

# 200,000 KL급 초대형 지상식 LNG 저장탱크 기본설계

김 용 응 · 김홍섭 · 장 회 진  
대우건설(주), LNG PJ팀

## The Basic Design for The Biggest above Ground LNG Storage Tank (200,000 KL Capacity)

Y.U. Kim · H.S. Kim · H.J. Chang  
Daewoo Corporation/Engineering & Construction  
C.P.O Box 8269 Seoul 100-095

### 1. 서론

현대적 에너지가 이용되지 않고서는 식량, 수자원, 보건, 교육 및 복지를 위한 개선이 될 수 없고, 에너지를 얻기 위한 기술은 경제 성장의 핵심이다.

에너지 산업은 광범위한 서비스를 할 수 있는 접근가능성과 중단 없는 공급을 할 수 있는 이용가능성 및 사회적으로나 환경적으로 수용 가능한 에너지 제품을 제공하는 것이며 이를 위해서는 소요자금과 기술이 필수적이며 적절한 제도와 사회 여타 분야의 지원이 수반되어야 한다.

또한 현대 에너지 산업이 추구하고 있는 목표는 지속 가능한 에너지의 개발이며 이를 위해 정부의 에너지 정책과 동반하여 부단한 신기술을 발전시키고 있다.

특히 에너지 저장분야는 각 국가별로 비상사태를 대비할 수 있는 에너지원의 비축개념으로서 중요한 기본 시책이며 우리나라도 이를 위해 정부주도하에 에너지 저장시설을 구축하여 왔다.

탱크는 LNG 기지의 총 건설비용 중 상당부분을 차지한다. 특히 LNG 소비량의 계절적 차이를 처리하기 위해서 많은 량의 LNG가 탱크에 저장되어야 한다. 이러한 이유 때문에 인수기지들은 다수의 탱크들을 보유할 수 밖에 없었고 저장탱크 건설 비용이 총 설비비용의 약 반 정도를 차지하고 있다. 따라서 경제적인 인수기지를 건설하기 위한 가장 핵심적인 문제로서 최근의 원가 절감 노력으로 탱크 용량을 증대시키고 건설방법을 개선하는데 주안점을 두어 왔다.

여기서는 탱크 대형화의 세계적 추세와 대형화를 가능케 하는 기술적인 요인과 문제점 및 200,000kl급 지상식 9% Ni LNG 저장탱크의 기본 개념 설계를 소개하였다.

## 2. 본론

### 2.1 LNG 저장탱크의 세계적 건설추이 및 향후 전망

LNG 저장탱크는 대체로 70년 후반까지 Single Containment 형태의 건설실적이 있고 Double Containment의 경우는 70년 중반부터 80년 후반까지 꾸준히 건설되었다.

주로 80년 중반부터 건설되기 시작한 Full Containment 탱크는 최근까지 세계적으로 약 30기 이상이 건설되었거나 건설중이며 이 형태의 탱크는 9% Ni강 제작 기술 및 고강도 콘크리트의 기술개발 등으로 향후 점차 대형 탱크의 건설이 가능할 것으로 예상되므로 안정성 향상 및 경제성 개선 측면에서 초대형 지상식 Full Containment 탱크는 향후 LNG 탱크 건설의 주종을 이룰 것으로 예상된다.

최근 세계적으로 안전 및 환경에 대한 인식이 높아감에 따라 공기, 투자비가 다소 증가되더라도 환경보호 및 Safety를 우선적으로 고려함으로써 보다 안전하고 민원의 발생소지가 적은 형태의 탱크를 건설하는 추세이다.

일본의 경우를 보면 LNG 탱크는 내조 9% Ni강의 제작기술의 한계로 인하여 지상식의 경우 주로 140,000kl로 건설되었으나 최근 50mm 두께의 9% Ni강의 제작기술 발달로 180,000kl 이상의 대형 탱크 건설이 가능해졌고 자동용접기술 및 고강도 High Performance 콘크리트의 개발로 안정성 향상 및 부지 이용의 극대화로 경제성 향상을 기하게 되었다.

