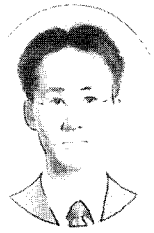


|| LNG 저장탱크의 설계와 시공기술 동향 ||

대용량 지상식 LNG 저장탱크의 설계기술 - Design Basis for Large Above-ground LNG Tank -



전세진*
Jeon, Se Jin



진병무*
Jin, Byeong Moo



유재원**
Yoo, Jae Weon



김영진***
Kim, Young Jin

1. 머리말

LNG 저장탱크의 건설 비용은 LNG 터미널의 전체 공사비 중 45 ~ 65 %에 이르는 상당히 큰 부분을 차지하고 있으므로 LNG 탱크의 가격 효율성을 높여려는 노력이 지난 수십여 년간 지속되어 왔다. 시공기술 개선을 통한 시공기간의 단축이나 정밀한 구조해석기술 및 설계기술의 발전에 따른 시공재료의 절감 등도 그러한 노력의 일환으로 볼 수 있지만, 또 한가지의 뚜렷한 경향은 LNG 탱크의 대용량화이다.

대용량화를 통하여 저장용량대비 상대 시공비용을 절감하고 또한 부지의 효율적인 이용도 도모할 수 있음은 이미 많은 연구 및 분석을 통하여 널리 인정되어져 왔다^{1~3)}. 이러한 이론적인 분석과 더불어 설계기술과 소재기술의 발전에 따른 기술적 제약의 완화를 통하여 실제로 전세계적인 LNG 탱크의 대형화 추세가 가시화되고 있는 실정이다. 대형화를 뒷받침하는 또 다른 결정적 요소는 대형화에 걸림돌이 되었던 몇몇 보수적인 설계기준이 크게 완화되고 있다는 점이며, 이에 대해서는 뒤에서 좀 더 자세히 다루기로 한다.

대용량화에 따른 경제성 분석은 기관마다 약간의 차이가 있지만 한국가스공사 연구개발원의 자료³⁾에 의하면 <그림 1>과 같은 저장용량대비 시공비용 절감 효과를 기대하고 있다. 비교적으로

Goto et al.¹⁾에 의하면 10만 m³급 탱크와 비교하여 20만 m³급은 20 %의 저장용량대비 시공비용 절감 및 40 %의 부지효율성 증가 효과를 거둘 것으로 예측하고 있다.

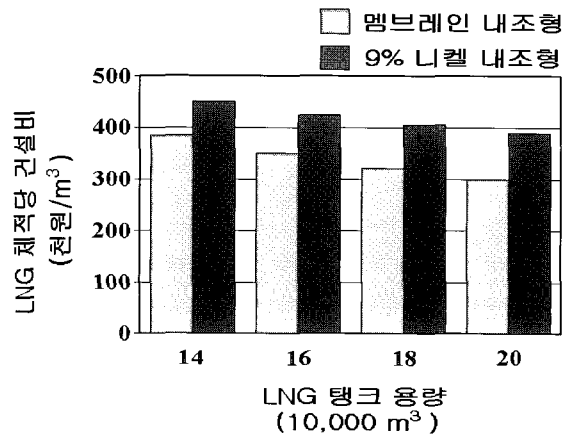


그림 1. 대용량 LNG 저장탱크의 시공비 절감 효과

경쟁적으로 대용량의 LNG 탱크를 설계하는 세계적인 기술추세하에서 경쟁력을 갖추기 위해서는 대용량화시 LNG 탱크의 효율적인 기본단면 설계기법에 대한 연구가 병행되어야 한다고 사료된다. 본고에서는 인천이나 통영의 지상식 탱크와 같은 완전방호식 지상식 LNG 탱크를 중심으로 대용량화시 고려해야 할 요인 및 기존 LNG 탱크 설계에서 개선할 수 있는 점들을 고찰해 보고자 한다.

* 정희원, 대우건설기술연구소 선임연구원
** 다산건설터트, 상무
*** 정희원, 대우건설기술연구소 수석연구원

2. LNG 저장탱크 대용량화의 역사

최초로 건설된 LNG 저장시설은 1940년대에 미국 Ohio주 Cleveland에 건설된 2,500 m³ 및 4,500 m³급의 탱크이지만, LNG 탱크가 상업적인 용도로 쓰인 것은 1959년 영국 Canvey Island에 건설된 2,500 m³급의 탱크에 LNG 하역을 성공한 이후로 볼 수 있다. 즉, 본격적인 LNG 탱크의 역사는 약 45년 정도로 비교적 일천한 편이다.

