

지상식 멤브레인 LNG 저장탱크의 안전성 향상 방안 연구

이승림, 조지환, 권부길
한국가스안전공사 제품연구실

A study for the safety improvement of above ground membrane LNG storage tanks

S.R. Lee, J.H. Cho, B.G. Kwon
Rproducts R&D Division, Korea Gas Safety Corporation

1. 서 론

LNG 저장탱크는 70년대 후반까지는 단일방호(single containment) 형태가, 70년대 중반부터 80년대 후반까지는 주로 이중방호(double containment) 형태가, 80년 중반부터는 완전방호식(full containment) 탱크가 건설되기 시작하였으며, 신기술 개발의 반영 및 안전성과 경제성 개선 측면에서 향후 방류독 일체형 저장탱크(외부 콘크리트 탱크가 방류독 기능을 가지는 구조로 완전방호식 탱크와 멤브레인 탱크를 말함)가 시장을 주도할 것으로 예상된다. 외국의 경우 EN 1473 및 BS 7777 등에 따라 이중방호식 및 완전방호식의 경우 별도의 방류독 없이 건설되고 있고, 유럽에서는 멤브레인식 탱크의 경우도 완전방호식 저장탱크와 대등한 안전성을 갖는 것으로 인정받아 별도의 방류독을 설치하지 않는 형태로 발주자에 의해 요구되고 있다.

국내의 경우 완전방호식 LNG 저장탱크의 경우 2002년 10월에 도시가스사업법에 근거해 동 저장탱크 외부 콘크리트 탱크의 방류독 기능 인정을 위한 가스안전기술심의위원회가 개최되어 방류독 기능을 인정받았으며 현재 15기가 운전 중이고 5기가 건설 중에 있다. 반면, 멤브레인 LNG 저장탱크의 경우 설치사례 및 관련 국제규격 등이 근거가 미약하다는 이유로 외부 콘크리트 탱크의 방류독 기능을 인정받지 못하고 있었다.

따라서, 본 연구에서는 한국가스공사에서 국산화 설계한 멤브레인식 저장탱크의 안전성을 이미 방류독 기능을 인정받아 건설·운전되고 있는 완전방호식 저장탱크와 비교·검토하고, 멤브레인 LNG 저장탱크의 안전성을 향상시키기 위한 설계 개선을 통해 완전방호식 저장탱크와의 대등한 안전성을 확보함으로써 멤브레인 저장탱크의 방류독 기능인정을 위한 객관적인 안전성 평가 자료를 확보하고자 하였다.

2. 멤브레인 LNG 저장탱크의 안전성 비교 평가 방법

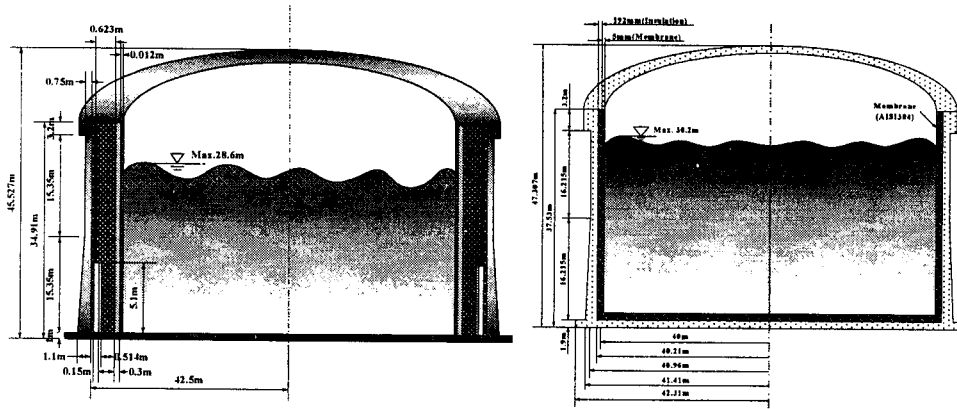
멤브레인 LNG 저장탱크에 대한 안전성 평가를 위해 정량적 위험성평가 방법과 구조해석을 통한 안전성 평가 방법을 사용하였다. 구조해석을 통한 안전성 평가는 LNG 저장탱크의 주요하중(압력하중, 충격하중, 지진하중 등)을 적용한 유한요소해석을 통해 멤브레인 LNG 저장탱크의 설계 안전성을 완전방호식 LNG 저장탱크와 비교 평가하였고, 정량적 위험성 평가(QRA)는 사고빈도분석(FTA)을 통해 초기 가스공사 멤브레인 저장탱크의 모델을 완전방호식 저장탱크와 비교해 사고빈도를 평가하고, 취약점을 도출해 몇 가지 설계 개선안을 바탕으로 최종 설계 개선된 멤브레인 LNG 저장탱크와 기존의 완전방호식 저장탱크의 안전성을 비교·평가함으로써 최종 설계개선안의 안전성 향상 기여도를 정량화하고자 하였다. 다음의 <Table 1>은 14만 kℓ급 완전방호식 LNG 저장탱크와 멤브레인 LNG 저장탱크의 일반적 특성을 나타낸다.