현재 일본에 건설중인 Senboku II 기지탱크의 경우 지상식 Full Containment 탱크로서 9% Ni강 Dome형 Roof를 가진 밀폐형 내조와 CS Roof 및 PC 외조 구조의 탱크로서 180,000kl의 저장용량으로 설계되어져 있다. 이 같은 대형 탱크 건설은 부지이용 극대화 등 경제성 향상 측면에서 향후에도 계속될 것으로 예상되며 또한 안전성을 강화하기 위한 설계 및 건설기법으로 Roof 재질에 콘크리트를 적용하는 방식이 선호되고 있다.

일반적으로 말해서 대형 저장 탱크들은 보다 경제적이고 부지이용을 효율적으로 해 준다. 그러나 또한 대형탱크는 재료, 구조 및 제작 등 모든 건설 부문에서 고도의 신뢰성이 유지될 것을 요건으로 한다. 전술한 바와 같이 그 방법으로 9% Ni강의 재질을 향상시키는 것을 들 수 있다. 저장 용량이 증대됨에 따라 LNG 누출시의 안전증진 문제를 주시해야 한다. 제2차 용기로서의 역할을 수행하는 외벽은 극히 중요성을 더해가고 있다. 이러한 외벽에 PS 콘크리트나 철근콘크리트와 토사를 이용하는 Full Containment Tank는 안전을 증진시키는 방법이 된다.

## 2.2 LNG 탱크의 건설 실적

탱크 대형화의 추세는 아래 실적을 보면 분명히 나타난다.

### 2.2.1 용량별 세계 실적

년도	용량
1960	9,000m <sup>3</sup> (Canvey Island)
1970 ~ 1980	50,000m <sup>3</sup> 가 주류 (British Gas Peak)
현재	100,000m <sup>3</sup> 가 가장 인기 140,000m <sup>3</sup> (카타르 - 1999년 건설완료 운전중 / 통영 - 2002년 완료 예정) 160,000m <sup>3</sup> (인도 - Dabhol 건설중) 180,000m <sup>3</sup> (일본 - 센보쿠 기지 2002년 완료 예정)

### 2.2.2 용량별 국내 실적

- 평택 : 100,000m<sup>3</sup> × 10기 membrane PC type (지상식)
- 인천 : 100,000m<sup>3</sup> × 10기 9% Ni PC type (지상식)
- 인천 : 140,000m<sup>3</sup> × 2기 membrane inground tank (지하식)
- 인천 : 200,000m<sup>3</sup> × 6기 membrane inground tank (지하식)
- 통영 : 140,000m<sup>3</sup> × 3기 9% Ni PC type (지상식)

## 2.3 탱크 대형화의 기술적 가능요인 및 문제점

### 2.3.1 발달 가능 요인

- 용량증가에 따라 두꺼워지는 9% Ni강의 Toughness 및 Welding 문제의 해결 및 저온하의 9% Ni강의 균열문제 규명
- 내조 탱크 제작시 대형 Plate의 사용
- 자동용접기술의 개발 및 적용으로 인한 대형탱크 제작의 용이성
- 강력한 X-ray 검사기술의 개발 및 적용
- 고강도, 자기충진형 Concrete의 개발로 Concrete 외벽구조의 강화
- Prestressing Tendon System의 기술발전으로 인하여 각 Tendon의 Strand에 균일한 Stress를 가할 수 있고 Prestressing 작업시 Computer에 의한 관리가 가능해졌으며 Grouting 재질 및 기술도 발전하였음