LNG 탱크 역사의 초기인 1960년대에는 영국 Canvey Island의 9,000 m³급을 비롯하여 1만 m³ 내외의 탱크가 주로 건설되었으며, 1970년대 ~ 1980년대 초까지는 3만 ~ 8만 m³ 용량, 즉, 5만 m³급 전후의 탱크가 활발히 건설되었다. 1980년대에는 10만 m³급이 주류를 이루었으며, 대용량화를 주도한 일본의 경우 1990년 이후로는 LNG 탱크들의 절반 이상이 10만 m³ 이상의 용량을 보유하게 되었다. 현재에는 지상식 탱크의 경우 인도의 Dabhol에 건설중인 탱크 등 전세계적으로 16만 m³급이 빈번히 발주되고 있어 대용량화의 현주소를 말해주고 있다. <표 1>에서는 지상식(above-ground type), 지중식(in-ground type), 그리고 지하식(under-ground type) 각각에 있어 세계최대용량 LNG 탱크를 비교하였다. 지중식의 경우 인천의 LNG 탱크가 일본 Negishi의 탱크와 함께 세계최대의 용량을 보유하고 있으며, 지상식의 경우는 통영의 LNG 탱크가 14만 m³급의 대용량이지만 하나 세계최대 용량에는 미치지 못하고 있다.

표 1. 세계최대 용량의 LNG 저장탱크

형식	위치	용량(m ³)
지상식	Senboku(일본) ⁴⁾	180,000
	Himeji(일본) ⁴⁾	180,000
지중식	Negishi(일본) ⁵⁾	200,000
	인천	200,000
지하식	Ohgisima(일본) ⁵⁾	200,000

한편 지상식 LNG 탱크를 단일방호식(single containment type), 이중방호식(double containment type), 완전방호식(full containment type)으로 나눌 때 대체로 1970년대 후반까지는 단일방호식이, 1970년대 중반 ~ 1980년대 후반까지는 이중방호식이 꾸준히 건설되었다. 주로 1980년대 중반부터 건설되기 시작한 완전방호식은 우수한 안전성 측면 및 9% Ni의 제작기술 발전 등에 힘입어 이후 지상식 LNG 탱크의 대용량화를 주도하고 있다.

3. 완전방호식 LNG 저장탱크의 형상을 결정짓는 요인

LNG 탱크의 대용량화와 관련하여 먼저 LNG 탱크의 직경과 높이 등 주요 형상을 결정짓는 요인들에 대해 간략히 알아보기로

한다. 일반적인 완전방호식 지상식 LNG 탱크의 단면비율은 내조를 기준으로 직경 : 높이 = 1 : 0.35 ~ 1 : 0.50 정도의 범위에 있으며, 수많은 설계 및 경제성 분석의 경험을 통하여 이러한 형상이 안전하면서도 효율적인 단면비율로 인식되어 왔다고 사료된다.

3.1 완전방호식 LNG 저장탱크의 구조

본고의 고려대상인 완전방호식 지상식 LNG 탱크는 <그림 2>와 같이 크게 내조(內槽: inner tank) 및 외조(外槽: outer tank)로 구성되며, 내·외조 사이의 공간은 단열재로 채워지게 된다. 이때 일반적으로 내조는 9% Ni(니켈)로 제조되며, 외조는 철근콘크리트(RC) 및 프리스트레스트콘크리트(PSC)의 조합으로 구성된다. 9% Ni은 -160°C 이하의 극저온에서도 우수한 강도 및 인성(靱性: toughness)을 보유하고 있으며, 자체적으로 일정수준의 강도를 보유하고 있어 완전방호식 LNG 탱크 내조의 소재로 빈번히 쓰인다.

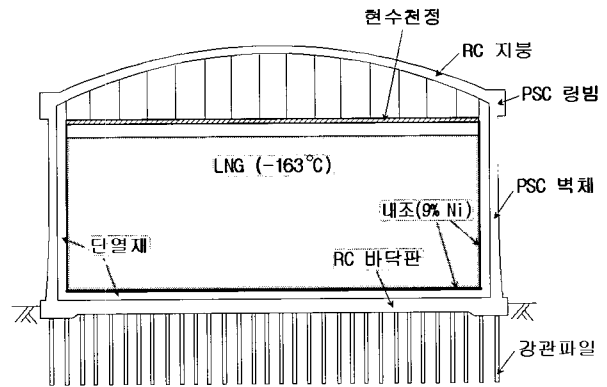


그림 2. 완전방호식 지상식 LNG 저장탱크

3.2 내조 및 외조의 구조적인 저항능력

<표 2>에는 내조와 외조 설계시 고려하는 개별하중들이 나타나 있으며, 또한 일반적으로 사용하는 설계법 및 단면의 저항을 증대시킬 수 있는 요인들을 비교하였다.

완전방호식 LNG 탱크의 직경 및 높이를 결정할 때 가장 기본적으로 고려해야 할 사항은 첫째, 완전방호식의 설계개념상 내조와 외조는 각각 독립적으로 LNG를 수용할 수 있는 구조적인 성능을 보유하고 있어야 한다는 것과 둘째, 내조와 외조가 일체가 되어 있는 완전방호식의 특성상 내조 및 외조의 직경과 높이는 서로 밀접한 관계가 있다는 점이다. 즉, 내조와 외조는 서로간에 단면을 제약하는 요인이 된다. 예를 들면 내조 단면이 구조적으로 안전하게 결정되더라도 그에 상응하는 외조 단면의 구조해석 및 단면검토시 구조적 안전성이 문제가 되어서 외조의 높이를 낮출 수밖에 없을 경우 외조 단면은 물론 내조 단면까지 재결정해야 한다는 것을 의미한다.

