

# LNG 저장 탱크 시스템의 안전 기술

## - 탱크 형식을 중심으로 -

김 청 균 / 김 영 규 / 홍 성 호

### 1. 서언

액화천연가스(Liquefied Natural Gas : LNG)는 메탄가스(CH<sub>4</sub>)를 주성분으로 하는 청정 연료로 천연 가스의 액화 기술, 저장과 운반 및 공급 기술이 급속도로 개발되고, 안전하게 이용할 수 있는 가스 기술이 확보되면서 각광받게 되었다. 각국의 공업화정책은 심각한 환경문제를 유발하게 되었고, 석유나 원자력 에너지 의존도를 줄일 수 있는 현실적 대안으로 제시된 천연 가스는 한국과 일본을 중심으로 아시아 지역에서 사용량이 급증하고 있다.

우리 나라에 인도네시아산 액화천연가스가 1986년에 처음 수입된 이후로 2000년에는 11,596천톤, 2006년에는 15,484천톤 이상을 수입할 계획으로 있고, 환경문제와 결부된 산업용과 대도시에서의 고급 연료 소비량이 급증하고 있음에 비추어 LNG 저장 탱크 건설 및 LNG 운반선 건조는 시급한 상황이다.

LNG 저장 탱크는 평택 인수 기지의 10기, 인천 인수 기지의 10기(6기는 건설중이고 4기는 발주 예정)를 포함하여 2002년까지 총 35기를 확보할 예정이고, 향후 국내에서 필요한 저장 탱크가 약 50기 정도로 예상됨에 따라서 LNG 저장 탱크 건설은 국가 에너지 수급정책에서 대단히 중요한 SOC사업이 되었다. 그동안 국내 저장 탱크 건설과 시스템 운전은 저장탱크의 핵심 기술을 갖고 있는 프랑스와 일본의 설계 기준에 따라서 건설·운영되었다. 최근에 국내에서도 LNG 저장 탱크의 핵심기술인 멤브레인의 고유 모델(링 마디식 멤브레인)이 개발되면서 저장탱크의 국산화 사업이 적극 추진되고 있다.

액화천연가스 저장 탱크는 1,000m<sup>3</sup>의 소형으로부터 200,000m<sup>3</sup>의 초대형 저장 탱크에 이르기 까지 다양하게 건설되고는 있으나 최근의 저장 탱크 건설 추이를 보면 100,000m<sup>3</sup> 이상의 대형화가 일반적 추세이다. 그래서 저장 탱크



김 청 균  
■ 1955년생  
■ North Carolina State University(공학박사)  
■ 홍익대학교 기계공학과 부교수



김 영 규  
■ 1962년생  
■ 홍익대학교(공학박사)  
■ 한국가스안전공사 가스안전기술연구센터 선임 연구원



홍 성 호  
■ 1956년생  
■ Michigan State University(공학박사)  
■ 한국가스공사 연구개발원 책임연구원

시스템의 형식에 따른 안전성 검토는 저장 탱크 건설시 대단히 중요한 문제이다.

## 2. LNG 저장 탱크 기능

액화천연가스는  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 상태에서 저장해야 하므로 저장 탱크 구조물에 대한 설계와 운영 방식은 유류 저장탱크나 LPG 저장 탱크와는 크게 다르다.  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체와 직접 접촉해야 하는 저장 탱크 구조물은 열변형 거동 문제가 액체 자중량이나 외부 하중보다도 더욱 중요한 문제이기 때문에 특별히 주름이 있는 멤브레인식 내조 설계가 도입되거나 또는 열수축률이 극미한 특별한 소재를 사용하고 있다.

육상용 LNG 저장 탱크 내조(LNG와 직접 접촉하는 원통형의 저장 탱크 구조물)에는 멤브레인식 저장 탱크와 9% 니켈강식 저장 탱크가 있고, 이들이 가장 많이 건설되고 있다. 저장 탱크 외부는 탱크의 설치 위치에 따라서 지상식, 지중식, 지하식 저장 탱크로 분류할 수 있고, 내조(최내측 금속제 구조물)와 외조(최외측 콘크리트 구조물)의 소재와 혼합 형식에 따라서 강재 외벽과 Prestressed Concrete (PC) 외벽으로 나누어 설명할 수 있다.

저장 탱크에서 사용되는 내조용 소재는 크게 오스테나이트계의 스테인레스 강판(SUS 304 또는 304L)을 가공하여 사용하는 멤브레인과 9% 니켈강과 같이 열팽창 계수가 대단히 작은 특성을 갖는 소재로 대변할 수 있다. 여기서 멤브레인은 설계 기술의 극대화로 초저온 상태의 열변형을 흡수하고, 과도한 열응력 집중을 피하기 위하여 멤브레인 판에 적당한 형태의 주름(Corrugations)을 설치하든지, 또는 열팽창 계수가 대단히 작은 9% Ni강과 같은 재질을 선정하여 저장 탱크를 제작해야 한다.

내조를 보호해 주는 외부 탱크에는 PC 콘크리트 구조물을 사용하는 것이 일반적이고, 콘크리트

구조물은 저장 탱크 구조물 자체의 강도나 각종 하중(자중량, 가스압 및 액압, 지압, 수압, 결빙압, 열부하, 지진압 등)을 지지해 주는 역할을 수행한다.

## 3. 저장 탱크 구조와 안전성

LNG 저장 탱크는 설치 방식, 안전 장치와 구조물의 조합 형태에 따라서 여러 가지로 분류될 수 있으며, IGU(International Gas Union)에서 1994년에 분류한 LNG 저장 탱크 7가지 모델에 대한 저장 탱크 구조와 안전성을 비교하면 다음과 같다.

