

- 합재료 축의 정적 비틀림 강도가 접합부의 비틀림 강도보다 높은 것을 알 수 있었으며 접합부가 파손될 때의 최대 비틀림 토크는 약 2316N-m으로서 계산된 비틀림 토크보다 높으며, 그 때의 비틀림 각도는 0.505 라디안(28.93°)임을 알 수 있었다.
6. 접착제 Hysol EA 9302.2 NA를 이용하여 외경 40mm, 내경 16mm, 길이 300mm인 복합재료 축과 금속재와의 접합강도를 평가한 결과 비틀림 토크와 비틀림 각이 거의 선형적으로 변화하다가 갑자기 접착제의 접합부위가 파손되는 양상을 보였으며, 순간적으로 접착제 접합부에 슬립이 발생하여 토크가 급격히 떨어지는 양상을 보였다. 이 때의 비틀림 강도는 약 450N-m이며, 비틀림 각도는 0.046 라디안(2.63°)임을 알 수 있었다.
 7. 경량화 정도를 확인하기 위해 동일한 치수의 금속재 축과 복합재료축의 무게를 계량한 결과 복합재료 축이 약 76%의 경량화가 된 것을 알 수 있었다.

13. 滿載航海中 非定常 熱解析에 의한 멤브레인형 LNGC의 BOR 算定에 관한 研究

냉동공조공학과 이정혜
지도교수 김경근

액화천연가스(LNG)의 수요가 전세계적으로 늘고 있는 가운데, 최근 국내에서 소비하고 있는 에너지중에서 천연가스가 차지하는 비율이 10%를 넘어, 발전부문을 제외한다면 상당한 양에 해당한다. 이러한 LNG를 수송하는 LNG 운반선(LNGC)은 화물탱크의 모양에 따라 Moss 방식과 멤브레인(Membrane) 방식으로 대별되어지며, 이러한 LNGC에 관하여는 설계 및 시공기술분야, 구조 및 응력해석 분야, 유동 및 유체해석 분야, 냉열 이용분야, 열해석 등 여러 연구분야가 있지만, 그 중에서도 LNGC의 열해석에 관하여서는 관련연구가 극히 미비하여 국내외적으로 많은 연구의 축적이 필요한 분야이다. 그러므로 프랑스의 GTT사를 비롯하여 일본, 노르웨이 등 일부 조선선진국에서 보유하고 있는 LNGC의 열설계기술보다도 일층 높은 수준의 열설계기술을 개발하는 것이 본 논문의 목적이다.

LNGC의 열해석을 위하여서는 한국의 인수기지에서 중동의 공급기지로의 1-항차 전체에 대한 이해가 필요한데, 운항모드별로는 1%의 화물을 적재하여 운항하는 공선항해기간과 적재전 화물탱크를 냉각시키는 쿨다운(Cool-down)기간, 화물을 적재하는 적재>Loading)기간 및 98% 정도의 화물을 적재하여 운항하는 만재항해로 구분할 수 있다. 또한, 1-항차를 열전달모드별로 구분하면, 공선항해 시작후 약 6일간의 공선 비정상 열전달(Unsteady state during B.V) 구간,

6일 이후의 정상 열전달 상태인 공선 정상 열전달(Steady state during B.V) 구간, 6시간의 쿨다운구간, 12시간의 적재구간, 만재항해 시작후 6일간의 만재 비정상 열전달(Unsteady state during L.V) 구간, 6일 이후의 만재 정상 열전달(Steady state during L.V) 구간의 6개 구간으로 나눌 수 있다.

특히 6개의 구간중에서, 화물을 적재한 후의 만재항해에서는 화물을 적재하기 전의 쿨다운과 화물을 적재하는 과정에서 단열재 내에 잔류한 잉여 축열량에 의해 지속적인 화물의 증발이 일어나므로, 국내의 LNG 화주인 한국가스공사(KOGAS)에서는 계약상 만재 항해일수 기준으로 전체 화물의 허용 증발율을 0.15%/day로 선사에 요구하고 있고, 화물탱크의 저온취성을 고려한 열적 안정성의 확보와 운항효율의 극대화를 통하여 화물의 발생 증발량을 최소화 할 필요가 있으므로 적재직후의 만재항해중 비정상 열전달구간에 대한 열해석이 매우 중요하다.

이에 본 논문에서는 최근 국내에서 가장 많이 건조되는 GTT 방식의 135,000m³급 멤브레인형 LNGC(Photo. 1)를 연구대상 LNGC로 선정하여, 1-항차 중에서도 화물의 증발량 즉 BOG 발생량과 관련깊은 만재 비정상 열전달 구간인 만재항해의 열설계를 주된 연구영역으로 하여, 이에 관하여 기술한다.