〈표 2〉에서 단면의 저항능력 항목을 비교해 볼 때, 외조의 경우 콘크리트 강도 및 두께, 철근 및 프리스트레싱 텐던의 배치 등 단면 저항능력을 높이기 위해 조절할 수 있는 요인 및 여유가 비교적 많다고 판단된다. 반면, 내조의 경우 9% Ni의 강도는 거의 정해진 값이므로 유일한 하중 저항 메커니즘은 9% Ni의 두께이다. 따라서 단면의 구조적인 저항능력을 고려할 때 외조보다는 내조가 LNG 탱크의 직경 및 높이와 같은 기본형상을 결정짓는 주요 요인일 것으로 판단된다.

표 2. 완전방호식 지상식 LNG 저장탱크의 설계하중 및 단면 저항능력

	재료	주요 설계하중	설계법	단면의 주요 저항능력
내조	9% Ni	<ul style="list-style-type: none"> · LNG 자중에 의한 압력 · 내압 (밀폐형 내조의 경우) · 지진하중 · 단열재 자중에 의한 압력 	허용응력 설계법	<ul style="list-style-type: none"> · 9% Ni 강도 · 9% Ni 두께
외조	RC 또는 PSC	<ul style="list-style-type: none"> · LNG 자중에 의한 압력 · 내압 · 지진하중 · 온도(극저온 LNG 및 화재시) · 풍하중 · 고정하중 및 활하중 · 프리스트레싱 하중 · 기타 	한계상태 설계법	<ul style="list-style-type: none"> · 콘크리트 강도 · 콘크리트 두께 · 철근 · 프리스트레싱 텐던

4. 대용량 LNG 저장탱크 내조 설계시 고려사항

3.2에서 언급한 바와 같이 내조는 LNG 탱크의 전체적인 형상을 결정짓는 주요 요인이라는 의미에서 중요하며, 내조 설계시 운전시와 충수시험시 두 경우 모두를 고려해야 한다. 내조의 설계절차는 설계기준별로 차이가 있으므로 어떠한 규정에 기초하여 설계하느냐에 따라 내조 및 전체 LNG 탱크의 형상이 달라지게 된다. 이하에서는 내조 설계시 주로 사용되어져 온 몇몇 내조 설계기준들을 비교분석 하였으며 또한 대용량 내조의 설계와 관련된 주요 요인들을 항목별로 고찰하였다.

4.1 대용량화를 위한 내조 설계기준의 변천

완전방호식 지상식 LNG 탱크의 9% Ni 내조는 BS 7777⁶⁾, API 620⁷⁾, RPAS⁸⁾ 등에 의하여 설계되어져 왔다. 그러나 이들 중 몇몇 보수적인 규정은 내조의 형상을 크게 제한하여 결과적으로 LNG 탱크의 대용량화를 저해하고 있음이 널리 인식되어져 왔다^{2,9)}. 따라서, 현재의 기술수준을 반영하여 합리적인 설계기준을 만들려는 노력이 계속되고 있는 실정이다. 예를들어 현재 CEN Committee TC 265에서 마련중인 Eurocode(EN 265002)¹⁰⁾에도 대용량화를 위한 새로운 규정들이 대폭 반영될 예정이며 이들 중 일부는 BS 7777의 보조규정인 PD 7777¹¹⁾에 이미 반영되었다.

내조의 설계에 영향을 미치는 여러 가지 요인들 중 가장 중요한 두 가지는 내조의 최대 두께 및 충수시험시의 규정이며, 이와 관련하여 대용량화의 저해 요인 및 개정 방향을 비교분석하기로 한다.

4.1.1 내조의 최대 두께

9% Ni 내조의 최대 두께는 대략적으로 두 가지 요인에 의하여 결정된다. 첫째, 생산이 가능하고 또한 성능이 검증된 두께여야 하며, 둘째, 내조의 설계기준상에서 제시하고 있는 최대 두께 이하여야 한다. 현재 9% Ni의 생산능력은 국제적으로는 50 mm 두께까지, 국내는 25 mm 두께까지 제조가 가능한 실정이다.

〈표 3〉에서는 내조 벽체 설계에 대한 몇몇 설계기준들을 비교하였다. 여기에서 주목해 볼 사항은 BS 7777의 내조 최대 두께는 30 mm로 규정되어 있어서 현재의 제작기술 수준을 반영하지 못하고 있었으나 최근 규정인 PD 7777 및 EN 265002에서는 50 mm로 상향조정되어서 대용량화시 내조 형상에 대한 제한사항이 크게 완화되었다는 점이다.

표 3. 내조 벽체의 설계기준 비교(허용응력 및 두께)

	API 620 ⁷⁾	RPAS ⁸⁾	BS 7777 ⁶⁾	PD 7777 ¹¹⁾ & EN 265002 ¹⁰⁾
허용응력 (운전시)	극한인장 강도의 1/3	극한인장 강도의 1/4	극한인장 강도의 1/2.35	극한인장 강도의 1/2.35
최대 두께	50 mm(a)	50 mm(b)	30 mm	50 mm

- (a) 자체 규정은 없으나 ASTM 규정의 A553의 경우임.
- (b) 자체 규정은 없으나 JIS SL9N520/590의 경우임.