### 지상식, 금속 이중벽 저장 탱크 구조

이중벽의 저장 탱크로 내부에는 9% Ni강으로 제작된 내조가 있고, 외부에는 탄소강으로 제작한 외조가 있다. 통상적으로 외조에는 단열재로 충전되어 LNG 액 누출에 대한 보호용으로만 역할을 하고, 내조가 파괴될 경우는 저장 액체를 견딜 수 없으므로 단일 방호형의 저장 탱크로 제작되었다. 전 세계적으로 볼 때 LNG 저장 탱크 중에서 가장 많이 건설되었고, 40여년의 오랜 운전 경험을 통하여 저장 탱크의 안전성은 입증되었으나 외벽이 탄소강으로 제작되었기 때

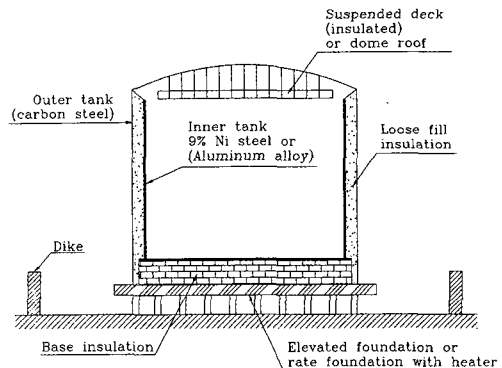


그림1. 지상식, 금속 이중벽 저장 탱크: 모델 I

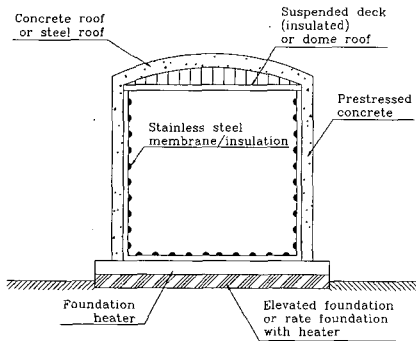


그림2. 지상식, 멤브레인/PC 저장탱크: 모델 II

문에 LNG 누출시 취성 파괴의 우려가 있으며, 콘크리트 구조물보다는 외부적 충격이나 화재에 취약한 단점이 있다.

### 안전성

구조물의 외벽을 탄소강으로 제작하였으므로 LNG 누출시 취성 파괴의 우려가 있고, 콘크리트만으로 제작한 것보다는 외부의 충격이나 화재에 취약한 측면이 있다. 내조가 파괴될 경우 외조는 탱크내의 저장 액체의 압력을 견딜 수 없으므로 단일 방호식 저장 탱크 형식을 취하고 있다. 따라서 별도의 방류덱과 같은 안전 장치를 반드시 설치해야 한다.

방류덱내에서 화재가 발생할 경우는 복사열의 피해 범위가 넓고, LNG 누출시는 LNG가 방류덱내에 체류함으로써 NG 가스에 의한 대기 확산 및 인접 지역에 냉열 피해를 줄 우려가 있다. 또한 저장 탱크내에 과도한 압력이 작용할 경우는 지붕과 외벽이 탄소 강재로 제작되어 자중량이 작기 때문에 Up-lift에 의하여 탱크가 파손될 우려가 있다.

9% 니켈 강재를 사용한 저장 탱크는 멤브레인식 저장 탱크보다 단일 시스템 구조가 복잡하고, 측벽은 단일 작업 공간이 좁으며, 내조는 대형 후판의 중량물이므로 시공성이 멤브레인식 탱크보다는 떨어진다.

## 지상식, 멤브레인/PC 저장탱크 구조

초저온 액체와 접하는 저장 탱크 내부는 1.2~2mm 스테인레스 박판의 주름진 멤브레인(Corrugated Membrane)으로 제작된 스테인레스 강재가 있고, 외벽에는 PC 구조물이 있어서 LNG 자중량이나 멤브레인의 하중을 지지해주는 역할을 한다. 이들 사이에는 폴리우레탄 폼(Polyurethane Foam) 혹은 PVC 폼으로 제작된 단열재 박스가 있고, 이 박스가 내조로부터 전달되는 하중을 부분적으로 지지하는 역할을 겸하고 있다. 지붕에는 철재 혹은 콘크리트 돔과 알루미늄으로 제작된 현수 데크로 구성되어 있고, 현수 데크 상부에는 단열재를 설치하여 외부의 열 침입을 차단한다.

멤브레인은 -162℃의 LNG가 외부로 누출되는 것을 차단하는 밀봉 기능이 있고, 열 변형이나 변동 하중에 대하여 수축과 팽창 기능을 원활하게 수행하여 내부 구조물의 안전성을 확보해 주는 기능을 보유한 특수 구조물이다. 멤브레인 구조물이 받는 하중은 모두 PC 구조물에 전가되어 외부 하중을 지지하도록 설계되어 있다.

### 안전성

외벽은 콘크리트 구조물로 제작하여 측벽은 화재나 외부의 충격 하중에 비교적 강하며, 스테인레스강 박판으로 제작된 멤브레인은 자기 지지형 저장 용기가 아니다. 멤브레인은 저장 액체의 기밀을 유지하는 역할을 하고, 저장 액체의 수두압은 하중 지지 단열 판넬을 통하여 콘크리트 구조물인 외조에 의하여 지지되므로 멤브레인은 NFPA 59A에 의한 방호벽으로 볼 수 없고, EEMUA 147에 따르면 단일 방호식 저장 탱크이다.

