

특집

|| LNG 저장탱크의 설계와 시공기술 동향 ||

지상식 LNG 저장탱크의 설계

- Design of Above-Ground Tanks for LNG Tank -



양인환*
Yang, In Hwan

1. 머리말

국가 경제의 발전으로 에너지 소비는 매년 증가하고 있으나, 국내의 유일한 부존 에너지원인 무연탄은 채탄성의 악화와 공해 및 사용의 불편성 등으로 인하여 미래의 급증하는 에너지 수요를 충족하기 어려운 실정이다. 또한, 언제 발생할지 모르는 석유 위기에 대비하여 석유 의존도를 낮추고 석유 대체 에너지의 확보를 통해 에너지 공급원을 다변화하려는 정부의 정책에 따라 LNG (Liquefied Natural Gas ; 액화천연가스)의 도입이 증가하고 있는 추세이다. 이러한 추세에 따라 우리나라에서는 평택에 LNG 인수기지가 처음으로 건설되었으며, 인천 LNG 인수기지에 이어 최근에 통영 LNG 인수기지가 건설 중에 있다.

LNG 저장탱크 시설은 LNG 운반선에 의해 인수기지까지 운반된 LNG를 최종 수요자에게 천연가스(NG) 형태로 공급하기에 앞서 중간단계로써 저장하기 위한 시설이다(그림 1). LNG 저장탱크는 LNG를 -162°C 의 극저온 액화상태에서 충분한 안전성과 기밀성을 확보하고 있어야 한다. 따라서, 고도의 설계 기술이 요구되는 구조물이다. 평택 및 인천 인수기지의 저장탱크는 외국 기술에 의해 설계되었다. 하지만, 최근 건설되고 있는 통영인수기지는 국내 설계진에 의해 설계된 저장탱크가 시공 중이며, 관련 설계기술이 점진적으로 발전하고 있는 추세이다.

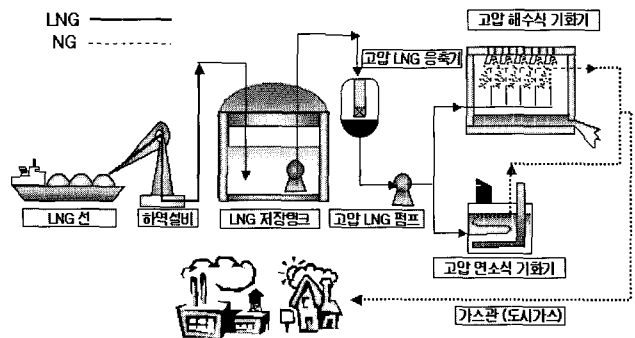


그림 1. LNG 공급 계통

2. 지상식 LNG 저장시설의 형식

LNG 저장탱크는 설치위치에 따라 크게 지상식 저장탱크 (Above-ground storage tank), 지중식 저장탱크(In-ground storage tank) 및 지하식 저장탱크(Under-ground storage tank)로 구분된다. 우리나라에서는 평택, 인천 및 통영 LNG 인수기지에서 지상식 탱크가 시공되었으며, 인천기지에서 지중식 저장탱크가 시공되었다. 지상식 저장탱크는 탱크를 지표면 위에 설치하는 것으로 액화천연가스를 저장하는 방법 중 가장 많이 이용되고 있는 탱크 형식이다(그림 2). 지상식 탱크는 구조물이 지표면 위로 노출되어 있어 지중식 탱크에 비하여 상대적으로 안전성이 더욱 요구되지만, 경제적이면서 공사기간이 짧은 이점이 있다.

* 정회원, 대림산업(주) 기술연구소, 선임연구원

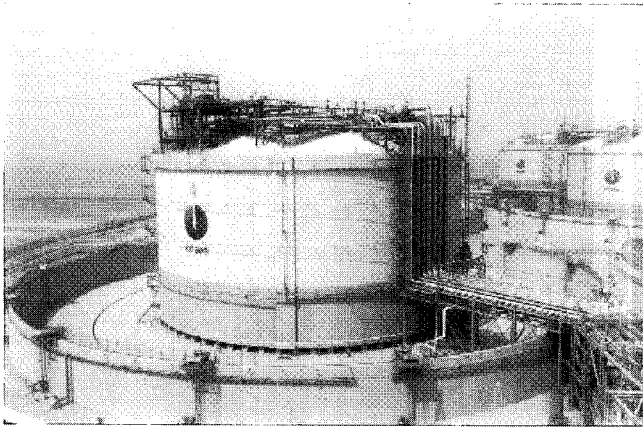


그림 2. 지상식 LNG 저장탱크

2.1 저장 형식에 따른 분류

지상식 탱크는 -162°C 저온의 LNG와 접촉하고 있는 내부 구조물이 손상을 입었을 경우 저온의 액체가 지표면으로 누출될 가능성이 있다. 이러한 경우를 대비하여 설계 기술은 2중 벽체 개념의 구조물로 발전되었으며, British Standard 7777: Flat-bottomed, vertical cylindrical storage tanks for low temperature service¹⁾ 기준에는 액체의 저장 형식에 따라 탱크를 단일 저장 형식, 이중 저장 형식 및 완전 저장 형식으로 구분하고 있다.

2.1.1 단일 저장 형식(single containment tank)

단일 저장 개념으로 설계된 형식이다(그림 3). 내부 탱크는 저온의 액체 접촉에 대해 연성을 확보할 수 있도록 설계되며, 외부로부터의 열흡입 차단을 위해 단열재로 보냉된다. 외조(outer tank)는 단열재 보호를 위해 설계되며, 내조(inner tank)로부터의 액체 유출시 저장 기능은 없다. 저온의 액체에 직접 접촉되는 내조의 파손시 액체는 탱크 외부로 직접 누출될 가능성이 있다. 따라서, 단일 저장 형식의 탱크는 내조에서 액체 누출시에 저온의 액체를 가두어 둘 수 있는 방액제(防液堤)가 필요하다.

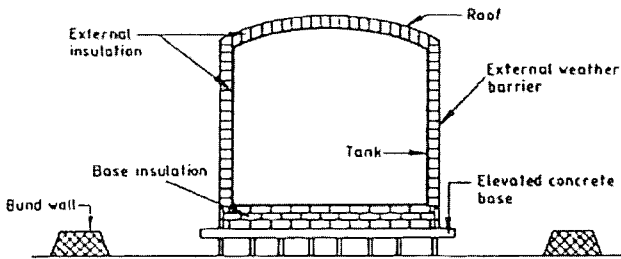


그림 3. 단일저장형식의 탱크

2.1.2 이중 저장 형식(double containment tank)

내조 및 외조가 저온의 액체를 각각 독자적으로 저장할 수 있

도록 설계되는 개념의 탱크이다(그림 4). 내조로부터 누출된 액체를 최소공간에 저장하기 위해 외조는 일반적으로 내조로부터 6 m 이내의 거리에 설치된다. 내조는 주로 니켈강으로 설계되며 정상 가동 상태에서 저온의 액체를 저장한다. 외조는 내조로부터 누출된 저온의 액체를 저장할 수 있으나 가스의 누출은 방지할 수 없도록 설계되는 탱크이다.