### 2.3.2 문제점

탱크 대형화의 가장 큰 제한적 요인은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째는 탱크의 두께 제한이고, 둘째는 탱크의 Hydro Test 요구조건이다. 두께는 9% Ni Plate 제조업체의 생산능력과 각국의 Standard에서 허용하는 두께에 의해 제한된다. 현재 9% Ni Plate의 생산능력은 국제적으로는 50mm까지 제조가 가능하며 국내는 25mm까지 제조가 가능한 실정이다. 각국의 Standard별로 살펴보면 유럽에서 주로 채택되는 BS7777은 최대 설계액위까지 Hydro Test를 수행하며 9% Ni Plate의 최대 두께를 30mm까지 제한하고, API620은 Full height가 원칙이나 과도한 기초설계 때문에 Operating Load의 125%까지의 Hydro Test를 허용하고 있으며 Plate의 최대 두께는 구체적 언급이 없다. BS7777의 최대 두께 제한은 세계적으로 탱크의 대형화를 저해하는 요인으로 작용했으며 최근 BS에서는 이러한 제한을 보완하기 위해 좀더 완화된 규정인 PD7777-2000을 제정케 했다. PD7777-2000은 LNG 저장의 경우 Operating Load의 125%까지 Hydro Test를 허용하고 있다. 향후 제정 예정인 저온용 탱크의 유럽 통합기준 EN265002에서는 BS의 엄격한 두께 제한도 완화될 것으로 예상되고 있으며 향후 국제적 기준으로 사용될 경우 세계적으로 20만 KL급 이상의 탱크를 제조할 수 있는 발판이 구축될 것이다.

국내의 경우에는 내조에 API620을 적용하고, 외조에는 BS7777을 적용하고 있으며 BS7777과 같은 두께 제한이 요구되고 있다.

아래에 탱크 대형화의 제한요인 사항들을 정리해 보았다.

- a. Design Code or Method
  - Allowable Design Stress
  - Maximum/Minimum Plate Thickness
  - Hydro Static Test Requirement
- b. Material Properties
- c. Soil Condition
- d. Base Insulation
- e. Seismic Design Data
- f. Local Planning Rules

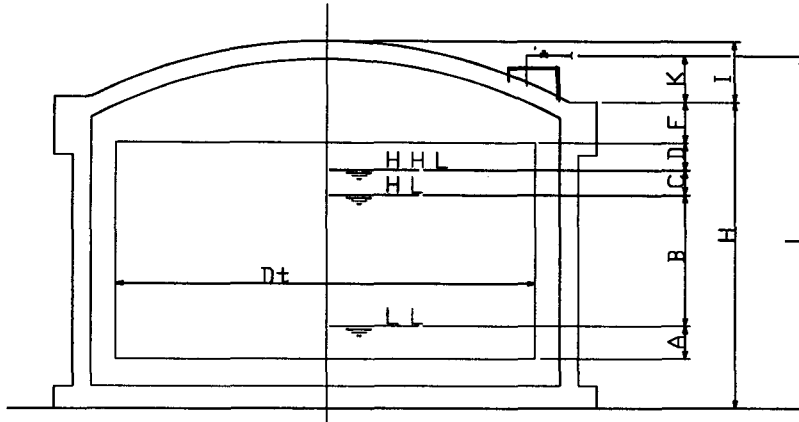
## 2.4 대형 LNG 탱크의 기본 개념 설계

### 2.4.1 탱크내조의 설계 기준

여기서 내조는 API 620 App.Q를 외조는 BS 7777을 적용하였으며, Hydro test 는 Operating Base Load의 125%를 적용하였다.

Item	Description
<b>General</b>	
Storage tank type	Full containment, 9% Nickel inner container
Gross capacity	213,000 m <sup>3</sup>
Net capacity	200,000 m <sup>3</sup> (at operating conditions)
Tank diameter (Primary container)	84,000 mm
Tank height (Primary container)	39,950 mm
Maximum design liquid level	38,550 mm
Maximum design operating level	38,250 mm
Minimum liquid level	2,000 mm
Hydrostatic test level	22,950 mm
Pneumatic test level & Pressure	18,360 mm 363 mbarg
Joint efficiency	100% for all butt welds of shell plate, Annular plate and stiffeners
Corrosion allowance	0 mm
Design code	API 620 Appendix Q, L, BS 7777
<b>Stored product data</b>	
Stored liquid	Liquefied Natural Gas
Stored temperature (Typical)	-162℃
Design density	480 kg/m <sup>3</sup>
Viscosity	0.16 CP
<b>Design conditions</b>	
Pressure	0.296 kg/cm <sup>2</sup> g
Temperature	-170℃, +65℃
Vaccum	-5 mbarg
Max. Boil-off gas rate	0.075 wt% per day