한편, 〈표 4〉에서는 통영과 일본 Senboku 지상식 LNG 탱크에 실제 사용된 최대 내조 두께를 비교하였다. Senboku의 경우를 살펴보면 거의 동일한 형식에서 용량만 14만 m³에서 18만 m³로 확장될 때 내조의 두께가 40 mm에서 50 mm로 두꺼워졌음을 알 수 있으며 대용량화될 때에 물량면에서 경제적인 단면형상을 갖기 위해서는 내조의 두께를 키우는 것이 필수적임을 시사해 주고 있다.

표 4. LNG 저장탱크의 9% Ni 내조 두께

	통영 140,000 m ³ 급	Senboku 140,000 m ³ 급	Senboku 180,000 m ³ 급
내조 형식	비밀폐형	밀폐형	
내조 벽체의 주요 설계하중	LNG 측압	LNG 측압 및 내압	
내조 벽체의 최대 두께	25.1 mm	40 mm	50 mm
내조 설계기준	API 620	RPAS	

4.1.2 충수시험시의 규정

〈표 5〉에서는 각 설계기준별 충수시험(정수압시험) 규정을 비

교 정리하였다. 인천이나 통영의 지상식 LNG 탱크의 경우 API 620 규정에 의해 운전시 LNG 최대설계수위의 60% 만큼 물을 채운 부분충수시험을 설계하중으로 고려하였다. 그러나 BS 7777의 완전충수시험(LNG 최고설계수위의 100%) 규정은 과도한 하중으로 작용하여 역시 BS 7777의 내조 최대 두께 규정과 더불어 효율적인 형상을 가진 대용량 LNG 탱크의 설계를 제약하는 큰 두 가지 요인으로 인식되어져 왔다. 따라서 최근 규정인 PD 7777 및 EN 265002에서는 규정을 완화하여 API 620과 같은 수준의 부분충수시험을 실시하도록 하고 있다.

표 5. 내조 벽체의 설계기준 비교(충수시험)

	API 620 ⁷⁾	RPAS ⁸⁾	BS 7777 ⁶⁾	PD 7777 ¹¹⁾ & EN 265002 ¹⁰⁾
충수시험 수위 (LNG 최고설계 수위 기준)	60%	72%	100%	60%

4.2 대용량화를 위한 내조관련 기술의 발달

최근 설계기준의 완화와 더불어 9% Ni 내조 제작기술의 진보로 인하여 대용량화에 대한 가능성을 더욱 밝게 하고 있다. 이를 정리해 보면 다음과 같다.

- ① 용량 증가에 따라 두꺼워지는 9% Ni의 인성 및 용접문제의 해결과 극저온하에서 9% Ni의 균열발생 메커니즘의 규명
- ② 내조 제작시 대형 판(plate)의 사용
- ③ 자동용접기술의 개발 및 적용으로 인한 대용량 탱크 제작의 용이성
- ④ 내조 용접부위 등에 대한 정밀 X-ray 검사기술의 개발 및 적용

Senboku 18만 m³급 탱크에서 50 mm 두께의 내조가 처음 사용되었지만, 판이 두꺼워질수록 제조시 열처리나 불순물 제거 등에 더욱 진보된 기술이 필요하며 실제로 사용하기 전에 판자체나 용접부에 대한 저온하에서의 Fracture 시험을 비롯한 강도 및 인성시험

이 필수적이다.^{2,4)}

4.3 20만 m³급 내조의 설계

내조를 이루는 구조요소들의 설계에서 LNG 탱크의 직경 및 높이와 직접적인 관련이 있는 주요인자는 내조 벽체로 볼 수 있다. 좀 더 구체적으로 설명하자면 내조 벽체 하부에서 발생하는 원환응력이 허용응력을 초과한다면 내조의 두께를 증가시켜서 응력을 감소시키거나 또는 내조의 직경을 늘려서 LNG 수위를 낮추어 응력을 감소시켜야 한다. 내조의 직경을 크게 늘릴 경우 전체 재료물량, 부지활용도면 등에서 비경제적이라고 판단된다면 두께를 증가시키는 것이 바람직한 방법이 되겠으나 각 설계기준 별로 최대 두께 규정이 있으므로 두께만을 계속적으로 증가시킬 수는 없으며 결국 경제성 및 시공성 등을 고려하여 적절한 내조 두께 및 내조 직경을 찾는 것이 대용량화시 효율적인 설계의 기반이 됨을 알 수 있다.

이러한 점들에 근거하여 <그림 3>에서는 API 620 규정에 의해 20만 m³급 지상식 LNG 탱크의 내조를 설계한 예를 보이고 있다¹²⁾. 특징적인 것으로 지진시에도 내조 바닥판과 외조 바닥판을 연결하는 anchor strap이 필요 없는 형상으로 설계되었으며, 내조를 기준으로 직경 : 높이 = 1 : 0.39로서 일반적인 LNG 탱크 형상의 범주에 들고 있다. 또한 내조 최대 두께는 31.2 mm이며 이는 BS 7777의 최대 두께 규정인 30 mm를 약간 넘는 수치이다. 만약 BS 7777의 내조 최대 두께 및 충수시험 규정에 맞추어 설계했다면 일반적인 LNG 탱크의 형상보다 더욱 납작한 형태의 내조 설계가 불가피하여 부지활용도나 재료의 효율적 이용면에서 크게 불리했을 것으로 판단된다.