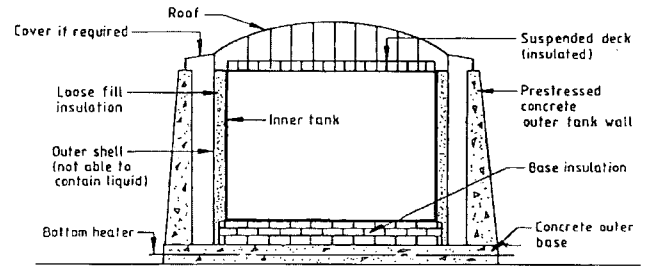


그림 4. 이중 저장 형식의 탱크

2.1.3 완전 저장 형식(full containment tank)

내조 및 외조가 저온의 액체를 모두 저장할 수 있도록 설계되며 외조는 내조로부터 약 1 ~ 2 m 거리에 설치되어야 한다(그림 5). 내조는 정상 가동 상태에서 액체를 저장한다. 외조의 지붕은 외조에 의해 지지된다. 내조로부터 액체 누출시에 외조는 액체의 누출뿐만 아니라 가스의 누출도 방지할 수 있도록 설계된 탱크이다.

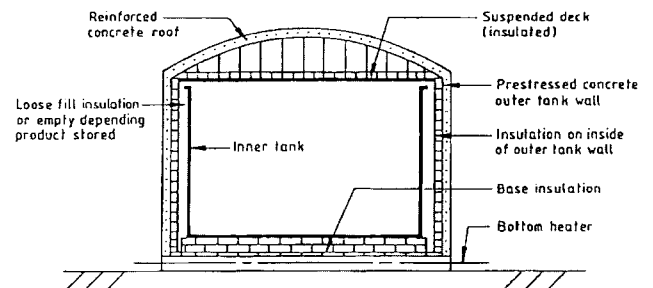


그림 5. 완전 저장 형식의 탱크

2.2 지상식 저장탱크의 구조

지상식 저장탱크의 대표적인 형식 및 구조적 특성은 다음과 같다.

2.2.1 금속 이중벽식 구조

전형적인 이중벽식 탱크로서 내부에 9% 니켈강으로 된 내조가 있고 외부에 탄소강으로 된 외조로 구성된다. 외조는 단열재 충전 및 보호용으로만 역할을 하고 내조 파손시에 액체를 저장할 수 없으므로 단일저장 형식의 탱크이다. 따라서, 별도의 방액제가 필요하다. 외벽이 탄소강으로 LNG 누출시 취성 파괴의 우려가 있고 콘크리트보다 외부 충격 및 화재에 취약하다.

2.2.2 멤브레인 및 프리스트레스트 콘크리트 형식

내부에 스텐인레스강으로 된 1.2 ~ 2 mm의 박판의 주름진 멤브레인이 위치한다. 멤브레인은 저장탱크 내부에 설치되어 LNG에 직접 접촉하여 액체나 가스의 누설을 방지하고 초저온 현상에 의한 재료의 열변형을 흡수하는 기능을 한다. 멤브레인은 탱크의 측면과 밑면에 설치되어 LNG의 누설을 방지하는 밀봉기능을 일차적으로 담당하고, 반복적인 열하중에 의한 피로 하중에 견디면서 액압 또는 자중 등에 의해 발생하는 하중을 흡수하여 단열재로 전달하는 기능을 갖고 있다. 멤브레인에 접하여 폴리우레탄 폼(foam) 또는 PVC 재질의 단열재에 전달된 하중은 궁극적으로 콘크리트 구조물에 의하여 지지된다. 지붕은 철재 혹은 콘크리트 돔과 알루미늄 재질의 현수 데크(suspended deck)로 구성된다. 외벽이 콘크리트 구조체로써 외부충격 하중에 비교적 강하다. 멤브레인은 독립적인 저장용 구조물이 아니고 저장 액체의 기밀성만 유지하고 저장액체의 액압은 단열재를 통하여 프리스트레스트 콘크리트 외조가 지지하는 형식이다. 멤브레인이 파손되어 저장 액체가 누출될 경우 콘크리트 외조가 액체 누출을 막을 수 있으나, 외부충격, 화재 등에 의하여 외조가 파손되어 LNG가 누출될 경우 이의 확산을 방지하기 위하여 방액제가 필요하다.

2.2.3 니켈강 및 프리스트레스트 콘크리트 형식

탱크는 내부에 9% 니켈강으로 된 내조와 외부에 PSC로 된 외조로 구성된다. 외조 내면에 탄소강으로 라이닝을 설치하며 외조와 내조 사이에 펄라이트 재질의 단열재로 충전되는 구조이다. 정상 가동시 니켈강으로 설계된 내조가 저장 액체의 액압을 독자적으로 견디도록 설계되며, 내조 파괴시 프리스트레스트 콘크리트 구조체인 외조가 2차적으로 저장액체를 지지하도록 설계된다. 내조 파손시 외조에 의하여 저장 액체 및 기체의 유출에 대한 기밀성이 유지되므로 완전 저장 형식의 구조물이다.

2.2.4 국내 지상식 탱크의 구조

평택 인수기지에 10기의 지상식 저장탱크가 멤브레인 및 프리스트레스트 콘크리트 형식의 단일저장탱크 형식으로 설계되었다. 인천 및 통영 인수기지에는 9% 니켈강 및 프리스트레스트 콘크리트 구조형식의 완전저장탱크 형식으로 설계되었다. 인천 인수기지에서의 탱크는 고상식(elevated type)으로써, 탱크 본체의 바닥 슬래브와 하부기초 사이에 공간이 존재한다(그림 6). 바닥 슬래브와 하부기초의 사이에는 면진 패드를 설치하였다. 반면에, 통영 인수기지의 탱크는 저부가열식(bottom-heating type)으로써 탱크 본체의 바닥슬래브 밑면에 막바로 파일 기초가 위치한다. 고상식에 비해 저부가열식은 바닥슬래브 밑면에 공간이 없으므로 초저온 효과에 의해 지반이 동결될 가능성이 있으며, 동결 가능성을 예방하기 위하여 바닥슬래브에 별도의 가열 시스템을 설치한다.(그림 7)

