

지하식 LNG 저장탱크의 설계 조건에 따른 거동분석

Structural Response of Underground LNG Storage Tank (Parameter Study for Design Conditions)

곽 효 경[†] 이 광 모* 송 종 영**
Kwak, Hyo-Gyoung Lee, Kwang-Mo Song, Jong-Young
(논문접수일 : 2001년 2월 2일 ; 심사종료일 : 2002년 3월 11일)

요 지

이 논문에서는 지하식 LNG 저장탱크의 설계조건 변화에 따른 구조거동에 대한 사례연구를 다루었다. 지하식 LNG 저장탱크의 설계에 있어서, 최적의 탱크 형상과 치수를 결정하는 것은 다양한 하중조건과 이들의 하중조합 하에서 더욱 향상된 구조거동을 위해 매우 중요하다. 저장 탱크의 설계단계에서 유지단계에 이르기까지 구조거동에 영향을 미치는 주요인자에 대한 분석과 평가가 이루어졌으며, 이러한 매개변수연구를 토대로 한 결과에 근거하여 지하식 LNG 저장탱크의 보다 합리적인 설계에 대한 기초자료를 제안하였다.

핵심용어 : 지하식 LNG 저장탱크, 극저온, 하중조합, 설계변수

Abstract

This paper deals with parametric studies of the structural response of underground LNG storage tanks according to change in design conditions. In the design of underground LNG storage tank, it is required to determine the optimal tank shape and dimension to represent a more improved structural behavior under many loading conditions and load combinations. Consequently, main factors which affect to the structural response of LNG storage tanks from planning and design up to maintenance, are investigated, and the differences in structural behavior due to those factors are analyzed. On the basis of the obtained results from parametric studies, a guideline for a more reasonable design is introduced.

Keywords : *Underground LNG Tank, Extremely Low Temperature, Load Combination, Design Parameter*

1. 서 론

최근 산업화에 따른 경제발전과 환경문제에 대한 사회적 요구의 증대로 인해 무연탄을 중심으로한 화석연료 사용이 감소하는 반면 대기오염이 극히 작은 액화

천연가스(LNG : Liquid Natural Gas)의 사용이 급격히 증가하고 있는 추세이다. 국내의 경우 1986년부터 LNG가 사용되기 시작한 이래로 그 수요가 증가 추세에 있으며, LNG의 안정적인 공급을 위한 비축시설인 저장탱크의 건설이 지속적으로 이루어지고 있다. 탱

[†] 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수
전화: 042-869-3621; Fax: 042-869-3610
E-mail: khg@kaist.ac.kr

* (주)청석 엔지니어링, S.O.C. 사업부

** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 연수연구원

* 이 논문에 대한 토론을 2002년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2002년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

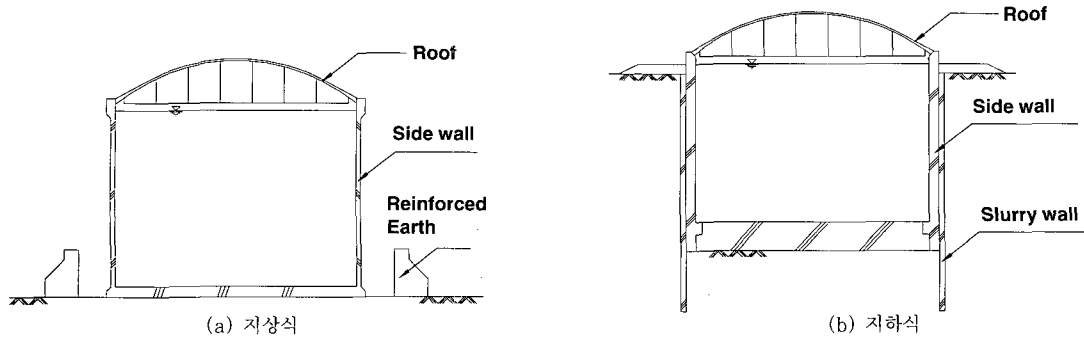


그림 1 LNG 저장탱크의 예

크 구조물의 도입 초기에는 지상식 저장탱크를 중심으로 건설이 활발히 이루어졌으나, 지상식의 경우 혐오시설로 인식되고 있으며, 사고시 피해를 최소화하고 사용시 부대면적이 비교적 적게 요구되는 지하식 저장탱크의 설치가 본격화되고 있는 실정이다.¹⁾

금속멤브레인, 단열재, 콘크리트 구체로 구성된 원통형 셸 구조를 이루고 있는 LNG 저장탱크는 일반 토목구조물과 달리 내부에 대용량의 -162°C 극저온 액체를 저장해야 하는 관계로 액체압은 물론 극저온 온도에 따른 영향과 함께 구조물의 붕괴시 그 피해 규모가 크기 때문에 지진하중을 포함한 극한하중에 대해 충분한 안전성이 요구되는 특수 구조물이다. 최근 국내에서 주로 시공되고 있는 지하식 LNG 저장탱크는 일본을 중심으로 발전하기 시작하여 20만kL 규모 이상의 탱크가 설계, 시공되는 등 현재의 기술수준은 발전단계에 있다.

이 논문에서는 LNG 저장탱크의 해석/설계를 위해 개발된 전용해석 프로그램(FESA-LNG)²⁾을 사용하여 LNG 저장탱크를 이루는 구조재료의 온도 의존적인 거동특성과 다양한 설계하중 조건하에서 저장탱크의 매립깊이, 액체깊이, 지붕형상, 온도변화에 의한 탄성계수 변화와 벽체의 균열 깊이 등 주요 설계/사용조건 변화에 따른 구조물의 거동을 비교, 분석하였다. 나아가 얻어진 결과를 토대로 LNG 저장탱크의 해석시 극저온 재료상수 등 다양한 영향인자의 고려여부를 결정하고 설계시 보다 효율적인 해석이 이루어지도록 하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. 해석 모델링

유한요소 해석을 위한 LNG 저장탱크의 모델링은

지붕, 벽체, 코벨, 지중연속벽, 바닥슬래브 등의 탱크 형상 모델링과 탱크 내의 액체깊이, 코벨부와 바닥슬래브 간의 연결 스프링, 벽체와 지중연속벽간의 경계처리, 지반을 모사한 경계스프링 등의 경계조건 모델링으로 크게 구분할 수 있다.

탱크형상 모델링은 해석의 효율성과 정확도 향상을 위해 그림 2와 같이 지붕 침정부는 체논의 국부적 세분화에 유용하게 이용될 수 있는 평면 셸 변이요소를 사용하여 지붕 침정부에서 singularity가 발생되지 않도록 모델링하였고, 코벨부와 지붕과 벽체가 만나는 부분은 회전자유도를 가진 변질점요소를 이용해 서로 직각으로 연결되는 응력집중부의 거동을 보다 정확히 규명할 수 있도록 도모하였다.³⁾ 나아가 구조물은 작용하는 하중과 구조물의 대칭성을 고려하여, 반만 모델링하였으며 1514개의 셸요소가 사용되었다(그림 2 참조).

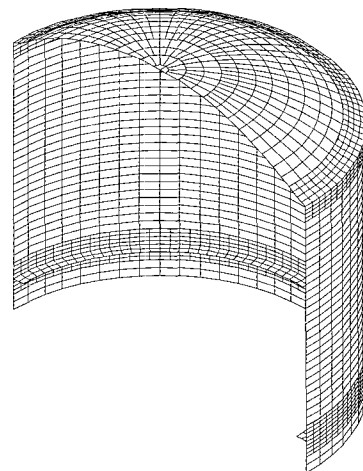


그림 2 저장탱크 구체의 모델링

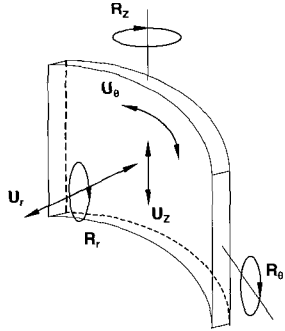


그림 3 벽체와 지중연속벽 경계면의 자유도

벽체와 지중연속벽간의 경계처리는 그림 3과 같이 경계면에 존재하는 6개의 자유도를 고려하였고, 이들 자유도의 변형에 따른 구속과 경계면에서의 전단연결 유무에 따라 경계조건을 네 가지 경우로 세분화하여 적용하였다.⁴⁾

설치 부지의 지반층 각각에 대한 방사방향 지반반력계수는 여러 현장조사 및 시험결과에 의해 얻어진 변형계수를 써서 하중 재하폭 등의 영향을 고려하여, 다음 식과 같이 산정하였다.

$$K_r = K_{H0} \cdot \left(\frac{B_H}{30} \right)^{-3/4} \quad (1)$$

여기서, k_r = 방사방향 지반반력계수(kgf/cm³), k_{H0} = 지름 30cm의 강체원판에 의한 평판재하시험의 값에 상당하는 방사방향 지반반력계수, B_H = 하중작용방향에 직교하는 환산 재하폭(cm)을 각각 나타낸다. 이때, $k_{H0} = \frac{1}{30} \alpha E_0$ 으로 구해지며, E_0 는 측정 또는 추정된 설계의 대상이 되는 위치에서의 지반의 변형계수(kgf/cm²), α 는 지반반력계수의 추정에 쓰이는 계수이다 (표 1참조).

