

LNG 지하 저장탱크 벽체의 비선형 열응력 해석

Nonlinear Thermal Stress Analysis of In-ground LNG Storage Tank

곽 효 경¹⁾ 송 중 영²⁾ 이 광 모³⁾
Kwak, Hyo-Kyoung Song, Jong-Young Lee, Kwang-Mo

ABSTRACT

Concrete cracking due to the temperature gradient across the wall, caused by the difference in temperature between cryogenic liquid natural gas stored and surrounding environment of in-ground LNG storage tank, is investigated in this study. Crack propagation of concrete LNG tank is effectively simulated by using a layered degenerated shell element. In addition, material nonlinearity is taken into consideration on the basis of the nonlinear elastic-orthotropic model. Finally, numerical analysis for a real LNG storage tank is conducted with the objective to verify the efficiency of the introduced model.

1. 서 론

현재 세계 1차 에너지 수요의 20%이상을 담당하는 천연가스는 국내에서도 석유 에너지 의존도를 낮추고 에너지 사용의 다변화를 위해 지난 1986년부터 액화천연가스를 도입한 이래로 사용상의 용이성과 무공해성 때문에 수요량이 급증하고 있다. 우리나라의 천연가스 도입 및 공급은 원산지에서 뽑아 올린 천연가스를 수송 및 저장 등을 위하여 -162°C 로 냉각하여 그 부피를 1/600로 줄여 해상수송을 거친 뒤에 국내의 주요기점에 설치된 인수기지를 통하여 도시가스 및 발전용 연료로 공급되는 LNG(Liquid Natural Gas) 수송이다.

최근 이러한 LNG의 점진적인 사용증가로 인하여 LNG 인수기지의 건설이 증가하고 있으며 국내에서도 인수기지 설비 프로세스, 극저온 설비 및 기기 및 천연가스 물성 관련 연구 등이 폭넓게 진행되고 있는 실정이다. 나아가 청정 에너지로 인식되는 천연가스의 안정적 공급을 위해서는 LNG공급을 위한 비축 저장탱크의 구조적인 안정성을 확보하는 것이 무엇보다도 중요하다. 극저온인 LNG의 특수성상 저장 탱크를 이루는 재료들은 상온과 다른 온도 의존적인 비선형 거동을 보이게 된다. LNG 지하 저장 탱크는 탱크 본체와 덮개로 구성되며, 본체는 내, 외력을 담당하는 철근 콘크리트 외조와 경질의 폴리 우레탄폼등과 같은 단열재에 의한 단열층, 극저온에 직접 접하게 되는 스테인레스 박판 등의 멤브레인으로 구성된다. 이와 같은 저장탱크 구조는 일반적인 구조와 달리 특수한 구조물로써 지진 및 극저온 재료 물성 효과, 지반의 동결융해, 내부의 가스 및 LNG 유체 압력 등에 의한 문제 등 설계, 시공 시에 많은 어려움이 존재하게 된다. 본 연구에서는 LNG 저장·탱크의 구조해석 분야 중에 특히 사용, 유지환경하의 온도조건 변화에 따른 열전도해석을 수행한

-
- 1) 한국과학기술원 토목공학과 부교수
 - 2) 한국과학기술원 토목공학과 박사과정
 - 3) 한국과학기술원 토목공학과 석사과정

결과로부터 얻어진 온도 분포 자료를 이용하여 저장 탱크 벽체에 발생하는 열응력에 의한 콘크리트 비선형 균열 거동 해석을 수행하였다. 저장 탱크의 효율적인 해석과 균열 거동을 모사하기 위해 본 연구에서는 8절점 감절점 쉘요소를 사용하여 재료 비선형 해석을 수행하였다.