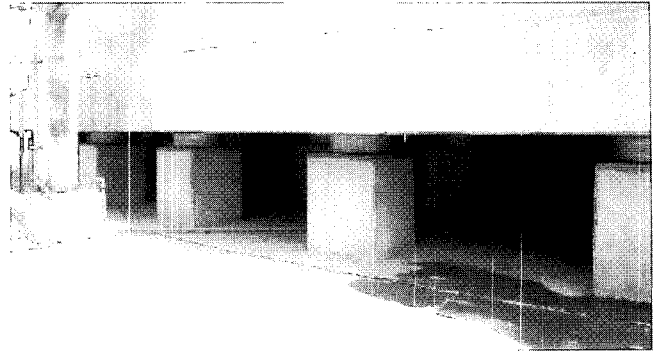


그림 6. 고상식 탱크의 하부구조



그림 7. 저부 가열식 탱크의 가열시스템

3. 설계 개념

3.1 설계 절차

지상식 LNG 저장탱크의 설계는 내조 설계와 외조 설계로 이루어진다. 내조 설계시에는 9% 니켈강 구조물과 이의 부속 장비 및 기계 장치의 설계를 수행한다. 외조 설계시에는 프리스트레스트 콘크리트 탱크 구조물의 설계를 수행한다. (그림 8)에 프리스트레스트 콘크리트 탱크 구조물의 설계절차를 나타내었다. 설계는 설계조건에 따른 하중에 대하여 구조해석을 수행한 후 하부기초 및 탱크 본체 상부구조물의 설계로 이루어진다. 탱크 본체는 일반하중 조건뿐만 아니라 비상조건에서의 특수하중에 대해서도 구조물의 안전성 검토가 이루어진다.

3.2 설계 조건

LNG 저장탱크는 극저온 상태의 LNG를 저장한다. 내조는 설계 수명동안 정상 가동 조건에서 저온의 액압을 지지해야 한다. 9% 니켈을 함유한 특수 합금강은 저온 조건에서 연성 및 인성을 확보하고 있다고 알려져 있다. 안전도 측면에서 9% 니켈강의 내조와 프리스트레스트 콘크리트의 외조로 구성되는 탱크 시스템이 효율적이며, 인천 및 통영 LNG 인수기지의 지상식 저장탱크는 다음의 조건하에서 한계 상태를 만족하도록 설계되었다.

1. 설계 기본사항 결정 · 저장 용량 · 사용 기본 충족 조건
2. 단일하중 결정 및 구조해석 · 일반하중 · 특수하중 · 선형탄성해석
3. 내진해석 · OBE 조건 · SSE 조건
4. 단면력의 선형중첩 · 하중조건에 따른 단면력 조합
5. 하부 기초 설계 · 하부 형식 결정 · 말뚝 기초 갯수
6. 페데스탈 설계 (고상식) · 단면력 산정 · 페데스탈 개수
7. 바닥슬래브 설계 · 단면력 산정 · 단면 제원 결정
8. 벽체 설계 · 단면력 산정 · 프리스트레싱 해석
9. Ring Beam과 Roof 설계 · 단면력 산정 · 프리스트레싱 효과
10. 비상 조건 검토 · LNG 누출 조건 · 탱크 내부 화재 조건 · 인접탱크 화재 조건 · 비선형 해석 수행
11. 시공단계 해석 및 검토 · 벽체 장비 출입구

그림 8. 지상식 탱크 설계 절차

처짐, 균열 등이 유발되는 상태이다. <표 1>에 인친 지상식 저장 탱크의 설계시 적용된 설계 기준을 요약하여 나타내었다.

3.3 설계 하중

하중은 탱크의 시험 및 정상가동상태에서 작용하는 일반하중과 비상상태시에 작용하는 특수 하중으로 대별된다.^{2,3,4)}

3.3.1 일반하중

설계시 고려되는 일반하중은 다음과 같다.(그림 9)

표 1. 설계 기준

조건	적용 범위	설계 기준	
A. 정상 가동 상태	안전성	BS 8110의 극한한계상태 만족	
	내구성	제한 균열폭 = 0.2 mm 평균 균열폭 = 0.12 mm	
	기밀성	Steel Liner에 의한 확보	
B. 정수압 시험 (공기압 시험 포함)	안전성	BS 8110의 극한한계상태	
	기밀성	Liner	
C. 비상 상황	1. 내조 LNG 유출	안전성 극한한계 상태 만족 잔존 압축영역 100 mm 이상 확보. 압축영역에서 압축응력은 2 N/mm ² 확보	
	2. 지진하중(OBE)	가동 가능	
		안전성	극한한계상태 만족
	3. 지진하중(SSE)	기밀성	제한 균열폭 = 0.2 mm
		안전성	극한한계 상태 확보
	4. 액체충격	기밀성	Steel Liner
		안전성	극한한계 상태 확보
	5. 미사일 충돌	· 내조의 구조적 안전성 유지	콘크리트 벽체의 관통은 국부적인 영향만 미치도록 방어
6. 벽체의 저온의 온도 충격		국부적인 영향 균열폭 = 0.2 mm	
7. 인접지역의 화재 발생에 노출시	· 구조적 안전성 확보 · 탱크와 지붕은 복사열에 대해 2시간 동안 유지	비선형 해석 검토	
8. 탱크 내부의 화재	· 액위 이하에서 탱크 벽체의 안전성 확보	비선형 해석 검토	

- 정상 가동 조건
- 시험 하중 조건
- 비상 상황 조건

한계상태는 극한한계상태와 사용한계상태로 구분한다. 극한한계상태는 부재의 최대 내력에 해당하는 상태로써, 안전을 상실, 단면 파괴, 좌굴, 피로 등에 의한 한계상태로 표현된다. 사용 한계 상태는 정상적인 가동 상태, 또는 내구성에 관한 한계상태이며, 과도한 변형,

① 지붕 구조물

지붕 구조물에 작용하는 하중은 다음과 같다.

- 지붕의 자중
- 단열재 및 부속 장비 하중
- 설하중
- 풍하중
- 가동시 온도 하중
- 가동시 설계 가스 압력

② 벽체 구조물

지붕 구조물에 작용하는 하중은 다음과 같다.

- 풍하중
- 지붕으로부터 전달되는 하중
- 액체 압력
- 가스압력
- 온도 하중
- 프리스트레싱 효과
- 벽체 자중
- 단열재 충전에 따른 횡압

③ 바닥 슬래브 구조물

바닥 슬래브 구조물에 작용하는 하중은 다음과 같다.