<Table 1> comparison of the designs between full-containment and KOGAS membrane tank

구 분	완전방호식(통영)	멤브레인(KOGAS)
내부탱크 재질	9% Ni (두께 10mm~30mm)	STS 304 (두께 2mm)
벽체 단열재	perlite(1,000mm)	PUF(200mm)
바닥 단열재	foam glass	PUF
내부탱크 누출 감시시스템	thermal Sensor	N ₂
내·외조 사이 Vapour	NG 존재	N ₂ 로 purge (누출 감시)
Vapour Barrier	Carbon Steel (NG 차단 및 수분 차단)	mastic + epoxy (외부 수분 차단)

2.1 구조해석을 통한 설계 안전성 비교

MSC/NASTRAN, MSC/MARC를 이용해 140,000kℓ 용량의 멤브레인 LNG 저장탱크를 동일 용량의 완전방호식 저장탱크(Fig. 1)와 비교해 내부 탱크의 강도 안전성, 외부 탱크의 강도 안전성(외부 충격하중, 지진하중), 외부 탱크의 누출 안전성 및 형식별 장·단점에 대해서 설계 범위 하중과 설계 범위 초과하중을 조건으로 각각의 구조 안전성을 비교·평가하였다.



<Fig. 1> 완전방호식 LNG 저장탱크(좌) 및 멤브레인식 LNG 저장탱크(우)의 단면도

1) 내부 탱크의 강도 안전성

멤브레인 LNG 저장탱크의 경우 대부분의 하중을 단일시스템을 통해 외부 콘크리트 탱크에 전달해 실제로는 단일시스템과 외부 콘크리트 탱크가 액하중을 지지하는 시스템으로 되어 있으며, 완전방호식 저장탱크의 경우 9% Ni강 내부탱크가 자립형(self-standing) 구조로 자립형 내부 탱크와 콘크리트 외부탱크 사이에 분말단열재(perlite)가 충전되는 구조로 두 탱크의 내부 탱크는 기능면에서 현격한 차이가 있다.

설계하중 조건에서 정상적으로 운전되는 경우에 두 탱크 모두 내부탱크가 받는 응력은 모두 항복 강도 이내로 안전한 것으로 해석되었다. 설계하중 조건과 설계하중의 2배 조건에서의 최대 von Mises 응력 및 최대 변위량은 다음 <Table 2>와 같이 나타났다.

<Table 2> results of strength safety assessment of internal tank

구분	기준 값	설계하중	2×설계하중	
9% Ni강 (ASTM)	○ Max. von Mises 응력 (MPa)	○ YS : 585 MPa ○ TS : 690~825 MPa	320	640
	○ Max. 변위량(mm)	○ 연신율 : Min. 20%	85	169
STS 304L (ASTM)	○ Max. von Mises 응력 (MPa)	○ YS : 170 MPa ○ TS : 485 MPa	250	640
	○ Max. 변위량(mm)	○ 연신율 : Min. 20%	0.85	1.8

2) 외부탱크 충격 안전성

LNG 저장탱크의 외부 PC(Prestressed Concrete) 탱크는 현재 2,000kg 하중을 갖는 비산물체(flying objects)가 50 m/s의 속도로 직경 1 m의 탱크 표면에 대해 부딪히더라도 안전하도록 설계하고 있다.

상기의 설계조건에서의 충돌해석 결과 설계범위 내에서는 PC 구조물의 극한

응력인 50 MPa 범위 이내로 모두 안전한 것으로 평가되었고, 설계하중을 벗어나는 경우에는 지붕이 가장 취약한 것으로 평가되었다.