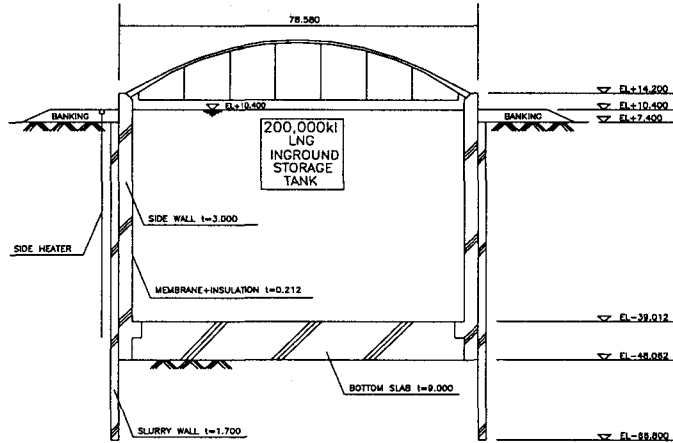


그림 1 LNG 지하 저장 탱크의 개요

2. 철근 콘크리트 재료 비선형 모델

LNG 지하 저장 탱크 벽체를 이루는 철근 콘크리트 구조물의 균열 거동을 모사하기 위하여 다음과 같은 해석 모델을 사용하였다. 일반적으로 철근 콘크리트 구조물은 서로 다른 성질을 가진 두 재료로 구성되어 있어 유한요소해석을 위해서 대상 구조물의 거동에 적합한 재료 모델을 선정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 비교적 균질한 재료로 이루어진 철근의 경우에는 압축 영역과 인장영역에서 동일한 응력-변형률관계를 갖는 탄소성 재료로 모사하였으며 콘크리트의 경우에는 각 하중 단계에서 응력-변형률 관계를 변형된 Hognestand 모델을 사용하였다.

2.1. 콘크리트

이축 응력 상태의 콘크리트는 포아송 효과와 내부 미세 균열 등의 영향으로 1축 상태와 다른 거동을 나타낸다. Kupfer 등의 실험에 의하면 콘크리트가 압축-압축을 받는 경우 주응력비가 0.5일 때 1축 압축 강도의 1.25배 증가되며 인장-압축의 조합시에 압축 강도는 다음 그림에서 보는 바와 같이 선형적으로 감소하게 된다. 2축 인장 영역에서는 일축거동과 거의 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

본 연구에서는 인장-압축영역의 거동특성을 나타내기 위하여 Kupfer 등이 제안한 다음의 식을 사용하였으며 이축 압축 응력 상태의 경우에는 주응력비를 사용하여 직교하는 두 주축의 압축 응력을 식 (1)의 관계를 이용하여 산정하였다.

$$\frac{\sigma_{2p}}{f'_c} = 1 + 0.8 \frac{\sigma_{1p}}{f'_c} \quad (1)$$

$$\sigma_{2p} = \frac{1 + 3.65\alpha}{(1 + \alpha)^2} \cdot f'_c, \quad \sigma_{1p} = \alpha \cdot \sigma_{2p}; \quad \alpha = \sigma_1 / \sigma_2, \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \quad (2)$$

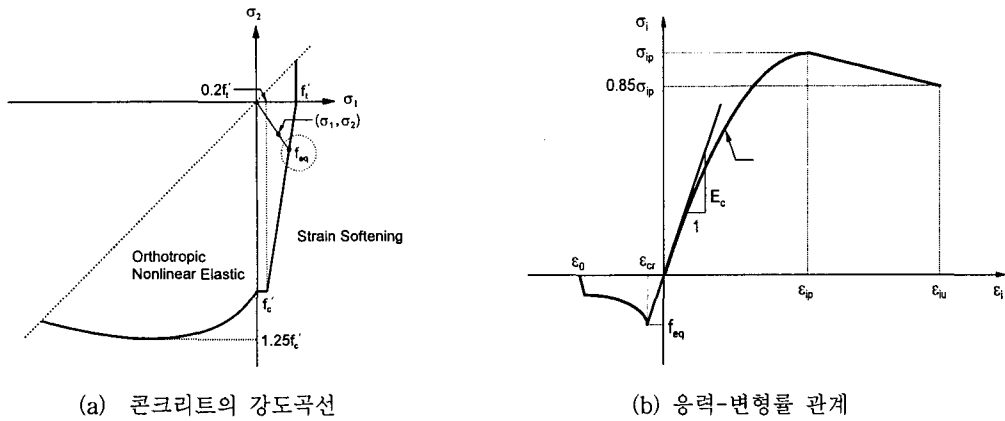


그림 2 콘크리트의 재료모델

나아가 포아송비의 영향을 포함하는 등가의 일축 응력-변형률관계를 모사하기 위하여 다음의 식으로부터 정의되는 최대 압축 응력에 대한 변형률을 구하게 된다.

