

# LNG 저장탱크의 개선된 온도해석 모델

## Advanced Heat Transfer Analysis Model of LNG Storage Tank

전 세 진\*                      정 철 현\*\*                      진 병 무\*                      김 성 운\*\*\*  
Jeon, Se-Jin                      Chung, Chul-Hun                      Jin, Byeong-Moo                      Kim, Seong-Woon

---

### ABSTRACT

Several methodologies were devised to reasonably predict the temperature boundary conditions of inner face of the concrete outer tank so as to set up heat transfer analysis model of the full containment above-ground LNG storage tank. In this model, outer tank is solely taken into account and the beneficial effect of suspended deck and insulation layers on the temperature distribution of outer tank is separately formulated according to the proposed procedures. More effective design of the insulations can be achieved when the proposed simple schemes are used in the preliminary stage.

---

### 1. 서 론

LNG(Liquefied Natural Gas; 액화천연가스)는 천연가스를 약  $-163^{\circ}\text{C}$ 까지 냉각하여 액화시킨 것으로서 기체에서 액체가 되는 과정에서 부피가 약 1/600로 감소되어 저장이 용이하게 된다. 본 연구의 고려대상은 완전방호식(Full containment type) 지상식 LNG 저장탱크로서 그림 1과 같이 내조(Inner tank) 및 외조(Outer tank)의 이중안전장치를 가지고 있으며, 내·외조 사이의 공간은 단열재로 채워지게 된다. 일반적으로 내조는 9% Ni(니켈)로 제조되며, 외조는 철근콘크리트(RC) 및 프리스트레스트 콘크리트(PSC)의 조합으로 구성된다.

LNG 탱크의 해석 및 설계에서 고려해야 하는 중요한 사항은 LNG의 극저온에 대한 구조안전성 및 사용성의 확보이다. 정상가동시(Normal operation)에는 내조가 LNG를 보유하고 있으며, 또한 단열재가 온도를 차단하는 역할을 하여 콘크리트 외조가 직접적으로 극저온에 노출되지는 않는다. 그러나 LNG가 내조로부터 누출되어 단열재에 스며드는 사고가 발생했을 경우 외조에는 급격한 온도변화로 인한 큰 단면력 또는 응력이 발생하게 된다.

LNG 탱크의 온도해석은 실제의 LNG 탱크의 설계도서<sup>(1)-(3)</sup>나 연구목적의 해석<sup>(4)-(7)</sup>에서 빈번히 수행되어져 왔으나, 해석의 방법론이 정립되어 있지 않거나 방법론 자체가 타당하지 않은 경우도 적지 않다. 이는 LNG 탱크가 그림 1과 같이 비교적 복잡한 구조로 이루어져 있어서 온도해석시

---

\* 정회원, 대우건설기술연구소 토목연구팀 선임연구원

\*\* 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 교수

\*\*\* 정회원, 대우건설기술연구소 토목연구팀 수석연구원

타당한 해석모델을 구성하기가 용이하지 않다는 데 주로 기인하고 있다. 따라서 본 연구의 목적은 LNG 탱크 콘크리트 외조의 온도분포를 합리적이고 효율적으로 추정할 수 있는 온도해석 모델을 도출하는 것이다.

## 2. 해석 개요

LNG 탱크의 온도해석을 정상가동시 및 누출시로 나누어 수행하였다. 온도해석시에는 외기온도나 LNG 수위에 대한 가정이 필요하다. 즉, 계절별로 몇 가지 외기온도를 설정하고 또한 몇 가지 LNG 수위를 가정하여 구조물에 가장 불리한 경우를 해석을 통하여 찾아내어야 한다. 그러나 본 연구의 목적은 합리적인 온도해석 모델을 구축하기 위한 절차를 제시하는 데 있으므로 대표적으로 외조 안쪽에 가장 큰 온도경사(Temperature gradient)를 발생시킬 것으로 예측되는 여름의 외기조건(35℃) 및 LNG의 최고설계수위를 가정하였다. 누출시 LNG가 단열재로 스며들면서 발생하는 약간의 수위저하는 무시하였다. 또한 LNG의 온도는 안전측으로 -170℃로 가정하였다.

정상가동시의 온도해석에서는 물론 단열재의 영향을 고려해야 하며, LNG의 누출시에도 단열시스템에 따라 일부 단열재가 남아있을 수도 있다. 따라서 예를들어 유한요소법을 통한 온도해석시 단열재를 유한요소모델에 포함시켜야 하는가가 문제가 되는데, 각각 다른 물성을 가진 여러 층의 단열재를 모두 유한요소로 모델링하는 것은 상당히 번거로운 작업이 될 수도 있다. 본 연구에서는 콘크리트 외조만을 유한요소로 모델링하더라도 비교적 정확한 온도해석 결과를 얻을 수 있는 방법론을 논하고자 한다. 해석대상 구조물의 대략적인 단면제원은 표 1과 같다.

