

LNG 저장탱크 대형화 설계 연구

기존의 설계 및 시공성을 개선한 지상식 세계 최대 용량의 LNG 저장탱크 기본단면을 소개하면서 기존의 탱크를 분석하고 상세 구조해석을 통하여 탱크 구성요소들이 경제적인 단면 및 적절한 물량을 갖도록 하고 더 높은 안전성을 추구하였다.

양 호 용

(주)대우건설 플랜트사업본부 (7924006@mail.dwconst.co.kr)

LNG 소비 현황

LNG(liquefied natural gas)는 기체상태인 천연가스를 -162°C 까지 냉각하여 액체상태로 만든 것으로 메탄, 에탄, 프로판, 탄화수소 등으로 구성되어 있다. 천연가스를 액화시키면 부피가 약 1/600로 줄어들어 보관 수송이 쉽고, 액화시키기 전에 이산화탄소(CO₂), 황화수소(H₂S), 중질 탄화수소 등을 정제, 제거하기 때문에 불순물을 거의 포함하지 않는 청정 가스다. 전세계 에너지 소비중 천연가스가 차지하는 비중은 23 %지만 우리나라의 경우 6 %에 머물고 있다.

<표 1> LNG 소비 현황 (단위: 천톤)

년도	1996	1997	1998	1999	2000
국내	9,721	11,515	12,203	14,156	15,380
세계	1,774,000	1,795,000	1,817,000	1,839,000	1,864,000

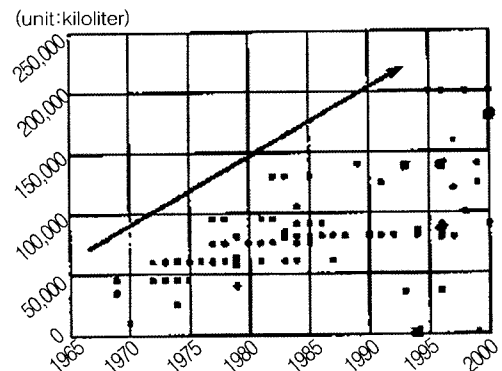
<표 2> LNG 저장탱크 주요 건설실적

년 도	년 도
~1970	5,600 m ³ (Trunkling LNG, USA)
	9,000 m ³ (Canvey Island, England)
	12,000 m ³ (Le Havre, France)
1971~1990	75,000 m ³ (Chita, Japan)
	80,000 m ³ (Himeji, Japan)
	100,000 m ³ (Pyeongtack, Korea)
	100,000 m ³ (Huelva, Spain)
	100,000 m ³ (El Paso LNG, USA)
1991~Now	140,000 m ³ (Tongyoung, Korea)
	160,000 m ³ (Dabhol, India)
	180,000 m ³ (Senboku II, Japan)

국내 천연가스 수요는 환경규제 강화, 소비의 편리성 등을 감안할 때 지속적으로 확대될 것이나, 대도시지역 도시가스 보급완료, LNG발전설비 건설규모 축소 등으로 증가세는 다소 둔화될 전망이다 (표 1).

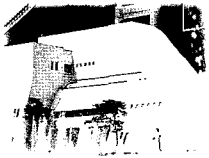
저장탱크 건설 현황

LNG 저장은 1940년대 미국에서 처음으로 시작되었고, 영국의 Canvey Island에서 2,500m³ 용량의 탱크가 건설된 후 본격적으로 저장탱크 건설이 이루어졌다. 그후 9 % Ni강, 고강도 콘크리트 및 해석기술 등 저장분야의 재질 및 기술의 발전으로 점점 대용량의 탱크가 건설되어졌다(표 2 및 그림 1 참고). LNG



● Aboveground type ■ Aboveground type(PC) ▲ In-Pit type * Underground type

[그림 1] 일본의 저장탱크 대형화 경향



인수기지 건설비용을 절감하기 위해서는 건설비의 많은 부분을 차지하는 저장탱크를 경제적으로 건설해야 한다. 저장탱크의 경제성은 내조 9% Ni, 외조 콘크리트/텐던 및 단열재 물량 등으로 결정되며 대용량일수록 경제적인 것으로 알려져 있다.

국내에는 3곳에 LNG 인수기지가 있으며 각 기지의 저장용량 및 세부사항은 표 3과 같다.