지진시 지반반력계수는 정상시의 두 배로 고려하였고, 표 2와 같이 수직방향과 원주방향 지반반력계수는 각각 방사방향 지반반력계수의 1/3배로 가정하여 모델링하였다.⁵⁾

이러한 지반반력계수를 등가스프링계수로 치환하여, 생성된 벽체와 지중연속벽의 변절점요소 절점에 부착함으로써 지반의 강성 영향을 반영하게 되는데, 이때 4절점 쉘요소로 모델링된 구조물에 연결되는 지반의 등가스프링계수는 다음식과 같이 계산되어진다.

$$k_{eq} = \frac{k_s \cdot A}{4} \quad (2)$$

여기서, k_s 는 정상시의 지반반력계수, A 는 요소의 면적

표 1 E_0 와 α 값

시험방법에 의한 변형계수 E_0 (kgf/cm ²)	α	
	정상시	지진시
지름 30cm의 강체원판에 의한 평판재하시험을 반복시킨 곡선에서 구한 변형계수의 1/2	1	2
표준관입시험의 N값에서 $E_0 = 28N$ 으로 추정된 변형계수	1	2

표 2 설치 부지의 지반반력계수(k_s) (정상시)(tf/m³)

토질층	깊이(EL. · m)	LNG Tank Only		Tank + 지중연속벽			
		벽체외부		지중연속벽 외부		지중연속벽 내부	
		방사방향 k_r	수직원주방향 $k_z \cdot k_\theta$	방사방향 k_r	수직원주방향 $k_z \cdot k_\theta$	방사방향 k_r	수직원주방향 $k_z \cdot k_\theta$
Banking	+10.400 ~ +7.400	240	80	-	-	-	-
Fill	+7.400 ~ -2.600	257	86	232	77	-	-
실트질 모래층1	-2.600 ~ -16.300	418	139	376	125	-	-
실트질 모래층2	-16.300 ~ -30.000	686	229	618	206	-	-
실트질 모래층3	-30.000 ~ -39.000	1236	412	1112	371	-	-
실트질 점토층	-39.000 ~ -42.300	1264	421	1138	379	-	-
모래질 자갈층	-42.300 ~ -47.300	1602	534	1442	481	-	-
풍화암층	-47.300 ~ -63.800	2860	953	2574	858	4832	1461
연암층	-63.800 ~ -66.800	-	-	10297	3432	17528	5843

을 각각 나타낸다.

바닥슬래브와 코벨부간의 연결스프링은 크게 탱크의 자중이나 액체압 등에 의해 바닥슬래브가 연직방향 강제운동을 할 경우에 대한 스프링, 슬로싱 하중이나 동적 액체압 등에 의해 바닥슬래브가 회전 강제운동을 할 경우에 대한 스프링, 벽체가 탱크 내부로 변형을 일으킬 경우에 대한 스프링으로 구분된다. 바닥슬래브가 연

직방향으로 강제운동을 할 경우에 대한 코벨부의 스프링(K_C)을 살펴보면, 식(3)과 같이 변형 $\Delta\chi_1$, $\Delta\chi_2$ 의 크기가 일치한다는 가정아래 바닥슬래브의 지반스프링을 벽체의 지반스프링(K_{BS})으로 치환하여 산정하였다(그림 4참조). 각각의 경우에 대해 바닥슬래브에 의한 영향은 이러한 치환된 지반스프링을 이용하여 고려된다.

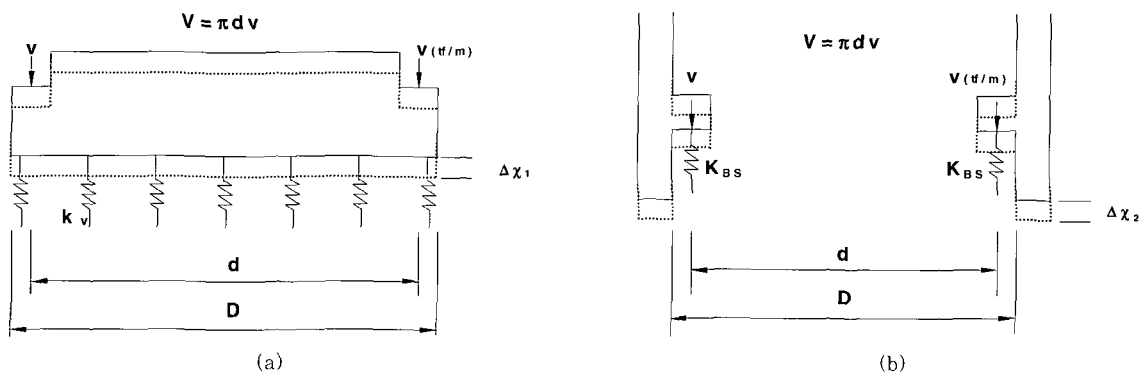


그림 4 바닥슬래브의 지반스프링

표 3 설치 부지의 지반성질

깊이 (EL.m)	토층	단위중량 γ (tf/m ³)	마찰각 ϕ (°)	점성 c (tf/m ²)	수평정적지진계수 K_H	수직정적지진계수 K_v
10.400	Banking	1.80	30.0	0.0	0.300	0.200
7.400	Banking	1.80	30.0	0.0	0.295	0.197
7.400	Banking	1.85	30.0	0.0	0.295	0.197
5.205	Fill	1.85	30.0	0.0	0.291	0.194
5.205	Fill	1.85	30.0	0.0	0.291	0.194
-2.600	Fill	1.85	30.0	0.0	0.277	0.185
-2.600	Fill	1.85	35.0	0.0	0.277	0.185
-16.300	실트질 모래층 1	1.85	35.0	0.0	0.254	0.169
-16.300	실트질 모래층 1	1.90	40.0	0.0	0.254	0.169
-30.000	실트질 모래층 2	1.90	40.0	0.0	0.230	0.153
-30.000	실트질 모래층 2	2.05	45.0	0.0	0.230	0.153
-39.000	실트질 모래층 3	2.05	45.0	0.0	0.213	0.142
-39.000	실트질 모래층 3	1.90	0.0	8.0	0.213	0.142
-42.300	실트질 점토층	1.90	0.0	8.0	0.209	0.139
-42.300	실트질 점토층	2.10	45.0	0.0	0.209	0.139
-47.300	실트질 점토층	2.10	45.0	0.0	0.200	0.133
-47.300	실트질 점토층	2.35	-	75.6	0.200	0.133
-63.800	풍화암층	2.35	-	89.1	0.200	0.133
-63.800	풍화암층	2.55	-	146.1	0.200	0.133
-66.800	풍화암층	2.55	-	149.3	0.200	0.133

$$\Delta \chi_1 = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot D^2 \cdot k_v}, \quad \Delta \chi_2 = \frac{V}{\pi \cdot d \cdot K_{BS}} \quad (3)$$

$$K_C = K_{BS} = \frac{D^2 \cdot k_v}{4 \cdot d} \quad (4)$$

여기서, K_{BS} =치환된 벽체의 연직방향 스프링(tf/m/m), d =코벨부 중심간의 거리(m), D =탱크의 내경(m), k_v =바닥슬래브의 수직방향 지반반력계수(tf/m³)를 각각 의미한다.

그리고 이 논문에서 지진시 해석은 등가정적해석법을 이용하였으며 이때 정적지진계수는 지표면에서 수평방향과 수직방향의 값을 각각 0.300, 0.200으로 하고 지진영향이 일정한 깊이의 지반층에서 값을 각각 0.200, 0.133으로 하여 선형보간을 이용해 산정하였으며, 단위중량과 마찰각 등의 물성은 표 3에서 보는 바와 같이 고려하였다.

3. 적용하중과 하중조합

이 논문에서 적용된 설계하중은 현재 국내에서 시공 중인 지하식 LNG 저장탱크의 설계⁶⁾를 토대로 표 4와 같이 자중, 프리스트레스, 지하수압, 토압, 동결토압 등의 기본하중 (5 Cases)과 열하중, 탱크 내의 액체 압에 관련된 하중, 지진 관련 하중, 기타 하중 등의 선택하중 (18 Cases) 및 내부수압, 공기압과 같은 실험하중(8 Cases) 등 총 31 가지를 고려하였고, 각각의 개별하중에 대해 LNG 저장탱크 전용해석 프로그램을

사용하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였다.