멤브레인이 파손되어 저장된 LNG가 누출될 경우 콘크리트 외조가 누출된 액체를 막을 수

는 있으나 외부의 충격 하중, 화재 등에 의하여 외조가 파손되거나 또는 외조의 예응력 케이블(Prestressed Cable)이 이완될 경우는 외조가 수두압을 받아서 저장 탱크 전체가 파괴될 위험성이 있으므로 누출된 LNG의 확산을 방지하기 위해서 방류둑이 필요하다.

### 지상식, 9% Ni강/PC 저장탱크 구조

저장 탱크 내부에는 9% Ni 강재로 제작된 내조가 있고, 외부에는 PC로 제작된 외조가 있다. 외조 내면은 탄소강이나 Mastic의 Vapor Barrier가 있고, 내조 외면에는 Resilient Fiber Blanket가 각각 설치되며, 내조와 외조 사이에는 필라이트계의 단열재를 충전한 탱크 형식이다.

저장 탱크가 정상적으로 운전될 경우 내조는 저장 액체의 수두압에 견디도록 설계되었고, 내조가 파손될 경우는 외조가 저장 액체의 압력에 견디도록 제작되어 있다. 저장 탱크의 지붕은 철재 또는 콘크리트 돔 지붕과 알루미늄으로 제작된 현수 데크로 구성되며, 현수 데크 상부에는 단열재를 설치한다.

#### 안전성

기존의 이중벽식 저장 탱크는 지난 40여년 동안 운전 경험을 통하여 입증된 안전성을 확보하고 있다. 이중벽 저장 탱크의 안전성에 외벽

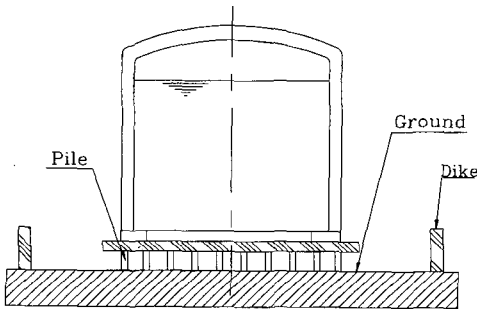


그림3. 지상식, 9% Ni강/PC 저장탱크: 모델 III

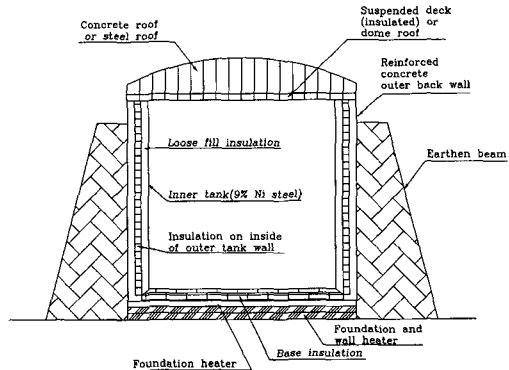


그림4. 지상식, 철근 콘크리트식 저장 탱크: 모델 IV  
콘크리트 구조물을 추가하여 안전성을 더욱 증가시킨 완벽한 저장 탱크이다.

외벽은 PC 콘크리트로 제작하였으므로 측벽의 화재나 외부의 충격 하중에 비교적 강한 편이다. 9% Ni강의 내조는 자기 지지형으로써 저장 액체의 수두압에 견디도록 NFPA 95A에 따라서 설계된 저장 탱크이고, 내조가 파괴될 경우는 외조에 의하여 저장 액체의 유출이 방지되며 또한 외조 지붕에 의하여 LNG 유출이 방지되므로 방류둑이 필요하지 않은 완전 방호형의 저장 탱크이다.

### 지상식, 철근 콘크리트식 저장 탱크 구조

내부에는 9% Ni 강재로 제작된 내조와 탄소강으로 제작된 외조로 이루어진 이중벽 형태의 저장 탱크이고, 외부에는 독립된 기초 Earthen빔을 설치하여 측벽에 대한 내충 격력과 내화력을 높여서 내조가 파괴될 경우 2차적 안전 장치 역할을 할 수 있도록 설계된 저장 탱크이다.

#### 안전성

기존의 이중벽식 저장 탱크에 Earthen 빔을 추가한 형태의 LNG 저장탱크로 건설 실적은 작으나 콘크리트 외벽을 설치함으로써 측벽

의 외부 충격 하중이나 화재시에 안전하다는 장점을 갖고 있다.

내조가 파손되어도 PC 외조와 Earthen 빔에 의하여 초저온 액체의 누출을 막을 수 있으므로 완전 방호 형태의 저장 탱크이다. 저장 탱크 내부에서 화재가 발생할 경우 액화천연가스가 연소되는 동안에도 저장 탱크 구조물의 안전성이 유지될 수 있으므로 방류뚝을 설치하여 이곳에서 연소되도록 하는 것보다 주변 지역에 대한 복사열 피해가 상대적으로 작다.

### In-pit식, 금속 이중벽 저장 탱크 구조

지하에 설치된 PC 차수벽 내부는 저장탱크 모델 I과 같은 금속재로 제작된 이중벽 탱크를 설치한 것으로 내부에 9% Ni 강으로 제작된 자립식 내조가 있고, 외부에는 탄소강으로 제작된 외조로 구성된다. 저장탱크 자체는 단일 방호형의 저장 탱크이다. 저장 탱크가 전체적으로 파괴될 경우는 PC 차수벽이 LNG 액의 누출을 방지할 수는 있으나 가스 누출은 막을 수 없으므로 이중 방호식 저장 탱크 형식을 취하고 있다.