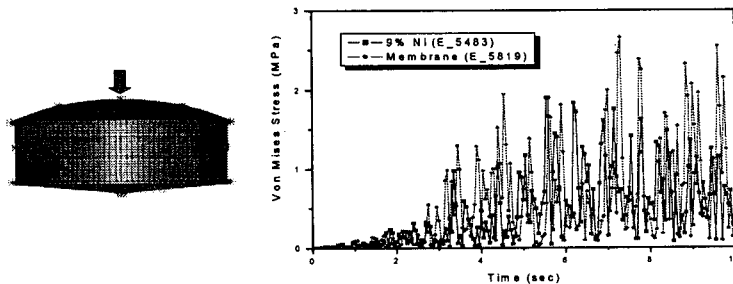
외부 충격에 대한 검토는 이미 2003년에 한국가스안전공사와 한국가스공사의 공동연구에서 200 ton의 비산물체가 200 m/sec의 속도로 0.1 sec 동안 외부콘크리트 탱크에 충돌할 경우에 대해서 수행된 바 있으며(Table 3), 지붕에 45° 각도에서 충돌한 경우에 두께가 60cm인 점을 감안할 때 변위가 77cm가 발생하는 것으로 유추해보면 충돌에 의하여 저장탱크 붕괴가 발생할 것으로 예측되었다. 결과적으로 멤브레인 및 완전방호식 모두 동일한 외부탱크 구조를 가진다는 점에서 외부 비행체에 의한 동일한 붕괴 가능성 및 안전성을 가지고 있다고 할 수 있다.

<Table 3> results of impact analysis by flying object

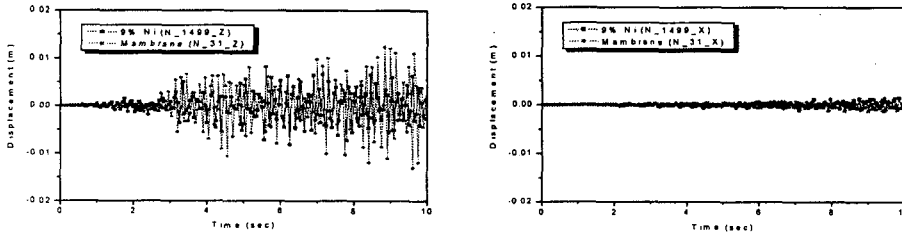
충돌위치 및 조건	Concrete 두께	최대변위	최대응력
지붕(45°)	60 cm	77.0 cm	69.7 MPa
외부탱크 상단(45°)	Knuckle부 150 cm	24.0 cm	36.3 MPa
외부탱크 상단(0°)	Knuckle부 150 cm	33.5 cm	50.8 MPa
외부탱크 중단(45°)	75 cm	28.3 cm	43.5 MPa
외부탱크 중단(0°)	75 cm	40.6 cm	60.0 MPa

3) 외부탱크의 지진하중에 대한 안전성

0.2 g의 지진하중에 대해 MSC/NASTRAN을 이용해 실시간 응답해석(transient response analysis)을 수행해 LNG 저장탱크 구조물에 걸리는 응력분포와 변위 거동량을 해석하였다. 두 가지 외부탱크 해석모델에서 관심 위치라 할 수 있는 5곳(지붕중앙부, 지붕중앙부와 링빔 중간부, 링빔부, 측벽면 중앙부, 측벽면과 바닥이 만나는 코너부)에 대해서 외부 탱크 구조물의 동특성 응력해석결과 및 변형 거동량에 대한 안전성 해석을 수행하였고, <Fig. 2> 및 <Fig. 3>에는 지붕중앙부에 대한 해석결과를 나타내었다.



<Fig. 2> strength variation depended on time(on the center of roof)



<Fig. 3> displacement in the z(left) and x(right) direction

해석 결과, 설계하중 범위 내에서는 모두 안전한 것으로 평가되었고, 초과 하중에 있어서는 멤브레인 탱크가 3.6 g까지, 완전방호식 탱크가 약 4.8 g까지 견딜 수 있는 것으로 나타났다.