본 해석에서의 유도식은 모두 정상상태의 가정에 근거하고 있다. 과도해석(Transient analysis)은 시간에 따른 온도변화를 함께 고려한 것인 반면, 정상상태해석(Steady-state analysis)은 과도상태가 지난 후 에너지의 평형이 이루어져 시간에 따른 온도변화가 없다고 가정한 해석이다. 수화열해석이나 화재해석과 같이 과도상태에서 구조물에 불리한 경우가 발생할 경우 과도해석을 수행해야 함이 당연하다. 그러나 본 연구와 같이 LNG 탱크의 정상가동시 및 누출시의 온도해석을 수행하여 구조물의 전반적인 거동을 살펴보고자 할 경우 정상상태에서 구조물 단면에 가장 큰 온도경사를 발생시켜서 가장 큰 단면력을 유발하게 되므로 정상상태해석을 수행하는 것으로 충분하다고 판단된다.

## 3. 지붕 내면의 경계조건

그림 1과 같은 LNG 탱크 시스템에서 현수천정 위에는 Resilient glass blanket이 단열재로서 얹혀져 있다. 즉, 현수천정은 콘크리트 지붕이 LNG의 극저온에 노출되는 것을 상당부분 차단하고 있는 것이다. 따라서 이러한 차단효과를 고려하여 지붕 내면의 온도 경계조건을 계산하는 합리적인 방법론이 요

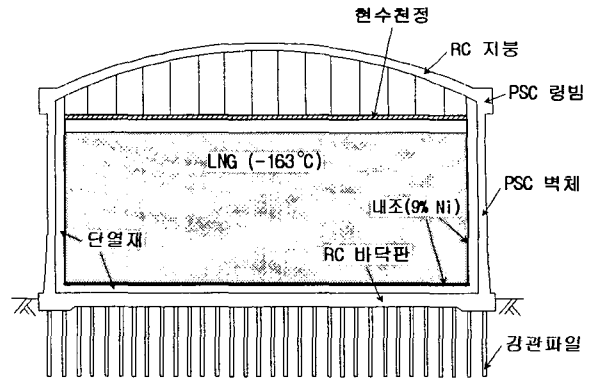


그림 3 완전방호식 지상식 LNG 저장탱크

표 1 해석대상 LNG 저장탱크의 단면제원

벽체 두께 (일반부)	0.75m
지붕 두께 (일반부)	0.6m
바닥판 두께 (일반부)	1.8m
외조 내경	92m
벽체 높이 (바닥판 상면 ~ 링빔 하면)	36.8m
최고설계수위	33.85m
용량	200,000m <sup>3</sup>

구된다. LNG의 누출은 벽체나 바닥판의 온도 경계조건을 변화시키며, 지붕 내면의 경계조건과는 직접적인 관련은 없다. 여기에서는 그림 2와 같이 정상상태에서 외기로부터 콘크리트 지붕과 현수천정을 관통하여 들어가는 열유동률(Heat flow rate)이 평형상태임을 이용하여 지붕의 온도 경계조건을 계산하는 방법을 사용하였다. 이러한 방법론은 일부 설계관련도서<sup>(2),(8)</sup>에서 기본 개념이 제안되었지만, 여기에서는 기존 자료의 일부 오류를 수정하고 개선하였다. 이하의 계산시 지붕 안쪽의 라이너(Carbon steel) 및 현수천정 본체(Aluminum)는 두께가 매우 얇으므로 무시한다.

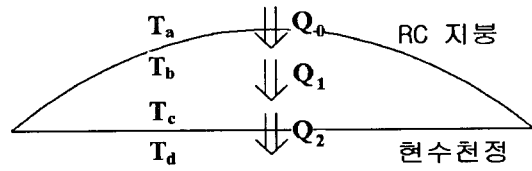


그림 4 지붕의 열유동률 가정

기존 해석에서 표면온도를 외기온도와 같게 두는 경우가 있지만, 지붕 콘크리트 외면의 온도는 외기온도와 대류현상 등에 의해 좌우되므로 실제적으로 외기온도와 같지는 않다. 정상상태에서 열의 전도식과 대류식 간의 등가성을 이용하면 지붕 콘크리트 외면온도를 외기온도로 두어도 같은 결과를 산출하게 되는 등가의 콘크리트 두께를 산출할 수 있으며, 이를 실제의 콘크리트 두께에 추가로 고려해서 계산의 정확도를 높이고 차후 계산과정을 용이하게 하였다.

