도를 손상시키지 않는 범위에서 계산시간을 단축하고자, 본 연구에서는 #3 탱크의 1/4를 계산영역으로 취하여, Fig. 5에서 보는 바와 같이, 메쉬를 자동으로 생성시켜 필요한 수치계산을 행하였다. 열수치계산을 위한 기본식은 3차원 비발열의 비정상열전도방정식으로 다음식과 같다.

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

LNGC의 표준설계에서 있어서는 1)IMO Ship design condition(대기온도/해수온도⇒45/32℃)과 2)USCG Ship design condition(대기온도/해수온도⇒-18/ 0℃)의 조건하에 설계를 하게 된다. 그러므로 이에 맞추어 식(1)을 해석하기 위하여서는 먼저 수학적인 경계조건을 명백히 해야 한다.

Fig. 6은 이를 나타낸다. LNGC는 공선항해 중에도 탱크 내부 및 단열벽 내를 저온으로 유지하기 위하여, LNG를 전부 하역하지 않고, ①약 3% 이하의 LNG를 적재한 상태로 한국(평택항)을 출항하며, 외부와의 온도차를 줄여 BOG발생량을 줄이기 위하여 탱크내 NG 온도를 되도록 높인다. ②약 5일 후에 NG 온도가 영하 42℃가 되면 BOG를 조절하여 일정히 유지한 다음, ③적화 7시간 전에 Cool-down을 시작하여 탱크 벽과 1차 단열재가 소정온도에 도달하면, ④적화가 시작된다. ⑤적화가 완료되어 출항하더라도 단열재 내부의 온도는 정상상태에 비하여 높으므로 약 5일간 지속적으로 잉여 축열량이 방출된 후, ⑥정상적인 온도분포가 되어 탱크 내 온도가 -162℃ 상태로 만재항해를

지속하여 평택항에 입항하게 된다. 참고로 GTT에 의한 LNGC에 관한 열해석은 만재 정상상태로 항해를 지속할 경우의 온도분포와 BOG만을 계산하는데 비하여, 본 연구는 1항차 전체에 대하여 순차, 연속적으로 열해석을 한다는 커다란 차이점이 있다.

Fig. 7은 이상과 같은 1항차 동안의 탱크내의 온도변화 히스테리시스를 나타낸 것이며, 이 그림에서 설계조건상의 대기 및 해수온도는 최고 45℃에서 영하 18℃ 사이에 놓이게 되며, 우리나라에서 운항하는 LNGC는 0~30℃ 사이에 상태임을 알 수 있다.

그러므로 식(1)에 의한 이산화방정식을, Fig. 6 및 Fig. 7과 같은 경계조건하에 단계적인 수치계산을 함에 있어서, 어느 단계의 마지막 계산결과는 다음 단계의 초기조건으로 이용하게 되며, 실제의 운항조건하의 계산에서는 4시간 간격으로 대기온도와 해수온도가 일정하다고 생각하는 준정상적인 개념 하에서 수치계산을 진행하였다.