GT-96 멤브레인형 LNGC의 계산을 위하여, 4개의 화물탱크중 표준형인 No.3 화물탱크를 선정하여 그 모양이 전후좌우가 대칭이므로 No.3 화물탱크의 1/4에 대하여 3차원 비정상 열전도 방정식을 이산화 하여 수치계산을 수행하였다. 1/4 탱크에 대한 각부 온도의 초기조건으로는 적재가 완료되었을 시점에서의 각 평판과 단열재 내부에서의 값들을 택하였다.

경계조건으로, 한쪽은 화물탱크 내부로 NG 또는 LNG와 접하고 있으며 다른 한쪽은 선체 외부로서 대기 또는 해수와 접하고 있는데, 대기 및 해수의 온도조건인 외부계산조건으로는 미국에 출입하는 모든 선박들에 요구되는 가장 낮은 온도조건으로서 선체의 저온취성을 고려한 USCG (United States Coast Guard) 설계조건과 적도지방에서 화물의 최대 증발조건인 가장 높은 온도조건으로서 IGC 코드에 제시된 IMO(International Maritime Organization) 설계조건으로 크게 나눌 수 있다. 두 조건은 표준설계 온도조건에 해당하며, 계산시 화물탱크 전후에 있는 코퍼담은 화물탱크를 구성하는 선체의 구조 부재의 허용강도를 만족시키기 위하여 설계온도인 +5℃를 항상 유지하므로, 일정한 값으로 사용하였다.

증발잠열 계산에 있어서 화물탱크 내 LNG가 접하는 1차 방벽으로 침입하는 열량은 모두 LNG의 증발잠열에 이용되며, NG가 접하는 1차 방벽에 있어서 침입열량은 준정상상태에서 증발기체인 NG의 온도변화인 현열로만 이용된다고 가정하였으며, LNG의 표면과 상부 1차 방벽과의 복사에 의한 열교환은 없다고 가정하였다.

먼저, 적대지방의 최대증발조건에 해당하는 대기온도 +45℃, 해수온도 +32℃인 IMO 설계조건과, 선체의 열충격 등 저온취성을 고려한 온도조건에 해당하는 대기온도 -18℃, 해수온도 0℃인 USCG 설계조건의 두 가지의 표준설계 조건하에서 선체 주요부에서의 온도분포와 각 위치별 단열재 두께방향의 온도분포를 계산하여, 탱크벽 표면에서의 국소열전달계수를 계

산하였다.

단열벽내의 온도분포를 항해시간의 경과에 따라 계산한 결과, 특히 적재후의 만재 비정상 열전달상태하에서는 출항후 약 6일에는 온도분포가 정상상태에 도달함을 알 수 있었으며, 본 연구결과의 합당성을 확인하기 위하여, 본 연구대상 LNGC에 설치된 CT 측정시스템에 의한 2차 방벽의 외측 및 밀폐공간에서 측정된 만재 항해일수의 경과에 따른 온도변화 측정치는 본 연구에 의한 계산결과와 정량적으로도 매우 잘 일치함을 확인함으로써 본 논문의 합당성을 충분히 확인하였다.

국소열전달계수는 각 영역별로 매우 상이한 값을 가지는데, 적재 직전 코퍼담측과 측면측에서는 최대 $148.9 \text{ W/m}^2\text{C}$ 의 값을 가지며, 만재 출항 후 약 6일간의 비정상 열전달상태가 끝나면 $114.5 \text{ W/m}^2\text{C}$ 전후가 되었다.

선체 각 위치에서의 온도분포를 바탕으로 코퍼담측, 천장부, 상부 코너측, 측벽부, 하부 코너측 및 바닥부의 6개 영역에서 1차 멤브레인의 내표면에서의 열유속을 계산하면, 항해모드에 따라서 매우 상이하지만 쿨다운과 적재기간에서 그 값이 급증하며 전체적으로는 내표면이 액상의 LNG와 접하는 영역에서의 열유속 값이 0.010 kW/m^2 전후의 값으로 일정히 유지되었다.

공선항해중 BOG의 발생을 억제하기 위하여 LNG 탱크내의 NG 온도를 높게 유지함으로써 단열벽에서는 축열현상이 발생하는데, 각 영역에서의 단열벽내의 축열량 변화로는, 만재 정상 열전달상태에서 단열벽내의 축열량을 기준[0]으로 하여 수치해석한 결과, 코퍼담측 단열벽내에서 쿨다운 직전에 최대 축열량을 가지며 하부측은 1-항차중 거의 축열이 없었다.

