

중동항로 취항 멤브레인형 LNGC의 BOG 예측에 관한 연구

장은규*, 정연철**

*한국해양수산연수원 조교수 **한국해양대학교 운항시스템공학부 교수

Prediction Method of the BOG for the Membrane Type LNGC in Middle East Route

Eun-Kyu Jang*, Yun-Chul Jung**

*Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 606-080, Korea

**Division of Ship Operating Systems Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : LNG 운반선은 항해중 외부로부터 다량의 열 침입으로 인해 많은 BOG가 발생하며 통상 이는 선박엔진의 연료로 사용된다. 화주의 입장에서 이러한 BOG의 발생과 소비는 화물의 손실을 의미하며, 따라서 선주와 화주 사이에는 BOR(boil off rate)에 대해 만선항해를 기준으로 0.15%/day 이하가 되도록 운송계약을 체결한다. LNG 운반선의 항해사관 입장에서는 자신이 승무하고 있는 선박의 BOR에 대한 정확한 지식을 바탕으로 선박을 운항할 필요가 있으나 실제로는 막연한 경험에 의존하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 선체온도분포 및 외부로부터의 침입열량에 관한 정밀 열설계 기술을 토대로 본선의 해기사들이 보다 간편하게 BOG를 예측할 수 있는 간단한 모델을 제시하였다. 그리고 개발된 모델을 사용하여 연구대상 선박의 실제 기상조건을 토대로 만선 및 공선항해에 대하여 각각 BOR을 계산하였으며 이를 실측자료와 비교, 검토하였다. 본 연구에서 제시된 BOG 예측방법은 현재 운항중인 LNGC에서 BOG를 관리하는 유용한 도구로 사용될 것으로 기대된다.

핵심용어 : LNGC, BOG, BOR, 멤브레인, 공선항해, 만재항해

Abstract : LNGC suffers a great heat inflow during navigation and this heat inflow inevitably boils off the LNG. The boiled off gas(BOG) is normally consumed as a fuel for ship's engine. The boiled off LNG means a loss of cargo during transportation from the viewpoint of shipper. Therefore, a contract between shipper and ship operator is made on the limit of boiled off rate(BOR) under 0.15 %/day based on laden voyage. This contract on BOR limit requires that ship's officer has a correct knowledge on BOR for his ship. But, in most cases ship is operated based on only officer's experiences. In this study, author presented a simple model to predict the boiled off gas(BOG) during navigation based on the existing precision heat exchange design technology about the heat distribution on the hull and heat inflow from outside through the hull. The BOG is calculated for ballast and laden voyage based on the actual weather conditions and verified by comparing with the measured BOG for the study ship. The study ship is a membrane type LNGC which is now servicing in Middle east route. Thus, the BOG prediction method which is presented in this study is expected to be used for an useful tool to manage the BOG in now servicing LNGC.

Key words : LNGC, BOG, BOR, membrane, ballast voyage, laden voyage

1. 서 론

현재 운항중인 선박의 종류 중에서 LNGC(LNG Carrier)는 가장 선가가 높고 고부가 가치를 갖는 선박이다. 조선산업의 꽃이라 불리는 LNGC를 설계하고 그 선박의 성능을 산정하는데 있어서 여러 요소들과 더불어 BOG 발생량은 매우 중요한 고려의 대상이며 BOG 발생량 저감은 가장 핵심적인 기술이다.

LNGC에서 증발한 다량의 LNG를 재응축(re-liquified)하기

위한 액화설비는 그 규모가 매우 커서 설치비용이 과대하고 효율적이지 못하므로 LNGC에서는 BOG를 선박의 추진 연료로 대부분 사용하고 있다. 따라서 화주의 입장에서 증발량만큼 화물의 손실이 발생하는 것이므로, 운항선사와 화주 간에는 총 발생하는 BOG에 대하여 만재항해일자 기준 0.15%/day 이하로 유지할 것을 화물운송계약서 상에 명시하고 있는 경우가 많다.

운항항로 상의 해수 및 대기온도에 따라 증발량은 수시로 변화하므로, 실선에서 정밀한 열계산을 수행하기에는 계산기 환

경은 물론 정밀계산에 소요되는 시간과 데이터의 해석법 등이 본선 해기사의 입장에서 매우 어려워 보다 간편하면서도 비교적 정밀하게 BOG량을 예측할 수 있는 방안의 연구, 개발이 필요하다. 따라서 본 연구는 LNGC의 기존 열 설계 관련 연구결과를 토대로 Noon Report에 의거하여 대기온도, 해수온도 및 선속이 1일 동안 일정히 유지된다고 가정함으로써, 1일 동안 발생할 BOG량을 예측할 수 있는 방안을 연구하였고, 나아가 공선행해 및 만재항해 기간 동안의 BOG량을 계산할 수 있는 방법을 확립하였다.

2. 표준탱크에 대한 침입열량 분석법

2.1 연구대상 선박의 제원 및 화물 탱크 치수

본 연구의 대상선박은 현재 운항중인 국적 LNGC 중에서 GT-96방식 138,000 m³급 멤브레인형 LNGC를 설정하였다. 선체 전장은 280.0 m이고 선체의 최대폭은 43.0 m로, 선박의 상세한 제원은 Table 1에 표시하였다.