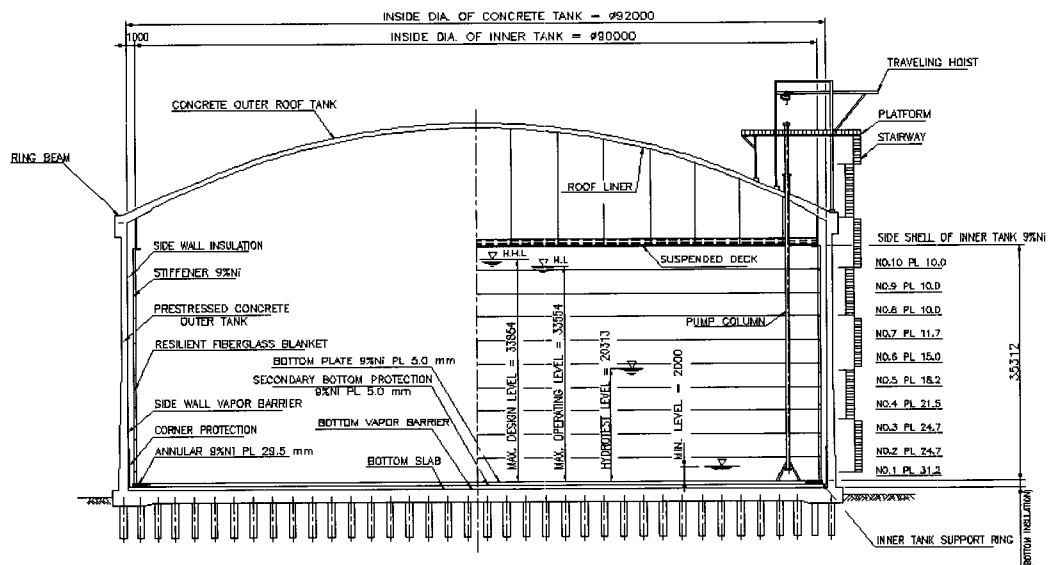


그림 3. 대용량 내조 설계 예(200,000 m³급 지상식 LNG 저장탱크)¹²⁾

5. 대용량 LNG 저장탱크 외조 설계시 고려사항

5.1 대용량화시 최적 외조 단면의 도출

비슷한 용량 및 형식의 기존 LNG 탱크의 설계 실적이 없는 대용량 LNG 탱크의 설계시 안전하고 효율적인 단면을 도출하기 위해서는 접근방법을 적절히 선택해야 한다. 이때 고려해 볼 만한 유력한 방법은 콘크리트 외조를 각각의 구조요소(지붕, 링빔, 벽체, 바닥판 등)로 나눈 후 주요 설계하중에 대하여 각 구조요소의 형상별로 적절한 해석방법론에 따라 분석하는 것이다. 예를 들어 각 구조요소별로 기존 LNG 탱크와 비슷한 또는 그 이상의 안전율을 확보하도록 콘크리트 단면 및 프리스트레싱 텐던의 배치를 결정하는 방식으로 용량의 증대 효과를 분석해 볼 수 있다³⁾. 이렇게 결정된 단면들을 모아서 전체구조물을 구성하고 상세 유한요소해석을 수행하여, 앞서 결정된 단면 및 텐던 배치를 검증하고 수정해 나가며 또한 철근의 배치 형태 및 철근량도 결정함으로써 시행착오를 최소화 할 수 있다. 그러한 절차를 <그림 4>에 도시하였다.

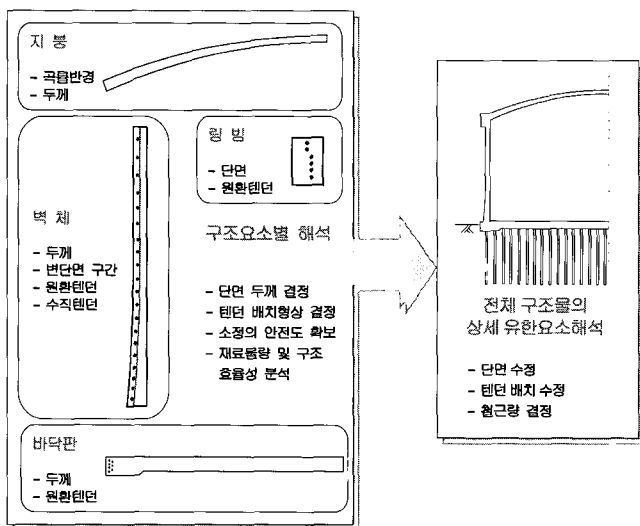


그림 4. 대용량 LNG 저장탱크의 외조 설계 절차

5.2 대용량화시 외조 구조요소별 고려사항

5.2.1 지붕(Roof dome)

대부분의 LNG 탱크 지붕은 RC 형식으로 건설된다. 또한 지상식 LNG 탱크는 <그림 2>에서 보듯이 매우 납작한 형태의 라이즈: 지름비(약 1/8정도)를 가지고 있는 것이 특징이다. 이는 자중 및 외부분포하중이 지배적일 때에는 라이즈가 낮을 때 지붕의 스프링 부분에서 원환방향 인장응력이 작게 발생한다는 쉘이론에 근거하고 있다.