대용량 저장탱크 설계

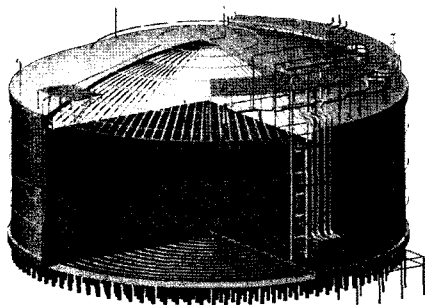
대용량 저장탱크 형상

대용량 저장탱크는 지상식으로서 완전방호식이며 저장능력은 200,000 m³으로 지상식으로는 세계최대 용량이다. 이 탱크는 지상식 저장탱크로 초저온 액체와 직접 접촉하는 내부탱크는 초저온에 강한 재질인 9% 니켈강, 외부탱크는 PC (prestressed concrete)를 사용하였으며 각 탱크 사이에는 단열재를 시공하였다(그림 2, 3).

9% Ni 탱크의 경우 기술개발 요소가 많지 않지만, 현재 대부분의 탱크가 이 형식으로 건설되고 있어 독자기술 확보시 세계시장 진출 가능성이 높다. 지상식

<표 3> 국내 저장탱크 현황

	형식	용량 및 기수	상업운전시작	기타
평택	지상식	100,000 m ³ x 10기	1986	운전중
인천	지상식	100,000 m ³ x 10기 140,000 m ³ x 2기 200,000 m ³ x 6기	1996	운전중 운전중 건설중
통영	지상식	140,000 m ³ x 7기	2002(예정)	건설중

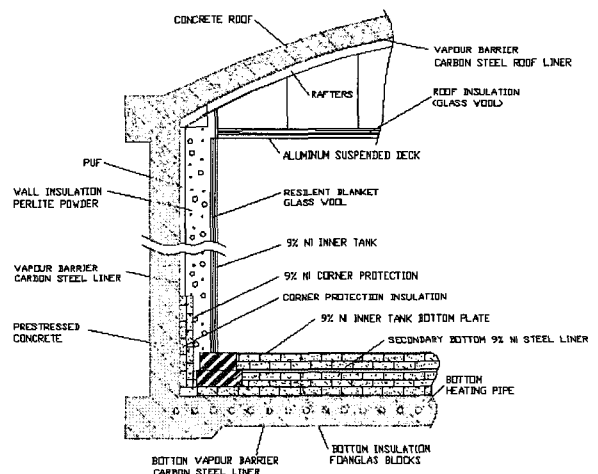


[그림 2] 지상식 저장탱크 일반형상

저장탱크(aboveground storage tank)는 LNG를 저장하기 위한 탱크 구조물을 지표면 위에 설치한 방식으로 여러 가지 방식중에서 가장 많이 건설되고 있으며, 지중식 저장탱크 방식보다는 공사기간이 짧고 건설이 용이하다는 장점을 갖고 있다. 완전 방호식 저장탱크(full containment storage tank)는 내부탱크와 외부탱크는 독립적으로 LNG를 저장할 수 있다. 즉, 내부탱크는 정상상태의 작동조건에서 LNG를 안전하게 저장할 수 있고, 외부탱크는 내부탱크 파손에 따라 LNG의 누설을 차단하고, 동시에 누설과정에서 발생하는 증발가스의 누출도 방지할 수 있다.

내부탱크

내부탱크 설계를 결정하는 가장 큰 요인은 내조두께와 충수시험이다. 9% Ni Plate로 제작되는 내조의 두께는 제조업체의 생산능력과 각국의 기준에서 허용하는 두께에 의해 제한된다. 현재 9% Ni Plate의 생산능력은 최대 50 mm까지이고, 기준에서 허용하는 최대 두께는 BS7777은 30 mm, API620(ASTM A553 규정)은 50 mm이다. 충수시험의 경우 BS는 최대 설계액위에서, API는 최대설계액위를 기준으로 선택적으로 운전수위의 125%에서 수행하는 것을 허용하고 있다. BS의 최대두께 제한 및 충수시험 조건이 그 동안 대용량 탱크 건설의 걸림돌이 되었으나,



[그림 3] 저장탱크 단면

개정중인 새 기준에서는 그 규정이 완화될 예정이므로 전세계적으로 탱크건설에 적용되고 있는 BS 및 API 어느 기준으로도 200,000 m³ 이상의 탱크 건설도 가능해 질 것이다.