$$\begin{aligned} \epsilon_{2p} &= \epsilon_c \cdot \left(3 \frac{\sigma_{2p}}{f_c} - 2 \right) \\ \epsilon_{1p} &= \epsilon_c \cdot \left[-1.6 \left(\frac{\sigma_{1p}}{f_c} \right)^3 + 2.25 \left(\frac{\sigma_{1p}}{f_c} \right)^2 + 0.35 \left(\frac{\sigma_{1p}}{f_c} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

2.2. 철근

철근의 경우에는 콘크리트와는 달리 해석상의 편의를 위해 다음과 같이 단일 응력-변형률관계로 규정하는 탄소성 재료로서 모델링하였다.

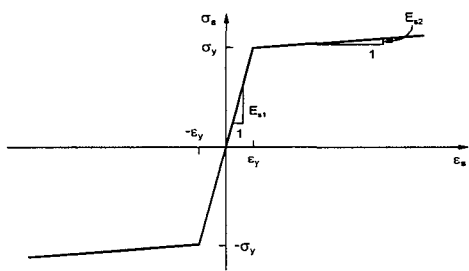


그림 3 철근의 응력-변형률관계

3. 감절점 쉘 요소를 이용한 유한요소 정식화

3.1. 감절점 쉘(degenerated shell) 요소의 선형 정식화

감절점 셀요소는 각각의 절점에서 다음의 그림과 같이 3개의 이동변위와 2개의 회전변위를 갖게 되며, 기하학적 형상은 중립면의 절점좌표와 이에 수직인 벡터들을 사용하여 표시할 수 있다.

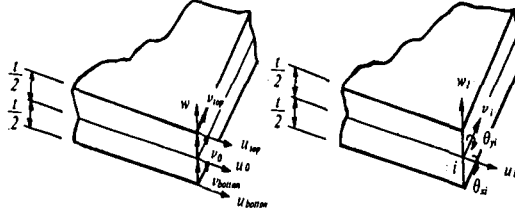


그림 4 감절점 셀요소의 절점 변위

이와같이 감절점 셀요소는 3차원 등매개변수의 입체요소로부터 절점을 줄여(degenerate) 유도되며, 요소의 기하학적 형상은 다음 식과 같다.

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) \left(\frac{1+\xi}{2} \right) \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix}_{top} + \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) \left(\frac{1-\xi}{2} \right) \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{Bmatrix}_{bot} \quad (4)$$

또한 요소의 변위성분은 다음과 같이 근사화 된다.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \sum N_i \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} + \sum N_i \xi \frac{t_i}{2} [v_i] \begin{Bmatrix} \alpha_i \\ \beta_i \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서, $[v_i] = [v_{1i} - v_{2i}]$ 이며, N은 형상 함수, v_{1i} : 기준축의 단위 방향벡터, v_{2i} : 기준축에 직각인 축의 단위 방향벡터를 나타낸다.

이를 이용하여 요소의 중립면에 수직방향의 응력(σ_z)을 무시하면, 국지 좌표계에서의 변형률을 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_x \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_{,x} \\ v_{,y} \\ u_{,y} + v_{,x} \\ u_{,z} + w_{,x} \\ v_{,z} + w_{,y} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

이와같은 국지좌표계의 변위 미분치는 다음과 같이 전체좌표계의 변위미분치에 의해 산정되어진다.

$$\begin{Bmatrix} \frac{\partial u'}{\partial x'} & \frac{\partial v'}{\partial x'} & \frac{\partial w'}{\partial x'} \\ \frac{\partial u'}{\partial y'} & \frac{\partial v'}{\partial y'} & \frac{\partial w'}{\partial y'} \\ \frac{\partial u'}{\partial z'} & \frac{\partial v'}{\partial z'} & \frac{\partial w'}{\partial z'} \end{Bmatrix} = [\theta]^T \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial v}{\partial z} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{Bmatrix} [\theta] \quad (7)$$