그러나, 지붕의 주요 설계하중 중의 하나인 내압에 대해서는 라이즈가 높을수록 구조적으로 유리하므로 기존 지상식 LNG 탱크의 지붕형상에서 라이즈를 변화시켜 구조적으로 좀 더 효율적

인 형상을 만들 수 있는 여지가 있다고 판단된다. 즉, 최적의 라이즈에서는 최소의 두께로써 소정의 안전도를 확보할 수 있으므로 콘크리트 물량을 줄일 수 있다. 실제로 지붕만이 지표면 위로 노출된 지중식 탱크 지붕의 경우 지상식 탱크 지붕보다 더 볼록한 형태인 사례가 많다. 단, 대용량화시 지붕의 라이즈를 변화시키고자 할 경우 다음과 같은 사항들을 만족하고 있는지 주의해야 한다.

① 콘크리트 지붕 안쪽에 밀착되는 강판 라이너의 형상에 대한 제한사항을 만족해야 한다. 예를 들어 API 650¹⁴⁾에 의하면 강판 라이너의 곡률반경은 외조 지름의 0.8 ~ 1.2배여야 한다.

② 시공비의 증가요인을 면밀히 고려해야 한다. 예를 들어 라이즈를 높였을 때 두께 감소에 따라 물량이 일부 절감되더라도 상부거푸집이 추가로 필요할 가능성이 있다.

③ 라이즈가 변화하는 것은 지붕 내부 공간의 변화를 의미하므로 LNG 탱크 설계개념에서 매우 중요한 LNG의 증발률(BOG rate)가 목표치를 확보하고 있는지 검토해 보아야 한다.

④ 콘크리트의 타설방법에 따라 콘크리트 지붕 및 강판 라이너의 좌굴에 대한 안전성이 달라지므로 적절한 타설계획을 수립해야 한다.

5.2.2 링빔(Ring beam)

링빔의 설치 목적은 지붕으로부터 전달되어져 오는 수평력(thrust)에 저항하여 지붕 및 벽체 상부의 과도한 변형을 막는 것이며, 링빔 단면 및 원환텐던의 양을 적절히 조절하여 그러한 목적을 달성할 수 있다. 링빔 단면의 크기는 구조적 저항 측면에서도 중요하지만 링빔에 밀집되어 있는 원환텐던의 배치 공간을 확보한다는 의미가 더 큰 경우도 많다.

라이즈가 높은 지붕일수록 링빔에 더 작은 수평력을 발생시키므로 지붕의 라이즈는 지붕 자체뿐 아니라 효율적인 링빔 설계와도 직접적으로 관련된다.

지붕 및 링빔의 상호 시공순서는 매우 중요하며 시공기간 중 변동하는 링빔의 인장 및 압축응력이 목표치에 들어오도록 지붕 콘크리트의 타설 및 링빔 원환텐던의 긴장 순서를 적절히 정해야 한다.

5.2.3 벽체(Outer wall)

정상가동시에는 LNG에 의한 축압이 내조에만 작용하지만 누출사고시 외조 콘크리트 벽체의 설계하중으로 작용한다. 벽체의 안전성 검토는 시공시와 운전시 두단계에 거쳐 수행해야 하며, 텐던에 의해 주요 설계하중이 서로 상쇄되는 운전시보다는 텐던에 의한 힘만 작용하는 시공시가 설계를 지배하는 경우도 다수 있다. 일반적으로 응력이 가장 크게 발생하는 곳은 강성이 큰 바닥판에 의해 구속되어 있는 벽체 하부이다. 따라서 이러한 벽체

하부의 과도한 수직방향 모멘트 및 응력을 효과적으로 감소시키고자 하는 연구가 비교적 최근까지도 수행되어져 왔다. 벽체 설계에 관련된 사항을 항목별로 정리하면 다음과 같다.

