

Moss형과 Membrane형 LNG선의 예비냉각공정 비교

이동훈*, 문기호, 남기일, 김성윤, 장대준
 현대중공업 산업기술연구소
 (pupa73@hhi.co.kr*)

Comparison of Moss and Membrane Type LNG Carriers in Cooldown Procedure

Donghun Lee*, Kiho Moon, Kiil Nam, Sungyoon Kim, Daejun Chang
 Hyundai Industrial Research Institute of Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.
 (pupa73@hhi.co.kr*)

서론

액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG)는 대기압, -162°C 의 초저온 액체상태로 LNG선으로 운반한다. 상온의 LNG선 저장탱크에 초저온 LNG를 직접 선적하면, 급격한 온도 변화에 의하여 탱크에 구조적 충격을 유발한다. 이를 방지하기 위하여 상온의 저장탱크에 소량의 액화천연가스를 분무시켜 온도를 서서히 하강시키는 공정이 필요한데, 이를 예비냉각(Cooldown) 공정이라고 한다. 예비냉각공정에서 분무된 LNG는 기화되어 배출되며, LNG선 본선 보일러의 연료로 사용되거나 LNG Receiving Terminal로 반송된다.

LNG선은 크게 Moss형과 Membrane형으로 나눈다. Moss형 LNG선은 Moss Rosenberg사(노)에 의해 개발된 선형으로, 선체와 독립된 구형의 화물탱크가 Skirt에 의해 지지되어 있다. Membrane형 LNG선은 Gaz Transport & Technigaz사(프)에 의해 개발된 Mark-III 형의 선형으로, Moss형과 달리 선체와 박스형의 화물탱크가 일체형 구조를 갖고 있다. Moss형 LNG선은 선박의 충돌에 의한 화물탱크의 안정성에 장점을 갖고 있고, Membrane형 LNG선은 화물탱크의 무게가 상대적으로 가볍고 운항이 용이하다.

본 연구에서는 Moss형과 Membrane형 LNG선의 예비냉각공정을 비정상상태로 해석하여 화물탱크의 온도 분포와 발생하는 천연가스 증발량을 비교하였다.

이론

Moss형 화물탱크는 기하학적으로 가장 안정한 구형으로 선체와 탱크가 분리되어 있어 충돌이나 좌초시 안전한 구조물이다. 또한 화물탱크 내에는 보강재가 없어 Crack발생을 최소화한다. 탱크는 적도부의 원통형 Skirt에 의해 지지되는데 Skirt는 파운데이션 갑판에서 선체와 연결되어 있다. 냉각시 알루미늄으로 구성된 화물탱크의 열응력을 흡수하도록, Skirt는 알루미늄 합금과 스테인레스 강 그리고 강철로 제작된다. 알루미늄 합금과 스테인레스 강 사이에는 STJ(Structural Transition Joint)가 배치되어 이종 금속을 연결시킨다. 구형탱크와 Skirt가 연결되는 적도부는 자중과 열수축에 의해 응력이 집중되므로 상세한 구조해석이 수반된다. Figure 1은 Moss형 LNG선의 화물탱크 형상 개략도이다.

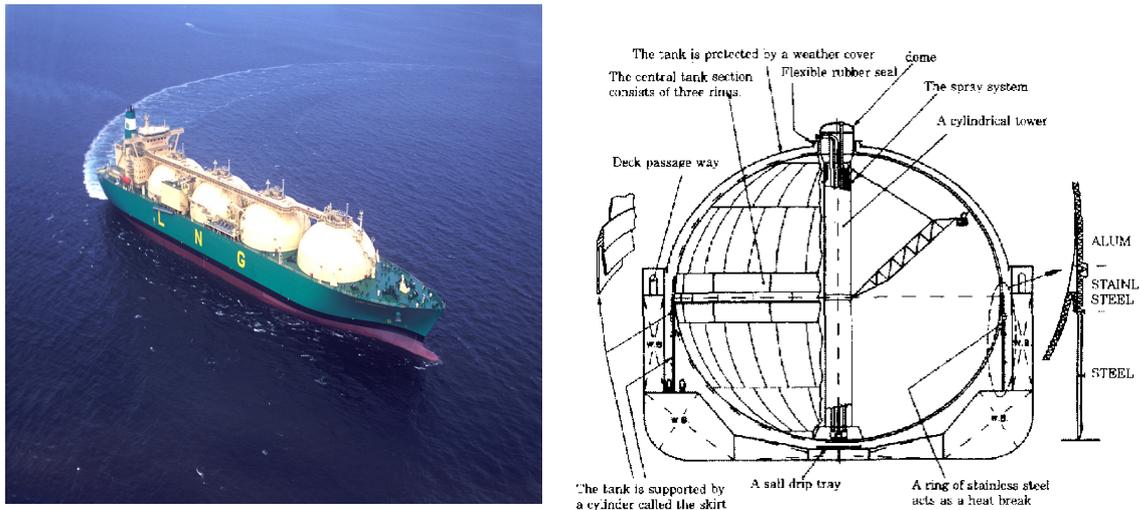


Figure 1. Cargo Tank of Moss Type LNG Carrier.