#### 안전성

저장 탱크가 지하에 설치되므로 지상으로

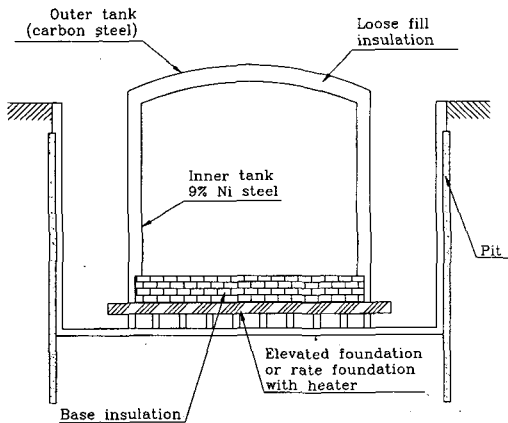


그림5. In-pit식, 금속 이중벽 저장 탱크: 모델 V

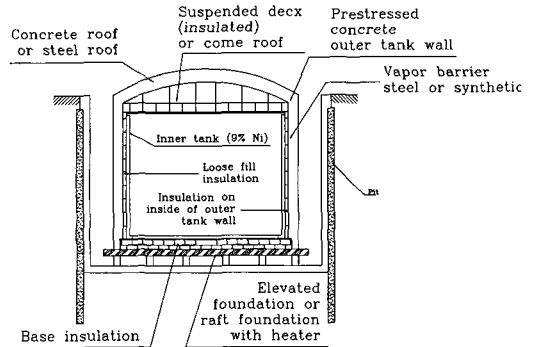


그림6. In-pit, 9% Ni강/PC 저장 탱크: 모델 VI

LNG가 누출될 우려가 없고, 저장탱크 내부에서 화재가 발생할 경우는 LNG가 완전히 타서 없어질 때까지 탱크가 파괴될 위험성이 없다. 이 모델은 지하식 저장 탱크이므로 지상부가 낮아서 미관상 좋으며, 저장 탱크 건설에 따른 지역 주민의 심리적인 불안감을 줄일 수 있는 장점이 있다.

### In-pit, 9% Ni강/PC 저장 탱크 구조

지하에 설치된 PC 차수벽 내부에 모델 III과 같은 완전 방호식의 저장 탱크를 설치한 것으로 내부에는 9% Ni강재로 제작된 자립식 내조가 있고, 외부에는 PC로 제작되어 있다. 이와 같은 저장 탱크는 지하에 안전하게 있어야 하므로 토목 공사비가 많이 든다는 문제점이 있다.

#### 안전성

저장 탱크가 지하에 설치되므로 지상으로 LNG가 누출될 우려가 없으며, 저장 탱크 내부에서 화재가 발생할 경우는 LNG가 완전히 타서 없어질 때까지 저장탱크가 파괴될 위험성이 없다. 앞의 모델 V처럼 지하식 저장 탱크이므로 지상부가 낮아서 미관상 좋으며, 저장 탱크 건설에 따른 지역 주민의 심리적인 불안감을 줄일 수 있다는 장점은 있으나 토목 공사비가 많이 드는 단점이 있다.

## 지중식, 멤브레인/PC 저장 탱크 구조

지하에 설치된 콘크리트벽 내부에는 하중 지용 폴리우레탄 폼 단열재와 스테인레스 멤브레인을 설치한 구조이다. 지중식이므로 콘크리트벽 외부의 흙이 동결되는 것을 방지하기 위하여 탱크의 벽면과 바닥에는 히터를 설치하여야 한다.

저장 탱크 내부에 설치한 멤브레인 구조물에서는 LNG 액의 누출, 결빙 등의 검사가 어려우며, 멤브레인 구조물이 파손되어도 LNG 액과 가스의 누출이 없으므로 완전 방호식의 저장 탱크이다.

### 안전성

저장 탱크가 지하에 설치되므로 LNG의 누출 위험성이 없고, 탱크 내부에서 화재가 발생하여도 LNG가 완전히 타서 없어질 때까지 탱크가 파괴될 위험성은 없다. 지붕을 철재로 제작할 경우 외부 충격에 의하여 하중이 가해질 경우는 지붕이 파괴되어 NG 가스 누출의 우려가 있고, 지붕을 콘크리트로 할 경우는 외부 충격하중에 대한 안전성이 높다.

특히, 지중식 저장 탱크는 지상부가 낮으므로 미관상 좋으며, LNG 저장 탱크 건설에 따른 지역 주민의 불안감을 줄일 수 있다. 그러나 장기간 운전시 Vapor Barrier를 통하여 침투된 수증기가 결빙되어 단열 효율이 저하될 우려가 있다.

## 4. LNG 저장 탱크 분류

### (1) 설치 위치에 따른 분류

#### 지상식 저장 탱크 (Aboveground Storage Tank)

천연가스를 저장하기 위한 탱크 구조물을 지면위에 설치한 방식으로 여타 저장 탱크에 비하

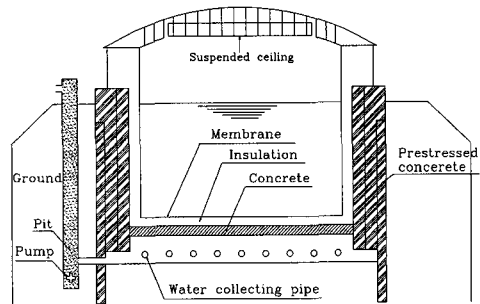


그림7. 지중식, 멤브레인/PC 저장 탱크: 모델VII

여 탱크가 액압이나 기계적 하중을 보다 크게 받는 것은 아니지만 저장 탱크를 지하에 설치하는 것보다는 안전성 확보에 많은 주의를 기울여야 한다.

