

LNG Tank Cooldown System 해석

문기호, 남기일, 송민철, 김준홍, 이동훈, 장대준
현대중공업 산업기술연구소

Analysis of LNG Tank Cooldown System

Kiho Moon, Kiil Nam, Minchurl Song, Junhong Kim, Donghoon Lee, and Daejun Chang
Hyundai Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries

1. 서론

청정연료로 각광받고 있는 천연가스는 국내외 수요가 급격히 증가하고 있다. 원근해 유정에서 채굴된 천연가스는 다양한 방법으로 수요처에 공급된다. 원거리 수요처는 액화천연가스(LNG) 형태로 수송하며, 현재 LNG 전용 선박이 국내외에 도입되어 이용 중이다. 극저온의 LNG를 수송하기 위해서는 Tank의 단열과 -160°C 근방의 저온 화물을 안전하게 보관 이송할 수 있도록 설계되어야 한다. LNG선의 Tank는 구조적으로 안전한 구형이지만, 상온의 탱크에 극저온의 LNG가 선적되면 급격한 온도변화에 의한 열응력이 유발되어 구조물이 파괴될 수 있다. 이를 방지하기 위해 상온의 탱크에 소량의 LNG를 분사시켜 온도를 서서히 하강시키는 예냉과정(Cooldown)이 필요하다. 특히, Tank와 선박간 구조적인 지지체인 Skirt 부분은 여러 재질로 부착되어 있어 열응력에 가장 취약한 부분으로 시간에 따른 온도구배 예측이 필요하다.

LNG Tank의 Cooldown은 선박의 운항 일정에 지장을 주지 않도록 신속히 완료되어야 하고, 열응력에 안전하도록 수행하여야 한다. 본 연구는 LNG Tank의 Cooldown시 필요한 분사량과 Tank내에 축적되지 않고 방출되는 Boil off gas의 양을 추정하고, 각 지점의 온도 변화 및 하강 속도를 예측하였다.

2. 이론

Cooldown 해석은 당사에서 건조 및 인도 중인 $135,000\text{m}^3$ 의 Moss형 LNG Tank를 고려하였다. 수립된 모델은 Tank내 기체의 온도 및 농도는 각각의 시간에서 일정하다고 가정하였다. Tank 내의 압력은 Suction하여 일정하게 유지하였다.

Tank 벽면 및 내부 기체의 물질 및 열수지는 일차원 열전달 방정식을 고려하였다.

$$M_s^* = M_g^* + \frac{dM}{dt} \quad (1)$$

$$M_s^* = M_g^* \cdot w_g + \frac{d(M \cdot w_g)}{dt} = M_g^* \cdot w_g + w_g \cdot \frac{dM}{dt} + M \cdot \frac{dw_g}{dt} \quad (2)$$

여기서 M^* 은 Mass rate를 나타내고, M 은 Tank내 기체의 Mass이고, 하첨자 s 와 g 는 각각 Spray와 Suction gas를 나타낸다. w 는 Spray gas의 Mass concentration을 나타낸다.

(1)과 (2)식을 결합하면 아래와 같다.

$$\frac{dw_g}{dt} = \frac{(1 - w_g)M_s^*}{M} \quad (3)$$

$$Q_w + Q_{it} + M_s^* h_s = M_g^* h_g + \frac{d(Mh_g)}{dt} = M_g^* h_g + h_g \frac{dM}{dt} + \frac{Mdh_g}{dt} \quad (4)$$

$$Q_{it} = -M_{it} \cdot Cp_{it} \cdot \frac{dT_{it}}{dt} \quad (5)$$

$$Q_{ins} - Q_w = M_{wall} \cdot Cp_w \cdot \frac{dT_w}{dt} \quad (6)$$

$$Q_{out} - Q_{ins} = M_{ins} \cdot Cp_{ins} \cdot \frac{dT_{ins}}{dt} \quad (7)$$

$$Q_w = hc_w \cdot A_w \cdot (T_w - T_g) \quad (8)$$

$$Q_{ins} = A_{ins} \cdot (T_{ins} - T_w)k/0.5d \quad (9)$$

$$Q_{out} = \frac{A_{out}(T_{out} - T_{ins})}{1/hc_{out} + 0.5d/k} \quad (10)$$

각각의 하첨자 w , it , ins 는 Tank 벽, Internal, Insulation을 나타낸다. h 는 enthalpy를 Cp 는 Specific heat capacity를 나타낸다.