Table 1 Basic dimension for the study LNGC

Item	Dimension
length overall	280.0 m
length between perpendiculars	268.5 m
moulded breadth	43.0 m
moulded depth	26.2 m
moulded scant. draft	12.0 m
moulded design draft	11.3 m
service speed (at design draft)	20.3 m
100% cargo tank volume	138,333.0 m

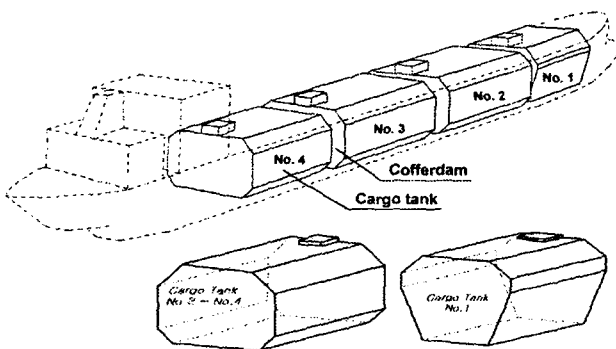


Fig. 1 Arrangement of cargo tanks and cofferdams of membrane type LNGC

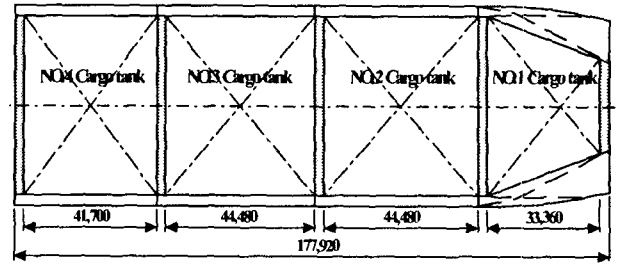


Fig. 2 Top view of cargo tanks and cofferdams

Fig. 1은 대상 LNGC의 개략적인 모형을 나타낸 것으로, 4개의 화물탱크가 있고 각 화물탱크 사이와 1번 화물탱크의 선수방향, 4번 화물탱크의 선미 방향에 총 5개의 코퍼담이 존재한다. Fig. 2는 화물탱크와 코퍼담의 상면도를 나타내었다. 화물탱크의 용적은 No.1 화물탱크는 21,607.9 m³로 가장 작고, No.2 화물탱크의 용적은 39,771.4 m³, No.3 화물탱크의 용적은 39,749.4 m³, No.4 화물탱크의 용적은 37,204.3 m³로서, 총 용적은 약 138,333.0 m³이다.

그리고 화물탱크를 살펴보면 선수로부터 2, 3번 화물탱크는 코퍼담을 사이에 두고 종방향 및 횡방향으로 열적 경계조건이 대칭이 된다. 그러나 1, 4번 화물탱크는 2, 3번 화물탱크와는 달리, 엄밀하게는 종 방향의 열적 경계조건을 대칭으로 볼 수 없으나, 1, 4번 화물탱크가 코퍼담을 사이에 두고 있고 횡단면의 크기에 큰 차이가 없기 때문에 대칭으로 가정하여도 무방하다.

코퍼담의 형상은 횡방향으로 화물탱크의 횡단면과 같으나, 종방향으로는 화물탱크의 길이에 비해 그 길이가 매우 짧다. 본 연구에서는 계산의 복잡성을 피하고 단순 정확히 하기 위하여 가장 크면서도 전형적인 No.2 화물탱크를 표준탱크로 정하여 계산하였다. Fig. 3은 표준탱크인 No.2 화물탱크의 상세치수를 나타내었다.

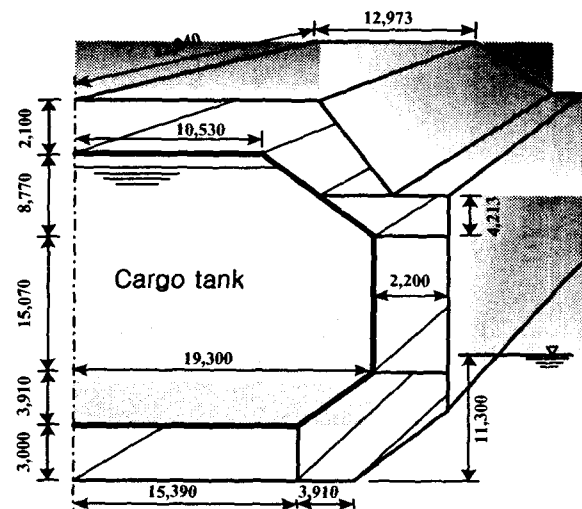


Fig. 3 Dimension of the quarter of No.2 tank (standard tank)

2.2 침입열량 계산을 위한 각 화물창의 전개도 작성법

LNGC 전체의 BOR(Boil Off Rate) 해석을 위해서는 계산대상인 표준화물탱크의 전개도로부터 전열면적을 계산하고, 동일한 방법으로 나머지 각 화물탱크의 면적을 구하여 계산되어진 면적비를 적용함으로써 BOG 해석이 가능하다(이정해, 2003).

LNGC의 설계사인 GTT에서 계산하는 방식에 의하여 No.2 화물탱크의 전개도를 나타내면 Fig. 4와 같고, Fig. 4에 의하여 나누어진 6개 영역에 대하여 각 화물탱크의 면적을 계산한 결과 및 1차 멤브레인의 탱크측 내표면을 기준으로 한 전개면적의 계산결과를 Table 2에 나타내었다.