지상식은 액화천연가스를 저장하는 방식중에서 가장 많이 건설되는 탱크 형식으로 여타 저장 탱크보다 공사기간이 짧고, 건설이 용이하다는 장점을 갖고 있다. 저장 탱크 내조는 초저온 액체와 직접 접촉해야 하므로, 만약 내조 구조물이 손상을 받아서 탱크로부터 누출이 진행될 경우는 LNG가 지표면에 흘러내리게 되므로 대형 사고를 유발할 가능성이 크다. 이러한 측면에서 지상식 저장 탱크는 이중벽 구조물 형태에 방류둑(Dike)을 설치하여 사고 위험성을 줄여야 한다.

그림. 1~4는 지상식 저장 탱크 구조를 나타내는 것으로 액체와 접촉하는 최내측 구조물은 초저온에 강한 재질인 스테인레스판으로 제작된 멤브레인 또는 9% 니켈강, 최외층 구조물은 탄소강 또는 PC(Prestressed Concrete)를 사용한다. 이들의 이중벽 사이에는 보냉재를 넣어서 외부로부터 침입하는 열량이 최소가 되도록 제작하여 저장 탱크의 열적 안정성을 확보해야 한다. 또한 이들 이중벽 구조물 탱크는 바다이나 외부 측판의 사용 재료나 지붕 모양에 따라서 나뉘어진다.

저장 탱크 내조는 상온에서 팽창하고, 초저온에서는 수축하게 되는데, 탱크의 이와 같은 열

적 거동에서 안전성을 확보하기 위해서는 내조의 루프(Roof)에 노즐과 안전 밸브를 설치하여야 한다.

**지중식 저장 탱크  
(Inground Storage Tank)**

지중식 저장 탱크는 LNG의 최고위 액면이 지표면과 동등하거나 또는 그 이하로 유지하도록 건설된 것으로 내진성이 좋고, 또한 만일의 사고에도 LNG액이 지상으로 유출되는 것을 막을 수 있는 구조로 설계되었기 때문에 저장 탱크의 안전성은 지상식에 비하여 크게 향상될 수 있다. 또한 지중식 저장탱크는 높이가 낮기 때문에 저장 탱크의 크기로부터 오는 시각적 충격과 반감을 덜어줄 수 있다는 장점이 있으며, 탱크 부지의 공간 활용이 보다 효율적이다. 일본의 초대형 저장 탱크의 기준에 따르면 지중식 저장 탱크 건설시는 탱크간의 설치거리를 지상식 저장 탱크 보다 절반으로 잡고 있다. 저장 탱크에서 콘크리트제 원통형 구조물에 대한 건설 비용은 사용 부지의 토양 조건 과 지면 구조에 큰 영향을 받게 되는데, 이것은 지하수 압력이 탱크의 외부 측판에 직접적으로 작용하기 때문이다. 저장탱크의 크기 즉, 직경이나 깊이를 크게 함에 따라서 경제적인 이점을 얻을 수 있으나 설비 부지의 굴착 시공 기간이 길어지기 때문에 지상식 저장

탱크를 건설하는 것보다는 약 1.3배 이상의 공사 기간이 더 요구된다.

그림. 7은 이중벽 구조의 지중식 저장탱크를 보여주고 있는데, 지붕 쪽에 보냉재를 부착하고 지표면 아래에는 콘크리트제의 원통벽을 설치하였다. 외부 측벽과 내부 측벽 사이에 보냉재를 넣고, 내측의 초저온액과 접촉하는 부분에는 지상식 저장 탱크와 마찬가지로 멤브레인 구조물로 조립한다. 또한 초저온 액체의 열 전달로 인하여 발생한 동결토의 확장방지를 위해서 저장 탱크의 측면과 바닥면에 히터를 설치하여 지반의 안정성을 확보해야 한다. 국내의 경우 지중식 저장탱크 건설 실적은 없으나, 금년에 200,000m<sup>3</sup>급의 지중식 초대형 저장 탱크가 건설될 예정으로 추진중에 있다.

**지하식 저장 탱크  
(Underground Storage Tank)**

그림 8에서 보여주는 지하식 저장 탱크 개념은 모든 저장 설비를 완전히 지하에 설치하는 형태로 그 구조는 터널과 매우 흡사하고, 화강암이나 사암 등의 지반에 설치하는 경우에 많이 적용된다. 이러한 지하 암반식 저장은 수백 미터의 지하 깊이에 건설되므로 지하수에 의한 외부 압력 문제를 해결해야 된다.

최근에 벨기에의 S. A. Distrigaz사가 액화 천연가스용 지하 암반식 저장 탱크를 건설하였으나, 이것은 단순히 소규모의 LNG 저장을 위한 시험용으로 사용되는데 그쳤고, 영국의 British Gas사가 건설한 지하식 저장 탱크는 고갈된 석유 암반층에 250kg/cm<sup>2</sup> 정도의 압력으로 가압하여 가스 상태로 저장하는 방법을 채택하고 있다. 그러나 천연가스를 액체상태로 지하에 저장하기에는 아직 기술적으로 많은 문제점을 갖고 있으며, 국내의 경우 액화천연가스 저장용 지하식 저장 탱크의 건설 실적은 전무하다.