- 가스 압력
- 바닥슬래브 자중
- 액체 압력
- 벽체로부터 전달되는 하중
- 온도 하중

3.3.2 특수하중

탱크 내부 및 탱크 외부로부터의 유발되는 사고 또는 재해에 의한 하중으로써 다음과 같다.(그림 10)

- LNG 누출
- 누출온도 하중
- 증가된 과압력
- 액체 충격
- 기능수행수준 지진(OBE)
- 붕괴방지수준 지진(SSE)

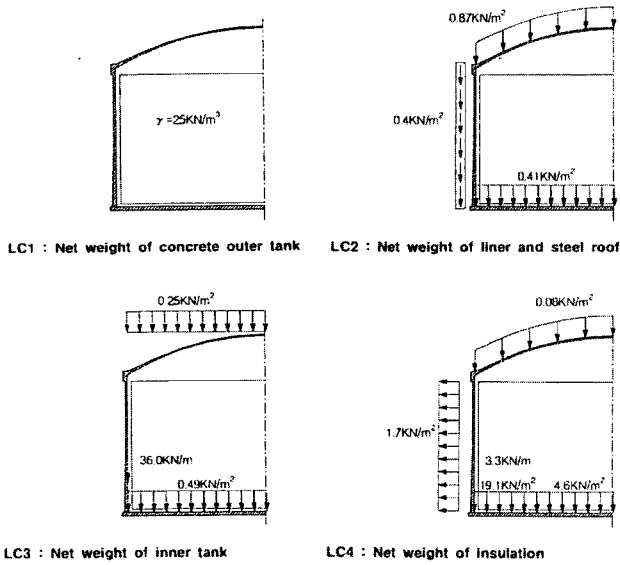


그림 9. 설계시 대표적인 일반하중

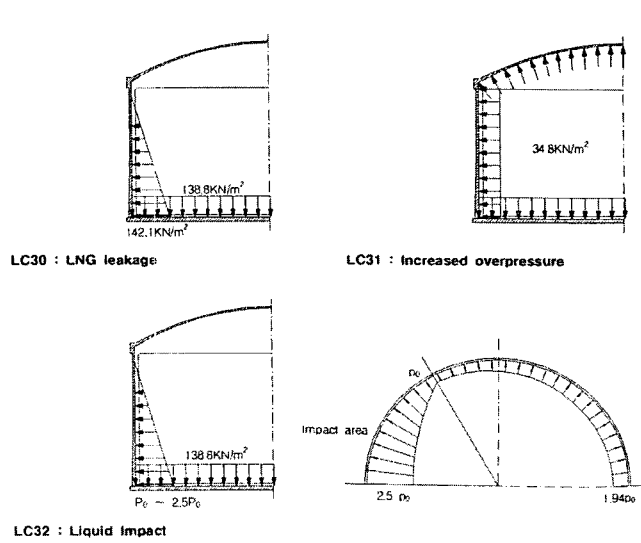


그림 10. 설계시 대표적인 특수하중

표 2 하중 조합

구분	단일 하중 내용	LNG 누출						인접탱크 화재			
		하중 조합 경우						극한한계상태(ULS)			
		사용한계상태(SLS)			극한한계상태(ULS)			극한한계상태(ULS)			
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
LC 1	Net weight of concrete outer tank	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.0	1.2
LC 2	Net weight of liner and steel roof							1.0	1.2	1.0	1.2
LC 3	Net weight of inner tank							1.0	1.2	1.0	1.2
LC 4	Net weight of insulation	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2	1.0	1.2	1.0	1.2
LC 5	Hoop prestressing	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
LC 6	Vertical prestressing	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84	0.84
LC 10	LNG filling in inner tank							1.2	1.2	1.2	1.2
LC 11	Operation design gas pressure	1.0	1.0	1.0	1.2	1.2	1.2	1.2		1.2	
LC 37	Hydrostatic pressure(LNG-level : 6.00 m)	1.0			1.2						
LC 38	Hydrostatic pressure(LNG-level : 16.20 m)		1.0			1.2					
LC 39	Hydrostatic pressure(LNG-level : 29.11 m)			1.0			1.2				
LC 40	Thermal loading(LNG-level : 6.00 m)	1.0			1.0						
LC 41	Thermal loading(LNG-level : 16.20 m)		1.0			1.0					
LC 42	Thermal loading(LNG-level : 29.11 m)			1.0			1.0				
LC 43	Heat flux I							1.0	1.0		
LC 44	Heat flux II									1.0	1.0

- 인접지역의 화재
- 탱크내 화재
- 비행 물체 충돌

정상 가동 상태에서 탱크 내부의 가스 압력은 일정한 범위 내에서 관리된다. 하지만, 비정상적인 경우 가스압은 커져 과압력이 작용한다. 또한, 내조의 파괴 또는 액체 누출시 외조는 갑작스런 온도 저하 즉, 온도 충격을 받는다. 내조와 외조 사이의 단열재에 결함이 있을 경우에도 온도 충격이 유발된다. <표 2>에 비상조건에서의 하중조합을 나타내었다.

3.4 해석 기법

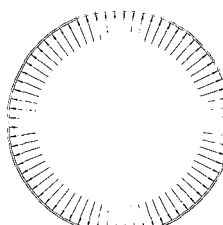
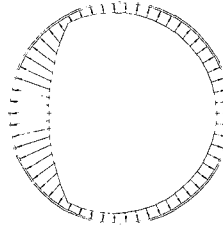
LNG 저장탱크의 전체 구조계는 회전축을 중심으로 대칭이 되

는 축대칭 구조물이다. 축대칭 구조물에 축대칭 하중이 작용한다면 전체 구조물을 축대칭 모델링으로만 해석이 가능하다. 축대칭 모델링을 통한 해석은 해석시간과 적용면에서 효율적이다. 지붕과 벽체 및 바닥슬래브는 축대칭 쉘요소를 사용하여 모델링하며, 고상식 탱크인 경우 탱크 본체를 지탱하는 페데스탈과 면진체는 축대칭으로 배열되어 있지 않다. 전체의 구조체를 축대칭으로 해석하기 위해서는 페데스탈과 면진체를 등량으로 환산하여 축대칭으로 분포시킨다. 페데스탈은 빔요소로 모델링하며, 페데스탈과 바닥슬래브를 연결하는 면진 베어링은 탄성 스프링으로 모델링한다. 그러나, 하중이 축대칭이 아닌 경우에는 축대칭 모델링만으로는 해석할 수 없다. 따라서, 구조해석시에는 축대칭 하중 해석을 위한 축대칭 모델링과 비축대칭 하중 해석을 위한 반모델링이

필요하다.