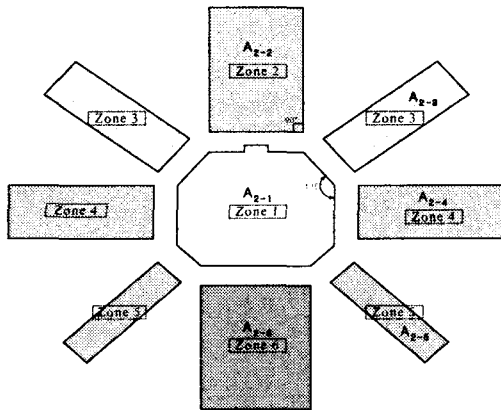


Fig. 4 Numbering of cargo tank zone for thermal calculation

No.2 화물탱크와 No.3 화물탱크는 그 상세 치수가 동일하므로 각 부위별로는 물론, 전체 내표면 기준 전열면적의 합도 7,199.5 m²로서 같은 값을 가진다. Fig. 2에서 나타내었듯이, 화물탱크 중 크기가 제일 작은 No.1 화물탱크는 도합 4,825.6 m²의 전열면적을, No.2 화물탱크에 비하여 선체 종방향으로 길이만 짧은 No.4 화물탱크는 도합 6,871.6 m²의 전열면적을 가져, 연구대상 LNGC의 화물탱크에 대한 전체 전열면적은 26,096.2 m²이다. Table 2는 표준탱크에 대한 다른탱크에 대한 면적을 계산한 것으로, 표준탱크인 No.2 화물탱크의 영역별 전열면적을 100 %로 가정하고 타화물탱크의 전열면적과 비교하였다. No.1 화물탱크의 코퍼담측 전열면적은 No.2 화물탱크의 코퍼담측 전열면적의 73.9 %, 천장부는 42.3 %, 상부측 코너는 76.4 %, 측벽측은 77.8 %, 하부측 코너는 76.4 %이고, 바닥은 52.6 %의 값으로, No.1 화물탱크의 전체 전열면적은 No.2 화물탱크의 전체 전열면적의 67.0 %에 해당한다. No.4 화물탱크는, No.2 화물탱크에 비하여, 선체 종방향으로 그 길이만 짧으므로 코퍼담측의 전열면적은 No.2 화물탱크와 동일하나, 나머지 5개 영역에서의 전열면적은 짧은 길이만 고려되어 No.2 화물탱크의 93.7 %가 되며, 전체적으로는 No.2 화물탱크 전열면적의 95.4 %의 값을 갖는다. 이상에서 계산한 각 화물탱크별 전열면적은 Fig. 5에 나타내었고, 각 화물탱크별 용적은 Fig. 6에 나타내었다.

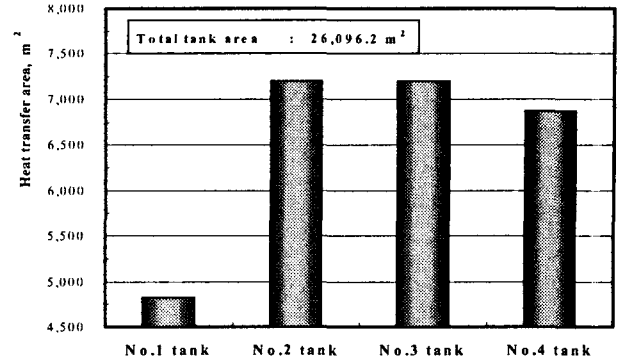


Fig. 5 Comparison of heat transfer area for 4 tanks

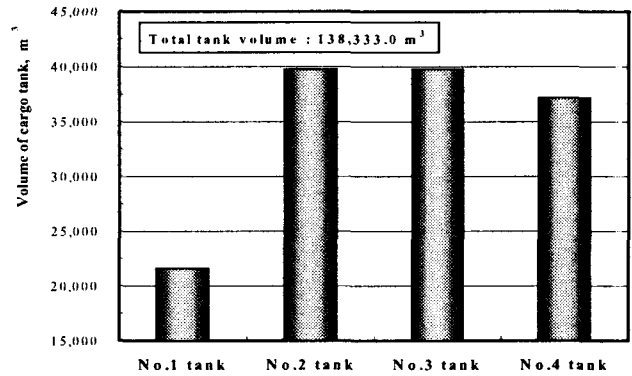


Fig. 6 Comparison of volume for 4 tanks

Table 2 Area ratio of each zone for standard tank

Zone	Items	Calculating equation	Area Ratio : A_{2-i} / A_{2-1}			
			No.1 m ² (%)	No.2 m ² (%)	No.3 m ² (%)	No.4 m ² (%)
A ₂₋₁ Zone 1 (Cofferdam)	No.1	$\frac{\{(10.11+1.34) \times 8.77 \div 2 + (10.11+6.2) \times 3.91 \div 2 + (10.11 \times 15.07)\} \times 2}{\{(10.53+19.3) \times 8.77 \div 2 + (19.3+15.39) \times 3.91 \div 2 + (19.3 \times 15.07)\} \times 2} =$	1,447.5 (73.9)	1,957.9 (100.0)	1,957.9 (100.0)	1,957.9 (100.0)
	2/3	$\frac{\{(10.53+19.3) \times 8.77 \div 2 + (19.3+15.39) \times 3.91 \div 2 + (19.3 \times 15.07)\} \times 2}{\{(10.53+19.3) \times 8.77 \div 2 + (15.39+19.3) \times 3.91 \div 2 + (15.07 \times 19.3)\} \times 2} =$				
	4	$\frac{\{(10.53+19.3) \times 8.77 \div 2 + (15.39+19.3) \times 3.91 \div 2 + (15.07 \times 19.3)\} \times 2}{\{(10.53+19.3) \times 8.77 \div 2 + (15.39+19.3) \times 3.91 \div 2 + (15.07 \times 19.3)\} \times 2} =$				
A ₂₋₂ Zone 2 (Top side)	1	$(21.06+2.68) \times 33.36 \div 2 \times 1 =$	396.0 (42.3)	936.8 (100.0)	936.8 (100.0)	878.2 (93.7)
	2/3	$(10.53 \times 2) \times (22.24 \times 2) \times 1 =$				
	4	$(21.06 \times 41.7) \times 1 =$				
A ₂₋₃ Zone 3 (Upper corner)	1	$(34.6027 \times 12.182) \times 2 =$	843.1 (76.4)	1,103.1 (100.0)	1,103.1 (100.0)	1,034.3 (93.8)
	2/3	$\{12.4 \times (22.24 \times 2)\} \times 2 =$				
	4	$(12.402 \times 41.7) \times 2 =$				
A ₂₋₄ Zone 4 (Hull side)	1	$(15.07 \times 34.6027) \times 2 =$	1,042.9 (77.8)	1,340.6 (100.0)	1,340.6 (100.0)	1,256.3 (93.7)
	2/3	$\{15.07 \times (22.24 \times 2)\} \times 2 =$				
	4	$(15.07 \times 41.7) \times 2 =$				
A ₂₋₅ Zone 5 (Lower corner)	1	$(34.6027 \times 5.4312) \times 2 =$	375.9 (76.4)	492.0 (100.0)	492.0 (100.0)	460.9 (93.7)
	2/3	$\{5.5296 \times (22.24 \times 2)\} \times 2 =$				
	4	$(5.5296 \times 41.7) \times 2 =$				
A ₂₋₆ Zone 6 (Bottom side)	1	$(30.78+12.4) \times 33.36 \div 2 \times 1 =$	720.2 (52.6)	1,369.1 (100.0)	1,369.1 (100.0)	1,283.5 (93.7)
	2/3	$(15.39 \times 2) \times (22.24 \times 2) \times 1 =$				
	4	$(30.78 \times 41.7) \times 1 =$				
Total inner area of primary membrane (m ²)			4,825.6	7,199.5	7,199.5	6,871.6