4) 외부 탱크의 누출 안전성

내부탱크가 파손되었다는 가정 하에 단열시스템을 포함한 외부 탱크가 얼마 동안 LNG 액을 지탱할 수 있을 것인가 하는 열평형 누출 안전성 해석 결과, 완전방호식 저장탱크와 멤브레인 저장탱크의 외부 콘크리트 탱크는 모두 누출된 LNG에 대해서 10일 정도 내력을 갖는 것으로 나타나 강도 안전성과 누출 안전성을 동시에 확보한 것으로 평가되었다.

2.2 정량적 위험성 비교 평가 및 설계 보완

1) 평가 대상 및 내용

FTA(Fault Tree Analysis)를 이용해 통영생산기지에 설치된 완전방호식 LNG 저장탱크와 가스공사에서 국산화 설계한 초기 KOGAS 멤브레인 LNG 저장탱크를 증기 누출, 내부 누출, 및 외부 누출의 정상사상(top event)에 대해 평가한 결과, 다음의 <Table 4>와 같이 완전방호식 LNG 저장탱크에 비해 멤브레인 저장탱크의 LNG 누출빈도가 높게 나타났고, Minimal Cut Sets(MCS)를 분석한 결과 <Table 5>와 같이 총 빈도의 약 68%를 ‘펌프 낙하’에 의한 멤브레인의 파손이 차지하는 것으로 나타났다.

<Table 4> top event frequencies between full-containment tank and initial KOGAS membrane tank

구분	full-containment tank	membrane tank
External Leak	1.63×10^{-6}	4.47×10^{-6}
Internal Leak	1.08×10^{-4}	1.33×10^{-4}
Vapour Leak	1.80×10^{-4}	8.02×10^{-5}

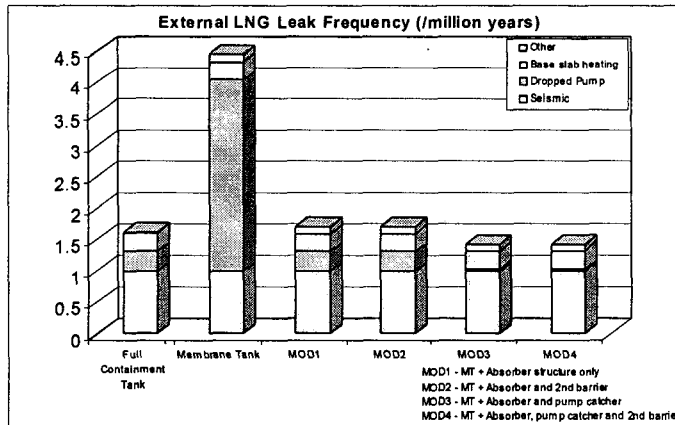
위의 초기 KOGAS 멤브레인 LNG 저장탱크와 완전방호식 탱크의 사고빈도분석 결과, 펌프 낙하에 의한 멤브레인 내부탱크의 파손이 완전방호식 탱크의 9% Ni강 내부탱크에 비해 안전성이 떨어지는 것으로 나타남에 따라 펌프 낙하에 따른 멤브레인 바닥부의 충격흡수장치(absorber structure)와 1차 멤브레인 저장 파손시 콘크리트 외부탱크 코너부의 열충격을 감소시킬 수 있는 열보호장치(second barrier) 및 펌프 낙하시 안전장치로서 펌프캐처(pump catcher)를 설계상 보완하고, 이상의 3 가지 안전장치가 멤브레인 탱크의 안전성에 미치는 영향을 정량화하여 재평가하였다.

<Table 5> main MCS's for External leak in the membrane tank

Frequency	Cut Set	Event Descriptions	Frequency Importance
3.04E-06	WELL RETAIN WELL DETAT PUMP LIFT PUMP DROP INT P WELL DIRECT WELL MB	Dropped pump retained in well Well to dome connection fails given dropped pump Pump lift in tank Pump dropped during lift in tank Dropped load penetrates base-mat directly Falling well penetrates membrane	68.05%
1.00E-06	SEISIN SEISOUT	Seismic failure of inner tank (NiSt or Membrane) Failure of outer tank given seismic failure of inner tank	22.39%
1.84E-07	SLAB MEMB ICE CRACK CS FAILS TANK LIFE PROB SEC COIL INERT PROT FAIL ICE CORRECT	Failure of membrane given structural failure of base-slab Ice heave cracks base slab Failure of primary CS coils Tank life frequency Failure probability of secondary coil Inerting fails to protect secondary coil Failure to correct long term failure of base heating	4.12%

2) 평가 결과

완전방호식 탱크와 멤브레인 탱크 설계모델 총 6 가지 형태에 대한 사고빈도를 정량적으로 평가한 결과는 아래의 <Fig. 3>과 같이 나타났다.