열전달 계수는 다음과 같은 실험관계식을 이용하여 추산하였다.

$$Nu = 0.13(Gr \cdot Pr)^{1/3} \quad \text{turbulent flow, } Gr > 1.0 \cdot 10^9 \quad (11)$$

$$Nu = 0.55(Gr \cdot Pr)^{1/4} \quad \text{laminar flow, } Gr < 1.0 \cdot 10^9 \quad (12)$$

$$\text{where } Nu = \frac{hL}{k}$$

$$Pr = \frac{Cp\mu}{k}$$

$$Gr = \frac{\beta g \rho^2 (T_s - T_\infty) L^3}{\mu^2}$$

Tank내의 압력을 일정하게 유지하기 위한 Suction rate는 아래와 같은 압력관계식을 이용하여 구한다.

$$\Delta P = \frac{\left[\int (M_s^* - M_g^*) dt + M \right] - RT_{g2}}{M_{w2} V} - \frac{MRT_{g1}}{M_{w1} V} = 0 \quad (13)$$

일차원 열전달 방정식에서 추산된 시간 변화에 따른 온도 및 열전달 계수를 경계조건으로 FEM 해석을 통해 Tank 구조부분의 온도분포를 추산하였다.

3. 결과 및 토론

LNG의 성분 조성은 인도네시아산을 대상으로 선정하였다. Cooldown 모사를 통해 Spray되는 LNG에 대하여 탱크의 압력이 약 116 kPa이 되도록 Suction되는 양과 응축되는 양을 계산하고 각 부분의 평균온도를 추산하였다. Tank의 초기조건은 101kPa, 30°C이고 Tank내부는 Natural Gas로 채워져 있다고 가정하였다.

Cooldown은 구형 Tank의 중심 표면에 위치한 Equator의 온도가 -110°C에 도달할 때 종료되며, Equator의 온도 변화 속도는 10 °C/hr 이내로 유지되고, Boil off gas의 양은 최대 10 ton/hr를 넘지 않도록 Spray의 양을 결정하였다.

Figure 1은 Cooldown 중에 열평형에 의하여 서로 교환되는 열유속의 양을 비교한 것이다. Spray된 LNG의 기화열은 Tank 벽면에서 가장 많은 열을 빼앗아 간다. Spray의 양이 커지면 열유속도 동시에 증가된다.

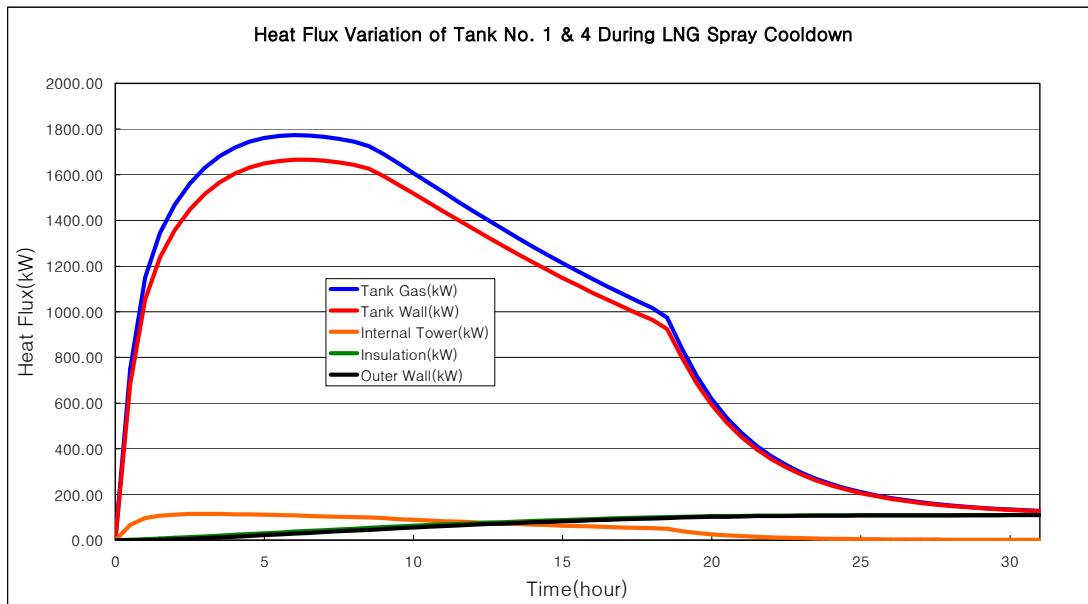


Figure 1. Heat Rate Variation of Tank during LNG Spray Cooldown.

Figure 2는 11 ton/hr로 일정하게 Spray를 분사한 결과다. Tank 내부 압력을 일정하게 유지되도록 Boil off gas를 Suction하였다. Suction량은 최대 9.4 ton/hr이며, Tank 내부 기체의 온도가 약 -90°C 에 도달하는 6시간 후에 Spray된 LNG의 내부 응축이 일어났다.