2.3 침입열량 계산을 위한 1항차 열모드 분석법

LNGC 운항중 방열재(insulation materials)를 통하여 화물탱크 내부로 침입한 열은 탱크내부의 LNG로 흡수되어 화물의 BOG 발생을 촉진시킨다. Fig. 6은 LNGC의 1항차 중 발생하는 열적 운항모드를 나타내었다. 열적 운항모드는 공선항해, 쿨다운(cool-down) 과정, 적하(loading) 과정과 만재항해로 구분할 수 있다.

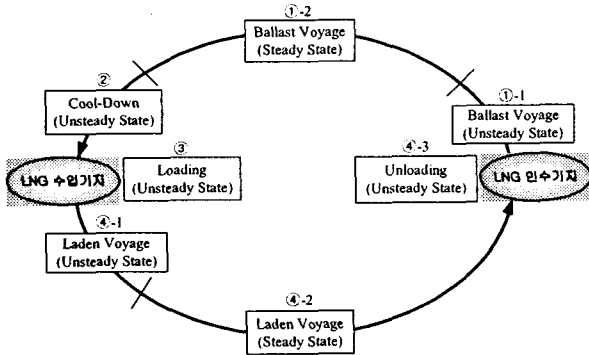


Fig. 7 Thermal analysis mode during a voyage for membrane type LNGC

Fig. 6에서 ①-1 비정상 공선항해(unsteady ballast voyage)는 국내의 LNG 수입기지에서 LNG를 하역한 후, 화물 탱크 내를 저온상태로 유지하는 쿨다운을 위한 적정 coolant 만을 싣고서 거의 공선상태로 출항함으로써 선체, NG 및 방열재의 온도가 비정상적으로 상승하는 구간으로 약 4~5일 정도이며, 이 시간이 지나면 방열구획의 급격한 온도 변화가 일어나지 않는 ①-2 정상 공선항해(steady ballast voyage)를 하게 되는데, 화물의 적재를 위한 쿨다운 직전까지의 항해기간에 해당하는 열해석 모드이다.

② 쿨다운 과정은 수입기지에서 -162 °C LNG를 외부의 열침입으로 인해 온도가 상승해 있는 화물탱크에 갑자기 적하할 경우 화물과 화물탱크 내부의 큰 온도차로 인하여 발생할 수 있으므로, 이러한 열 충격을 제거하기 위하여 LNG 수입기지에 도착하기 직전에 수행하는 과정으로 LNG 탱크 하부에 있는 -162 °C LNG를 스프레이 노즐을 통하여 탱크 상부에 분무함으로써, 화물 탱크의 내부 온도를 화물적재를 위한 적정온도인 상하부 평균 -130 °C로 낮추는 과정의 열해석 모드이다.

③ 적하과정은 LNGC가 수입기지에 도착하여 -162 °C LNG를 적하함으로써, 공선항해 기간중 선체 외판과 방열재에 축적된 열량이 본격적으로 제거되는 기간 동안의 비정상 열해석 모드이다.

④-1 비정상 만재항해(unsteady laden voyage)는 LNG를 적재하고 수입기지를 출항한 이후의 과정으로, 적하과정동안 모두 제거되지 못하고 방열재 내부에 잔존한 축열량이 제거되기 위하여 지속적으로 온도하강을 계속하는 비정상상태 구간으로 약 4~5일정도가 소요된다. ④-2 정상 만재항해(steady laden voyage)는 비정상 만재항해가 종료된 시점 이후로 정상상태에

도달하여 인수기지를 향하여 만재상태로 항해하는 기간 동안의 열해석 모드이다. 국적 LNGC가 실제로 운항하고 있는 항로는 편도 항해기간이 약 8일의 단기간이 소요되는 동남아시아 항로와 약 15일이 소요되는 중동 항로가 있다. 동남아시아 항로는 비교적 항해기간이 긴 중동 항로의 경우보다 항해기간이 짧으므로, 열해석 모드 상에서 볼 때 정상 공선항해 기간과 정상 만재항해 기간이 매우 짧게 나타나는 특징이 있다.

2.4 표준설계조건하에서 표준탱크의 BOG 산정

LNGC의 선체 외측에는 해수와 대기가 접하고 있어 화물탱크내의 저온 유체인 LNG와는 온도구배가 형성되며, 화물탱크를 둘러싸고 있는 코퍼담, 일·이차 방열구획 및 밸러스트 탱크 등의 이중격벽에 해당하는 밀폐공간에는 3차원 대류도 일어나게 되며, 다음으로 LNGC의 열계산을 하기 위해서는 선체외측은 대기 또는 해수와 접하고 있어 강제대류 열전달이 일어나고, 화물탱크 내부는 단열벽이 NG 또는 LNG와 접하고 있어 자연대류 열전달이 일어난다. 이와 같은 복잡한 열계산과 선체의 구조해석은 매우 어렵고 복잡하므로 본 논문에서는 기존의 연구자료를 이용하여 선박 운항적 측면에서 접근하였다.