이때, 지진토압과 동적액체압의 적용에 있어 그림 5와 같이 각각의 작용하중 및 경계조건을 살펴보면 지진 토압의 경우에는 탱크벽체는 흙의 강도 또는 주동토압 상태가 발휘될 수 있는 정도로 충분한 변위가 발생되고, 뒷채움 흙은 점착성이 없으며 마찰각 ϕ 를 갖고, 뒷채움 흙은 포화되어 있지 않아 액상화 문제가 없다는 세 가지 가정 아래 Mononobe-Okabe 해석을 이용하여 산정된다.⁵⁾

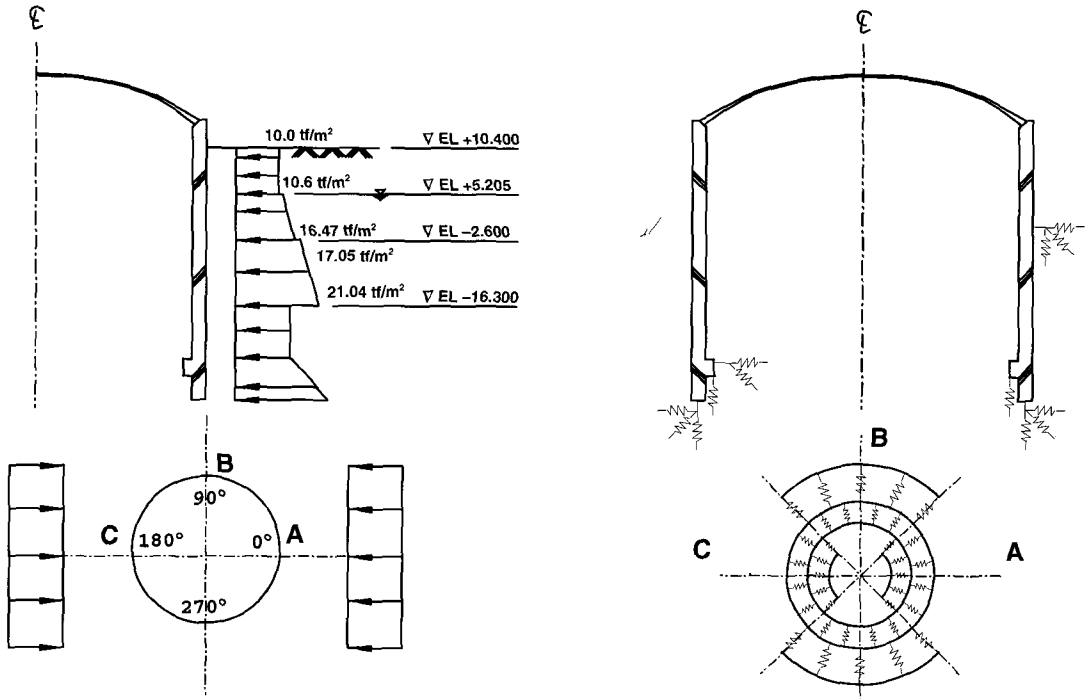
또한, 동적액체압과 슬로싱하중의 경우에는 탱크 내 LNG의 단위중량을 0.480tf/m³으로 하여 Harouon과 Housner의 연구결과를 토대로 산정하였다.^{7),8)}

지하식 LNG 저장탱크는 지하구조물로서 설치지역의 지반특성에 따른 영향을 받게 됨은 물론 지상식과 달리 토압과 주변 지반의 동결로 인한 동결토압, 지하수압에 의한 추가적인 영향을 받게 된다. 특히 지하구조물의 특성상 지중연속벽이 시공된 뒤에 지반굴착이 이루어지고 나면, 저장탱크가 시공되며 시공완료 후에는 지중연속벽-저장탱크-지반간의 상호작용에 따른 영향을 감안해야하는 등 지상식 보다 복잡한 하중조합을 고려하게 된다.

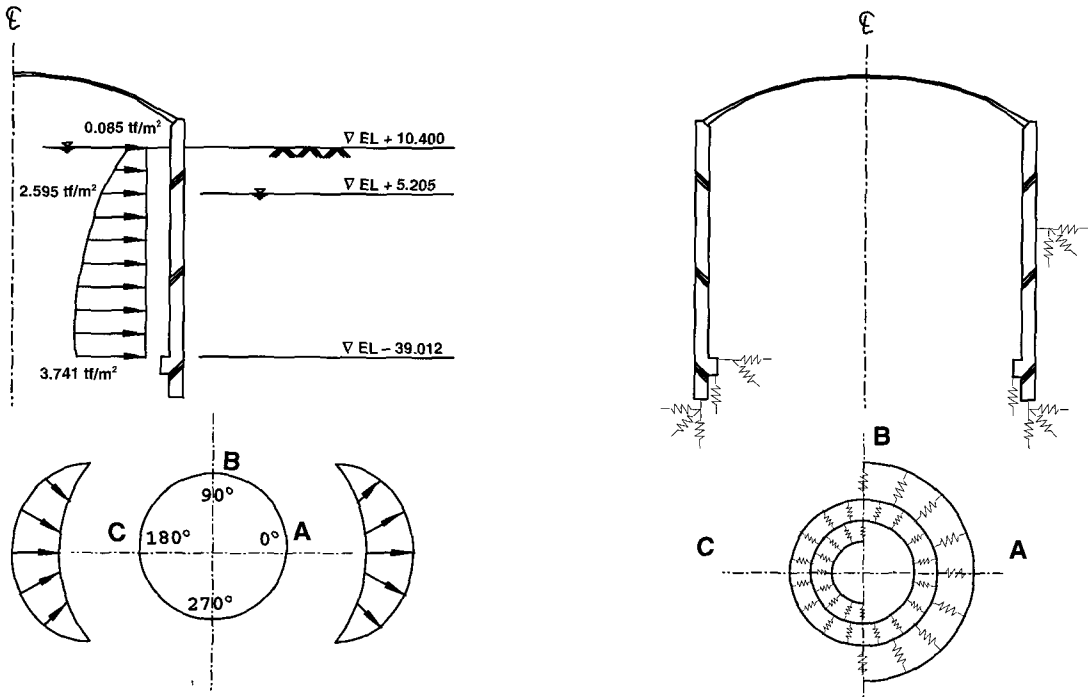
이 논문에서는 각각의 설계하중에 대한 해석결과를 바탕으로 정상 조건, 슬로싱 조건, 지진시 조건의 세 가지 구분과 저장탱크 내의 액체깊이가 최대인 경우와 최소인 두 가지 구분, 지중연속벽을 포함한 해석과 포함하지 않은 해석의 두 가지 등으로 구분하여 총 146가지의 하중조합을 고려하여 설계 부재력을 산정하였다(표 5 참조).²⁾

표 4 적용된 하중 예(총 하중 수 : 31)

기본하중	<ul style="list-style-type: none"> • E1(자중) • E2(지붕하중) • E3(프리스트레스력) • E4(지하수압) • E5(토압) 		<ul style="list-style-type: none"> • ST 1~ST4(열응력) • SL1(액체압) • SL2(슬로싱하중) • SL3a, SL3b(동적 액체압) • SS1a, SS1b(지진토압) • SS2a, SS2b(관성력) • SO1a, SO1b(편토압) • SO2(가스압) • SO3(동결토압) • SO4(활하중) • SO5(바닥슬래브 반력)
실험하중	<ul style="list-style-type: none"> • T1(실험중의 가스압) • T2(실험중의 내부수압) • T3(실험중의 자중) • T4(실험중의 내부수압) • T5(실험중의 토압) • T6(편토압 관련 압축공기실험) • T7(실험중 강제지붕에 의한 반력) • T8(실험중의 공기압) 	선택 하중	



(a) 지하식 LNG 탱크의 지진토압 및 경계조건



(b) 지하식 LNG 탱크의 동적액체압 및 경계조건

그림 5

표 5 적용된 하중조합 예(총 하중조합 수 : 146)

하중조합 구분		지진시(등가정적계수법 : +Kv)								지진시(등가정적계수법 : -Kv)							
		LNG온도응력 비고려				LNG온도응력 고려				LNG온도응력 비고려				LNG온도응력 고려			
		액체깊이최소		액체깊이최대		액체깊이최소		액체깊이최대		액체깊이최소		액체깊이최대		액체깊이최소		액체깊이최대	
하중종류		C01	C02	C03	C04	C05	C06	C13	C14	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C33	C34
정상 상태	E1	C01	C02	C03	C04	C05	C06	C13	C14	C21	C22	C23	C24	C25	C26	C33	C34
	E1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	E2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	E3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	E4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	E5																
	So1			○	○			○	○			○	○			○	○
	So2			○	○			○	○			○	○			○	○
	St1					○		○						○		○	
	St2						○		○						○		○
	St3																
	St4																
	So3						○								○		
	So51	○				○	○			○				○	○		
	So52		○								○						
	So53			○				○	○			○				○	○
So54				○								○					
지진 상태	Ss1+	○	○	○	○	○	○	○	○								
	Ss1-									○	○	○	○	○	○	○	○
	Ss2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Ss2+	○	○	○	○	○	○	○	○								
	Ss2-									○	○	○	○	○	○	○	○
	SI3			○	○	○	○	○	○			○	○			○	○
	SI4+			○	○	○	○	○	○			○	○			○	○
	SI4-																
So4	○	○							○	○			○	○			

4. 설계조건에 따른 거동분석

이 논문에서 주요 설계조건 변화에 따른 LNG 저장 탱크 구조물의 거동특성을 살펴보기 위하여 선택한 대상 구조물은 그림 6과 같이 반지름이 72.58m, 높이가 74.70m인 축대칭 형상을 가진 원통형 쉘 구조체로서 벽체는 3.00m, 지중연속벽은 1.70m, 바닥판의 두께는 9.00m이다. 또한, 탱크 내부에 액화천연가스가 완전히 채워져 있는 경우의 액체깊이는 49.20m이고 코벨부는 길이방향으로 3.80m, 원주방향으로 2.00m의

두께를 가지고 있다. 이때, 지붕의 두께는 첨정부에서 0.60m, 벽체와 만나는 부분에서는 1.40m이고 banking의 높이는 3.00m이다.