지하식 저장 방법과 지중식 저장 형태를 상호

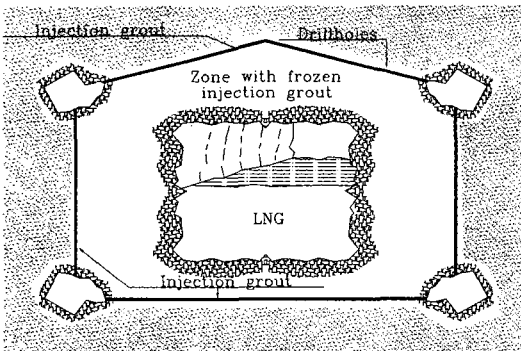


그림8. 지하식 저장 탱크

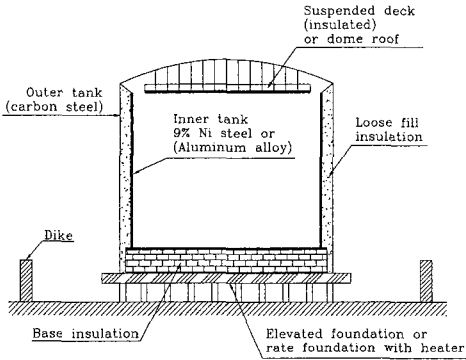


그림9. 단일 방호식 저장 탱크

비교하면 지하식 저장 방법이 안전성 측면에서 더 우수할 뿐만 아니라 지상의 토지를 좀더 효율적으로 사용할 수 있고, 적당한 구조로 고압 가스를 저장할 수 있다는 장점이 있다. 또한 지하식 저장 탱크는 구조상 지중식 탱크보다 지면조건에 더 많은 영향을 미치게 되므로 주변의 지면 조건에 적합한 저장 탱크 구조물 설계가 이루어져야 한다. 지하식 탱크에 콘크리트벽, 보냉재, 멤브레인을 설치할 경우 저장 탱크 건설 비용은 지중식 탱크 건설비용보다 더 많이 소요된다.

## (2) 방호 형식에 따른 분류

LNG저장 탱크의 내조 형식을 EEMUA (The Engineering Equipment and Materials Users Association) 147에 의거 분류하면 다음과 같다.

### 단일 방호식 저장 탱크 (Single Containment Storage Tank)

저장 탱크가 초저온 액체를 저장하기 위하여 초저온에서 탱크 구조물의 연성에 필요한 조건을 충족시킬 수 있도록 설계·제작된 단일 탱크 또는 이중 탱크로 외조에 의하여 보호해야 한다. 단일 방호식의 내조에서 초저온 액체가 누출될 경우 이들을 잠시 체류시킬 수 있는 방류턱이 반

드시 필요하다.(그림9 참조)

### 이중 방호식 저장 탱크 (Double Containment Storage Tank)

내조 및 외조의 이중 방호식 저장 탱크는 저장된 초저온 액체에 모두 견딜 수 있도록 설계·제작되어야 한다. 누출된 LNG 액을 최소한의 공간에 저장하기 위해서 외조는 내조로부터 6m 이내의 거리에 설치하는 것이 일반적이다. 내조는 정상 운전 상태에서 초저온 액체를 안전하게 저장할 수 있어야 하고, 외조는 내조 파괴시 누출된 초저온 액체를 저장할 수 있으나, 저온 가스의 누출까지 방지할 수 있는 저장 탱크는 아니다.(그림 10 참조)

### 완전 방호식 저장 탱크 (Full Containment Storage Tank)

내조 및 외조가 저장된 초저온 액체에 모두 견딜 수 있도록 설계·제작된 이중 탱크로 외조는 내조로부터 약 1~2m 거리에 설치되어야 한다. 내조는 정상 운전상태에서 초저온 액체를 저장할 수 있어야 한다. 외조 지붕은 외조벽에 의해 지지되고, 외조는 내조 파괴시 액체의 누출뿐만 아니라 가스의 누출도 방지할 수 있도록 설계된 저장 탱크이다.(그림 11 참조)

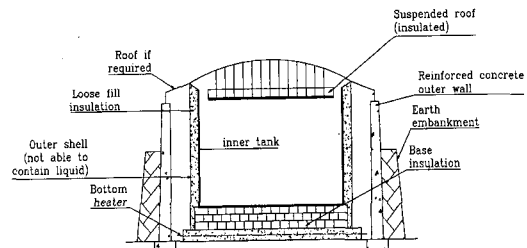


그림10. 이중 방호식 저장 탱크



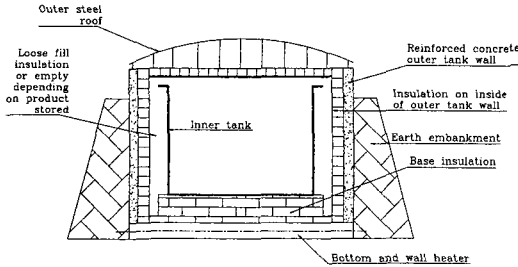


그림 11. 완전 방호식 저장 탱크

## 5. 내조 시스템의 안전성 검토

LNG 저장 탱크는 PC기술이 발달함에 따라 서 두께가 비교적 얇은 초대형 저장탱크가 실용화 단계에 들어섰다. PC설계는 소형 지상식 저장 탱크의 설계 방법과 기본적으로 일치한다.

LNG액이나 기체의 누설 방지를 목적으로 사용하는 멤브레인은 LNG 운반선의 저장 탱크에서 일반적으로 사용하는 주름식의 멤브레인 소재와 같으며, 초저온 액체에 대한 기술적 성능 사항은 이미 입증되었다. 그러나 LNG 저장 탱크 설계에서 적용되었던 코드와 방법을 탱크에 동일하게 적용하면 문제가 발생한다. 외부 콘크리트 벽체와 내부의 멤브레인 강판에서는 외부의 위험적 요소를 배제하기 위하여 안전율이 고려되어야 한다.