## 2.4.2 탱크 내조의 기본 구조 계산



Mark	Item	Dimension	Specified value
A	Minimum liquid level for pump restart	2,000 mm	Min. 2,000 mm
B	Net operating volume height	36,250 mm	
C	Distance between HL* and HHL**	300 mm	Min. 300 mm
Dt	Diameter of inner tank	84,000 mm	
D	Sloshing height by seismic + free board	1,400 mm	Free board ; Min. 500 mm
F	Distance above free board to outer tank side wall top	3,340 mm	
H	Outer tank side wall height	45,190 mm	from G.L
I	Roof Rise	11,082 mm	
K	Distance between outer tank side wall top and highest point of LNG inlet line	6,060 mm	
L	Height of highest point of LNG inlet line	51,250 mm	from G.L

Note : 상기 값들은 상온 상태를 기준 한다.

\* HL : 최대 운전 액위

\*\* HHL : 최대 설계 액위

## 2.4.3 내조의 Shell plate 강도 계산

### 1) 설계 조건

- (1) Type : Open Top, Flat Bottom, Cylindrical Type
- (2) Contents : Liquefied Natural Gas

- (3) Net capacity : 200,000 m<sup>3</sup>
- (4) Inside diameter : 84,000 mm
- (5) Height of sidewall : 39,950 mm
- (6) Maximum design liquid level : 38,550 mm
- (7) Specific gravity of liquid : 0.480
- (8) Design temperature : -170°C
- (9) Design pressure : Liquid Head
- (10) Spectral accelerations :

Description	Ground		Tank	
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
OBE	0.100	0.067	0.376	0.251
SSE	0.200	0.133	0.626	1.417

- (11) Corrosion allowance : 0 mm
- (12) Minimum shell thickness : 10.0 mm
- (13) Material : ASTM A553 Type I
- (14) Allowable stress : 2,226 kgf/cm<sup>2</sup>
- (15) Application standard : API 620, Appendix L and Q

## 2) 내압에 대한 Shell 두께 계산

API 620, Para.3.10.3에 따라 Shell 두께는 아래 식으로 구할 수 있다.

$$t = \frac{T}{S_t s \cdot E} + c$$

여기서;

t : Required shell plate thickness (cm)

T : Latitudinal unit force = p · Rc

S<sub>ts</sub> : Maximum allowable stress (weld metal basis)  
= 2,226 kgf/cm<sup>2</sup>

E : Maximum allowable joint efficiency = 100%  
(API 620 Table 3-2 maximum allowable joint efficiencies for arc-welded joints)