4.1. 매립깊이에 따른 영향

LNG 저장탱크는 크게 지상식과 지하식의 두 종류로 구분할 수 있으며 지상식의 경우는 탱크 내부의 액체압력의 영향이 지배적인 반면 지하식의 경우는 토압, 동결토압, 지중연속벽, 지하수압 등에 의한 추가적인

하중의 영향을 받는다. 따라서, 지하식에서 지상식으로 변화함에 따라 부재력의 큰 변화가 예상되므로, 이 논문에서는 그림 7~10과 같이 매립깊이를 완전 지하식에서 완전 지상식으로 변화시키면서 구조해석을 수행하여 매립깊이의 변화에 따른 영향을 비교, 분석하였다.

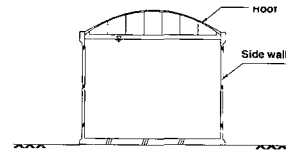


그림 10 완전 지상식 LNG 탱크(Case D4)

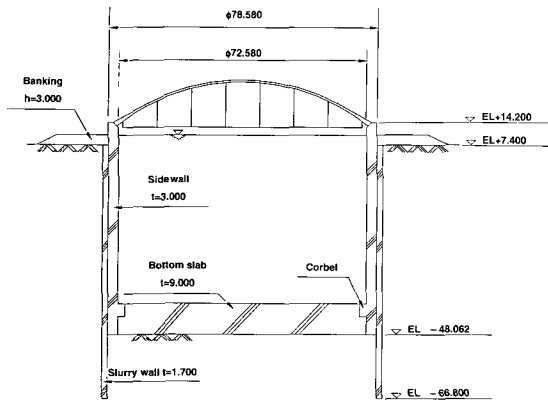


그림 6 지하식 LNG 저장탱크의 형상

일반적으로 저장탱크가 지하식에서 지상식으로 변화에 따라 탱크의 벽체 내부에서 외부로 작용하는 가스압과 액체압 등은 항상 일정한 반면, 외부에서 내부로 작용하는 토압과 지하수압 등이 급격히 감소하게 된다. 또한, 저장탱크가 지상으로 상승함에 따라 저장탱크의 벽체에 작용하는 지반반력계수가 감소하게 된다. 이러한 매립깊이 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 146가지의 하중조합을 토대로 산정된 최대 축력과 모멘트의 포락선을 나타내었다.

매립깊이 변화에 따른 그림 11의 수직방향 축력거동을 살펴보면 Case D1, D2가 Case D3, D4보다 저장탱크 벽체의 2/3지점 상부에서 인장력이 더 크게 작용하고, 2/3지점 하부로는 인장력이 상대적으로 작게 작용하는데, 이는 지진시 연직방향으로 작용하는 관성력에 대해 지반과 지중연속벽에 의한 저항력으로 인한 인장력이 크게 작용하기 때문이다. 나아가 지상식에 비해 지하식에서는 연직방향의 압축력 또한, 전영역에 걸쳐 크게 작용하는데, 이는 지진토압에 의한 추가적인 영향에 기인한 것이다. 원주방향 축력변화를 살펴보면, 지하식에서 지상식으로 변화에 따라, 벽체에 압축력을 유발시키는 토압과 지하수압에 관련한 하중이 사라져서 상대적인 압축력의 감소로 인해 최대인장력은 증가하는 반면, 최소압축력의 크기가 감소하게 된다. 즉, 원주방향의 축력이 일정부분 인장축으로 이동하게 된다. 축력의 크기 또한, 연직방향의 축력에 비해 상대적으로 커서, 탱크구조의 설계를 지배하는 축력은 원주방향 성분임을 알 수 있다. 따라서, 경제적인 설계를 유도하기 위해서는 원주방향의 축력성분을 효과적으로 분배시킬 수 있는 방안이 강구되어야 할 필요가 있다.

모멘트 변화의 경우는 그림 12에서 보는 바와 같이 Case D1의 지하식에서 가장 큰 모멘트가 발생하는데, 이는 지하에 근입됨으로써 크게 작용하는 수압과 토압에 기인한 것이다. 특히, 정상시 동일한 크기의 압력으로 작용하는 원주방향의 하중에 지진시 한 방향으로 작용하는 추가적인 지진토압의 영향이 중첩되어, 원주방향과 연직방향의 정, 부모멘트가 모두 증가하게 된다.

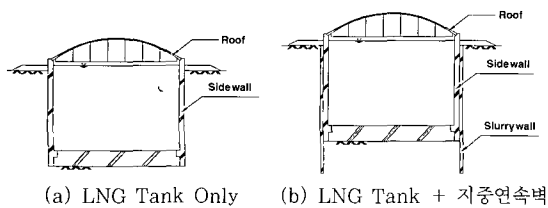


그림 7 완전 지하식 LNG 탱크(Case D1)

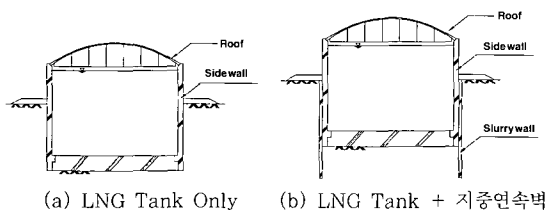


그림 8 2/3 지하식 LNG 탱크(Case D2)

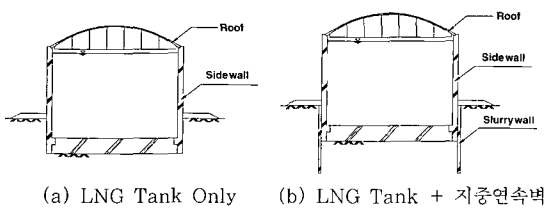


그림 9 1/3 지하식 LNG 탱크(Case D3)

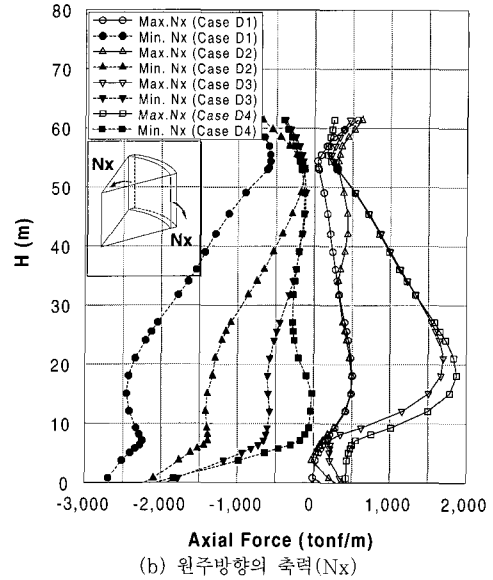
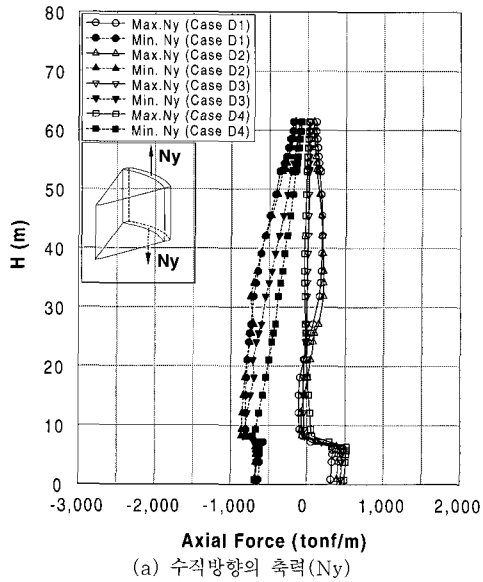


그림 11 축력에 대한 포락선

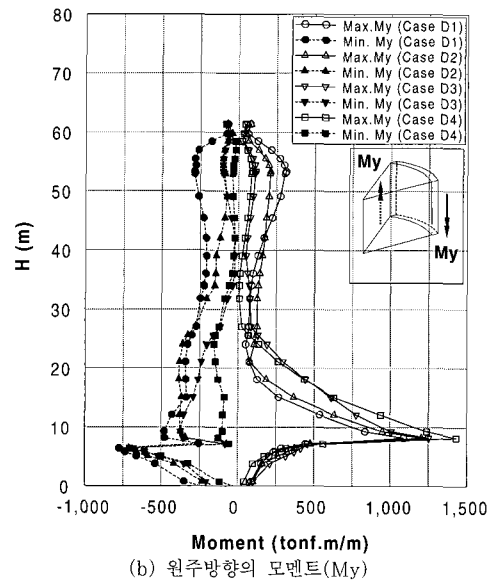
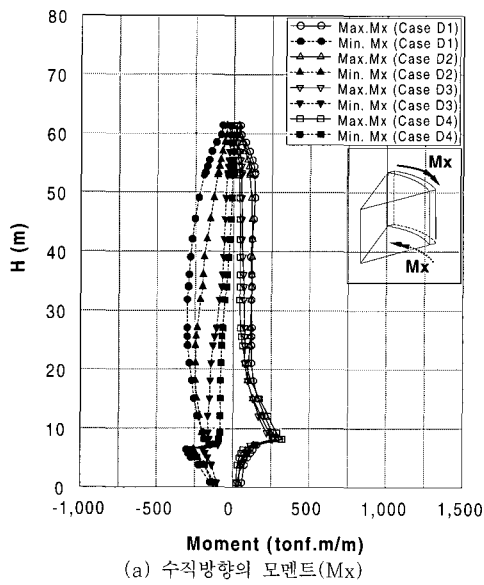


그림 12 모멘트에 대한 포락선

나아가 연직방향의 정, 부모멘트는 높이방향으로 비교적 일정한 반면, 원주방향의 정모멘트는 H=27m이하의 구간에서 선형적으로 증가하여, 바닥슬래브와 만나는 부분에서 분포폭이 크게 증가하는데 이는 탱크 내의 액체압과 같이 내부에 저장되는 액화천연가스에 의한

영향 때문이다.