여러 가지 형태의 잠재적인 영향에 의한 저장 탱크 구조물의 거동시 서로 이완된 상호 반응이 발생될 수 있고, 또한 구조물의 거동 반응에 대한 수치가 정확치 않으므로 항상 정밀한 시험 평가가 요구된다. 현재 외부 콘크리트 벽체와 내부 멤브레인 소재를 혼용한 저장 탱크와 금속재 저장 탱크에 대한 정확한 안전 평가가 수행되지 못하고 있는 실정이다. 유럽에서 추진하고 있는 내조 탱크의 표준화 사업 측면에서 보면 저장 탱크의 안전성 평가 문제는 주요 핵심 연구 사항이

되고 있다.

### (1) 내조 시스템의 형식별 안전성 구축 : 멤브레인식 저장 탱크

멤브레인식 저장탱크에서 안전은 첫째 구조적 기능과 기밀 유지 기능(Tightness)의 분리 에 의해 기인된다. 내부 저장 탱크에 작용하는 하중은 원칙적으로 없기 때문에 내부 탱크의 파손에 대한 위험성은 줄여줄 수 있다. 다른 안전에 대한 특징은 멤브레인의 높은 변형 가능성에 의해 기인된다. 이 의미는 두 개의 컨테이너가 아주 밀접하게 연결되어 있지 않다는 것이다. 콘크리트 탱크는 멤브레인에 있어서 결합상 어떠한 결점이 없어도 대균열을 유발할 수 있다. 안전 평가를 위하여 고려해야할 세번째 중요한 사항은 이중 가스벽에 있어서 PC 탱크는 매탄가스와 직접 접해 있지 않다는 것이다. 이 구조는 매우 정확한 운영 방법에 따라 내부 탱크의 영구적인 모니터링을 가능하게 해주며, 안전한 작동 조건을 증가시키는 것이다.

멤브레인의 구조적 기능은 PC 탱크와 유사하나, 주로 LNG의 저장 기능에 견딜 수 있는 구조 형식이다.

멤브레인 소재는 -162℃의 열부하에서 발생되는 팽창과 수축이 자유롭게 이루어질 수 있도록 십자형 마디 또는 링 마디를 설치하여 주름이 서로 교차하도록 제작되었다.

멤브레인은 단열재 박스를 통하여 액체와 기화 응력을 외조 벽체에 전달하며, 딱딱한 나무로 제작한 샌드위치 형태의 단열 박스를 벽체와 바닥에 설치된다.

### 9% 니켈 강재식 저장 탱크

9% 니켈 강재(완전 방호식) 저장 탱크는 내조 자립식의 탱크와 외조 PC 콘크리트 탱크를 결합시킨 개념으로 저장탱크 시스템의 안전

표1. 탱크형식별 증발률

| 탱크 형식                    | 가스 증발률(BOG)    |
|--------------------------|----------------|
| 모델Ⅱ : 멤브레인식 내조/PC 외조     | 0.075~01%/day  |
| 모델Ⅲ : 9% Ni 지립식 내조/PC 외조 | 0.05~0.08%/day |
| 모델Ⅴ : 저중식 멤브레인/PC 외조     | 0.1~0.2%/day   |

성은 액체의 차단 여부에 달려 있으며, 밀봉 정도에 따라서 외부 화재와 같은 위험적 요인으로 부터 대항하는 효과가 있다.

탱크의 거동에 대한 정확한 분석 즉, 내조와 외조가 완전히 독립된 것이 아니기 때문에 약간의 문제점은 다른 탱크가 위험 범위내에 포함될 수 있으므로 탱크의 안전성이 사전에 검토되어야 한다. 예를 들면 2개의 탱크는 지반 침하 혹은 지진 위험에 대항할 수 있는 강체물의 결속체이어야 한다. 또한 이중 차단벽 개념은 외부 콘크리트 탱크 구조물이 항상 메탄가스와 접해 있기 때문에 액체로 적용된다는 것을 주목해야 한다.

9% Ni 강제 저장 탱크로 구성되어 있는 내부 저장탱크 벽면은 LNG와 직접 접촉한다. LNG 내압에 견딜 수 있는 구조로서 지붕이 없는 그 자체로 지지할 수 있는 탱크이다. 저장 탱크 용량에 따라서 Ni 강제의 두께를 다르게 설계하며, 통상적으로 상부는 얇게, 하부는 두껍게 설치하여 계단식 구조를 갖는 탱크 시스템의 안전성을 확보한다.

외부의 PC 저장 탱크 구조물은 2차적인 구조체로 다음과 같이 정의될 수 있다.

- 기초 형상에 따라 지반위에 설치된 슬라브는 PC 구조물이다.

- 0.8m 두께 이상의 벽체는 수직 및 원주 방향으로 PC 강재에 의해 긴장한다.
- 0.5m 두께 이상의 지붕은 콘크리트 타설을 위한 거푸집 및 기화 응력 차단망으로 사용되는 탄소 강재 지붕을 설치한다. 또한 외부 PC 벽체는 외부 위험 요소에도 대비하는 배리어(Barrier) 구조물이다.

앞에서 언급한 기화 응력 차단 라이너 지붕 외에 벽체와 바닥에도 함께 적용한다.

완전 방호식 저장 탱크의 상부 데크에는 유리 섬유로 단열 처리한다. 9% Ni의 개방 저장 탱크가 아닌 경우에는 용접의 정확성과 완벽한 가스 차단기능을 갖추어야 한다. 이러한 배열로 멤브레인과 콘크리트 사이에 메탄가스가 충전하게 밀봉되어 있기 때문에 멤브레인의 수명을 증가시킬 수 있으므로 시스템의 기능이 향상된다.