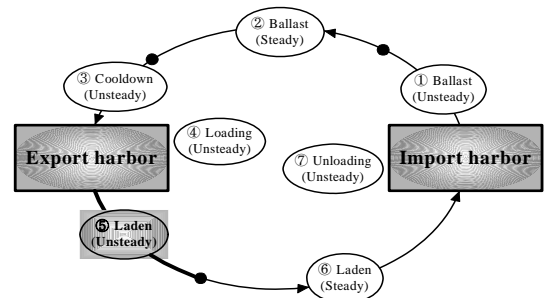


Fig. 6 Thermal analysis modes during 1-voyage

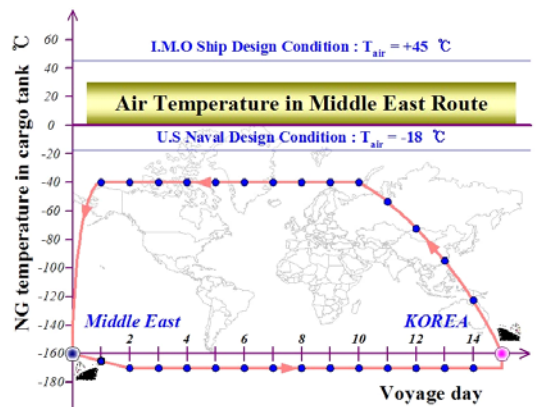


Fig. 7 Thermo-hysteric curve of LNG temperature in LNG tank during 1-voyage

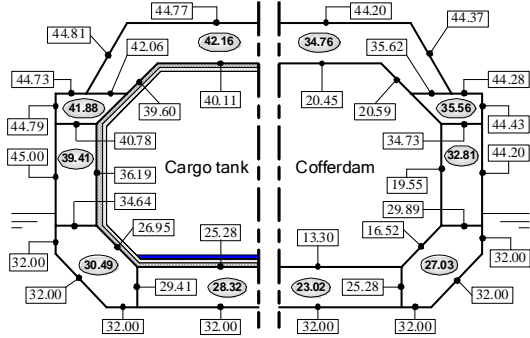


Fig. 8 Temp. distribution at the end of ballast voyage under the IMO S.D.C.(ship design condition)

3. 계산결과

Fig. 8은 IMO 설계조건하에서, 공선항해가 완료된 시점 즉, Cool-down 직전의 #3 탱크 주위의 온도분포의 계산결과를 나타내는데, 탱크에서 외판까지의 온도분포를 소상히 구할 수 있었다.

Fig. 9는 IMO 설계조건하에서 1항차의 탱크 벽에서 외판까지의 온도분포를 계산한 결과를 나타낸다, 이 그림에서 x축은 내판을 중심으로 한 거리로서, 왼쪽 끝은 선체 외판을 x=550 mm 위치는 탱크 벽을 나타내며, Fig. 9에서 보는 바와 같이 공선항해 끝난 후가 전체적으로 가장 높은 온도분포를 이루다가, Cool-down에 의하여 특히 탱크 벽과 1차 단열재 내부온도가 급강하하고, 적하과정과 만재 후 약 5일이 지나면 가장 낮은 정상 온도분포를 이루며 우리나라에 입항함을 알 수 있다. 식(1)을 기본식으로 하여 Fig. 9와 같이 각 위치에서의 온도분포가 구하여지면, 열플럭스 q (kW/m^2hr)는 다음 식에 의하여 구하여진다.

$$q_{in} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=550} \quad (2)$$

열플럭스가 구하여지면, 주어진 시간간격(4시간) 동안에 유입하는 열량은 다음 식으로 구하여지며,

$$Q_{in}' = \int_{i=1}^t q_{in} dt \quad (3)$$

다시 위식을 Fig. 4의 9개의 단면에 대하여 그

합을 구하면, #3 탱크의 1/4에 유입하는 열량을 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_{in} = \sum_{i=1}^{i=9} A_i \int_0^t q_{in} dt \quad (4)$$

Fig. 10은 표준설계조건하에서 #3 탱크 전체에 유입하는 총 열량 $Q(kW)$ 를 구한 결과를 표시한 것으로서, Cool-down과 적하의 급냉각과정에서 1차, 2차 단열벽 내에 잉여로 축열된 열량 때문에 순간적으로 가장 많은 열량이 탱크내로 유입하는 것을 확인할 수 있다.

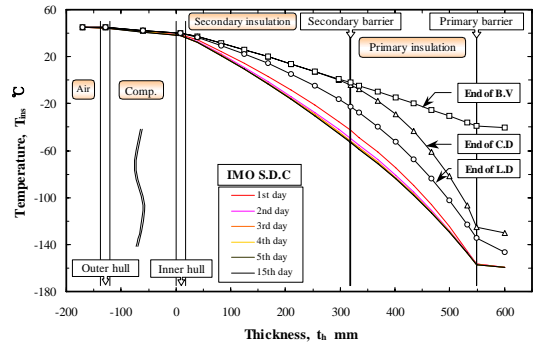


Fig. 9 Temp. behavior in the top side wall during 1-voyage under the IMO S.D.C.