LNG 저장탱크에 작용하는 하중은 사하중, 가스압력하중, 온도 하중, 시험하중, 프리스트레스하중 등이 있다. 이러한 설계 하중들은 하중의 작용방향에 따라 축대칭하중과 비축대칭 하중으로 분류할 수 있다. 사하중, 프리스트레스하중, 가스압력하중과 같이 회전축을 중심으로 대칭인 축대칭하중들은 축대칭모델에 사용하여 해석하면 된다. 그러나 지진하중, 풍하중, 액체 충격과 같이 회전축에 대해 대칭이 아닌 하중들은 다른 방법으로 해석을 수행하여야 한다. <표 3>은 하중의 방향에 따른 하중의 분류를 나타낸다.

표 3. 하중의 방향에 따른 분류

하중의 분류	축대칭 하중	비축대칭 하중
하중의 분포		
하중의 종류	사하중 프리스트레스 하중 가스압력하중 액체압력하중 온도하중 시험하중 지붕하중	지진하중 액체 충격 풍하중

작용하는 하중이 비축대칭이라면 축대칭모델로 해석되지 않고, 1/2모델링이나 1/4모델링을 통하여 해석해야한다. 축대칭구조물에 비축대칭 하중이 작용할 경우, 축대칭 구조물에 작용하는 비축대칭 하중을 축대칭성분과 역대칭성분으로 분리하여 해석한다. <표 4>는 축대칭성분과 역대칭성분으로 분리된 예를 나타내고 있다.

비축대칭하중은 축대칭(axisymmetric)성분과 역대칭(anti-symmetric)성분으로 분리될 수 있고, 분리된 성분은 다시 삼각함수로 구성된 Fourier 전개식으로 표시할 수 있다. 외조를 따라 발생하는 하중을 Fourier 전개식으로 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (1)$$

이를 Euler공식에 적용하여 Fourier계수를 구하면 다음과 같다.

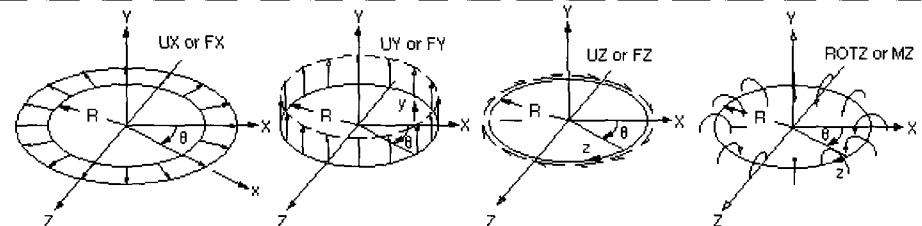
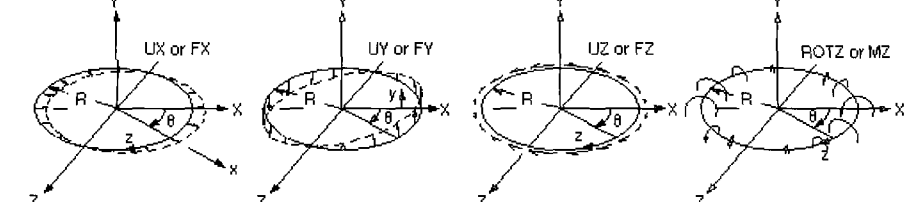
$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \\ a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx dx \\ b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx dx \end{aligned} \quad (2)$$

비축대칭 하중에 대한 축대칭 구조의 해석은 $n+1$ 개의 Fourier 전개식에 대해 완전히 독립적으로 힘-변위방정식을 구성하고 풀 뒤 그 결과를 중첩하여 최종변위와 최종응력을 구한다. 외조에 작용하는 풍하중은 비축대칭 하중의 전형적인 예이다. 벽체에 작용하는 풍하중의 항력계수를 $-\pi$ 부터 π 까지 도식화하면 <그림 11> 및 <그림 12>와 같다.

4. 프리스트레싱 설계

탱크 구조물은 내압에 의하여 측벽에 원환 방향 인장력과 수직 방향의 휨모멘트를 유발한다. 따라서, 원주 방향 인장력에 대한 저항력을 확보하기 위해 원주방향으로 프리스트레스를 도입하며, 수직 방향의 휨모멘트에 대한 저항력을 확보하기 위해 수직 방향으로 프리스트레스를 도입해야 한다. LNG 저장탱크 구조물과

표 4. 하중의 축대칭성분과 역대칭 성분

하중의 도식화 예	
축대칭 성분	
비축대칭 성분	

같은 원통형 구조물에서 원 환 방향으로 도입된 프리스트레스는 원환방향 단면의 압축응력을 유발한다. 프리스트레스에 의해 도입된 압축응력은 구조물 내부의 액압에 의해 발생하는 원환방향의 인장응력을 방지한다. 원주 방향의 프리스트레스 도입은 포스트 텐서닝 방법에 의해 PS 강재를 내부 긴장 방식으로 설치한다. 원주 방향의 텐던은 벽체의 부벽(butress)에 정착되며, 부벽은 일정한 각도로 배치된다. 부벽의 간격은 60° 간격으로 배치되거나 90° 간격으로 배치된다(그림 13). 벽체의 수직텐던은 저부가열식의 경우 탱크의 바닥판이 지면이 접해 바닥판에 텐던 정착부를 설치하기가 곤란하므로 텐던을 U자형으로 배열하여 긴장단과 고정단을 벽체의 상단에 위치시키게 된다. 고상식 탱크의 바닥판은 페데스탈에 의해 지지되어 일정한 높이에 위치하므로 텐던의 정착부를 바닥판 밑면에 위치시킬수 있다. 따라서, 텐던을 수직 형태로 배치하도록 설계한다.

벽체에 도입되는 원환 방향의 프리스트레스를 결정하는 과정은 다음과 같다.

(1) 벽체에 작용하는 내압 F_a 를 계산한다. 내압은 LNG 누출시의 액압, 가스압, 단열재 다짐에 의한 횡압 및 잔류 응력(residual stresses)으로 구성된다.