선박 및 해상구조물의 설계를 위한 외부온도 조건을 Table 3에 정리하였고, 극저온 조건에 해당하는 USCG (United States Coast Guard) 조건은 대기온도가 -18 °C이고 해수온도가 0 °C인 가장 낮은 온도조건으로서 저온취성을 고려한 조건이며, IGC 코드에 제시된 IMO 조건(IMO design condition)은 열대고온조건으로 BOG가 가장 많이 증발하는 조건으로 대기온도 45 °C, 해수온도 32 °C의 조건이다. 본 연구대상 선박이 취항하는 항로의 조건은 이러한 선박의 설계조건 범위 내에 있으며, 본 연구에서는 대기온도의 범위를 -18 ~ 45 °C, 해수온도 0 ~ 32 °C를 표준조건으로 하였다. 따라서 정상상태의 해석을 위한 상세 열계산을 위한 조건으로서, 대기온도가 0 °C, 10 °C, 20 °C, 29 °C와 32 °C인 경우와 해수온도가 -18 °C, 0 °C, 15 °C, 28 °C와 45 °C인 경우로 나누어, 공선항해 및 만재항해에 대하여 각각 25가지의 열계산 조건으로 나누었다. 이때 초기조건으로 코퍼담의 온도는 5 °C로 일정하다고 가정하였고, 만재항해시 탱크내에 전체 화물탱크 용적의 98.5%, 공선항해시는 1.2%가 적재되어 있다고 가정하였다. 비정상 상태인 쿨다운과 적하과정 중에 발생하는 열량에 대해서는 동일한 선종의 연구결과를 인용하였다.

Table 3 Design conditions for ship and marine structure

	Design conditions	Air temp. (T _{air})	Seawater temp. (T _{sw})	Remarks
1	USCG design condition	-18 °C	0 °C	very low temperature condition
2	IMO design condition	45 °C	32 °C	tropical high temperature condition

Fig 8은 중동항로에 취항하는 LNGC의 1항차 동안 발생하는 화물탱크 내부의 온도변화와 외부조건을 중심으로 도시화 하였다. 중동항로의 기상조건은 IMO 조건과 USCG 조건 사이에 분포하며, 화물탱크 내부의 온도변화는 이보다 훨씬 낮은 상태에 있음을 알 수 있다.

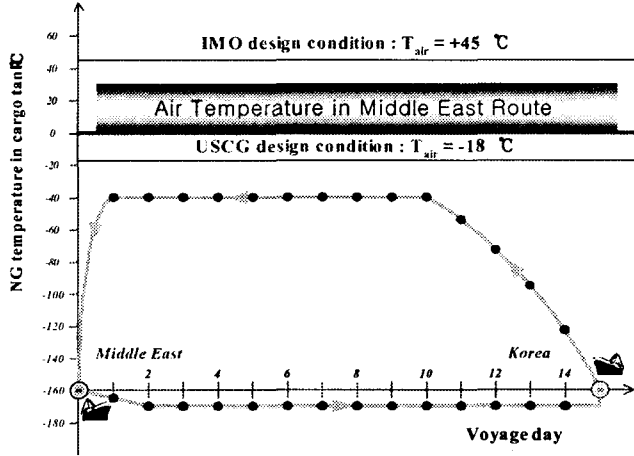


Fig. 8 The change of temperature in LNG tank during a voyage

전술한 Fig. 3의 전개방식에 따라 공선항해 중 각 영역별로 유입되는 열량 q_{B2-i} 은 아래의 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{B2-i} = U \times A_{2-i} \times \Delta T \quad (1)$$

여기서 B는 공선항해를, i는 Fig. 3에서 구분한 영역을, U는 각 영역별 총괄열전달계수를, A는 단면적을 그리고 ΔT 는 화물탱크의 내부와 외부의 온도차를 각각 나타낸다. 따라서 표준탱크인 No.2 화물탱크의 내부로 유입되는 총열량 Q_{B2} 는 Zone 1 ~ Zone 6에 대하여 식(1)에서 계산되어진 유입열량을 총합한 것으로, 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{B2} = q_{B2-1} + q_{B2-2} + \dots + q_{B2-5} + q_{B2-6} \quad (2)$$

동일한 방법으로 표준탱크에 있어서 만재항해에 대하여 계산하면, 영역별 유입열량 q_{L2-i} 는 식(3)으로부터, 만재항해 중 표준탱크 전체로 유입된 열량 Q_{L2} 는 식(4)로부터 계산되어지며 L은 만재항해를 나타낸다.

$$q_{L2-i} = U \times A_{2-i} \times \Delta T \quad (3)$$

$$Q_{L2} = q_{L2-1} + q_{L2-2} + \dots + q_{L2-5} + q_{L2-6} \quad (4)$$

따라서 표준탱크를 대상으로 하여 침입열량을 계산한 결과를 Fig. 9 ~ Fig. 10에 그래프로 나타내었다. Fig. 9는 공선항해 중 No.2 화물탱크에 시간당 침입한 열량을, Fig. 10은 만재항해 중 No.2 화물탱크에 시간당 침입한 열량을 나타낸 그래프이다. Fig. 9 ~ Fig. 10의 그래프에서 가로축은 대기온도를 나타내고 있으며, 파라미터는 0 ~ 32 °C 사이의 5가지 경우에 대한 해수온도이다. 식(2)에 의하여 계산된 침입열량을 LNG의 증발잠열 $H_{fg} = 0.142 \text{ kWh/kg} (= 122.2 \text{ kcal/kg})$ 로 나누면 공선항해중 단위시간당 발생하는 화물의 BOG의 발생량 G_{B2} 를 계산할 수 있으며, 이를 나타내면 식(5)와 같다.

$$G_{B2} = \frac{Q_{B2}}{H_{fg}} \quad (5)$$

같은 방법으로 만재항해중의 화물의 BOG 발생량은 식(6)과 같다.

$$G_{L2} = \frac{Q_{L2}}{H_{fg}} \quad (6)$$

Fig. 11은 식(5)의 결과, Fig. 12는 식(6)의 결과를 나타낸 그래프로서 Fig. 9 및 Fig. 10과 같이 외기온도가 높을수록 결과값도 상승하는 비슷한 경향을 보이고 있다.