c : Corrosion allowance = 0 mm

p : Liquid pressure

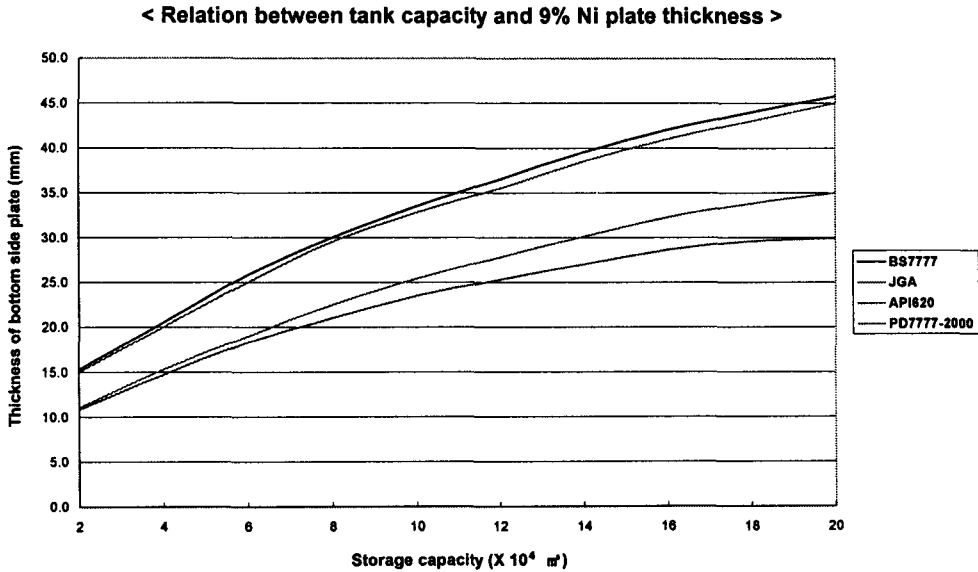
$$= \frac{0.480 \times H_i}{1000} \text{ kgf / cm}^2$$

H<sub>i</sub> : Liquid depth (cm)

R<sub>c</sub> : Inside radius of tank = 4200 cm

계산 결과 내조 최하단의 탱크 최대두께로 35mm를 구할 수 있었다.

#### 2.4.4 각 Standard별 기준 적용에 따른 탱크 내조의 Thickness 비교



- \* BS 7777 최대 허용 두께 : 30mm
- \* 국제적인 생산 가능 두께 : 50mm
- \* 국내 생산 가능 두께 : 26mm

### 3. 결론

본 고에서는 LNG 인수기지를 경제적으로 건설하는 방법의 일환으로 점점 탱크가 대형화되어 가는 세계 추세와 대형화를 가능케 하는 기술적인 요인과 문제점을 소개하였으며 200,000kl급 초대형 LNG 저장 지상탱크의 기본설계를 연구해보았다. 기본설계 계획단계에서 경제성을 감안하여 적용법규를 내조에는 API620을, 외조에는 BS7777을 적용하였다.

기본설계 결과 이미 전 세계적으로 출현이 예고되고 있는 20만kl급 LNG Tank가 이미 국내에서 적용하고 있는 API620, BS7777등의 국제 기준으로 설계시에도 충분히 설계가 가능함을 알게 되었다.

현재 우리나라는 LNG 저장 탱크 건설을 위해 설계기술을 선진 외국에 의존하고 있으며 그것으로 인하여 막대한 외화가 유출되고 있는 실정이다. 다행히 한국 가스 연구개발원을 중심으로 가스 엔지니어링에서 올해 말까지 9%Ni형 14만kl급 LNG 저장탱크 설계 기술을 정립할 예정이다. 향후 이를 발판으로 LNG 저장탱크의 기술자립화를 이루어 우리나라가 세계의 초대형 LNG 저장탱크 건설분야에서 선도적인 역할을 할 수 있기를 바란다.



※ 참조 및 인용 문서

1. BS 2654, "Manufacture of vertical steel welded storage tanks with butt welded shells for the petroleum industry"
2. BS 7777, "British standard for flat-bottomed, vertical cylindrical tanks for low temperatures service"
3. EEMUA No.147, "Recommendations for the design and construction of refrigerated liquefied gas storage tanks"
4. EEMUA No.159, "Recommendation for in-service inspection of aboveground vertical cylindrical, steel storage tanks"
5. API 650, "Welded steel tanks for oil storage"
6. API 620, "Recommended rules for design and construction of large, welded, low-pressure storage tanks"
7. Storage Tank Philosophy and practice, "An intensive design course in the university of design cambridge (13-16 Sep. 1994)"
8. LNG12, "Bigger & Cheaper LNG Tanks ?"