<Fig. 3> comparison of the external LNG leak frequencies for the tank designs

3. 결 론

3.1 구조해석을 통한 구조안전성 비교 평가

1) 기본적으로 시스템적 안전성을 추구하는 멤브레인 저장탱크와 자립형 안전성을 확보하는 9% 니켈강재 LNG 저장탱크는 설계 개념을 달리하기 때문에 안전성, 효율성, 생산성, 운전성 등에서 약간의 차이를 보여주지만, 이것들을 시스템적으로 평가하면 같아지는 통합 지향적 설계특성을 보인다.

- 2) 140,000m³의 저장용량을 갖는 초대형 저장탱크에서 실제 작동조건을 설계하중 범위 내에서 사용한다고 하면, 두 가지 저장탱크는 정적, 동적조건이 작용되는 모든 복합하중에 대하여 안전한 것으로 나타났다.
- 3) 두 가지 저장탱크 모델을 단순 비교하기 위해 수행된 강도 안전성과 누출 안전성을 해석한 결과를 보면, 9% 니켈강재 LNG 저장탱크가 멤브레인 저장탱크에 비하여 약간 앞서는 것으로 나타났으나 설계하중 범위 이내에서 평가하면 모두 안전한 것으로 나타났다.
- 4) 결과적으로, 140,000m³ 저장용량을 갖는 초저온 저장탱크의 두 가지 모델은 저장탱크 시스템에 대한 강도 안전성과 누출 안전성 측면에서 해석한 결과에 의하면 모두 안전한 것으로 평가되었다.

3.2 정량적 위험성 평가 기법을 통한 안전성 평가

- 1) 펌프 낙하로 인한 손상을 줄이기 위해 개선된 멤브레인 LNG 저장탱크와 완전방호식 LNG 저장탱크로부터의 외부 LNG 누출 위험에 있어서의 그 차이는 매우 작고, 분석의 불확도(uncertainties) 범위 내에 존재한다.
- 2) 멤브레인 저장탱크에 알루미늄 박판 형태의 2차 차단막(second barrier)의 추가(개선된 모델 2 및 4)는 전반적인 누출 빈도에 있어 무시해도 좋을 정도의 작은 차이를 가지는 것으로 평가되었다.
- 3) 펌프낙하로 인한 손상은 완전방호식 저장탱크에 비해 멤브레인 저장탱크에서 상당히 크게 예측된다. 충격흡수 구조물을 갖는 멤브레인 저장탱크(개선모델 1)는 완전방호식 저장탱크와 유사한 위험도 수준이 예상된다. 펌프 캐처(개선 모델 3-완전방호식 저장탱크에는 설치되지 않은 것으로 가정)는 이 위험도를 보다 감소시킨다.
- 4) 외부 LNG 누출 빈도에서 기타 다른 차이는 매우 작고, 두 탱크 사이의 중요한 차이로 간주되지 않는다.
- 5) 콘크리트 외부 탱크에 대한 충수시험(hydrotest)으로 인하여 멤브레인 저장탱크의 증기 누출 빈도에 있어 약간의 감소 효과가 있는 것으로 평가되었다.
- 6) 결과적으로 개선되지 않은 멤브레인 저장탱크(초기 모델)를 제외하고 예측된 위험도 수준은 매우 유사해서 각각의 탱크는 동일한 위험도 수준(the same level of risk)을 나타내는 것으로 평가되었다.

4. 참고 문헌

- 1) 한국가스학회, “구조해석을 통한 KOGAS 멤브레인 LNG 저장탱크 및 완전방호식 LNG 탱크의 안전성 평가”, 한국가스안전공사, 2004.5
- 2) AEA Tech., “Comparative Risk Assessment of LNG Tank Designs”, 한국가스안전공사, 2004.5
- 3) EN 1473(Installation and equipment for liquefied natural gas - Design of onshore installations), CEN, 1997