따라서, 전체적인 거동을 살펴보면 축력에 비해 발생하는 모멘트는 비교적 크지 않은 것으로 판단되며, 축력과 마찬가지로 원주방향 모멘트가 더 큰 영향을 나타냄을 알 수 있다. 한편, 지하식에 비해 과도한 인장력이

유발되는 지상식의 경우는 일반적인 철근콘크리트(RC) 구조로 설계가 어려울 것으로 판단된다. 이러한 인장력을 최소화하기 위해서는 프리스트레스 콘크리트(PSC) 구조로 설계가 되어야 할 필요가 있는데, PSC 구조가 될 경우 인장력이 감소하는 동시에 압축력이 증가하나, 지하식에 비해 과다한 인장력을 줄이고, 상대적으로 작게 발생하고 있는 압축력의 증가를 통해 보다 효율적인 구조거동을 기대할 수 있을 것으로 판단되며, 보다 경제적인 설계로 유도할 수 있음을 알 수 있다.

4.2. 액체깊이에 따른 영향

지하식 LNG 저장탱크는 시공이 완료된 후 액체깊이에 따라 탱크 내부에서 외부로 작용하는 정적 액체압과 동적 액체압이 변하게 되며, 이에 따른 부재력의 변화가 예상되므로, 이를 고려하기 위해 액화천연가스가 완전히 채워진 상황(Case L1)과 반만 채워진 상황(Case L2), 그리고 완전히 비어있는 상황(Case L3)의 3가지 상태로 구분하여 구조해석을 수행하였다.

LNG 저장탱크의 액체깊이가 최대인 경우는 탱크 내부에서 외부로 정적 액체압과 동적 액체압이 작용하여 외부로부터 작용하는 토압과 지하수압 등에 의한 영향이 감소하는 반면, 액체깊이가 최소인 경우에는 상대적으로 토압과 지하수압의 영향이 크게 나타난다.

그림 13은 액체깊이 변화에 따른 벽체의 축력변화를 나타낸 것이고, 그림 14는 모멘트에 대한 변화를 나타낸 것이다. 그림 13을 살펴보면 액체 깊이가 낮아짐에 따라 벽체에 인장력을 유발시키는 액체압과 가스압이 작용하지 않게 됨으로써, 상대적인 인장력의 감소로 인해 최대인장력은 감소되는 반면 최대압축력은 증가함을 알 수 있다. 이때 압축력은 Case L1과 Case L2의 부재력 차이보다는 Case L2와 Case L3의 부재력의 차이가 크게 나타나는데, 이는 Case L1과 Case L2에는 설계기준압인 $p_G=2.957\text{tf/m}^2$ 이 적용되었으나 탱크가 완전히 비어있는 Case L3에는 내부로부터 작용하는 가스압이 존재하지 않기 때문이다.¹⁾ 또한, 벽체의 높이 1/3지점 상부에서는 Case L2보다 Case L1에 최대 압축력이 더 크게 작용하고 그 하부에서는 Case L2에 압축력이 더 크게 나타났다.

모멘트 변화의 경우는 그림 14와 같이 수직방향과 원주방향 모두 탱크 내의 액체깊이가 최대인 Case L1에서 정모멘트가 최대로 나타나는 반면, 부모멘트는 벽체 구간에 따라 증가, 감소하는 경향이 동시에 나타나고 있다. 이는 그림 15와 같이 탱크 내의 액체깊이가 낮아지면서 탱크 내부에서 외부로 작용하는 액체압에 의한 인장력이 감소함과 동시에 슬로싱하중에 의한 부재력의 경향이 다른 것에 기인한다. 또한, 저장탱크 주