따라서 이상의 결과를 이용하여 그래프로부터 대기온도와 해수온도의 값을 입력하면 표준 탱크인 No.2 탱크에 대한 공선항해 및 만재항해시 단위시간당 침입하는 열량과 단위시간당 발생하는 BOG의 양을 구할 수 있다.

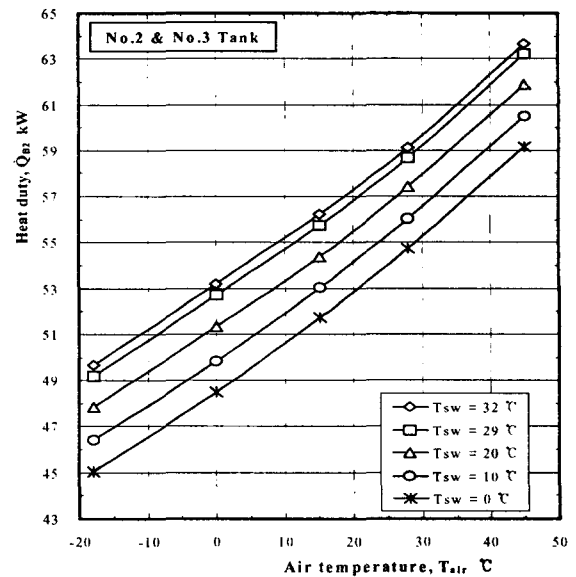


Fig. 9 Penetrating heat duty during the ballast voyage for No. 2 tank

3. 총 BOG 산정을 위한 확장 적용법

1항차의 열계산을 위한 운항모드의 순서에 따라 표준탱크인 No.2 탱크의 1항차 동안 발생하는 BOG의 양을 계산할 수 있다. 따라서 인수기지 출항후 약 5일간은 공선 비정상항해기간, 그 이후 수입기지 도착전 쿨다운 직전까지를 공선 정상항해기간, 쿨다운, 적하, 수입기지 출항후 약 5일간을 만재 비정상항해기간, 이후 인수기지에 도착하여 양하작업 직전까지를 만재 정상항해 기간으로 하여, 각 모드별 발생하는 BOG의 양을 계산하였다. 항해일에 따른 기상조건, 즉 항해일 하루하루의 대기온도 및 해수온도 조건에서 화물탱크내로 유입된 침입열량을 구하고 이 열량을 화물의 증발량을 환산하면 발생하는 총 BOG를 구할 수 있으며, 비정상 상태인 쿨다운 및 적하과정에서의 BOG 증발량은 이전 연구의 값을 인용하였다.

화물탱크로의 침입열량과 이 침입열량에 의한 BOG를 산정하기 위해서는 전열면적의 비를 알면 가능하다. 표준탱크를 기준으로 No.3 탱크는 동일한 형상과 크기를 가지고 있으므로, 전술한 No.2 탱크와 동일한 계산값을 가지나, No.1 탱크와 No. 4 탱크는 그 형상과 치수가 다소 상이하다. 본 연구대상 선박의 경우에 있어서, 표준탱크인 No.2 탱크의 전열 면적비를 100%로 하였을 때 No.3 탱크는 면적이 같으므로 100%, 1번 탱크는 67%, 4번은 93%이므로 이 면적비의 차이만큼 침입열량의 차이가 발생하고, 발생하는 화물의 BOG의 양도 이에 비례한다.

LNGC의 전체 화물탱크에 침입한 열량과 증발 BOG를 구할 수 있다. 항해일 하루에 LNGC 전체 화물탱크에 침입한 열량(Q_V)은 식(8)과 같이 각 화물탱크에서 항해일마다 침입한 열량을 합한 식으로 나타낼 수 있으며, 이 열량을 시간에 대하여 누적하면 식(9)와 같이 총항해일에 대한 연구대상 LNGC로 유입된 침입열량(Q_V)을 계산할 수 있다.

$$Q_V = Q_{V1} + Q_{V2} + Q_{V3} + Q_{V4} \quad (8)$$

$$Q_V = \int Q_V dt \quad (9)$$

그러므로 항해일 하루 동안 실항해 시간에 대하여 각 화물탱크로 침입한 열량으로부터 BOG 증발량을 계산하여 이를 합하면 1일 항해일에 대한 발생 BOG(G_V)가 식(10)과 같이 계산되어진다. 이를 1항차동안의 전체 항해일에 대하여 누적하면 1항차동안 대상 LNGC에서 증발한 BOG(G_V)를 계산할 수 있으며 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_V = G_{V1} + G_{V2} + G_{V3} + G_{V4} \quad (10)$$

