

# 프리스트레스트 콘크리트 저장 탱크의 저온 조건에서의 거동 연구

## A Study on the Behavior of Prestressed Concrete Storage Tanks under Cryogenic Conditions

양 인 환\*      고 재 일\*\*      김 우 진\*\*\*  
Yang, In Hwan      Ko, Jae Il      Kim, Woo Jin

### ABSTRACT

This paper describes the behavior of prestressed concrete storage tanks under cryogenic temperatures by thermal stress analysis. In concrete tanks to store up LNG, a thermal shock can occur over a global area resulting from the sudden filling of the outer tank with cryogenic storage contents. Analysis results show that internal surface of concrete tank is cooled down rapidly. Tank is subjected mostly to thermal constraint moment due to temperature gradient across its section. Constraint moment may cause tensile stresses beyond tensile strength in the wall. Problems related with concrete cracking due to temperature gradient have been considered.

### 1. 서론

액화천연가스(Liquefied Natural Gas) 저장 탱크는 2중 구조로 구성된다. 내부 탱크는 액체 상태인 LNG 또는 기체상태인 증발가스가 새어 나오지 않도록 9% 니켈합금강으로 시공되며, 외부 탱크는 프리스트레스트 콘크리트 구조물로 시공된다. 내부 탱크와 외부 탱크 사이의 공간은 외부로 부터 유입되는 열을 차단하여 보냉 효과를 유지하기 위해 단열재로 충전된다. 외부 탱크의 안쪽면은 평상시 상온을 유지하나, 내부 탱크 파괴시  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 LNG에 의해 극저온에 노출된다. 극저온 노출(cryogenic attack)은 갑작스런 온도의 변화를 나타내며, 극저온 매체와 직접적인 접촉을 통해 발생하는 온도 하중을 의미한다. 온도 하중은 작은 면적에서 발생하여 국부적인 영향을 주거나, 극저온의 LNG가 외부 탱크에 채워지는 것과 같은 구조물 전체에 영향을 주는 상황이다. 따라서, LNG 저장탱크는 일반 토목 구조물과는 달리, 평상시  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 극저온 상태를 유지하기 위해 보냉구조뿐만 아니라 LNG 누수시의 비상시에 충분한 기밀성과 안전성을 확보하여야 한다<sup>1,2)</sup>. 본 논문에서는 내부 탱크의 LNG 누출에 따른 극저온 조건에서의 LNG 외부 탱크 단면 내의 온도분포 특성 및 온도 하중에 따른 거동 특성을 파악한다. 또한, 극저온의 온도하중에 의한 균열폭을 산정하므로써 구조물의 기밀성을 평가한다.

\* 정희원, 대림산업(주) 기술연구소 선임연구원, 공학박사

\*\* 대림산업(주) 기술연구소 선임연구원

\*\*\* 대림산업(주) 기술연구소 주임연구원

## 2. 구조물의 형상

LNG 저장 탱크의 형상을 그림 1에 나타내었다. 저장 탱크는 내부 탱크와 외부 탱크로 구성된 이중 구조물로서, 일차적으로 내부 탱크에 LNG를 채우며, 외부 탱크는 내부 탱크의 파손시 LNG를 저장하는 기능과 함께 외부하중으로부터의 구조물의 보호역할을 한다. 내부 탱크 벽체와 외부 탱크 벽체 사이에는 1m의 간격이 존재하며, LNG의 보냉을 위해 perlite성분의 단열재로 채워진다. 정상적인 사용하중시, 내부 탱크와 외부 탱크 사이에는 단열재가 존재하므로 프리스트레스트 콘크리트 외부 탱크의 안쪽면과 바깥쪽면 사이에는 온도 경사가 작다. 그러나, 내부 탱크 파손에 따른 LNG 누출 비상사태시에 저장탱크는 내부의  $-162^{\circ}\text{C}$ 와 외부의 경계온도에 해당하는 온도경사가 존재한다. 온도경사는 외부의 경계온도가 동절기일 때보다 하절기일 때 더 큰 값을 갖는다.