본 계산에 쓰이는 기호는 다음과 같다.  $T_a$ : 외기온도(=35℃),  $T_b$ : 지붕 내면의 온도,  $T_c$ : 현수천정 상면의 온도,  $T_d$ : 현수천정 하면의 온도(=-170℃),  $\lambda_r$ : Resilient glass blanket의 열전도도[=0.038 W/(m·℃)],  $t_c$ : 대류현상에 의한 등가두께(0.182m)를 고려한 지붕 콘크리트의 두께(=0.6+0.182=0.782m),  $t_r$ : Resilient glass blanket의 두께(=0.5m),  $\epsilon$ : 방사율(Emissivity)(=0.6423),  $\sigma$ : Stefan-Boltzmann 상수[=5.67×10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>·℃<sup>4</sup>)],  $A_{roof}$ : 지붕의 면적(=7467.4m<sup>2</sup>),  $A_{deck}$ : 현수천정의 면적(=6647.6m<sup>2</sup>).

그림 2에서  $Q_0$  및  $Q_2$ 는 전도에 의한 열유동률,  $Q_1$ 은 복사에 의한 열유동률로 가정할 때 각각의 값은 식 (1)~(3)에 의해 산정할 수 있으며, 여기에서 열유동률은 열속(Heat flux)이 통과하는 단면적에 열속을 곱하여 구하였다. 원래 복사식에는 형상계수(Form factor)가 곱해져야 되지만, 일반적인 LNG 탱크의 지붕은 매우 납작한 돔의 형상이므로 지붕과 현수천정이 거의 평행하게 마주본다는 가정하에 형상계수를 1로 두었다. 열유동률의 평형이 이루어진다고 가정하면, 식 (1)~(3)이 모두 같다는 조건으로부터 지붕 내면의 온도( $T_b$ )를 계산할 수 있다.

$$Q_0 = \left( \lambda_c \frac{T_a - T_b}{t_c} \right) A_{roof} \quad (1)$$

$$Q_1 = [\epsilon \sigma \{ (T_b + 273)^4 - (T_c + 273)^4 \}] A_{roof} \quad (2)$$

$$Q_2 = \left( \lambda_r \frac{T_c - T_d}{t_r} \right) A_{deck} \quad (3)$$

#### 4. 벽체 및 바닥판 내면의 경계조건

##### 4.1 해석법의 제안

본 연구에서는 단열재의 효과를 경계조건으로 적절히 고려하는 방법론으로서 모든 단열재 층의 영향을 등가의 대류계수로 치환하는 방법을 제안하고자 한다.  $i$ 가 특정한 단열재 층을 의미할 때 단열재 층에서 실제로 일어나는 전도현상을 대류현상으로 치환하면 식 (4)와 같다. 여기에서 좌변은 전도

식, 우변은 대류식에 해당하며 이를 정리하면 식 (5)와 같이 등가의 콘크리트 대류계수  $h_{ci,eq}$ 를 산정할 수 있다.

$$\lambda_i \frac{\Delta T}{t_i} = h_{ci,eq} \Delta T \quad (4)$$

$$h_{ci,eq} = \frac{\lambda_i}{t_i} \quad (5)$$

한편 단열재 층은 단열재간의 직렬연결로 볼 수 있으므로, 모든 단열재 층의 등가 콘크리트 대류계수를 고려하면 다음 식 (6)과 같으며 결국 그림 3과 같은 문제를 푸는 것으로 귀착된다. 유도된 대류계수 및 외기 온도를 고려하여 온도해석을 수행해도 되겠지만, 정상상태에서 식 (7)의 대류 열속과 전도 열속의 평형으로부터 콘크리트 내면의 온도 ( $T_g$ )를 식 (8)과 같이 유도하여 고정온도 경계조건으로 주는 방법도 가능하다.

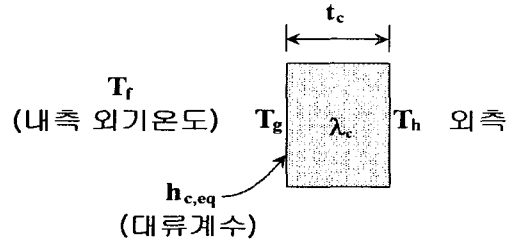


그림 5 단열재의 영향을 대류계수로 고려한 해석

$$\frac{1}{h_{c,eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ci,eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{t_i}{\lambda_i} \quad (6)$$