No.3 화물탱크로의 침입열량을 계산하여, No.3 화물탱크에서의 증발량인 BOG 및 증발율인 BOR을 계산한 결과, 총 항해일 30일간의 1-항차 동안 IMO 설계조건하에서 No.3 화물탱크에 유입한 열량에 의하여 발생하는 LNG의 총 증발량은 $339.2 \times 10^3 \text{ kg}$ 이 되며, 이를 No.3 화물탱크의 표준 적재율인 98.0%의 LNG를 탑재하였을 때 총 LNG 화물의 무게 $16,833.3 \times 10^3 \text{ kg}$ 을 기준으로 하면 누적을 2.02%가 됨을 알았으며, USCG 설계조건하에서는 누적이 1.52%로서 IMO 설계조건하의 계산치의 약 75.2%가 됨을 확인하였다.

본 연구대상 선박의 실제항로인 한국~중동에서의 4-항차분에 대하여, 매일 매일의 대기 및 해수온도 그리고 선속의 변화를 바탕으로 표준설계조건에서와 동일한 계산을 수행하였는데, 실제항로에 대한 계산을 위한 외부온도조건으로 대기온도와 해수온도는 실선에서 매일 정오에 기록된 데이터로, 실제로는 하루중에도 시시각각으로 대기온도와 해수온도 및 선속이 변화하지만, 매일 정오를 기준으로 이들 값이 스텝적으로 변화한다고 가정함으로써 즉 준정상상태하의 수치계산으로 단열벽내의 온도분포에 대하여 항해일수를 추적하면서 연속적으로 필요한 열계산을 수행하였다.

실항해조건으로서 4-항차에 대하여 표준설계조건에서와 같이, 선체 주요부에서의 온도분포와 각 위치별 단열재 두께방향의 온도분포를 계산하였는데, IMO 설계조건에서의 결과와 유사한 경향을 보이거나 외부온도조건에 따라 변동이 발생함을 알 수 있었다. 이를 바탕

으로 1/4 화물탱크를 구성하는 6개 영역에 대하여, 탱크벽 표면에서의 대류열전달계수를 계산하여 1차 멤브레인의 내표면에서의 열유속을 계산하였는데, Case-1의 경우 IMO 설계조건에서의 계산결과와 거의 일치하였으나 공선행해중 화물탱크 내의 NG 온도의 변동에 따라 일부 IMO 설계조건에서의 계산결과와 상이한 부분이 있었다.

6개 영역에 대하여 단일벽내의 축열량 계산에서는, 입출항시 한국의 겨울날씨와 중동지역의 따뜻한 날씨로 인한 심한 외부온도조건의 변동 및 내부 NG 온도의 변동에 따라 IMO 설계조건에서의 계산결과와 다소 상이한 결과를 얻었으나, 그 경향은 유사함을 알 수 있었다. 다음으로 No.3 화물탱크로의 침입열량을 계산하여, No.3 화물탱크에서의 총 BOG 및 총 BOR을 계산하였다.

Case-1의 경우 본 연구대상 LNGC가 1-항차 동안에 No.3 화물탱크에 유입하는 열량에 의하여 증발하는 LNG의 총 증발량은 $334.7 \times 10^3 \text{kg}$ 이 됨을 알 수 있었으며, No.3 화물탱크의 화물의 총량을 기준으로 한 LNG 증발율의 항해시간에 대한 그 누적치는 1.99%에 도달함을 알았다.

No.3 화물탱크에 대한 이상의 계산결과로부터 각 화물탱크의 면적비율로 총 4개 화물탱크의 증발량을 산정할 수 있는데, 그 계산 결과로 Case-1의 경우, 총 BOG 발생량은 1-항차 동안에 1,175.2 ton, 총 BOR의 발생량은 2.044 %로서, 이 결과는 IMO 설계조건에서의 총 BOG 발생량 1,200.5 ton, 총 BOR 발생량 2.089 %의 값과 거의 유사하였다.

또한, Case-1~Case-4의 4항차에 대한 계산결과로, 4항차의 총 BOR의 평균값은 1.866%로서 실제의 운항실적치의 평균값은 이 보다 9.9% 정도가 큰 2.05% 정도로 양자가 잘 일치하였다. 4항차에 대한 본 논문에서의 일일 BOR 계산결과와 평균값인 0.0638%/day는 실제의 4항차분의 LNG 화물의 하역량에 근거하여 측정된 운항 실적치의 평균값인 0.0708%/day와 매우 잘 일치함으로써, 결국 본 연구에서의 계산결과가 운항실적에 의한 측정결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있었으며, 본 논문에서 연구한 LNGC에 관한 수치계산법은 매우 정확한 것으로 판단되었다.



Photo. 1 Photo. of the present GT-96 type LNGC