(2) 프리스트레스에 의한 등가 외압 F_e 의 결정

$$F_e = X \cdot F_a \quad (3)$$

여기서, F_e : 프리스트레스에 의한 등가 외압

X : 프리스트레스 수준(prestress level)

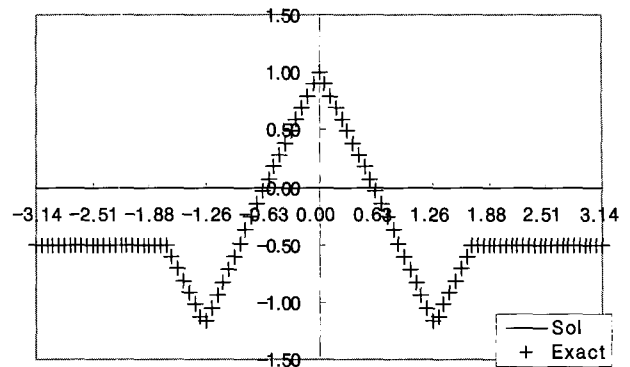
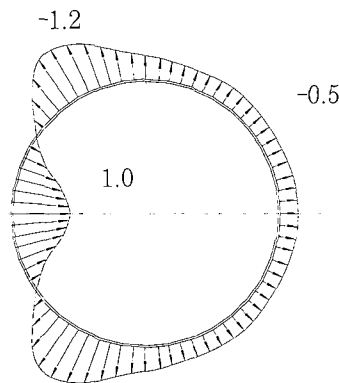


그림 11. 풍하중의 평면도

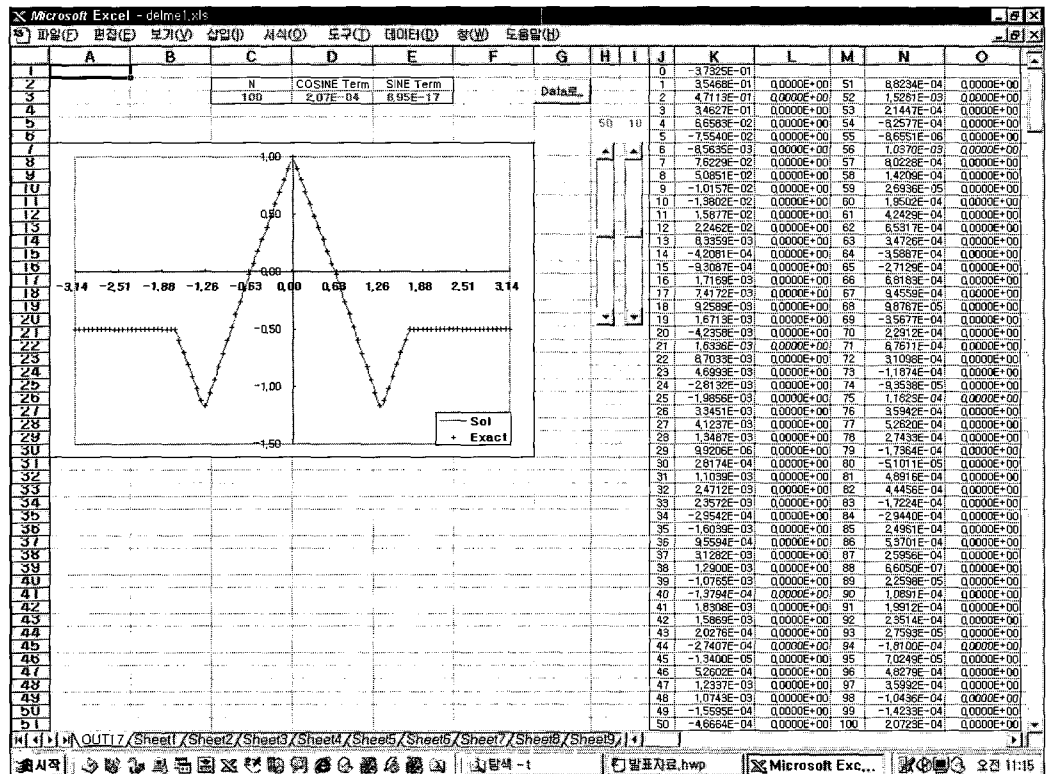


그림 12. 하중의 Fourier 함수 변환

F_a : 작용 내압(= 액압 + 가스압 + 단열재 횡압 + 잔류 응력)

(3) 텐던당 유효 프리스트레스 f_{pe} 계산

(4) 유효 프리스트레스에 의한 텐던의 유효 하중 산출

$$P_e = A_{ps} f_{pe} \quad (4)$$

여기서, P_e : 텐던의 유효 하중

A_{ps} : 텐던의 단면적

f_{pe} : 텐던의 유효 응력

(5) 벽체 높이별 텐던 구간 l 의 구분

(6) 벽체 구간별 텐던 갯수의 결정

$$n = \frac{F_e r l}{P_e} \quad (5)$$

여기서, n : 텐던 갯수

F_e : 프리스트레스에 의한 등가 외압

P_e : 텐던의 유효 프리스트레스 하중

r : 원통형 벽체의 반지름

l : 벽체 구간의 높이

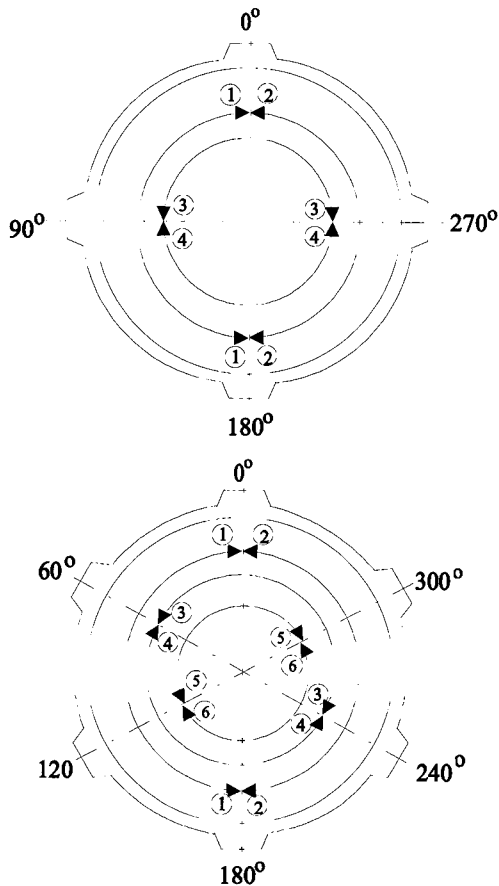


그림 13. 원환방향 텐던의 배치 형식

5. 내진 설계

인천 LNG 인수기지의 탱크는 지진과 관련하여 외조의 바닥 슬래브와 페데스탈 사이에 392개의 면진 패드를 설치하는 것으로 설계되었다. 면진 패드는 설정된 기능수행수준 지진과 붕괴방지 수준 지진 조건에 따라서 수평방향 지진운동으로부터 LNG 저장 탱크를 격리시키게 된다.