$$h_{c,eq}(T_g - T_f) = \lambda_c \frac{T_h - T_g}{t_c} \quad (7)$$

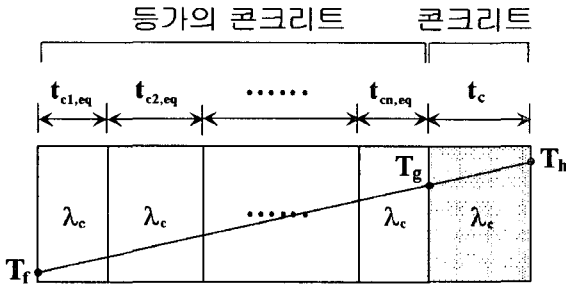
$$T_g = \left( \frac{h_{c,eq} t_c}{h_{c,eq} t_c + \lambda_c} \right) T_f + \left( \frac{\lambda_c}{h_{c,eq} t_c + \lambda_c} \right) T_h \quad (8)$$

#### 4.2 기존 방법과의 비교

(주)대우건설 등<sup>(2)</sup>에서는 단열재 층의 두께를 등가의 콘크리트 층의 두께로 모두 변환하는 방법으로 온도 경계조건을 계산하였다. 두께 변환에 관계없이 열속은 같아야 함을 이용하여 식 (9)와 같이 등가의 콘크리트 층의 두께  $t_{ci,eq}$ 를 산정할 수 있다.

$$t_{ci,eq} = \frac{\lambda_c}{\lambda_i} t_i \quad (9)$$

따라서  $n$ 개의 단열재 층이 존재한다면 그림 4와 같이 각 단열재 층을 등가의 콘크리트 층으로 변환한 후 정상상태에서 온도의 선형분포로부터 콘크리트 내면의 고정온도 경계조건 ( $T_g$ )을 식 (10)과 같이 유도할 수 있다. 식 (8)과 (10)은 서로 상이해 보이지만 식 (10)에 식 (6)을 대입하고 정리하면 식 (8)과 정확히 동일한 식을 산출함을 증명할 수 있다. 즉, 본 연구에서 제안된 방법은 기존방법과 비록 접근방식은 서로 다르지만 최종결과는 동일하다.



$$T_g = T_h - \frac{T_h - T_f}{\left(\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_c}{\lambda_i} t_i\right) + t_c} \times t_c \quad (10)$$

그림 6 단열재의 영향을 등가 콘크리트로 고려한 해석

#### 4.3 벽체 및 바닥판의 온도 경계조건 계산

앞서 논의하였듯이 제안된 방법과 기존 방법은 동일한 결과를 산출하므로 본 절에서는 등가두께를 이용한 기존 방법론으로 논의하기로 한다. 표 2에서는 단열재 층을 내조에서 외조 벽체 방향으로 실제의 순서대로 나열하였다. 여기에서 내조나 라이너는 두께가 매우 얇으므로 열전도에 미치는 영향이 작을 것으로 보아 무시하도록 한다. 식 (10)에서  $T_f$ 를 LNG 온도(=-170℃)로,  $T_h$ 를 외기온도(=35℃)로 두면 콘크리트 벽체의 내면온도를 계산할 수 있다.

표 2의 비교에서 보듯이 본 해석대상 LNG 탱크와 같이 단열재 층에 PUF를 쓴 경우 누출시에도 라이너에 부착된 PUF 층은 손실되지 않고 남으므로 외조가 직접적으로 LNG 온도에 접하는 것을 크게 완충시키는 역할을 할 수 있어 유리하다.

한편 바닥판의 경우에도 정상가동시와 누출시의 단열재층을 고려하여 벽체의 경우와 비슷한 과정으로 바닥판 내면온도를 계산할 수 있다. 내조 바닥부에서 누출시 바닥부 단열재의 중간에 위치한 Secondary protection의 차단효과로 일부 단열재는 보존된다.

표 2 벽체부 단열재의 등가 콘크리트 두께 계산

재료명	두께 (mm)	열전도도 [W/(m·℃)]	등가 콘크리트 두께 (mm)	비고
내조(9% Ni)	10		고려안함.	누출시 손실됨.
Resilient glass blanket	300	0.038	18347	
Perlite powder	635	0.040	36894	
PUF(Poly-Urethane Foam)	50	0.023	5052	
라이너(Carbon steel)	5		고려안함.	
외조 벽체(콘크리트)	750	2.324	750	
대류 효과			182	
합계			정상가동시 : 61225 누출시 : 5984	

#### 5. LNG 탱크의 온도해석 모델

그림 5는 해석대상 LNG 탱크에 대하여 본 연구에서 유도된 콘크리트 외조 내면의 고정온도 경계조건을 지붕, 벽체 및 바닥판별로 보여주고 있다. 벽체의 경우 PUF가 부착된 시스템에서의 온도이다. 이처럼 외조의 경계조건만 올바르게 설정된다면 현수천정, 단열재 등을 온도해석 모델에 포함시키지 않고 고도 외조만의 해석으로 비교적 정확히 외조의 온도분포를 추정할 수 있다.