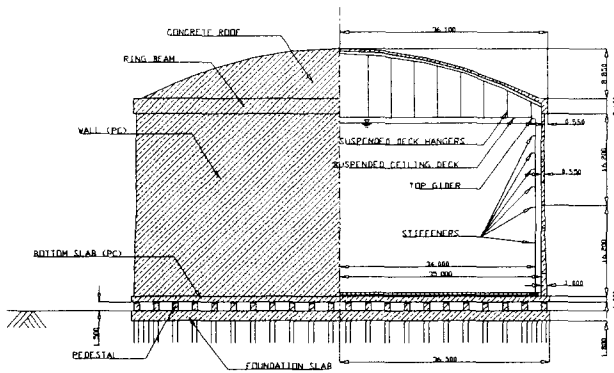


그림 1 LNG 저장탱크의 형상

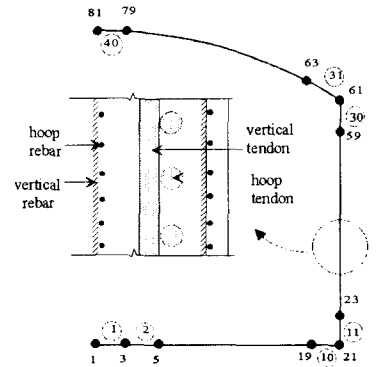


그림 2 해석 모델

## 3. 유한요소해석

### 3.1 해석모델 및 과정

본 연구에서는 실제로 국내에서 시공된 저장용량 100,000kl 구조물을 대상으로 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소 해석시 ABAQUS<sup>3)</sup> 프로그램을 사용하였다. 구조물의 기하학적 형상은 축대칭 쉘 요소를 사용하여 모델링하였으며, 기계 장비를 위한 국부적인 단면의 관통과 벽체에서의 수평 텐던의 정착을 위한 버트레스(buttress)는 무시하였다. 그림 2에 유한 요소 해석을 위한 축대칭 모델 형상을 나타내었다. 온도응력 해석시, 자오선 방향(또는 수직 방향) 철근과 원환방향 철근은 ABAQUS의 rebar요소로 모델링하며, 철근은 콘크리트를 모델링하는 각 쉘 요소 내에서 층(layer)으로 분포시키거나 또는 단일 철근으로 배근 모델링할 수 있다. 또한, 프리스트레싱 강재도 rebar요소를 사용한다. LNG 누출 액위는 바닥슬래브 상면으로 부터 6.00m, 16.20m 및 29.11m의 경우를 고려하며, LNG 누출시의 작용 하중조합( $U$ )은 다음과 같다.

$$U = 1.0D + 1.0P_e + 1.0G + 1.0F + 1.0T \quad (1)$$

여기서,  $D$ 는 자중,  $P_e$ 는 유효 프리스트레스트,  $G$ 는 누출에 따른 작용 가스압,  $F$ 는 액압 그리고  $T$ 는 온도하중을 나타낸다. LNG 누출에 따른 극저온 온도조건에서의 LNG 저장 탱크 구조물의 거동 해석

은 크게 열전달 해석과정과 온도하중에 따른 온도응력 해석과정으로 나뉘어 수행된다. 먼저, LNG 누출로 인한 극저온 온도에 따른 구조물의 온도 분포를 획득하기 위해 열전달 해석을 수행한다. 열전달 해석 후, 시간에 따른 온도 분포에 대한 온도응력 해석을 수행한다. 열전달 해석은 저장 탱크의 안쪽 면이 LNG에 노출된 후 각 절점에서의 온도 변화가 1°C 이하 일때까지 수행하였다.

### 3.2 해석 결과

벽체 단면 내의 온도분포 결과를 시간 단계별로 그림 3에 나타내었다. 시간에 따라 냉각효과는 벽체 내부로부터 벽체 외부로 점진적으로 진행된다. 이에 따라 저장 탱크 내부와 외부와의 온도 경사는 점진적으로 증가된다. 노출 경우 1과 2는 극저온 노출후 약 50시간 후에 최대 온도경사가 발생하며 온도 경사는 직선 형태가 된다. 노출 경우 3은 극저온 노출후 약 57시간 후에 최대 온도경사가 발생한다. 온도경사에 의해 단면에는 모멘트가 유발되며, 벽체의 안쪽면에 인장응력을 유발한다. 또한, 저온액 노출부위에서의 냉각효과로 인한 수축작용을 부재의 구속으로 인해 응력이 유발된다. 극저온에 노출된 단면의 안쪽면에서 국부적인 큰 인장응력이 발생하고 바깥면에서 압축응력이 발생한다. 인장응력 값은 노출부위에서 전반적으로 최대 50kg/cm<sup>2</sup> 정도까지 발생한다. 이는 콘크리트의 인장강도를 초과하는 응력이며, 안쪽면에서 균열을 유발할 수 있다.

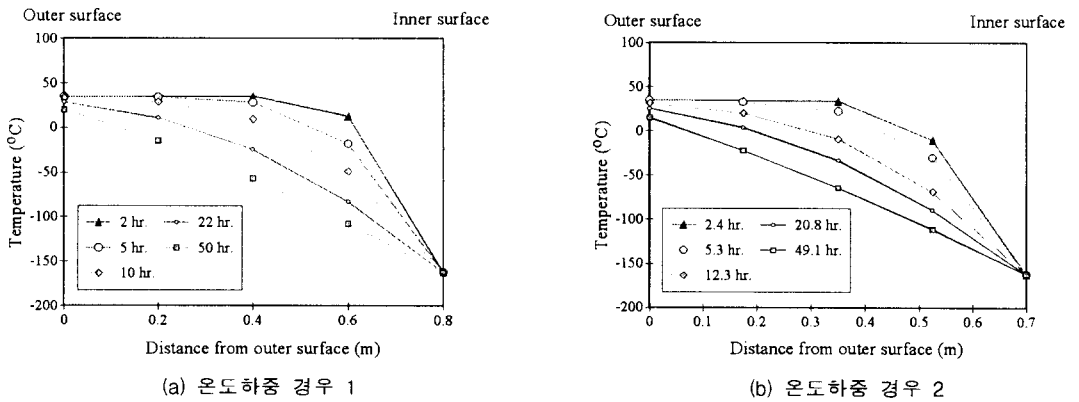


그림 3. 벽체의 온도 분포

### 4. 사용성 평가

본 연구에서는 감압하중 개념을 도입하여, 감압하중 이후의 철근의 응력에 근거하여 저장 탱크 벽체의 균열폭을 산정한다. 프리스트레스트 콘크리트 부재 단면의 감압하중은 다음식으로 표현된다.