수평방향 지진에 대한 해석을 위한 모델은 <그림 14>와 같이 집중질량과 보요소로 유효요소 모델링한다. 또한, 구조계와 지반-

구조물 상호작용에 의한 거동은 탱크와 지반 구조계의 질량과 강성 기여의 영향을 고려하여 다자유도 모델로 형상화하며, 내부 유체의 영향은 집중질량과 내조에 연결되는 선형스프링으로 모델링하였다.

외조의 셸은 보요소로 변환하여 고려한다. 외조 콘크리트 셸의 강성은 휨강성, 전단강성, 멤브레인 강성으로 구성된다. 휨강성에 대해서는 단면 2차모멘트를 이용한다. 나머지 두 가지에 대해서는 보요소의 전단 단면적(shear area)을 이용하여 고려하며, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$A_{shear} \approx \frac{A(1-\nu)}{6(K_{shear} + K_{membrane})} \quad (6)$$

$$I = \pi (D_0^4 - D_i^4) / 64 \quad (7)$$

$$K_{shear} = (1 + \nu) / 3 \quad (8)$$

$$K_{membrane} = \frac{\nu}{24} + \frac{\alpha^2}{8} \quad (9)$$

$$\alpha = R/H \quad (10)$$

여기서, A_{shear} 는 전단 단면적, ν 는 포아송비, R 는 벽체의 반경, H 는 벽체의 높이, K_{shear} 는 전단계수 및 $K_{membrane}$ 는 멤브레인 계수이다. 내조는 높이에 따른 단면의 성질이 유사하기 때문에 특별한 변화가 없는 구간에서는 외조와 동일한 방법으로 모델링한다. 또한, 외조와 달리 내조는 유체와 접해있기 때문에 전달요소의 영향에 대한 반영이 다르게 고려되며, 반경에 비해 벽체 두께가 상대적으로 얇기 때문에 단면 강성의 산정에 있어 박막이론을 적용하는 것이 타당하다.

내부의 유체 모델링시 LNG 유체는 대류성분(sloshing)과 충격성분(유체-탱크 상호작용)으로 나누어진다. 충격성분은 탱크의 움직임에 따라서 운동하는 유연 압력성분과 탱크와 동일하게 강제운동을 하는 강체성분으로 구분된다. 슬로싱 질량이 위치하는 높이는 다음과 같다.

$$h_{sl} = H \left(1 - \frac{\alpha}{1.837 \tanh(1.837/\alpha)} \right) \quad (11)$$

또한, 슬로싱 주기는 다음 식에 의해 계산된다.

$$T_{sl} = 2\pi \sqrt{\frac{R}{1.84 \times g \times \tanh(1.84 H/R)}} \quad (12)$$

면진 장치는 지반과 구조물 사이의 낮은 전단강성을 제공하고 비격리된 구조물보다 낮은 진동수를 갖는 기본 고유모드를 도입한다. 수평방향의 기본 고유진동수는 설계 스펙트럼의 최대 진폭 영역 밖에 위치하게 되고 지진응답은 감소한다. 한편, 구조물의

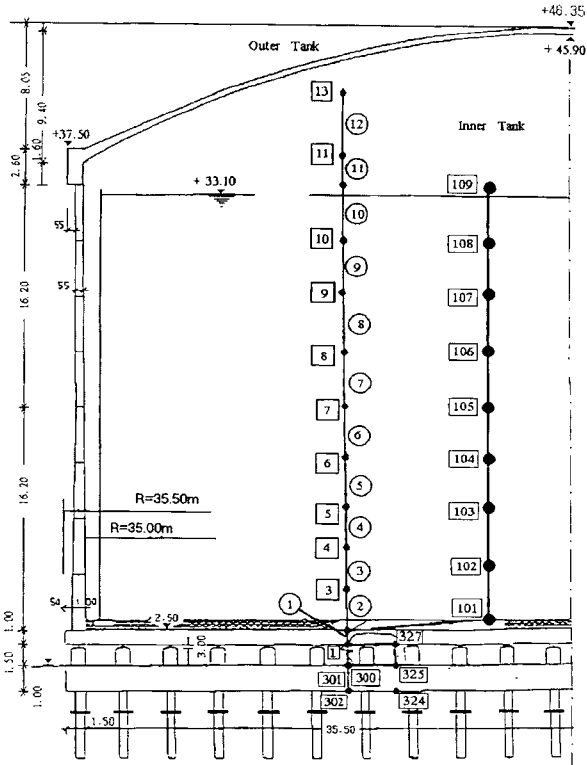


그림 14. 수평방향 내진 해석 모델

강성과 면진 장치의 강성 차이(1:0.15)가 크기 때문에 수평방향 모드와 Rocking 모드는 커플링되지 않게 되고, LNG 저장탱크의 높이를 따라 거의 일정한 운동을 하게 된다. 이러한 감소된 응답량과 저장탱크 높이에 따른 운동의 일정성은 전체 구조물의 상대적으로 큰 수평변위와 함께 얻어진다. 지진입력자료인 가속도 설계스펙트럼은 기초 말뚝의 선단부 높이에 위치한 풍화암의 표면에 작용한다. 구조물과 기초의 설계를 위하여 3방향의 지진 하중이 고려되며, 수평과 수직 방향의 진동에 대해서는 두 가지 서로 다른 해석 모델이 적용된다. 구조물과 기초의 축대칭성에 따라 수평방향의 계산은 임의의 일방향에 대하여 수행되고 그 결과는 모든 수평방향에 적용될 수 있다. 구조계의 최종 응답 즉, 단면력, 모멘트, 변위를 얻기 위해 응답은 주어진 방향에 따라 중첩된다. 특정한 1방향의 효과는 100% 기여하게 되고, 나머지 직교하는 2방향에 대한 효과의 40%가 이와 함께 조합된다.

6. 비상 조건 검토

외부 하중에 대한 구조물의 단면 결정 및 철근 배근 등의 설계를 위한 구조물 해석시에는 각각의 단일하중을 정의한 후, 각 단일하중의 해석결과를 중첩하여 단면력을 산출한다. 이와는 달리, 온도하중에 따른 구조물의 극한 거동 및 사용성 검토에서는 미리 결정된 각각의 단일하중을 조합한 조합하중을 구조물에 재하한 후, 각 시간 단계별로 온도 하중에 따른 비선형 해석을 수행한다. 벽체와 지붕의 비선형 해석을 위해서 크게 다음 두 가지 경우의

비상상태를 고려한다.

- (1) LNG 유출에 따른 비상상태 상황
- (2) 인접 저장탱크의 화재(복사 효과)로 인한 비상상태 상황

LNG 유출시에는 한계 상태를 사용 한계 상태(SLS)와 극한 한계 상태(ULS)로 나누어 고려하며, 인접 탱크 화재시에는 극한 한계 상태만을 고려한다.