## (2) 내조의 형식별 성능 평가

LNG 저장 탱크는 형식에 따라서 저장탱크의 성능과 구조물의 안전성 측면에서 커다란 차이가 있다. 따라서 저장 탱크의 형식 선정시 탱크가 설치될 부지의 주변 여건과 상황, 저장 탱크의 사용용도 등을 고려해야 하고, 또한 저장 탱크의 성능과 구조물의 안정성 요구 조건에 부합하는지 여부를 충분히 검토해야 한다.

저장 탱크 성능 평가에서 중요한 항목인 LNG 증발률(Boil-off gas rate)과 냉각률(Cool-down rate)의 두가지가 있다. 이들은 LNG 저장 탱크 시스템의 내조 형식(모델) 결정시 성능을 평가할 수 있는 중요한 참고 사항이다.

표2. 냉각률과 소요시간

| Type                  | ModelⅡ : Membrane            | ModelⅢ : 9% Ni Steel        |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Cool-down rate        | MAX. 20°C/hr<br>AVG. 15°C/hr | MAX. 10°C/hr<br>AVG. 5°C/hr |
| Required time         | MIN.(162+20)/20<br>=9.0hr    | MIN.(162+20)/10<br>=18.2hr  |
| for cool-down at 20°C | AVG.(162+20)/15<br>=12.1hr   | AVG.(162+20)/5<br>=36.4hr   |

## 증발률

지상식인 9% 강제 자립식 내조/PC 외조(모델Ⅲ)로 구성된 저장 탱크 경우는 탱크 건설시의 작업 공간 문제로 내조와 외조간의 거리를 1m

이상 떨어뜨려야 하기 때문에 축벽의 단열재를 두껍게 해야 되므로 증발률은 낮아지게 된다.

그러나 저장 탱크 형식이 지상식인 멤브레인 내조/PC 외조(모델 II)인 저장 탱크의 경우는 단열재 박스가 내조로부터 전달되는 하중을 부분적으로 지지해야 하고, 또한 콘크리트 외벽에 하중을 전달하므로 고압축 강도가 필요하기 때문에 단열재 두께에 영향을 미치게 되어 증발률이 비교적 높은 편이다. 또한, 지상식 중에서도 기초의 형식에 따라 고상식, 기초보다 저부가열식, 기초가 지열과 히터의 영향에 의한 증발률은 높다. 따라서 지하식 멤브레인식 저장 탱크는 지열과 히터의 영향에 의하여 지상식 저장 탱크보다는 증발률이 높다. 대표적인 LNG 저장 탱크의 형식에 따른 LNG 증발률은 표1에서 제시하고 있다.

멤브레인식 저장 탱크(모델 II)와 9% Ni 자립식 내조 탱크(모델 III)를 냉각률 측면에서 비교하면 많은 차이가 있다.

### 냉각률(Cool-down rate)

멤브레인식 저장 탱크(모델 II)는 판재의 두께가 1.2 2mm인 스테인레스 박판으로 주름이 있도록 제작되어 열변형에 신속히 대응할 수 있으므로 9% Ni 자립식의 내조 탱크(모델 III)보다는 냉각률을 높게 유지할 수 있고, 액화천연가스를 저장 탱크에 충전할 경우 저장 탱크 냉각에 소요되는 총 시간을 크게 줄일 수 있다. 내조의 형식에 따른 냉각률과 총소요 시간은 표 2와 같다.

## 6. 결론

청정 연료로 알려진 LNG는 최근 대체 에너지원으로 각광받고 있으며, 전량을 외국으로부터 수입에 의존하는 우리 나라로서는 천연가스의 운반과 저장에 필요한 LNG선, 육상용 저

장 탱크의 안정적 확보와 국내 배관망 구축이 대단히 중요한 현안이 되었다.

거대한 가스 시장을 갖고 있으면서 기계 장치에 관련된 가스 기술은 전적으로 외국에 의존하는 형식을 빌어서 국내 가스 시장을 급속히 성장시켰다. 최근 국내 기업체들도 가스 관련 사업을 크게 증가하고 있으며, 정부에서도 가스 기술의 국산화 개발에 많은 노력을 기울이고 있다.

LNG 저장 탱크를 비롯한 각종 저장 탱크 수량이 크게 증가하면서 대형 사고 예방 측면에서 저장 탱크에 대한 안전성 문제와 운영 체계도 현안으로 대두되고 있다. 즉, 저장 탱크의 체계적인 운영과 유지 보수 관리를 위한 전문 회사 또는 별도의 전문 사업단을 설치하는 문제도 전문성과 경제적 측면에서 검토할 필요성이 제기되고 있다.

LNG 저장 탱크 건설시 안전성 측면에서 보면 지진을 많이 경험한 일본의 지중식을 선정하는 것이 좋고, 경제적 측면에서 보면 탱크의 대형화(100,000m<sup>3</sup> 이상)와 지상식이 바람직하며, 환경적 측면에서는 지중식이나 지하식이 추천된다. 이러한 점에서 저장 탱크의 안전성과 주변 기술, 경제적 측면을 동시에 고려하면 지중식의 초대형에 적합한 멤브레인식 저장 탱크가 향후 저장 탱크 건설에서 가장 경쟁력있는 탱크 건설방법이라 예상된다.

본고에서는 저장 탱크의 형식과 구조물의 조합에 따른 안전 기술을 총괄적으로 기술하였고, 다음호에는 저장 탱크 구조물과 지진에 관련된 안전성 문제를 중심으로 두고할 예정이다.㉠