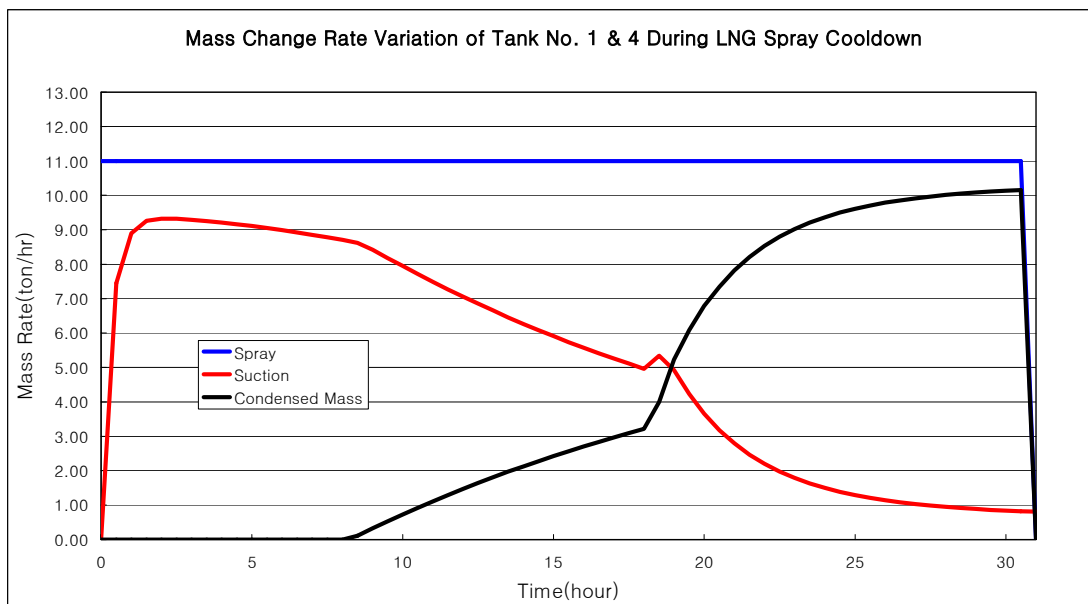


Figure 2. Rate of Change in Mass in Tank during LNG Spray Cooldown.

Figure 3은 Tank 각 부분의 온도를 추산한 결과다. Equator의 평균온도와 Equator 하단부 200mm 부근에 위치한 Sensor부의 온도는 FEM 해석을 통해 얻어진 값이다. Equator Sensor의 온도가 -110°C 에 도달하는 약 24시간 후에 Cooldown이 완료되며 잔류된 천연가

스의 양은 약 120 ton, Tank Gas의 온도는 -158°C 다.

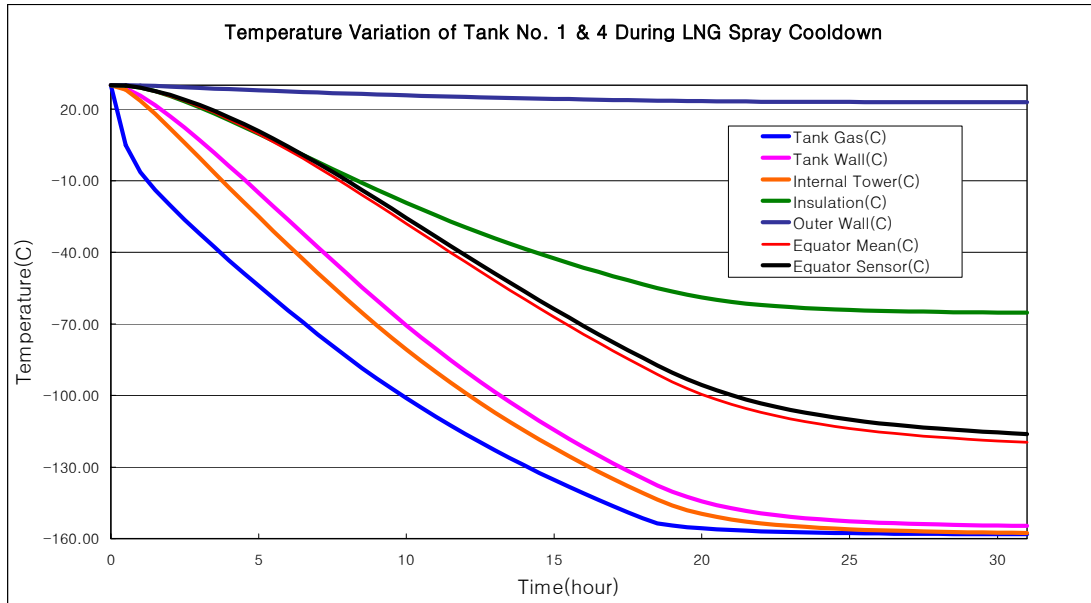


Figure 3. Temperature Variation of Tank during LNG Spray Cooldown.

4. 결론

Cooldown 해석의 결과로 시운전시에 적용해야 하는 Cooldown Procedure를 결정하였으며 Tank 내부의 기체 온도 및 Tank 구조물의 시간별 평균온도를 추산하였다. 또한 해석의 결과로 제시되는 열전달 계수를 이용하여 FEM 열전달 해석을 수행하였다. FEM 해석 결과를 바탕으로 구조적으로 취약한 부위의 온도하강 속도와 열응력에 안전한 구조물의 온도 분포를 추정하여 LNG의 선적 가능시간을 예측하였다. 11 ton/hr로 LNG Tank의 Cooldown시, 최대 Boil off gas는 9.4 ton/hr이며 24시간 후에 LNG 선적이 가능한 온도로 예냉되었다.