• 설계 조건

- tank type : 9 % Ni Steel(내부), prestressed concrete(외부)
- pressure : 0.296 kgf/cm²g
- temperature : -170°C, +65 °C
- vacuum : -5 mbarg
- specific gravity : 0.48
- max. boil-off rate : 0.075 wt%/day
- gross capacity : 215,000 m³
- net capacity : 200,000 m³

• 설계 결과

- shell diameter : 90.0 m
- shell height : 35.3 m
- net height : 31.5 m

- max. design level : 33.8 m
- hydrotest level : 20.3 m
- 첫째 단 두께 : 32.8 mm
- annular plate : 두께 26.5 mm, 폭 2.8m

외부 탱크

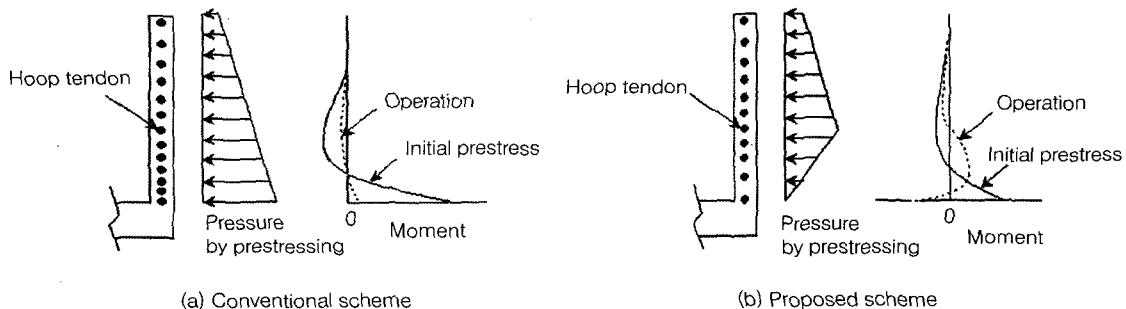
기술개발이 추진중인 200,000 m³ 급 저장탱크는 기존 통영 및 인천의 지상식 탱크를 비교분석 및 상세 구조해석을 통하여 빔, 벽체, 바닥판 등의 구조요소들이 경제적인 단면 및 적절한 텐던량을 갖도록 하였다. 세계적으로 처음 시도되는 용량이므로 기본적으로 기존 탱크와 비슷하거나 더 높은 구조적 안전성을 갖도록 해외 기술동향을 참고하여 진행하고 있다.

• 기존의 지상식 탱크 돔은 스프링에서의 각도가 30° 정도인 것이 대부분이나, 구조해석결과 돔의 높이가 좀 더 높은 것이 구조적으로 유리한 것으로 판명되었으므로, 재료물량, 시공의 난이도 등 구조 외적인 요소를 함께 고려하여 최종적인 높이를 결정함

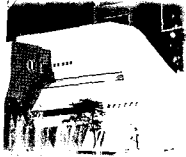
<표 4> 탱크 돔의 응력 검토

(단위 : kgf/cm²)