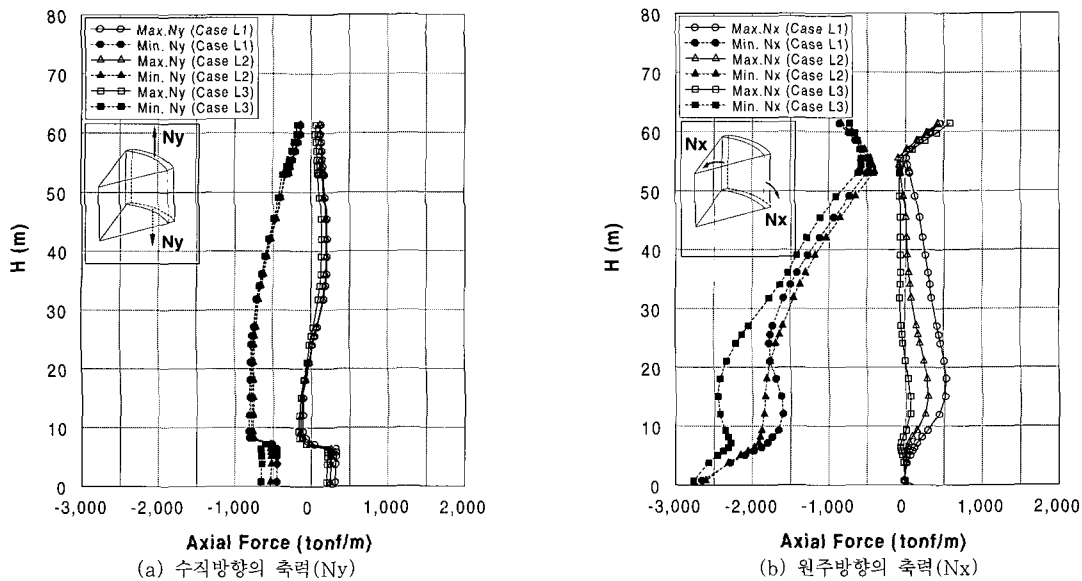


그림 13 축력에 대한 포락선

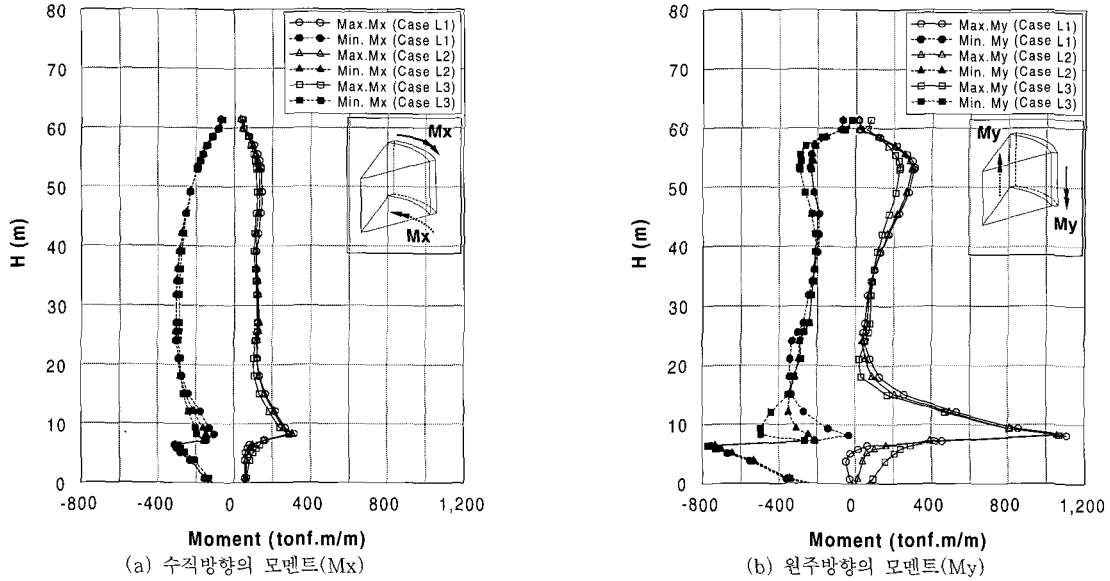


그림 14 모멘트에 대한 포락선

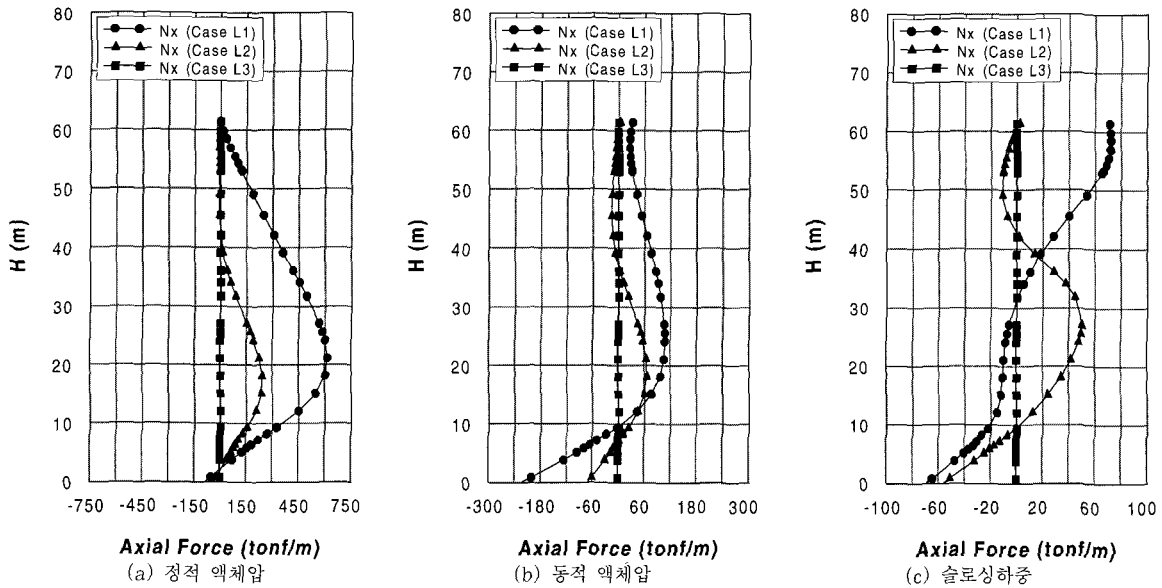


그림 15 각 하중해석에 의한 부재력 산정 예

변의 지하수위 변화에 따라 바닥슬래브의 반력도 표 6 과 같이 크게 변하게 된다. 이때 반력값은 바닥슬래브 의 자중만을 고려한 경우와 탱크 내부의 액체와 가스의 중량을 함께 고려한 경우 등의 10 가지로 나누어 각각 을 조합하여 산정한 값이다.

부재력 변화를 살펴보면, 모멘트에 비해 축력이

LNG 탱크 설계를 지배하는 부재력이 되며 원주방향 성분이나 더 큰 영향을 미치므로 액체깊이에 따른 영향의 측면에서 볼 때 프리스트레스 콘크리트 등을 이용해 설계된 것을 가정하면 탱크 내의 액체깊이가 최대인 Case L1이 보다 안전하다고 판단된다. 따라서 구조물의 설계시 액체깊이가 최소인 Case L3를 기준으로 부

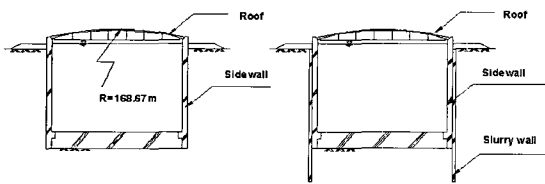
표 6 바닥슬래브의 반력변화(ton/m)

반력	조건	낮은 지하수위			높은 지하수위		
		Case L1	Case L2	Case L3	Case L1	Case L2	Case L3
바닥슬래브의 반력		-47.1	-28.75	-10.4	245.3	434.5	623.7
자중에 의한 반력 (LNG Tank Only)		-298.3					
산정된 반력 (LNG Tank Only)		-345.4	-327.1	-308.7	-53.0	136.2	325.4
자중에 의한 반력 (LNG Tank + 지중연속벽)		-175.7					
산정된 반력 (LNG Tank + 지중연속벽)		-222.8	-204.5	-186.1	69.6	258.8	448.0

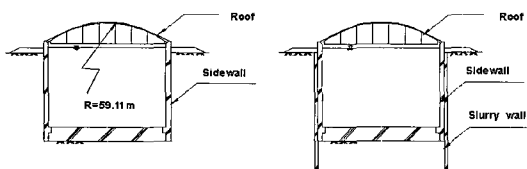
재력을 산정할 필요가 있음을 알 수 있다.

4.3. 지붕형상에 따른 영향

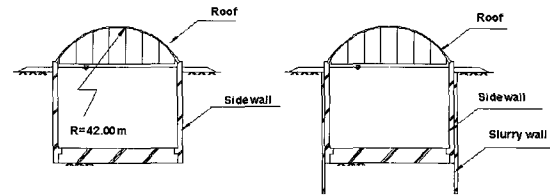
LNG 저장탱크의 설계에서 지붕 형상은 평평한 형상에서 둥근 형상에 이르기까지 다양한 지붕층의 곡률 변화가 가능하다. 이러한 지붕형상의 변화로 말미암아 내부에서 외부로 작용하는 가스압이나 관성력 등의 작용하중과 외부에서 내부로 작용하는 자중이나 지붕하중, 활하중 등 지붕에 연직방향으로 작용하는 하중에 의한 영향이 각각 다르게 나타나게 된다. 본 논문에서는 그림 16~18과 같이 세 가지 다른 지붕형상을 갖는 지하식 LNG 저장탱크를 대상으로 지붕형상 변화에 따른 구조계의 거동을 비교, 분석하였다.



(a) LNG Tank Only (b) LNG Tank + 지중연속벽
그림 16 R=168.67m인 지하식 LNG 탱크(Case S1)



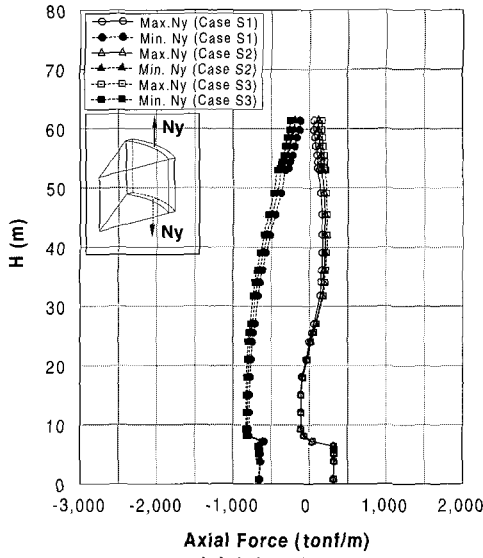
(a) LNG Tank Only (b) LNG Tank + 지중연속벽
그림 17 R=59.11m인 지하식 LNG 탱크(Case S2)



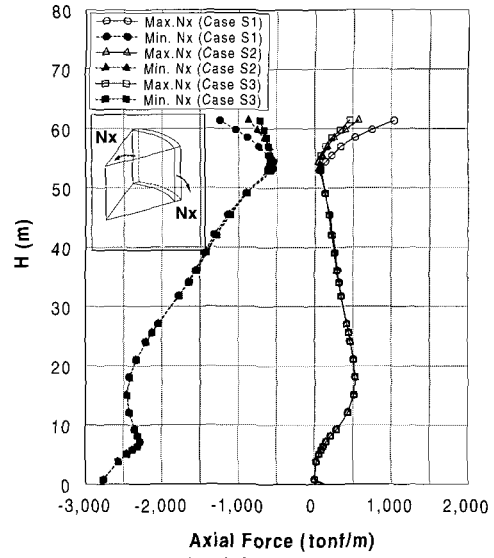
(a) LNG Tank Only (b) LNG Tank+지중연속벽
그림 18 R=42.00m 인 지하식 LNG 탱크(Case S3)

그림 19는 지붕형상 변화에 따른 수직방향과 원주 방향의 축력변화를 나타낸 것이고, 그림 20은 모멘트 변화를 나타낸 것이다. 그림 19의 해석결과를 살펴보면 수직방향의 축력변화는 Case S3와 Case S1의 부재력을 상·하한선으로 변화하는데, 이는 지붕형상이 둥근 상태로 변함에 따라 자중과 지붕하중, 관성력 등이 증가하기 때문이다. 수평방향의 축력변화는 Case S1과 Case S2의 부재력 차이가 Case S2와 Case S3의 차이에 비해 크게 나타나는데, 이는 지붕형상이 평평한 경우에 벽체와 만나는 부분에서 강성이 급격히 증가하기 때문이다. 그러나 지붕과 벽체가 만나는 지점 하부로는 수직방향과 원주방향의 축력 모두 부재력의 차이가 거의 없는데, 이는 이 부분에서의 지반스프링이 급격히 증가하고 지하수압, 토압 및 액체압 등이 증가하여 지붕형상 변화에 따른 영향이 유발되지 않기 때문이다.