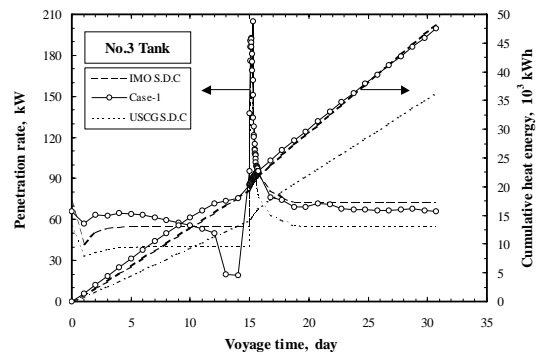


Fig. 10 Total heat energy penetrated into No.3 tank during 1-voyage

Fig. 11은 #3 탱크의 주위 전체 단열재 안에 축열된 열량의 변화를 나타낸다. Fig.9와 같이 가장 낮은 단열재 내의 온도분포 즉, 만재 정상상태의 온도분포에 비하여 잉여로 축열된 전체 열량의 변화를 나타낸다. x축은 평택항을 출항(x=0)한 이

후의 일자의 경과를 나타낸다. 공선출항 후 약 5일 후 최대 2,000 kWh의 열량이 #3 탱크 주위의 단열재에 축열되었다가, Cool-down 과정과 적화과정에서 약 850 kWh 까지 급속도로 감소한 후, 만재 출항 후 약 5일이 지나면 잉여 열량이 전부 사라지고 만재 정상상태에 도달하여 귀항하게 된다.

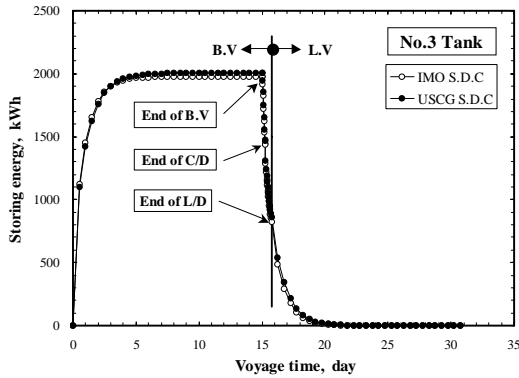


Fig. 11 Total energy stored in insulation material around #3 tank

4. 실선운항 데이터와의 비교 검토

송, 김, 이 등^{[10],[11]}은 D해운의 A호의 실제 운항 Log-book상의 대기온도, 해수온도, 선속에 대하여 4시간으로 간격으로, Fig. 6의 각 운항모드에 대하여, 준정상적인 수치계산을 수행하였다. LNGC에는 LNG 탱크 각부의 온도나 압력을 측정 감시할 수 있는 C.T.C 모니터링시스템이 장비되어 있는데, Fig. 12는 카타르에서 만재 출항 후 1차 단열재와 2차 단열재 경계에서 측정된 온도 값과 계산치를 비교한 것으로 양자가 정성적으로는 물론 정량적으로도 매우 잘 일치함을 확인하였다. 공선상태로 우리나라 수입항을 출항한 LNGC는 약 5일간의 비정상 온도상승기간과 정상온도에 도달한 후의 공선항해 기간 중 외부로부터 침입한 열량으로 끊임없이 BOG가 발생하고, 이에 따라 탱크 내 압력도 상승한다. Fig. 13은 매일 정오에 측정된 탱크 내 실제 압력변동으로서 정상적인 압력 작동 범위 내 또는 이하의 압력을 나타내고 있고 안전상 아무런 문제가 없으며, 안전밸브의 작동압

력인 125.3 kPa보다는 훨씬 낮은 압력임을 알았다. 실제 LNGC의 운항에서는 공선항해 중 탱크 내 압력과 온도상승을 억제하기 위하여 정오에 정기적인 Cool-down을 실시하기도 한다. Fig. 14는 본 연구결과를 기초로 한 이상적인 Cool-down에 의한 NG 온도제어와 압력제어 패턴을 나타낸다. 과도한 Cool-down은 외부와 탱크 내부 간의 온도차를 쓸데없이 크게 하여 BOG를 오히려 증대시키는 우려 범할 수도 있다.