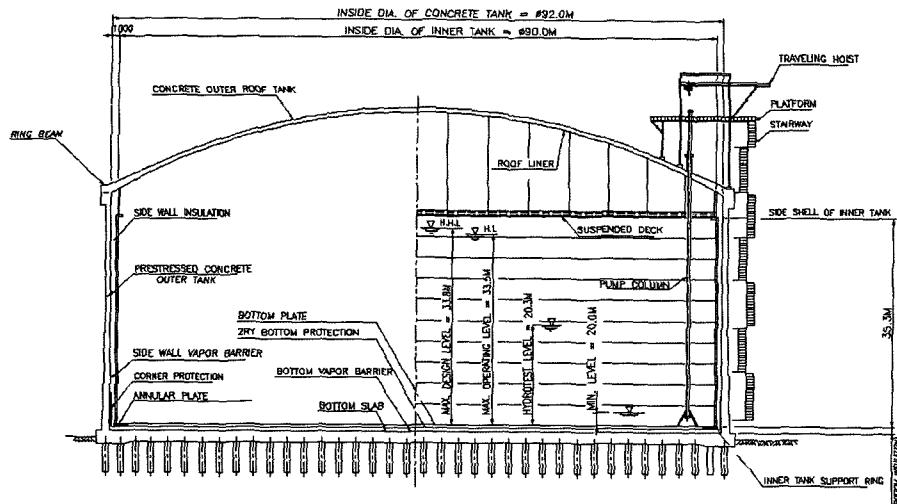
Types of LNG tank	Dimensions of dome		Internal pressure (3.7 tf/m ²)	Self-weight	Externally distributed loads (0.5 tf/m ²)	Total stress (severer case)	Safety factor (allowable stress /total stress)	Remark	
	Radius of curvature	Thickness (at the crown)							
Conventional design	1	1.0d	0.6 m	26.5	-7.1	-1.8	19.4	1.25	
	2	1.0d	0.45 m	28.8	-5.8	-1.9	23.0	1.05	
Proposed design	1	1.0d	0.6 m	28.4	-7.6	-1.9	20.8	1.16	
	2	0.8d	0.6 m	22.7	-4.0	-0.7	18.7	1.29	Acceptable
	3	0.58d	0.6 m	16.5	2.2	1.1	19.8	1.22	
	4	1.0d	0.5 m	34.0	-7.6	-2.3	26.4	0.92	
	5	1.0d	0.65 m	26.2	-7.6	-1.8	18.6	1.30	Acceptable



[그림 4] 모멘트 분포



집중기획 환경친화적 플랜트



[그림 5] General Assembly

<표 5> 설계 재질 및 적용코드

	요소	사용재질	적용코드	비고
내부 탱크	Side Wall	9% Ni	ASTM A553	두께: 10~32 mm
	Bottom Wall	9% Ni	ASTM A553	두께: 5 mm
	Top Girder and Stiffener	9% Ni	ASTM A353	
	Suspended Deck	Al Alloy 5083-O	ASTM B209	두께: 5 mm
	Corner Protection	9% Ni	ASTM A353	바닥면으로부터 5m까지 설치
외부 탱크	Side Wall	Prestressed Concrete	BS 8110	
	Bottom Wall	Prestressed Concrete	BS 8110	
	Outer Roof Tank	- Reinforced Concrete - Carbon Steel	BS 8110	ASTM A516
	Ring Beam	Prestressed Concrete	BS 8110	
	Pile	Carbon Steel	ASTM A516	
단열재	Vapor Barrier	Carbon Steel	ASTM A516	PC 내벽면을 따라 설치
	Side Wall	- Perlite Powder - Resilient Blanket		
	Bottom Wall	- Center Formglass - Annular Formglass - PCB		
	Deck	Fiber Glass		

• 통영, 인천의 벽체 변단면 구간은 벽체 높이의 1/2 이지만, 상세 구조해석 및 해외의 LNG 탱크와의 비교 결과 벽체의 변단면 구간을 더 줄이는 설계 수행함

• 벽체의 원환텐던 (hoop tendon)의 배치에 대한 분석결과 기존 탱크의 텐던 배치상의 문제점을 개선하여 적용함

• 기존 시공방식 및 텐던의 긴장순서를 비교분석하

여, 탱크 부위별로 좀 더 바람직한 시공법을 채택하였으며, 이때 시공성을 추가로 반영하여 개선함

• 내진해석시 기존 설계자료에 비하여 더 정확한 유체-구조물 상호작용을 포함함

General Assembly

그림 5와 같은 현재까지의 설계를 반영하여 작성한 LNG 저장탱크의 general assembly, 설계재질 및 적용코드는 표 5와 같다.

맺음말

전 세계적으로 지속적인 경제성장과 환경의 중요성에 대한 인식으로 천연가스 산업은 지속적인 성장세를 유지해 왔다. 미국이나 유럽은 배관을 통하여 천연가스를 공급받지만, 우리나라와 일본은 LNG를 도입하여 저장후 기화하여 천연가스를 공급한다. 따라서 천연가스 소비 증가에 따라 저장시설의 건설이 뒤따라야 한다.

LNG 저장탱크를 경제적으로 건설하는 방법의 일환으로 점점 탱크가 대형화되는 추세에 있으며, 기술의 발전과 설계기준의 변경은 200,000 m³ 급의 탱크 건설을 가능하게 한다. ㉔