지붕의 경우 기존 해석에서 지붕 내면 온도를 LNG 온도와 같게 두었던 것과 비교하여 본 연구에서 산정된 온도는 큰 차이를 보이는데, 이는 기존 해석에서 현수천정에 의한 차단효과 및 현수천정 위의 단열재의 효과를 올바르게 고려하지 못했기 때문이다. 또한 벽체 및 바닥판의 경우 기존의 누출시 해석에서 벽체 및 바닥판 내면의 온도를 LNG 온도와 같게 두는 것은 오류이며, 이는 누출시에도 남아있는 단열재의 영향을 합리적으로 반영하지 못한 결과이다. 만약 기존의 잘못된 해석과 같이 외조의 내면을 극저온으로 두고 해석하였을 경우, 콘크리트 단면은 극심한 온도경사하에 있게 되고 큰 휨모멘트가 발생하여 단면의 두께나 철근량이 실제로 요구되는 것 이상으로 과다하게 산정될 우려가 있다.

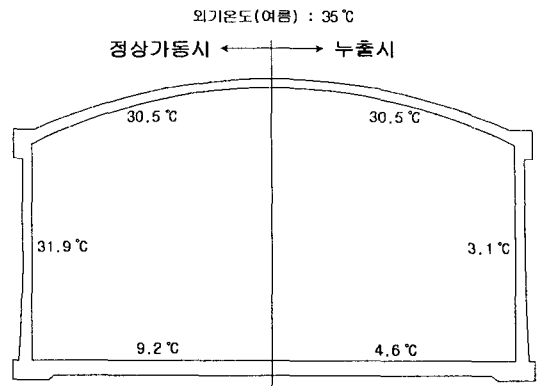


그림 7 LNG 탱크 외조 내면의 온도분포

## 6. 결 론

본 연구에서는 완전방호식 지상식 LNG 탱크의 합리적인 온도해석 모델을 고찰하였다. 콘크리트 외조만을 온도해석 모델에 포함시키고 현수천정이나 단열재의 영향은 따로 외조의 경계조건 산정시 고려할 수 있는 방법론을 모색하였다. 기존의 해석들에서 타당한 근거없이 온도해석 경계조건들을 추정했던 경우가 많은데 비해 본 연구에서는 지붕, 벽체 및 바닥판과 같이 외조를 이루는 요소별로 경계조건들을 유추할 수 있는 합리적인 방법론들을 제안하였다. 정상상태에서 열속 또는 열유동률이 일정하다는 조건을 열전도, 대류, 복사 등 다양한 열전달 이론에 적용하여 실용적으로 용이하게 사용할 수 있는 식을 유도하였다. 본 연구에서 제시된 간단한 수계산을 통하여 단열재 층의 영향이나 누출시의 영향을 사전에 명확히 파악한다면 단열재의 설계시 시행착오를 최소화할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. 대림산업주식회사, "Inchon LNG-receiving Terminal(1st Extension) 실시설계", 한국가스공사, 1995.
2. (주)대우건설, 대림산업주식회사, "통영 생산기지 저장탱크 및 본설비공사 기술제외서(Technical Part)", 한국가스공사, 1999.
3. 한국가스엔지니어링(주), 한국전력기술주식회사, "KOGAS 멤브레인 PILOT 탱크 설계(토목외조분야) 종합설계보고서", 한국가스공사, 2000.
4. 김청균, 조승현, "완전 밀폐형 PC 구조물의 누설 안전성에 관한 연구", 한국가스학회지, 제5권, 제4호, 2001, pp.85~91.
5. 김형식, 홍성호, 서홍석, 양영철, "ASME section VIII div.2에 따른 LNG저장탱크 코너프로텍션의 설계개념 고찰", 한국가스학회지, 제5권, 제3호, 2001, pp.73~79.
6. 양인환, 이광희, "저온에서의 프리스트레스트 콘크리트 LNG 저장 탱크의 거동 연구", 대림기술발표집-플랜트 부문, 1999, pp.5~28.
7. 최창근, 이태열, 이은진, "지하식 LNG 저장탱크의 개선된 유한요소해석모델", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제22권, 제5-A호, 2002, pp.1175~1182.
8. "Recommended Practice for LNG Inground Storage(RPIS)", Japan Gas Association, 1979.