① 원환텐던 설계시 중요한 사항은 설계기준에 제시된 적정한 크기의 여유압축응력을 도입하는 것이며^{6,15,16)}, 이는 원환텐던에 의해 주요 설계하중을 상쇄하고 온도변화 및 건조수축 등에 대한 대비로서 추가로 도입되는 원환방향의 압축응력을 의미한다. (그림 5)

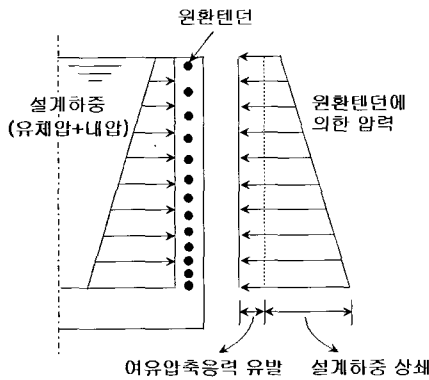


그림 5. 원환텐던의 역할

② 기존 인천 및 통영 지상식 LNG 탱크의 원환텐던은 (그림 5)와 같이 벽체 하부로 갈수록 조밀하게 배치하였다. 이는 운전시의 LNG 측압을 상쇄시킨다는 면에서는 효과적이지만 시공시 벽체 하부의 모멘트를 과도하게 발생시키는 주요 요인이 된다. 또한, 대용량화에 의해 벽체 높이가 높아질 경우 벽체 하부에서는 텐던이 너무 조밀하게 배치되어 설계기준상의 텐던 최소 간격 규정¹⁵⁾을 어기게 되는 경우도 발생할 수 있다. 따라서, Nielsen¹⁷⁾이나

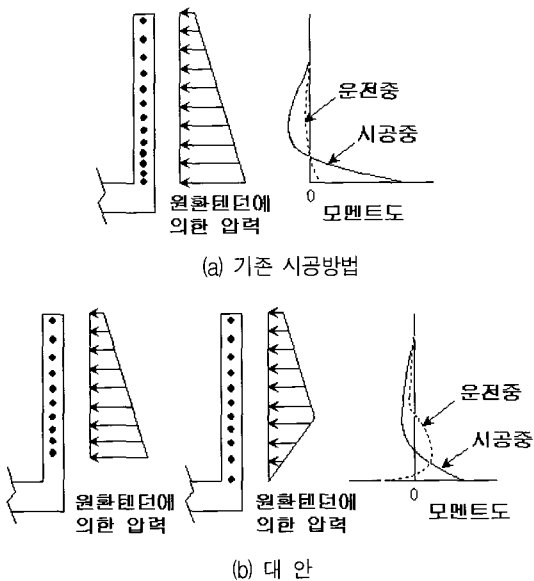


그림 6. 원환텐던의 배치 및 벽체의 모멘트 분포

Ghali^{18,19)}가 제안한 바와 같이 벽체 하부의 일정구간 텐던을 배치하지 않거나 벽체 하부의 텐던 배치 간격을 늘리는 방식으로, 운전시와 시공시 모두에 대해 적절한 단면력 수준을 확보하고 또한 소요 텐던의 갯수를 절약하는 것도 바람직하다(그림 6)). 이때 최적의 원환텐던 배치 방법은 Nielsen¹⁷⁾과 같은 이론적인 접근이나 Ghali¹⁸⁾와 같은 최적화 기법을 활용하여 도출할 수도 있지만 몇 번의 시행착오를 통해서도 비교적 용이하게 찾아낼 수 있다.

③ 벽체에서 발생하는 휨응력은 선형탄성 해석시 벽체 두께의 제곱에 반비례하므로, (그림 7)의 a와 같이 등단면을 사용하는 것보다는 주요 부위에 변단면을 활용하여 벽체 인장응력을 적절히 감소시키는 것이 효과적이다. 인천 및 통영 지상식 LNG 탱크의 경우 (그림 7)의 b와 같이 상부 1/2은 등단면, 하부 1/2은 변단면의 형태를 가지고 있으나, 전형적인 벽체 모멘트의 분포로 미루어 볼 때 변단면 구간을 c와 같이 좀 더 하부로 국한시킬 수 있는 여지가 있으며, 실제로 해외의 많은 LNG 탱크들이 이러한 형태로 건설되었다. 물론 변단면 구간의 설계는 콘크리트 물량에도 직접적인 영향을 미친다.

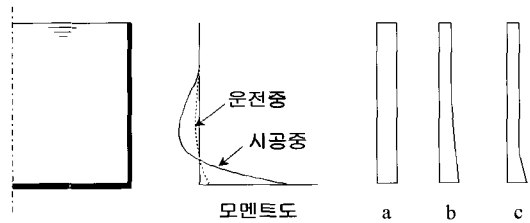


그림 7. 벽체의 모멘트 분포 및 벽체의 형태

④ 수직텐던을 통한 압축응력의 도입에 의해 휨인장응력을 감소시킬 수 있으나 휨압축응력은 오히려 증가시키므로, 설계기준에서 규정하는 허용압축응력¹⁶⁾ 이하가 되도록 도입수준이 제한된다.

⑤ 인천 및 통영 지상식 LNG 탱크 벽체는 400 kgf/cm²의 설계기준강도를 가지고 있으나, 일본의 Senboku 탱크와 같이 600 kgf/cm² 정도의 고강도 벽체를 사용하여 인장 및 압축응력의 허용값을 증가시키고 단면 두께를 줄일 수 있다.⁴⁾

⑥ 벽체의 시공방식도 단면력 분포에 큰 영향을 미친다. 통영과 같이 벽체를 모두 시공하고 원환텐던을 긴장할 경우 (그림 7)과 같은 단면력 분포를 따르지만, 인천과 같이 벽체 세그먼트를 시공하면서 동시에 긴장작업을 수행해 갈 경우 최종적으로 서로 다른 단면력 분포를 가지게 된다. 상세해석시 이러한 시공단계의 차이를 엄밀히 고려해야 한다.