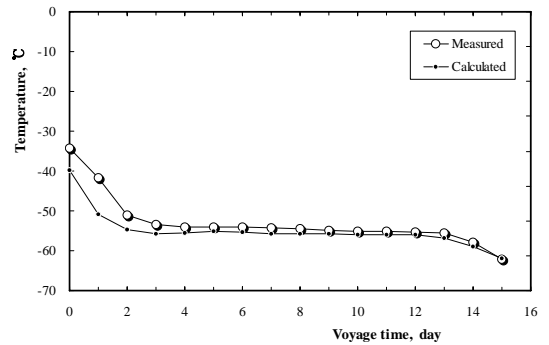


Fig. 12 Comparison of temperature behavior at secondary barrier of side wall during laden voyage

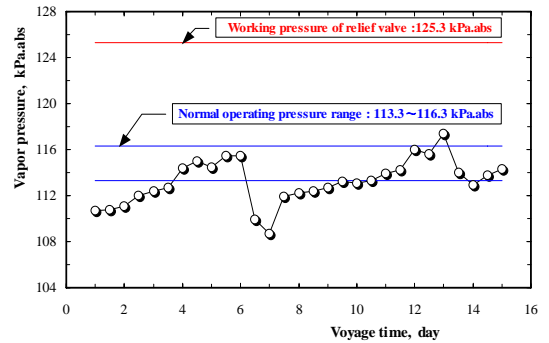


Fig. 13 NG pressure in No.3 tank during the ballast voyage

Fig. 10에서 기술한 바와 같이 #3 탱크에 각 운항모드별로 침입하는 열량을 계산하고, Fig. 4의 전개면적도에서 기술한 바와 같이 각 전열면적에 비례하여 #1, #2, #4 탱크에 유입하는 총열량을 계산하면, 이 값이 결국 1항차 동안에 유입하는 총열량이 된다. 증발잠열은 물론 현열까지를 포함한 증발량 BOG는 다음 식으로 정의된다.

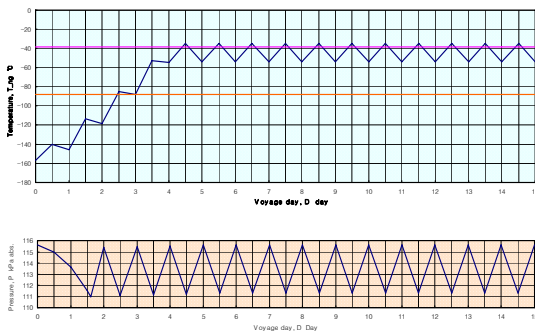


Fig. 14 NG temp and press variation during the ballast voyage

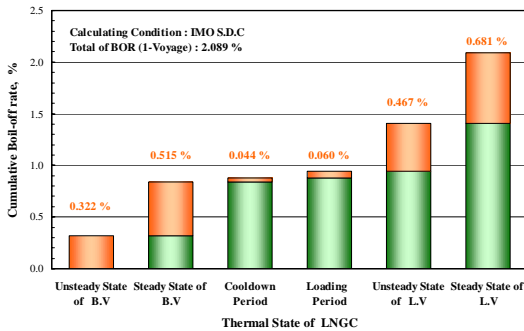


Fig. 15 BOR through the 1- voyage under the IMO S.D.C.

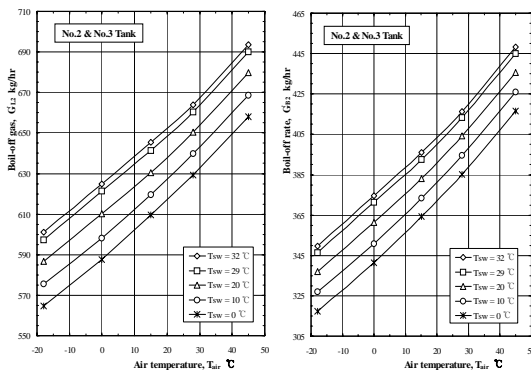


Fig. 16 The simple BOG and BOR prediction method by graph

$$G_{BOG} = \frac{(V_1 \gamma_1 - V_2 \gamma_2) H + V_2 \gamma_2 C_{pL} (T_2 - T_1)}{H} \quad (5)$$

실제의 LNGC는 만재항해 시 적재율은 98 %이므로, 만재항해일수를 기준으로 한 BOG의 비율

즉 BOR(%/day)은 다음식과 같이 정의된다.