모멘트의 변화는 그림 20의 해석결과와 같이 수직 방향은 부재력의 차이가 거의 나타나지 않는 반면 원주 방향은 지붕형상이 둥근 상태로 변함에 따라 부재력이 작게 발생함을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 지붕형상이 평평한 경우에는 지붕관련 하중의 감소로 인한 수직방향의 축력 부재력이 감소하는 반면, 벽체 1/3지점

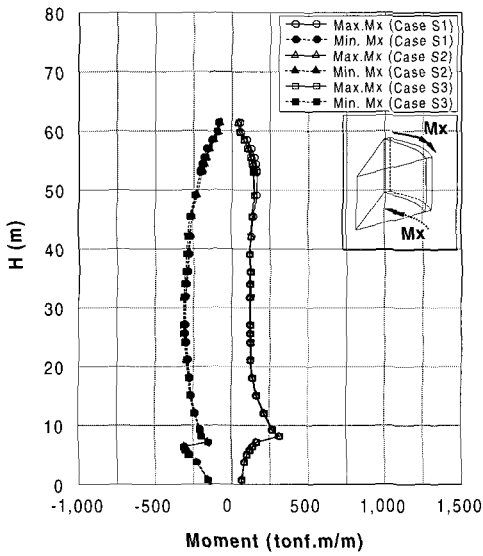


(a) 수직방향의 축력(N_y)

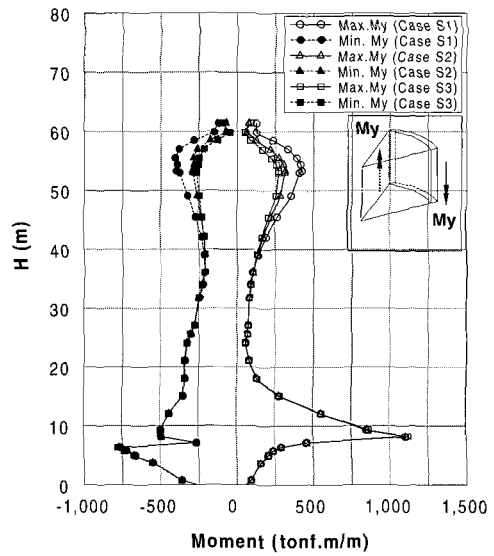


(b) 원주방향의 축력(N_x)

그림 19 축력에 대한 포락선



(a) 수직방향의 모멘트(M_x)



(b) 원주방향의 모멘트(M_y)

그림 20 모멘트에 대한 포락선

상부에서는 등근형상에 비하여 원주방향 축력과 수직, 원주방향 모멘트 부재력이 모두 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다. 얻어진 결과를 토대로 살펴보면, 초기단면의 결정시 지붕층의 등근형상이 가장 효과적임을 알 수 있지만 이에 따른 큰 영향은 없는 것으로 판단된다.

4.4 저장탱크 재료의 온도변화에 따른 영향

LNG저장 탱크는 일반 지하 저장탱크와는 달리 내부에 -162°C 의 극저온 액체를 저장하는 관계로 다른 구조물에 비해 극저온물성과 관련한 거동특성을 추가

적으로 고려해야 한다. 널리 알려진 바와 같이 저장탱크를 이루는 주요 재료인 콘크리트는 극저온상태에 도달하면 상온상태보다 압축강도, 인장강도, 탄성계수, 부착강도 등 주요한 재료 물성값이 증가하여 보다 안전할 것으로 예견되나, 본 논문에서는 온도에 따른 재료 성질의 변화와 열응력 영향을 보다 명확하게 규명하기 위해 지하식 저장탱크의 설계지침자료를 토대로 그림 21과 같이 측벽 히터에 의해 동결토 영역이 1m로 유지될 때 여름(Case E1)과 겨울(Case E2) 두 경우와 온도변화를 고려하지 않은 경우(Case E3)에 대하여 축대칭 유한요소를 이용한 열전도 해석을 수행하였다.²⁾ 이를 통해 얻은 탱크 주변지반의 온도분포를 토대로 그림 23과 같이 콘크리트의 온도에 따른 탄성계수변화를 고려하기 위해 다음 식과 같이 $-162^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 선형함수로 가정하였다.^{2),9)}

$$E(T) = (-0.02 \times T + E_0) \times 10^6 \text{ (ton/m}^2\text{)} \quad (5)$$

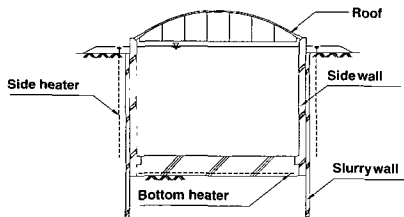


그림 21 Heater를 고려한 지하식 LNG 탱크

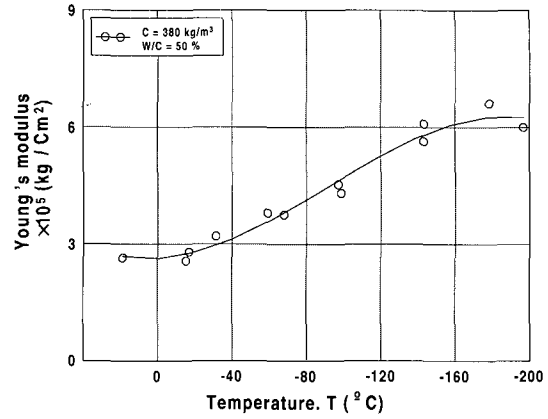
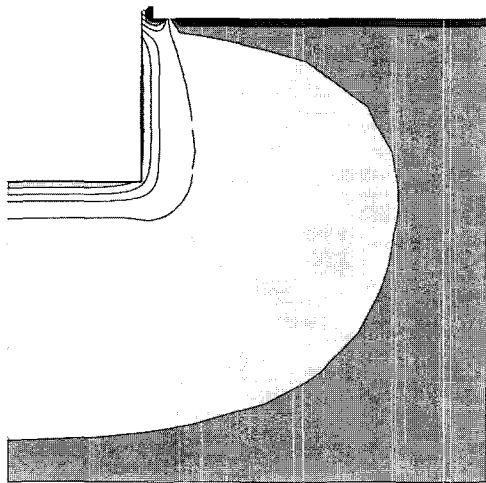


그림 23 온도변화에 따른 콘크리트의 탄성계수

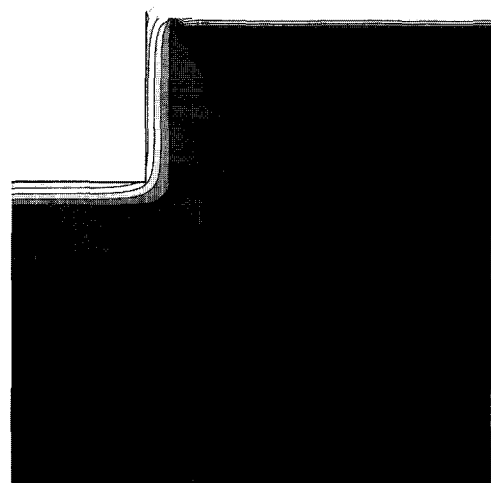
여기서, $E(T)$ 는 온도에 따른 콘크리트의 탄성계수, T 는 온도($^{\circ}\text{C}$), E_0 는 상온에서의 탄성계수이다.

일반적으로 LNG 저장탱크 벽체는 극저온 액체로 인해 상온보다 낮아지며 이에 따라 벽체를 이루는 콘크리트의 탄성계수가 증가하여, 부재력의 재분배가 유발되어 벽체의 부재력이 온도의존적인 경향을 보이게 될 것으로 예상된다.

그림 24는 저장탱크 재료의 온도변화에 따른 수직방향과 원주방향의 축력을 나타낸 것이고, 그림 25는 모멘트에 대한 포락선을 나타낸 것이다. 그림 24의 해석결과에서 볼 수 있듯이, 여름(동결토 영역:1m)의 경우인 Case E1의 부재력은 약간의 차이를 보이나,



(a) Case I(여름)



(b) Case II(겨울)

그림 22 LNG 저장 탱크의 열전도 해석 결과

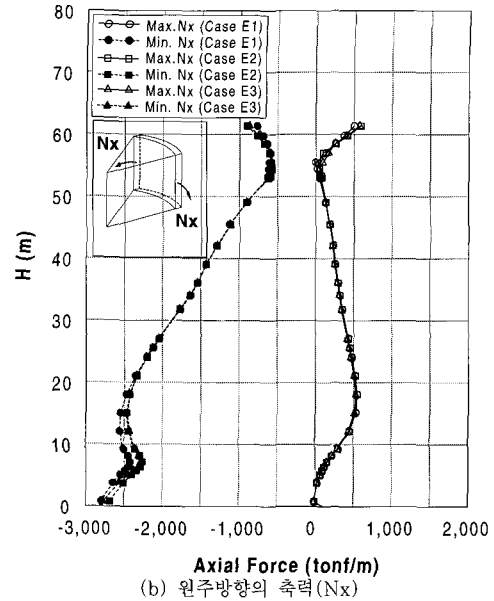
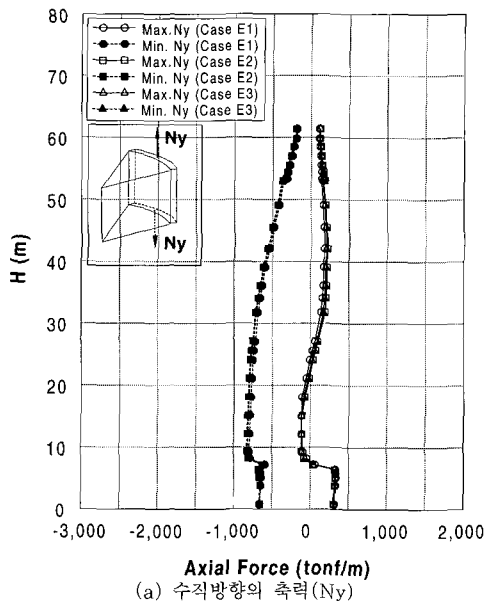