여기서, $[\theta]$ 는 방향여현행렬이며, $\begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial v}{\partial z} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{Bmatrix} = [J]^{-1} \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} & \frac{\partial v}{\partial \xi} & \frac{\partial w}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} & \frac{\partial v}{\partial \eta} & \frac{\partial w}{\partial \eta} \\ \frac{\partial u}{\partial \zeta} & \frac{\partial v}{\partial \zeta} & \frac{\partial w}{\partial \zeta} \end{Bmatrix}$ 이며,

$$[\Lambda] = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} & \frac{\partial z}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} & \frac{\partial z}{\partial \eta} \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta} & \frac{\partial y}{\partial \zeta} & \frac{\partial z}{\partial \zeta} \end{bmatrix} \text{이다.}$$

3.2. 등가 절점 온도 하중

온도하중은 초기 변형률 ϵ_0 로 가정하여 산정되며, 초기 온도변형률에 의해 구조물에 작용하는 등가의 절점하중은 다음과 같이 각 요소마다 구해진다.

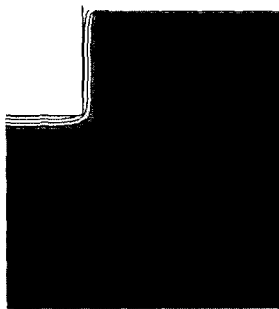
$$F_T^e = \int \int_V B^T \cdot D \cdot \epsilon_0 dV \quad (8)$$

4. LNG 지하 저장 탱크의 열응력 해석

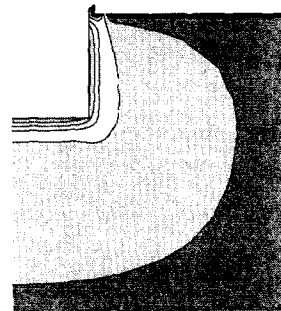
4.1. 저장탱크의 열전도해석과 열응력 해석

LNG 지하저장 탱크의 열응력 해석 및 열전도해석에 의한 온도분포추정은 저장탱크의 BOG(Boil Off Gas) 량의 추정과 저장탱크 벽체의 열응력 계산과 지반동결 영향 등의 예측을 위해 수행된다. 구조해석을 위해서는 상온에서 건설된 LNG 저장탱크가 극저온의 영향을 받아 열적 평형 상태에 도달한 뒤의 정상 해석의 결과를 이용하게 된다. 본 연구에서는 LNG 인수기지 지하 저장 탱크의 열전도해석 예를 중심으로 앞 절에서 구현한 비선형 열응력 해석을 수행하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 해석 조건은 대기온도가 겨울, 여름인 경우와 동결토 관리를 위해 탱크의 외벽 바깥에 설치된 사이드 히터작용에 의하여 동결토 영역이 1 미터와 0 미터인 네가지 경우에 대하여 적용하였다. 열전도 해석은 축대칭 유한요소를 이용하여 수행되었으며 각각의 경우에 대한 온도분포 결과는 다음 그림과 같다.

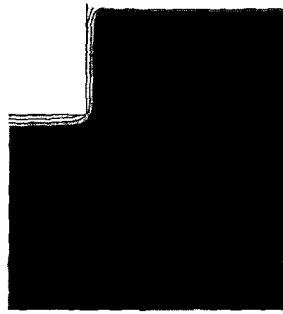
그림에서 알 수 있듯이 여름(CASE 2, 4)과 겨울(CASE 1, 3)의 주변 지반 온도분포가 크게 차이를 알 수 있으며, 동결토 영역에 따라 차이가 남을 알 수 있다. 또한 실제로 해석하고자 하는 대상인 벽체의 온도 분포의 경우에는 겨울과 여름의 차이가 지상부에서는 큰 차이를 나타내나 벽체 깊이가 깊어질수록 거의 동일한 분포를 보여준다.