Membrane형 화물탱크는 박스형의 화물탱크가 선체와 일체화된 방열구조로 1차 방벽은 극저온에 의한 열수축과 선체변형에 의한 신축을 흡수하는 Corrugation 형태의 가진 스테인레스 강 Membrane으로 구성되어 있으며 2차 방벽은 Triplex접착에 의한 탱크 전면의 완전 방벽을 형성하고 있다. Figure 2는 Membrane형 LNG선의 화물탱크 형상 개략도를 나타낸 것이다.

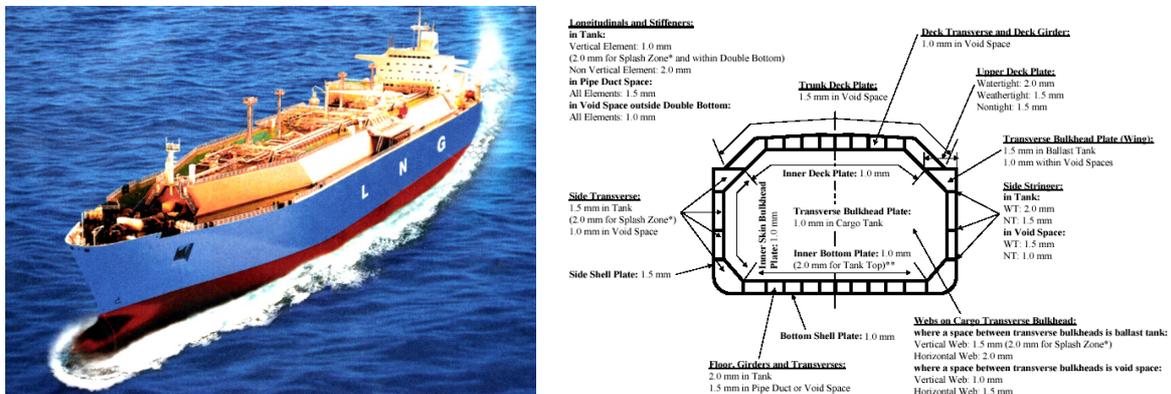


Figure 2. Cargo Tank of Membrane Type LNG Carrier.

예비냉각 공정은 급격한 온도변화에 의한 화물탱크의 구조적 손상을 방지하기 위한 공정으로, 예비냉각공정의 핵심요소는 최소량의 액화천연가스를 이용하여 빠른 시간 내에 화물탱크의 온도를 떨어뜨려 구조적 안정성을 확보하는 것이다. 또한, 예비냉각 공정시 발생하는 천연가스 증발량은 Compressor용량을 결정하는 중요변수가 된다.

예비냉각 공정의 해석은 화물탱크 내부의 액화천연가스 증발에 의한 상평형과 벽면을 통해 전달되는 침투열량을 동시에 해석해야 한다. 특히, Membrane형 화물탱크의 경우 8개 층으로 구성된 방벽을 통한 열전달 해석을 수행해야 한다. 이는 액화천연가스의 증발열이 화물탱크 내부뿐 아니라 방벽의 냉각에 사용되기 때문에 방벽을 통한 열전달량을

정확히 계산하는 것이 중요한 요소로 작용한다.

비정상 상태의 모델은 다음과 같은 요소로 구성되어 있다.

- 저장탱크 내부에서 Component Mass Balance
- 저장탱크 내부에서 Pressure Balance
- 저장탱크 내부에서 Equilibrium Relations
- 저장탱크 내부에서 Heat Balances
- 저장탱크 내부에 설치된 구조물에 대한 Heat Balances
- 저장탱크를 둘러싼 단열층에 대한 Heat Balance

저장탱크 내부에서 Equilibrium Relation은 Peng-Robinson 식을 사용하여 계산하였다. 또한, 화물탱크 벽면의 단열층에 대해서는 Lumped Capacitance Model을 사용하였다. 즉, 각 단열층에서는 내부 온도가 균일한 것으로 가정하였다.

위의 모델은 상용 공정모사기인 HYSYS와 이에 내장된 User Program을 사용하여 해를 구하였다. 대부분의 공정모사기는 열전달을 구조적으로 반영하기 어렵게 되어 있어, 해당 시스템과 같이 복잡한 시스템은 사용자가 직접 프로그램을 작성하고 이를 공정모사기와 연결시켜야 한다.

이 모델을 사용하여 산출된 결과는 Thermal Stress 해석에 사용된다. 이 논문에서는 이 부분에 대한 논의는 제외한다.

결과 및 토론

예비냉각 공정의 비교검증을 위하여 화물탱크 내에 분사되는 액화천연가스의 분무량을 20Ton/hr로 유지하고, Moss형과 Membrane형의 화물탱크 용량을 각각 40,000m³로 설정하였다. 단, 화물탱크 각 재료의 표면적은 화물탱크의 특성에 따라 적용하였다. 초기 화물탱크 내부 온도와 대기온도는 30℃로 가정하였다.