그림 24 축력에 대한 포락선

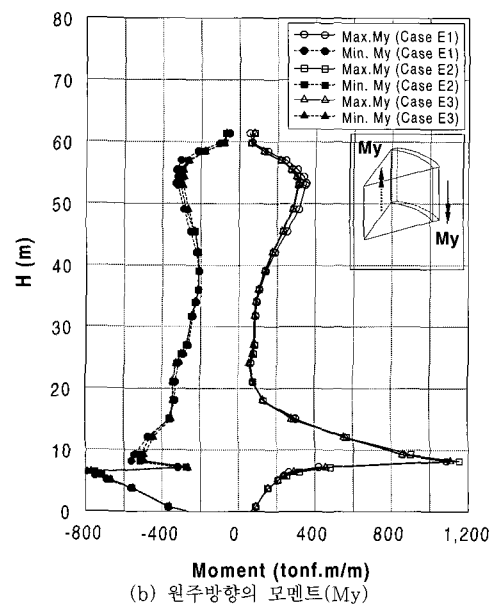
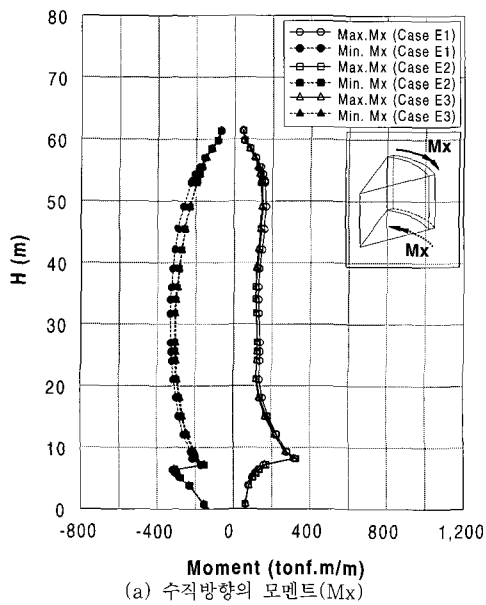


그림 25 모멘트에 대한 포락선

전반적으로 그 영향이 미미함을 알 수 있다. 이는 열전도 해석에서 여름일 때는 벽체 전체에 걸쳐 온도차이가 큰 반면 겨울일 때는 벽체의 온도차가 작게 나타나기 때문이다. 축력은 모든 경우, 거의 유사한 부재력이 발생하며 수직방향은 Case E1의 경우에 작은 부재력이

유발되고, 원주방향은 바닥슬래브와 만나는 지점에서 Case E1의 경우에 부재력이 크게 발생한다.

그림 25를 살펴보면 모멘트는 Case E1에서 가장 큰 부재력이 발생하는데 이는 Case E2의 벽체 온도변화가 작은 반면 Case E1은 온도변화 폭이 크기 때문

이다. 특히 수직방향 정모멘트의 변화폭보다 부모멘트의 변화폭이 벽체 중간 부분에서 크게 나타나며 원주방향에 대해서는 벽체 상부에서 정(부 모멘트 모두 Case E1의 부재력이 가장 크게 유발됨을 알 수 있다.

따라서, 작은 부재력의 변화가 온도분포에 의한 탄성계수 변화에 따라 나타나고 있지만 설계를 위한 해석시 내부 극저온 액체에 의한 영향으로 인한 콘크리트 구체의 온도에 따른 재료성질 변화를 추가적으로 고려할 필요는 없을 것으로 판단된다.

또한, 본 논문에서는 열응력에 의해 지하식 LNG 저장탱크 벽체에 발생하는 균열에 따른 영향을 살펴보기 위하여, 여름 (Case W1)과 겨울 (Case W2)의 경우에 대해 콘크리트 비선형 균열해석^{10),11)}을 수행하여 열응력에 의한 벽체의 균열분포를 산정하였으며, 이에 따른 벽체에 발생하는 균열에 따른 영향을 살펴보았다. 해석결과 균열로 인한 벽체 유효폭 변화에 가장 큰 영향을 받는 개별 하중은 편도압, 지진도압 등과 같이 수평으로 작용하는 하중이나 전체 설계 부재력에 미치는 영향은 미미하여, 설계를 위한 해석시 열응력으로 인하여 발생하는 구조체의 균열깊이는 추가적으로 고려할 필요는 없는 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 논문에서는 전용 유한요소 프로그램(FESA-LNG)을 이용하여 설계단계에서, 유지단계에 이르기까지 지하식 LNG 저장탱크의 구조거동에 영향을 미치는 매립깊이, 액체깊이, 지붕형상, 극저온 온도환경에 의한 탄성계수 변화와 열응력에 의한 벽체의 균열깊이 등과 같은 주요 변수 변화에 따른 구조물의 거동 영향에 대하여 검토하였으며, 이를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 매립깊이가 지하식에서 지상식으로 변함에 따라 지하수압과 토압 등의 작용이 사라지게 되므로 이에 따라 크게 증가하는 원주방향 인장력을 효과적으로 제어하기 위한 방안이 강구되어야 할 필요성이 있다.
- (2) 탱크 내의 액체깊이가 최소인 경우에 액체압과 가스압 등의 영향이 감소하여 압축력이 벽체 하부에서 크게 증가하게 되므로, LNG 저장 탱크의 운용시 이를 고려한 효율적인 사용조건 관리가 요구된다.

- (3) 지붕형상 변화에 따른 영향은 벽체의 상부 1/3 정도의 범위에서 발생하였으며, 둥근 형상이 가장 효과적임을 알 수 있었다.
- (4) 극저온 액체저장으로 말미암아 상온보다 낮은 온도분포에 따른 탄성계수 변화에 의한 영향은 벽체의 상부 1/6 정도의 범위에서만 영향을 받으며 발생하는 부재력의 차이 또한 작게 유발되었다. 나아가 열응력에 의한 벽체 균열발생의 영향은 벽체의 균열발생 구간과 유사한 지점에서 균열에 따른 강성의 감소로 인해 부재력이 작은 차이로 감소하는 것 이외에는 전체적으로 큰 변화는 없는 것으로 나타났다. 따라서 얻어진 결과를 토대로 설계를 위한 탱크 구조물의 해석시 온도분포에 따른 재료비선형 거동을 고려할 필요는 없을 것으로 판단되며, 축대칭요소로 모델링 된 탱크구체에 비대칭으로 작용하는 하중에 대한 경계처리를 효과적으로 고려할 수 있도록 모델링 한다면, ANSYS와 ABAQUS 등과 같은 상용프로그램을 이용한 해석이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 삼성물산(주) 건설부문의 지원을 받아 이루어진 것으로, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 北村 八朗, "PC LNG 저조의 개발", 동경대학 박사학위논문, 1999
2. 액화천연가스 탱크 해석, 설계 기술의 국산화 연구(최종 보고서), 한국과학기술원 토목공학과, 2000
3. 이완훈, "면내 회전자유도를 가진 변이 평면 쉘요소의 개발과 이를 이용한 적응적 체눈 세분화", 한국과학기술원 박사학위논문, 1995
4. Japan Gas Association, Recommended Practice for LNG Inground Storage, 1996
5. 건설교통부, 도로교표준시방서, 1996
6. Korea Gas Corporation, Incheon LNG Terminal 2nd Extension Project (#13, 14 Tank)
7. Harouon, M. A., "Vibration studies and tests of liquid storage tanks", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 11, 1983,

- pp.179~206
8. Housner, G., "Dynamic pressure on accelerated fluid containers", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 47, 1957, pp.15~35
 9. 김생빈, 이도현, "극저온에서의 콘크리트의 거동", 콘크리트학회지, 제9권, 제4호, 1997
 10. 곽효경, 송중영, 이광모, "LNG 지하저장 탱크 벽체의 비선형 열응력 해석", 한국전산구조공학 학술포럼 논문집, 제13권, 제1집, 통권 제25호, 2000
 11. 최창근, 유승운, "개선된 Degenerated 쉘 유한요소 비선형 해석", 한국전산구조공학 논문집, 제3권, 제3호, 1990, pp.113~123
 12. Cook, R. D., Malkus, D. S. and Plesha, M. E., *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*, 3rd ed, John Wiley & Sons, New York, NY, 1989