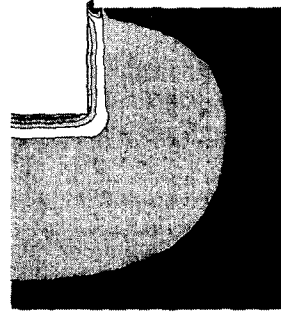
(a) CASE 1



(b) CASE 2



(c) CASE 3



(d) CASE 4

그림 5 LNG 저장 탱크의 열전도 해석 결과

표 1 열전도 해석 예

CASE	저장 탱크 내부 온도	동결토 영역	대기 온도
CASE 1	-162℃	1m	겨울
CASE 2	-162℃	1m	여름
CASE 3	-162℃	0m	겨울
CASE 4	-162℃	0m	여름

Cracked Zone
Tension Zone
Compression Zone



(a) CASE 1



(b) CASE 2



(c) CASE 3



(d) CASE 4

그림 6 열응력 해석에 의한 벽체 균열 분포

이와같이 열전도 해석에 의하여 얻어진 온도분포 결과를 감절절 쉘요소로 모델링된 구조해석 모델에 적용하여 벽체에 발생하는 열응력에 의한 균열 거동을 살펴보았다. 그림 6을 살펴보면 여름의 경우, 사이드 히터의 작용에 의하여 동결토 영역이 1미터 인경우와 0미터인 경우가 거의 동일한 거동을 나타냄을 알 수 있다. 나아가 이와같은 균열 분포를 통하여 사이드 히터의 작용에 의한 영향보다는 계절에 의한 온도변화가 지하

저장 탱크 벽체에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 통상적으로 설계 시에는 균열 발생과 크리프 등에 의한 강성 저하를 고려하여 콘크리트 전단면의 강성을 1/2로 저감하여 사용하도록 추천되고 있으나 비선형 해석 결과를 살펴보면 전형적인 설계 온도 분포에 의해 발생하는 열응력에 의해 벽체의 유효 단면적이 감소하는 영역은 벽체의 중심부에 국한되어 있음을 알 수 있다.

4.1. LNG 저장탱크 벽체의 부재력 거동 특성

본 절에서는 해석된 균열영역을 이용하여 LNG 지하 저장 탱크에 대한 구조해석을 수행한 결과는 다음과 같다. CASE 2와 CASE 4는 동일한 균열거동을 나타내어 벽체에 작용하는 부재력은 다음 그림과 같이 자중과 극저온 액체압, 그리고 수평으로 거의 동일한 하중이 작용하는 경우인 동결토압이 작용하는 경우의 휨 모멘트 부재력을 비교하였다. 열응력에 의하여 발생한 균열은 그림 6에서 보는 바와 같이 겨울환경에서 벽체 중앙부에 균열이 많이 발생하는데 이러한 까닭에 자중보다는 하중이 횡 방향으로 작용하여 벽체에 휨 모멘트를 크게 유발시키는 액체압 하중조건(그림 8(b))과 거의 수평 하중이 작용하여 저장 탱크 벽체가 바닥 슬래브 부분이 고정단인 캔틸레버 보와 유사한 거동특성을 나타내는 동결 토압 하중 조건(그림 8(c))의 경우에 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다. 이와 같은 사실로부터, 통상적으로 휨 강성의 절반(0.5 EI)을 저하시켜 온도 분포에 의한 균열을 고려하는 통상적인 설계 방법이 대부분의 설계 하중조건하에서는 보수적인 결과를 보여 주나, 동결 토압등과 같이 횡방향으로 작용하는 설계 하중 조건의 경우에는 보다 상세한 구조해석을 수행할 필요가 있음을 알 수 있다.