$$G_V = \int G_V dt \quad (11)$$

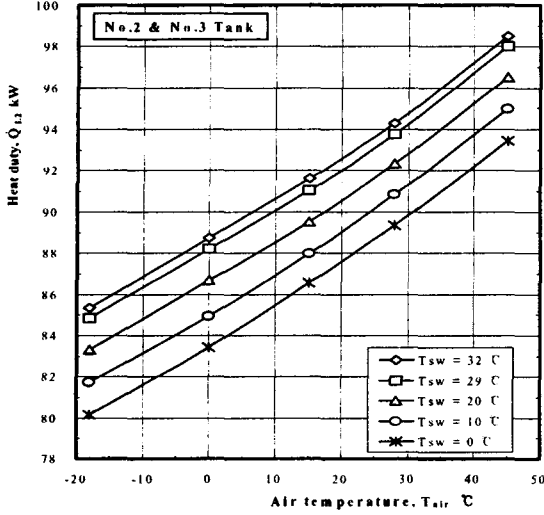


Fig. 10 Penetrating heat duty during the laden voyage for No. 2 tank

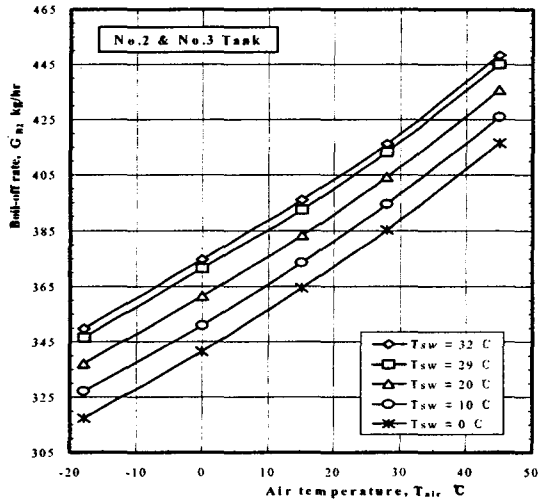


Fig. 11 Boil-off rate during the ballast voyage for No. 2 tank

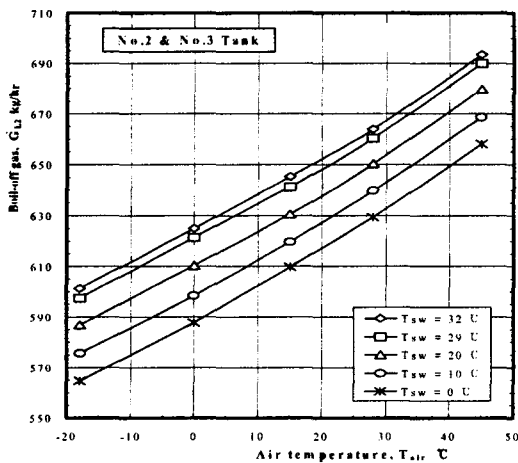


Fig. 12 Boil-off rate during the laden voyage for No.2 tank

4. 실제 운송실적과의 비교·검토

현재 화주인 KOGAS와 국적 LNGC 운항선사간의 BOR 발생에 관한계약 조건은 만재항해 중 총탱크 용량의 0.15%/day 이하로 규정되어 있고, 이를 입증하기위해 매년 운항선사에서 KOGAS에 제출되는 자료 중 연구항차로 선정된 5개 항차에 대해 본 연구결과와 비교하였다. 비교 결과를 공선항해와 만재항해로 나누어 그래프로 도시하면, Fig. 13과 Fig. 14와 같이 나타낼 수 있는데, 여기서 계산치는 쿨다운 과정과 적하 과정에서의 BOG를 고려하지 않은 값이며, 공선항해 및 만재항해 동안의 BOG 계산치와 실측치를 서로 비교하였다. Fig. 13은 총 5항차에 대한 공선항해중 계산치 BOG 발생량과 실측치 BOG 발생량을 도시한 것으로, 계산치가 475 ~ 555 ton 그리고 실측치가 385 ~ 476 ton의 범위이며, 계산시 고려한 여유율로 인하여 계산치가 실측치보다 약 15 % 정도 높게 나타나고 있다.

Fig. 14는 만재항해 과정에서 발생한 각 항차별 BOG 계산치와 실측치 BOG 발생량을 비교하여 도시한 것인데, 공선항해의 경우와 반대로 계산치가 실측치보다 최대 17 %까지 낮게 나타나고 있다. 이는 만재항해를 하기 이전에 수행하는 쿨다운 과정과 적하 과정에서의 BOG 생성량을 계산치에 적용하지 않았기 때문에 발생한 오차로 간주된다.

Fig. 13 및 Fig. 14에 나타난 쿨다운 과정과 적하 과정에서의 생성 BOG를 모두 고려하여 총 5항차에 대한 전체 발생 BOG를 나타내면 Fig. 15와 같다. 제4항차를 제외하고 계산치가 실측치보다 0.4 ~ 5.2 % 정도 높게 나타남을 알 수 있는데, 제4항차의 경우는 이전 항차에서 잔존한 열량으로 인한 영향이나 본선에서의 측정상 오차로 판단되어진다.

이상의 결과를 토대로 총 5항차에 대하여 계산치와 실측치를 비교, 검토하였는데, 계산에 의한 공선항해 중 BOG 발생량은 476~556 ton이고, 이를 공선항해일수를 기준으로 한 BOR로 환산하면 0.054 ~ 0.063 %/day의 범위이다. 마찬가지로 계산에 의한 만재항해중 BOG 발생량은 749~877 ton으로 이를 만재항해일수를 기준으로 한 BOR로 환산하면, 0.085 ~ 0.099 %/day의 범위이다.

왕복 약 30일 정도가 소요되는 중동항로에서 1 항차 동안의 총 BOG 발생량을 계산하면 1,330 ~ 1,490 ton/voyage로, 이를 LNG 화물운송계약상의 만재항해일수를 기준으로 한 BOR로 계산하면 0.133 ~ 0.149 %/day의 범위가 되고, 이 값은 화물운송상의 계약조건을 만족함을 알 수 있다. 실제 중동항로에 취항 중인 연구대상 선박의 각 항차 LNG운송 실적에 따르면 총 BOG 발생량이 1,238~1,521 ton/voyage의 범위이고, 이를 계산치와 비교했을 경우 평균 약 4% 정도 적은 값을 확인하였다.