$$P = P_e + \Delta P_b + P_s + \Delta P_s \quad (2)$$

여기서,  $P_e$ 는 프리스트레스의 초기손실과 시간에 따른 손실 발생후의 PS 강재에 작용하는 유효 프리스트레스 힘,  $\Delta P_b$ 는 고정하중과 유효 프리스트레스 작용시 텐던 위치에서의 콘크리트 응력을 상쇄하기 위해 텐던에 작용해야 하는 힘,  $P_s$ 는 시간에 따른 변형률에 의한 철근에 작용하는 힘,  $\Delta P_s$ 는 고정하중과 유효 프리스트레스 작용시 철근 위치에서의 콘크리트 응력을 상쇄하기 위해 철근에 작용해야 하는 힘이다.

Suri와 Dilger<sup>4)</sup>는 감압하중 이후의 철근의 응력을 바탕으로 Gergely-Lutz 공식을 수정하여 프리스트레스트 콘크리트 부재의 균열폭을 산정하기 위한 식을 제안하였다. 강연선 종류의 프리스트레싱 강재와 이형 철근을 갖는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 균열폭을 산정하기 위한 제안식은 다음과 같다.

$$w_{\max} = 13.7 \times 10^{-6} f_s (c \cdot A)^{1/3} \quad (3)$$

여기서,  $w_{\max}$ 는 최대 균열폭 (mm),  $A$ 는 철근에 대한 콘크리트의 인장 면적( $\text{mm}^2$ ),  $c$ 는 콘크리트의 최소 피복 두께 (mm),  $f_s$ 는 감압하중 이후의 철근의 응력( $\text{MN}/\text{m}^2$ )이다. 식 (3)을 적용하여 각 하중경우에 대하여 대표단면에서의 균열폭을 산정하였으며, 이를 표 1에 정리하여 나타내었다. 또한 표 1에 산출한 단면의 압축영역 깊이도 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 각 하중 경우의 균열폭은 0.06~0.12mm이며, 압축영역 깊이는 150mm이상으로써 내부 탱크 파괴에 따른 LNG 누출 비상사태시 외부 탱크의 기밀성은 충분히 확보된다고 사료된다.

표 1 대표단면에서의 균열폭 및 압축영역 깊이(mm)

	하중 경우 1	하중 경우 2	하중 경우 3
균열폭 ( $w$ )	0.08	0.06	0.12
압축영역깊이	228.5	252.6	157.0

## 5. 결론

본 논문에서는 LNG 저장탱크 구조물의 내부 탱크 파괴시의 외부 탱크의 냉각에 따른 온도응력해석을 수행하였다. 극저온(-162℃)의 LNG 누출시 구조물 안쪽면부터 온도가 하강한다. 누출 후 약 50시간 후에 구조물 단면에 최대의 온도경사가 유발된다. 온도경사가 발생하는 부분은 극부적으로 큰 휨모멘트가 발생하며, 온도 경사의 증가와 더불어 휨모멘트도 증가한다. 이때, 구조물의 벽체 안쪽면에는 인장응력이 유발되며, 바깥면에는 압축응력이 유발되는 것으로 나타난다. 본 연구에서는 Suri와 Dilger가 제안한 Gergely-Lutz의 수정 공식을 사용하여 온도응력으로 인한 콘크리트의 균열폭을 산정하였다. 예상 균열폭과 균열 단면에서의 압축영역 깊이를 고려할때, 콘크리트 저장 탱크의 냉각에 따른 비상시에 구조물의 기밀성과 사용성은 확보된다고 사료된다.

## 참고문헌

1. Closner, J. J. and Parker, R. O.(1978), "Careful Accident Assessment Key to LNG Storage Safety." *The Oil and Gas Journal*, Feb. 6, pp.47-51.
2. van Breugel, K.(1982), "A Designer's Perspective on Cryogenic Storage System for Liquefied Industrial Gases." *Cryogenics*, Vol. 22, No. 7, July, pp.331-334.
3. *ABAQUS Theory Manual, User's Manual*, Ver. 5.6, Hibbit, Karlsson & Sorensen.
4. Suri, K. M. and Dilger, W. H.(1986), "Crack Width of Partially Prestressed Concrete Members." *ACI Journal*, Sept.-Oct, pp.784-797.