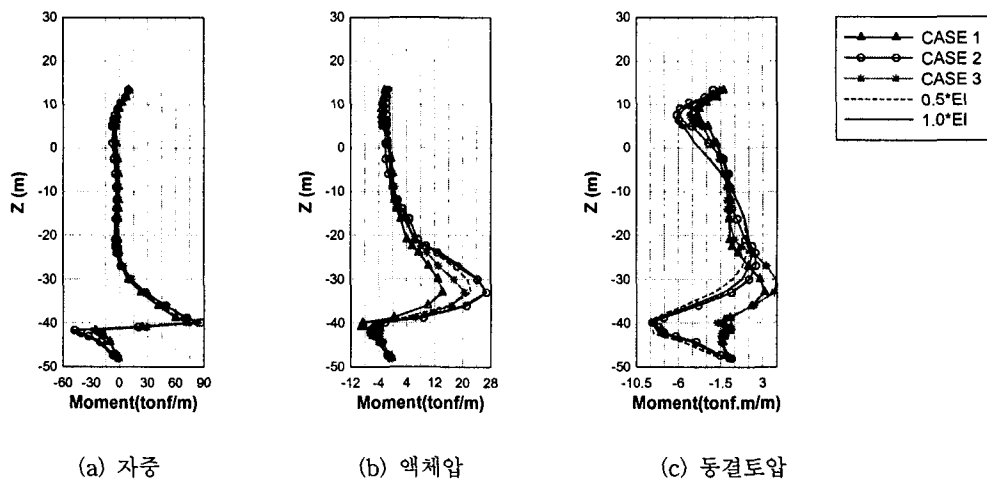


그림 7 균열거동을 특성을 고려한 LNG 저장 탱크의 부재력

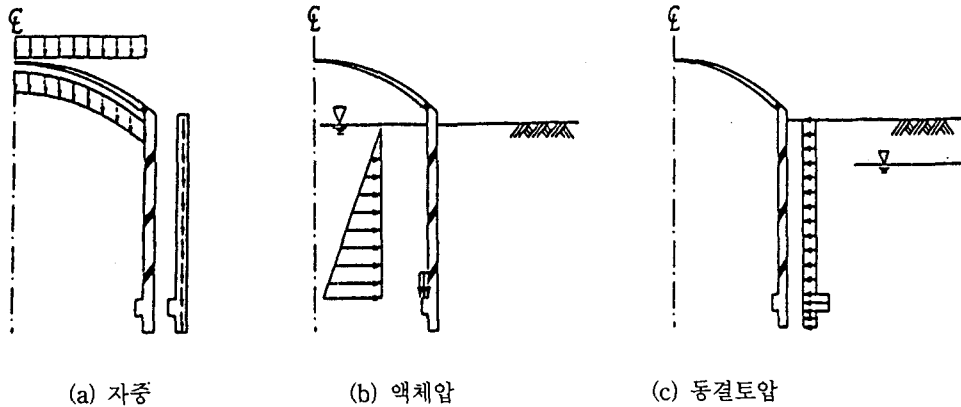


그림 8 설계 하중 조건의 예

5. 결 론

본 연구에서는 극저온의 액체와 주위 온도 환경에 의하여 유발되는 온도분포를 열전도해석으로부터 구한 뒤에 이를 바탕으로 LNG 지하 저장 탱크 벽체에 대한 비선형 열응력 해석을 수행하였다. 보다 효율적인 균열 거동 모사와 해석의 경제성을 증가시키기 위하여 벽체는 층상화된 감질점 셀 요소와 철근 콘크리트는 직교이방성 모델을 사용하여 모델링 되었다. 실제적인 LNG 저장 탱크 구조물에 제안된 해석기법을 적용한 결과, 통상적으로 열응력에 의한 콘크리트의 균열 영향을 고려하기 위하여 저장 탱크 설계시 가정되는 유효 단면적 값이 보수적인 설계를 유발함을 알 수 있었으나 동결 토압등과 같이 횡방향에서 작용하는 하중조건 의 경우에는 보다 상세한 설계를 할 필요가 있음을 알 수 있다.

참고 문헌

1. 일본가스공사, "Recommended Practice for LNG Inground Storage", Committee on LNG Inground Storage, 1979.
2. 한국가스공사, "인천 LNG 인수기지 #13, 14 저조해석", 연구보고서, 1999.
3. Chen, E. F., Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill, New York, 1982.
4. Hinton, E. and Owen, D. R, *Finite Element Software for Plates and Shells*.
5. Hognestad, E., "A Study on Combined Bending and Axial Load in RC Members", Univ. of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin Series No. 399, Bulletin No. 1, 1951.
6. Kwak, H. G., and Filippou, F. C., "Finite element Analysis of Reinforced Concrete Structures under Monotonic Loads", Report, NO. UCB/SEMM-90/14, Univ. of California, Berkeley, 1990.