$$BOR = \frac{(V_1 \gamma_1 - V_2 \gamma_2) H + V_2 \gamma_2 C_{pL} (T_2 - T_1)}{V_{98\%} \gamma_{1L} H n} \times 100 \quad (6)$$

Fig. 15는 Fig. 6의 1항차 동안 각각의 운항모드 기간 중에 발생하는 BOR값과 누적치를 나타내고 있다. IMO 설계조건하에서 1항차 동안에 발생하는 BOG의 만재항해일수 기준 BOR값은 2.089 %로서 충분히 운항계약상의 값 이내임을 확인하였다. D해운의 A호의 실제 운항상의 BOR 값도 설계치 이하의 값이었음을 부기한다.

LNGC의 승선요원의 입장에서 자기가 현재 승선 운항하고 있는 LNGC에 대하여 당직시간 동안의 대기온도, 해수온도 및 선속의 변화에 대한 BOR의 순간치를 예측하는 것은 안전운항의 측면에서는 매우 중요하다고 생각된다. Fig. 16은 이러한 관점에서 해수온도를 파라미터로 하여, 14만톤급 멤브레인형 LNGC가 설계선속으로 운항할 경우, 1항차 동안에 발생하는 BOG와 BOR을 도표로서 구할 수 있는 하나의 새로운 방법을 제시하고 있는데, 정확도는 약간 떨어지겠지만 복잡한 수치계산을 피하고 수계산만으로도, 자기가 현재 운항중인 LNGC에 대한 BOR 값을 예측할 수 있는 좋은 방법이라고 사료된다.

5. 결 론

14만8천톤급 멤브레인형 LNGC에 관한 독자적인 열설계기술 개발을 위하여 3차원 수치계산수법으로, IMO S.D.C, USCG S.D.C 그리고 실제 운항조건하에서, 화물의 적재 운항상태를 고려한 1항차 동안의 준정상적인 연속 수치계산 추적을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) LNGC 열해석을 하기 위하여서는, 표준탱크인 #3 탱크의 1/4만을 계산영역으로 설정하여 계산을 수행한 후, 이 결과를 확장하여 #3 탱크는 물론 #1~#4 탱크 전체를 예측하여도, BOG의 계산 정확도를 거의 손상시키지 않고 정확한 예측이 가능함을 알았다.

(2) 수치계산을 위한 경계조건을 기준으로 운항

모드를 나누면, ①공선 비정상열전달, ②공선 정상 열전달, ③비정상 Cool-down, ④비정상 적화과정, ⑤만재 비정상열전달 및 ⑥만재 정상열전달의 기간의 6-운항모드로 분류 할 수 있고, 이에 상응하는 화물창 내 LNG와 NG의 “온도히스테리시스 곡선”을 구할 수 있었다.

(3) 수치계산 결과를 통하여 임의 시각에서 탱크의 내부~외판까지 전체의 온도분포를 구하고, 이에 근거한 열프럭스 및 전체 침입열량, BOG 및 BOR을 순차적으로 구하는 방법을 제시하였다.

(4) 7시간의 Cool-down 기간에는 탱크벽과 1차 단열재 내부의 온도만이 주로 하강하며, 공선 출항과 만재 출항시 비정상의 회복에 걸리는 기간(시정수)는 약 5일이 소요됨을 알았다.

(5) 공선 출항 후 약 5일이 되면 최대 2,000 kWh의 열량이 #3 탱크 주위의 단열재에 축열되어 일정히 유지되다가, Cool-down 과정과 적화과정에서 약 850 kWh 까지 급속도로 감소한 후, 만재 출항 후 약 5일이 지나면 잉여 축열량이 전부 소멸되어, 비로소 만재 정상상태에 도달한다.

(6) D해운의 A호의 실제 운항조건(대기온도, 해수온도, 선속)하의 4시간 간격의 준정상적인 수치계산에 의한 공선항해중의 단열벽(중간위치) 내의 온도거동 계산결과와 실측결과는 정량적으로 매우 잘 일치하였다.

(7) 공선항해 중 BOG를 최적으로 제어하기 위하여 매일 정오에 본선 승무원들에 의하여 조작되는 Cool-down 조작에 대하여, 계산결과에 근거한 최적의 온도와 압력제어 표준모형을 제시하였다.