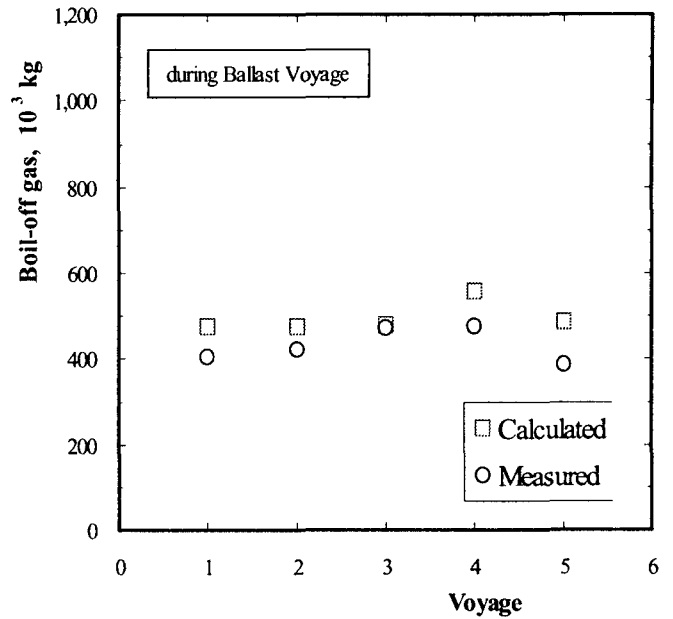


Fig. 13 Comparison of calculated BOG and measured BOG during the ballast voyage

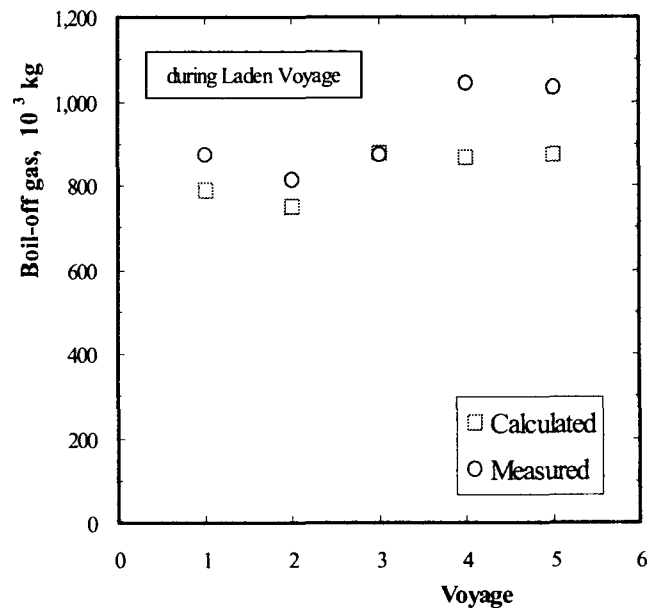


Fig. 14 Comparison of calculated BOG and measured BOG during the laden voyage

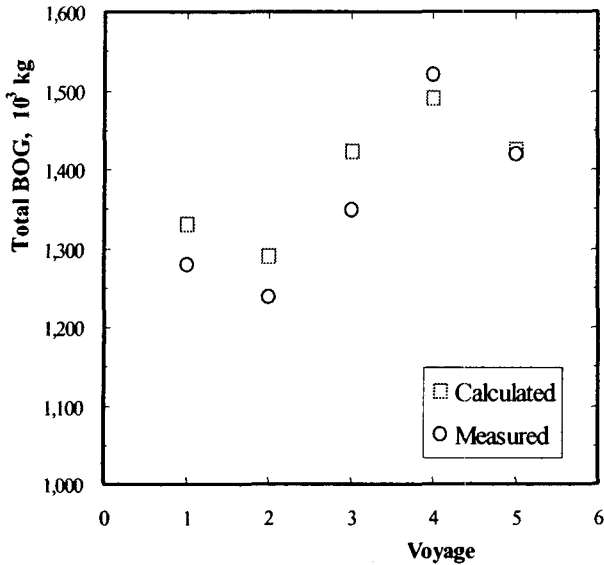


Fig. 15 Comparison of calculated BOG and measured BOG during the whole voyage

5. 결론

LNGC의 핵심 설계기술의 하나인 선체온도분포 및 침입열량에 관한 선행연구를 이용하여 선박에서 보다 간편하게 BOG 발생량을 예측할 수 있는 모델에 관하여 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 표준탱크(No.2 & No.3)에 관한 BOG 산정결과를 이용하여, Noon Report상의 대기 및 해수온도를 기준으로 공선헬해 및 만재항해를 포함 전 항해에 대하여, 하루 동안에 침입하는 평균열량에 따른 BOG 발생량의 예측기법을 확립하였고, 실제 중동항로에 취항중인 선박의 총 BOG 발생량이 1,238~1,521 Ton/voyage의 범위이고, 이를 계산치와 비교했을 경우 평균 약 4% 정도 적은 값을 확인하였다.

(2) 각 탱크의 전개 면적비에 관한 자료에 기초하여, 표준탱크(No.2 & No.3)에 대한 BOG 계산결과를 타 탱크(No.1 & No.4)로 확장하는 방안이 제시되었다.

본 논문은 중동항로에 취항하는 멤브레인형 LNGC에 대해 조사한 것으로 앞으로 동남아항로 및 다른 항로에 대해서도 적용할 수 있도록 연구가 진행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 송성욱 외, Membrane Type LNG선의 3차원 정상상태 온도 분포 및 BOR 계산 프로그램 개발에 관한 연구, 한국박용기 관학회 논문집, 제23권 2호, pp.140~148, 1999
- [2] 이정혜, 만재항해중 비정상 열해석에 의한 멤브레인형 LNGC의 BOR 산정에 관한 연구, 2003
- [3] 이정혜, MARK-III Membrane type LNG선의 만재 정상 상태하의 열해석에 관한 연구, 1999
- [4] 이정혜외, 멤브레인형 LNGC의 공선헬해중 탱크내 압력과 온도 시뮬레이터 개발, 해사산업연구소논문집 제13집 pp.51~61, 2003
- [5] 천병일의, MRV형 LNG선의 선체온도분포 및 증발률 산정에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집, 제18권 제4호, pp.986~996, 1994
- [6] 허주호외, 멤브레인형 LNG선의 화물창 온도분포 해석, 대한조선학회 논문집, 제34권 제4호, pp.108~118, 1997
- [7] H해운의 기술자료보고서 (항해일지, I.A.S Report, Noon Report, 성능보증결과보고서)