6.1 LNG 유출에 따른 저온 조건

LNG 저장탱크 내조의 LNG 유출은 바닥판과 벽체의 2차 단열체에 의해 차단된다. 2차 단열체는 바닥 슬래브 상면으로부터 5.2m까지 위치한다. 따라서, 유출된 저온의 LNG는 바닥슬래브 상면으로부터 5.2m 위의 콘크리트 외조 내측 벽면에 직접적으로 영향을 미친다. 이때, 콘크리트 외조의 안쪽면과 바깥쪽면 사이에는 온도경사가 발생하며, 온도경사는 안쪽면의 -162°C 와 바깥쪽면의 상온과의 차이이다. 동절기보다는 하절기의 상온이 더욱 높으며, 결과적으로 더 큰 온도경사를 유발한다. 따라서, 설계시 고려되는 온도 경사는 여름의 상태에 대하여 고려한다. 인천 인수기지의 탱크 설계시에는 LNG 유출에 따른 구조물의 건전도를 검토하기 위해 다음의 3가지 LNG 액위를 고려하였다.

- 바닥슬래브 상면에서 LNG 액위 6.00m까지의 저온 노출
- 바닥슬래브 상면에서 LNG 액위 16.20m까지의 저온 노출
- 바닥슬래브 상면에서 LNG 액위 29.11m까지의 저온 노출

6.2 인접탱크 화재시의 열 플럭스에 의한 고온 조건

2시간 동안에 32 kW/m^2 의 열 플럭스가 구조물에 유입되는 경우를 고려한다. 2시간 동안 구조물에 유입되는 열 플럭스에 대하여 열전달 해석을 수행하며, 이에 따른 열영역 해석을 통하여 구조물의 건전도를 평가한다. 열플럭스는 인접 LNG 저장탱크

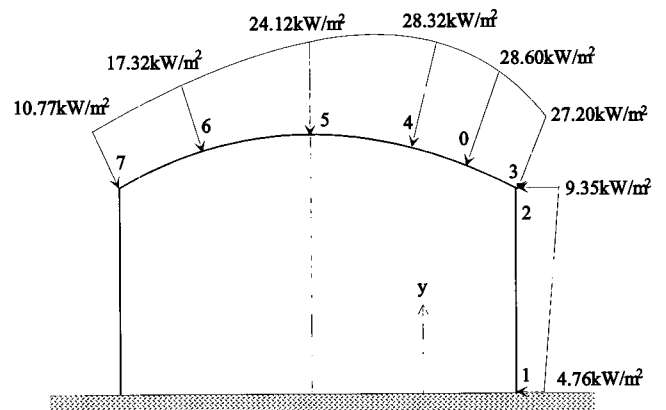


그림 15. 열 플럭스의 분포

화재시의 실린더형 불꽃으로부터 유래한다고 가정한다. <그림 15>에 콘크리트 외조에 분포하는 열플럭스를 나타내었다.

하중 조합 경우 및 각 하중 경우에 적용되는 하중계수는 <표 2>를 참조한다. 하중 조합 경우는 LNG 유출시 6가지를 고려하며, 인접탱크 화재시는 4가지를 고려한다. 이때, LNG 유출시에는 사용한계상태 3가지 경우와 극한한계상태 3가지 경우를 고려하며, 인접탱크 화재시는 극한한계상태 4가지 경우를 고려한다. 하중조합을 위해 기본적인 하중경우만 고려한다. 구조물 사용시의 유효 프리스트레스는 시간에 따른 프리스트레스 손실을 고려한다.

LNG 유출시의 사용한계상태(SLS)에서의 하중조합은 저장탱크 벽체의 검토를 위한 지배적인 하중조합이며, 이 때의 모든 하중계수는 1.0을 적용한다. 극한한계상태에서의 하중계수 적용은 하중이 구조물에 유리하게 작용하는지 또는 불리하게 작용하는지에 따라 달라진다. 열 플럭스는 구조물의 지붕 검토에 지배적인 하중 조합이며, 내부 압력이 있는 경우(지붕에 최대 인장력 유발)와 없는 경우(링 빔에 최대 인장력 유발)로 구분한다.

7. 맺음말

본 글에서는 지상식 LNG 저장탱크의 주요 설계기술과 인천

및 통영 인수기지에서 시공된 구조물의 특성을 고찰하였다. 국내의 LNG 저장시설의 설계 기술은 건설 초기에는 독일, 영국, 프랑스 및 일본 등의 외국 기술에 의존하였다. 하지만, 최근에는 외국 기술을 도입하여 국내의 기술진에 의해 설계된 저장탱크 시설이 시공 중에 있다. 한걸음 더 나아가 우리나라의 독자적인 설계 기술의 자립화 성공을 기대한다. □

참고문헌

1. British Standard 7777 : Flat-Bottomed, Cylindrical Storage Tanks for Low Temperature Service, 1993.
2. British Standard BS 8110, Structural Use of Concrete, Part 1 : Code of Practice for Design and Construction, 1985.
3. British Standard BS 8110, Structural Use of Concrete, Part 2 : Code of Parctice for Special Circumtances, 1985.
4. Eurocode No. 2, Design of Concrete Structures, Part 1 : General Rules and Rules for Buildings, Dec., 1989.
5. Ghali, A., Circular Storage Tanks and Silos, 2000, E & FN Spon.
6. 인천 LNG 인수기지 공사 구조계산서.
7. 통영 LNG 인수기지 공사 구조계산서.

논문 투고 및 게재시 유의사항

1. 논문 작성시 단위를 「2003년도 개정 콘크리트표준시방서」에 맞추시기 바랍니다.

<단위 : SI단위로 표시>

- ① 하중, 전단력, 축력 등 : N또는 kN
- ② 휨모멘트 : Nm 또는 kNm
- ③ 설계기준강도, 배합강도, 응력 등 : MPa(=N/mm²)
- ④ 배합설계시 각 재료의 단위량, 염화물이온량, 단위용적질량 등 : kg/m³

이외 주요 개정내용은 홈페이지(<http://www.kci.or.kr>) 공지사항에 안내되어 있습니다.

2. 논문 투고시 제출자료 : 논문심사신청서, 논문 4부 및 파일, 심사료 60,000원
 게재 확정 후 제출자료 : 논문게재신청서, 논문파일, 게재료 40,000원

3. 논문 심사료 및 게재료는 다음과 같습니다.

항목	국문논문	영문논문
심사료	60,000 원/편	-
게재료	40,000 원/편	-
초과게재료	20,000 원/면 (8면을 초과할 경우 해당 이 경우에도 최대 12면을 넘을 수 없음)	(최대 10면 까지)