6. 맺는말

국내의 LNG 저장탱크 시공관련 기술은 지금까지의 많은 건설 경험을 바탕으로 세계적인 수준에 도달한 반면, LNG 탱크의 설계는 외국의 기술에 의존하여 왔었다. 따라서, 최근 한국가스공

사(KOGAS)가 주도하여 LNG 탱크 설계기술의 자립화 및 건설 재료의 국산화를 위하여 노력을 기울이고 있으며, 국내의 몇몇 LNG 탱크 시공사들도 민간차원에서 그와는 별도로 설계기술 자립화를 꾀하고 있다.

LNG 탱크 설계기술의 자립화를 위해서는 기존 해외 설계사들의 LNG 탱크 설계도서를 항목별로 정리하고 분석하여 모방할 수 있는 능력을 보유하는 것이 가장 기본적이면서도 필수적인 방법이다. 그러나, 경쟁적으로 대용량의 LNG 탱크를 설계하는 세계적인 기술추세를 고려할 때 설계시 경쟁력을 갖추기 위해서는 LNG 탱크 설계기준의 세계적인 변화추세에 대해서도 지속적인 관심을 기울이는 것은 물론 대용량화시 LNG 탱크의 효율적인 기본단면 설계기법에 대한 연구가 병행되어야 한다고 판단된다.

본고에서는 완전방호식 지상식 LNG 탱크를 중심으로 대용량화시 고려해야 할 요인 및 기존 LNG 탱크 설계에서 개선할 수 있는 점들을 고찰해보았다. □

참고문헌

1. Goto, S., Kamiya, A. and Tajima, M., "LNG Technological Progress in Japan-Three Decades of Evolution", Proc., Thirteenth International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas, 2001, pp.PO-23.1-PO-23.9.
2. Long, B., "Bigger & Cheaper LNG Tanks? Overcoming the Obstacles Confronting Freestanding 9% Nickel Steel Tanks up to and beyond 200,000 m³", Proc., Twelfth International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas, 1998, pp.5.6-1-5.6-28.
3. "LNG 탱크 국산화 개발성과 및 상용 멤브레인형 LNG 탱크 설계 발표회", 한국가스공사 연구개발원, 2002. 8.
4. Nishizaki, T., et al., "Largest Aboveground PC LNG Storage Tank in the World, Incorporating the Latest Technology - Construction Cost Reduction and Shortening of Work Period by Employing New Construction Methods", Proc., Thirteenth International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas, 2001, pp.PS6-4.1-PS6-4.11.
5. 中野正文, "LNG 地下タンク建設技術の変遷と最新の技術開発," 日本土木學會論文集, No. 679/VI-51, 2001, pp.1~20.
6. "BS 7777 : Flat-bottomed, Vertical, Cylindrical Storage

- Tanks for Low Temperature Service", 1993, British Standards Institution.
7. "API 620 : Design and Construction of Large, Welded, Low-pressure Storage Tanks", 1996, American Petroleum Institute.
8. "Recommended Practice for LNG Aboveground Storage (RPAS)", 1981, Japan Gas Association.
9. Heiersted, R. S., et al., "Capacity and Technology for the Snøhvit LNG Plant", Proc., Thirteenth International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas, 2001, pp.PO-23.1-PO-23.9.
10. "prEN 265002 : Specification for the Design, Construction and Installation of Site Built, Vertical, Cylindrical, Flat-bottomed Steel Tanks for the Storage of Refrigerated, Liquefied Gases with Operating Temperatures between -5°C and -165°C", CEN TC 265.
11. "PD 7777 : Alternative Steel Selection and Its Effect on Design and Testing of Tanks to BS 7777", 2000, British Standards Institution.
12. 김용웅, 김홍성, 조승일, 최낙수, "200,000 kl 지상식 LNG 저장 탱크 기본설계", 2001년도 추계학술발표회 논문집, 한국가스학회, 2001, pp.265~268.
13. Jeon, S. J., et al., "Basic Design for Large Above-ground Tank", Proc., GASEX, 2002, pp.A3.4.1-A3.4.11.
14. "API 650 : Welded Steel Tanks for Oil Storage", 1998, American Petroleum Institute.
15. "ACI 373R-97 : Design and Construction of Circular Prestressed Concrete Structures with Circumferential Tendons", 1997, American Concrete Institute.
16. PCI committee on precast, prestressed concrete storage tanks, "Recommended Practice for Precast Prestressed Concrete Circular Storage Tanks", PCI Journal, Vol.32, No.4, 1987, pp.80~125.
17. Brøndum-Nielsen, T., "Prestressed Tanks", ACI Journal, Vol.82, No.4, July~Aug. 1985, pp.500~509.
18. Ghali, A. and Elliott, E., "Prestressing of Circular Tanks", ACI Journal, Vol.88, No.6, Nov.~Dec. 1991, pp.721~729.
19. Ghali, A., "Circular Storage Tanks and Silos", 2nd edition, E & FN Spon, 2000.