(8) 실제 운항 중 운항조건(대기온도, 해수온도, 선속)을 알면, 본선 승무원에 의하여 간략히 14만 8천톤급 멤브레인형 LNGC의 1항차 동안에 발생하는 BOG와 BOR을 도표로서 구할 수 있는 방법을 제시하였다.

후 기

이 연구는 산자부 및 삼성중공업의 연구비 지원에 의하여 연구가 수행되고, 대한해운의 실선 데이터 제공에 의하여 비로소 실용성 입증 가능성이

있으며, 그 결과를 인정받아 산자부/과기부/한국일보 사로부터 1999년도 『한국의 100대 기술』에 선정되었음을 여기에 밝히며, 이에 대하여 다시 한번 깊이 감사드리는 바입니다.

참고문헌

- [1] Pierre Jean and Henry Petit, “Methane by sea, A history of french methane carrier technics”, P. Tacussel Editeur Marseille, 1998.
- [2] Lehr, Fay, Quest & Vallejo Studies, “SANDIA Report, Guidance on Risk Analysis and Safety Implications of a Large Liquefied Natural Gas(LNG) Spill Over Water” SAND-2004-6258.
- [3] 김용모, 고상철, 천병일, 김경근, “초저온 LNG선의 열설계에 관한 연구”, 한국박용기계학회논문집, 제17권, 제4호, pp. 227~236 1993.
- [4] 송성욱, “Membrane Type LNG선의 냉각 및 적화과정에서의 비정상 열해석에 관한 연구”, 한국해양대학교 대학원 박사학위논문, 2000.
- [5] 전현필, “멤브레인방식 액화 천연가스 운반선의 공선 항해시 열해석에 관한 연구”, 한국해양대학교 대학원 박사학위논문, 2000.
- [6] 이정혜, “만재항해중 비정상 열해석에 의한 멤브레인형 LNGC의 BOR 산정에 관한 연구”, 한국해양대학교 대학원 박사학위논문, 2003.
- [7] 김경근 등, “LNG선용 탱크의 열설계 및 제작 기술”, 공기반과제, 통상산업부, 1997.
- [8] 김경근 등, “GTT MARK-III MEMBRANE TYPE LNG선 열설계 기술개발-SHI HNO 1207/1258/1259선의 열해석(BOG와 BOR의 계산 및 평가)”, 삼성중공업, 1997.
- [9] 김경근, “한국의 100대 기술”, 통상산업부, 과학기술부, 한국일보사 공동, 1999.
- [10] 송성욱 등, “Membrane Type LNG선의 3차원 정상상태 온도분포 및 BOR 계산 프로그램

램의 개발에 관한 연구”, 한국박용기관학회지, 제23권 제2호, pp. 30~39, 1999.

- [11] 이정혜 등, “Membrane Type LNG선의 3차원 정상상태의 온도분포 및 BOR 계산 프로그램 개발에 관한 연구”, 공기조화냉동공학회, pp. 1224~1228, 1998.

저 자 소 개



Chang-fu Jin(金昌福)

1969년 10월생, 1993년 연변대학교 농기학과 졸업, 2004년 충북대학교 농업기계학과 대학원졸업(공학석사), 2007년 한국해양대학교 기관시스템공학부 대학원졸업(공학박사), 2007~현재 한국해양대학교 해사대학 열공학연구실 Post Doc. 연수중.



김정근(金京根)

KMU 해사대학 재직 중. 동경대학 공학부 기계공학과 석사학위(1979), 박사학위(1985)를 받음. 주 관심분야는 이젝터를 이용한 각종 프랜트 설비, LNG 선박의 열설계, 저온진공 상태하에서의 건조분야를 연구함. 최근 저온진공건조 기술에 의한 생체 건조와 건조장치를 주로 연구중 임.



오 철(吳喆)

1958년생, 1983년 한국해양대학교 기관학과 졸업, 1985년 한국해양대학교 대학원 박용기관학과졸업(공학석사), 1998년 북해도대학 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 현재 한국해양대학교 해사대학 기관시스템공학부 교수.