HYSYS를 기반으로 벽면을 통해 침투되는 열량을 Lumped Capacitance Method를 사용하여 계산하였다. 화물탱크 내 압력은 1.16bar로 유지하였다.

Figure 3은 예비냉각 공정시 Moss형 탱크와 Membrane형 탱크의 시간에 따른 온도변화를 나타낸 그림이다. 탱크 내부의 증발된 천연가스의 온도가 평형온도에 도달하는 시간은 Moss형의 경우 약 9시간, Membrane형의 경우 5시간이 소요된다.

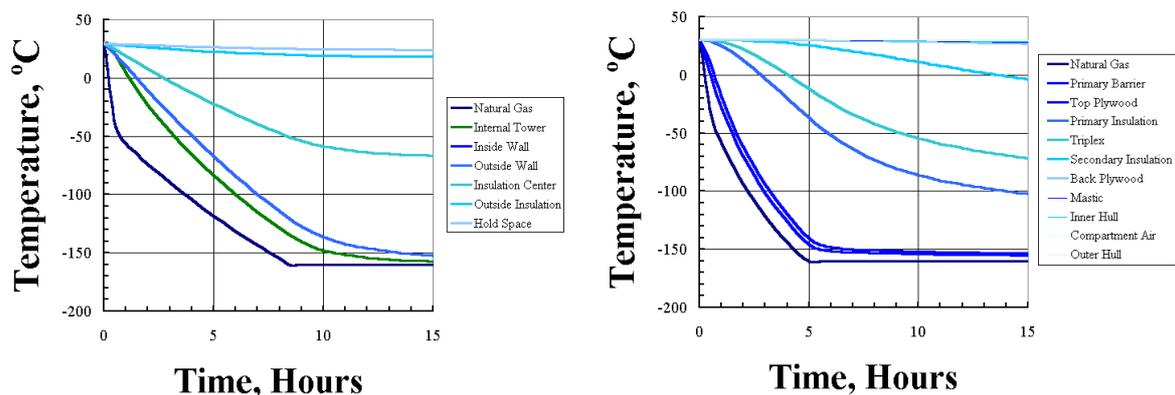


Figure 3. Temperature Distribution of Moss Type and Membrane Type Cargo Tank.

Figure 4는 예비냉각 공정시 Moss형 탱크와 Membrane형 탱크의 시간에 따른 질량유속 변화를 나타낸 그림이다. 발생하는 천연가스증발량을 살펴보면 Moss형의 경우 예비냉각 공정개시 1.5시간 후 16.3Ton/hr의 최대 증발량을, Membrane형의 경우 1시간 후 11.6Ton/hr

의 최대 증발량이 발생한다.

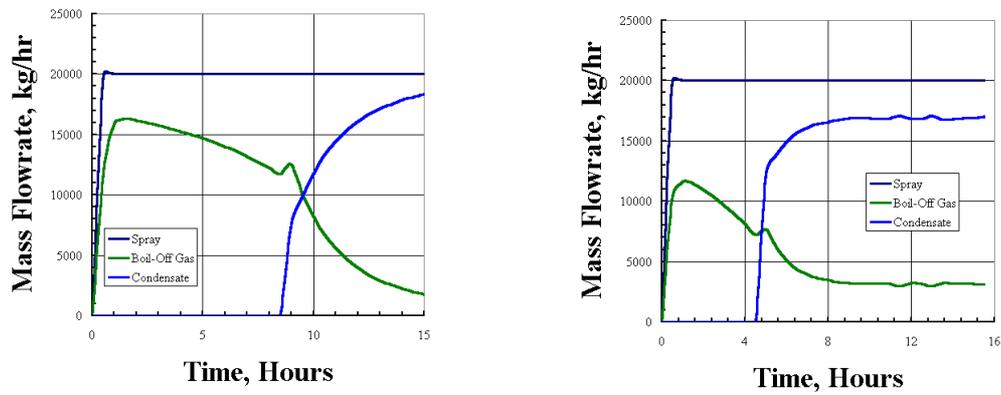


Figure 4. Mass Flow Rate of Moss Type and Membrane Type Cargo Tank.

결론

본 연구에서는 비정상상태 모델을 적용하여 LNG선 화물탱크에 침투되는 열량을 계산하여 Moss형과 Membrane형 LNG선의 예비냉각 공정의 중요변수인 탱크 내부의 증발된 천연가스의 온도가 평형온도에 도달하는 시간과 최대 천연가스 증발량을 비교 분석하였다. Membrane형이 Moss형에 비해 평형온도 도달 시간이 약 4시간 정도 적게 소요되었으며 최대 천연가스 증발량은 Moss형의 경우 예비냉각 공정개시 1.5시간 후 16.3Ton/hr의 최대 증발량을, Membrane형의 경우 1시간 후 11.6Ton/hr의 최대 증발량이 발생하였다.