

# FTA를 이용한 LNG 저장탱크 형식별 정량적 위험성 비교 평가

이승림, 조지환, 권부길  
한국가스안전공사 제품연구실

## The comparative quantitative risk assessment of LNG tank designs by using FTA

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

### 1. 서 론

LNG 저장탱크에 대한 최근의 기술 동향은 완전방호식 저장탱크와 멤브레인 저장탱크로 대별할 수 있다. 1980년대 중반부터 정형화된 코드와 많은 건설 및 운전을 통해 안전성이 입증된 완전방호식 탱크와 비교해 멤브레인 LNG 저장탱크는 멤브레인 설계 및 제조기술 등이 특정회사의 배타적 지적재산권으로 유지되어오며 따라 특정회사의 규격 수준에 머물러 있어, 최근까지 지상식 LNG 저장탱크 건설시장에서는 크게 각광을 받지 못하고 있다.

현재 멤브레인 기술은 프랑스, 일본 및 한국의 3개국이 보유하고 있으나 해당 국가의 법령이 지상식 멤브레인 탱크의 방류독 기능을 인정하고 있지 않거나 형식 자체를 규정하고 있지 않아, 자립형 탱크와의 경쟁력에서 상대적으로 떨어지고 있는 것이 현실이다.

그러나 최근에 멤브레인 저장탱크의 대용량화 용이성, 친환경성, 내부 탱크의 낮은 누출가능성(완만한 누출속도 증가), 내부 누출의 조기 검지 용이성, 충수시험을 통한 외부 PC 탱크의 높은 신뢰성 등의 장점과 시공 기간의 단축 등으로 인한 높은 경제성으로 인해 프랑스, 한국 및 일본에서 지상식 멤브레인 LNG 저장탱크 건설에 대한 검토가 적극적으로 이루어지고 있다. 이에 따라 이미 프랑스와 일본에서는 멤브레인 탱크의 안전성에 대한 연구 및 검토가 1990년대 중반부터 활발하게 이루어지고 있으며, 유럽에서는 완전방호식과 대등한 안전성을 갖는 것으로 인정해 동등한 조건(별도의 방류독을 건설하지 않는)으로 구매자에 의해 입찰에 붙여지고 있다.

따라서 본 고에서는 완전방호식 저장탱크와 멤브레인 저장탱크를 FTA를 이용한 상대적 위험성 비교평가를 통해 멤브레인 탱크의 안전성에 대한 객관적인 데이터를 확보하고자 한다.

## 2. 평가 개요

이 연구는 한국가스공사(KOGAS)의 2 가지 탱크 설계, 즉 표준적인 완전방호식(full containment) 탱크와 멤브레인(membrane) 탱크의 정량적 위험성 비교평가를 고장수분석법(FTA, Fault Tree Analysis)을 이용하여 수행하였다. 멤브레인 탱크에 대하여는 한국가스공사의 초기 설계 모델과 4 가지의 설계 개선 모델을 평가하여 전체적으로는 6 가지의 설계 모델에 대한 평가를 수행하였다.

완전방호식 탱크와 멤브레인 탱크의 설계 개념의 주요 차이점은 다음과 같다.

- 완전방호식 탱크는 그 내부탱크가 자립식 니켈강 구조물이며 느슨한 필라이트 단열재로 둘러싸여 있다.
- 멤브레인 탱크는 그 내부탱크가 누출은 없으나 구조적 강도가 거의 없는 얇고 주름을 갖는 스테인리스강 멤브레인으로 되어 있다. 멤브레인은 구조체 역할을 하는 단열재를 통하여 외부 콘크리트 탱크에 하중을 전달하여 지탱되고 있다. 펌프의 낙하에 대비하여 보강판(reinforced plate)이 설치된다.
- 설계 개선 모델 1의 멤브레인 탱크에는 펌프의 낙하에 대비한 보호용으로 보강판에 충격 흡수 구조물( absorber structure)이 추가로 설치된다.
- 설계 개선 모델 2의 멤브레인 탱크에는 충격 흡수 구조물에 탱크 바닥의 단열재 내에 0.5 mm 두께의 알루미늄의 2차 차단막(second barrier)이 추가로 설치된다.
- 설계 개선 모델 3의 멤브레인 탱크에는 펌프 낙하로부터 탱크를 추가적으로 보호하기 위하여 흡수 구조물에 펌프 캐처(pump catcher)가 추가로 설치된다.
- 설계 개선 모델 4의 멤브레인 탱크에는 흡수 구조물과 펌프 캐처에 탱크 바닥의 단열재 내에 0.5 mm 두께의 알루미늄의 2차 차단막이 추가로 설치된다.

FTA 수행에 있어서 다음의 3 가지 유형의 방출(release)을 정상사상(top event)로 상정하고 각 경우의 사고빈도를 평가하였다.

- 1) 탱크 주변으로의 LNG 액의 외부누출(external LNG leak)
- 2) 내부 액누출(internal liquid leak)(콘크리트 외부탱크 내에서 억류)
- 3) 대기로의 증기누출(vapor leak)

## 3. 저장탱크 설계 개념

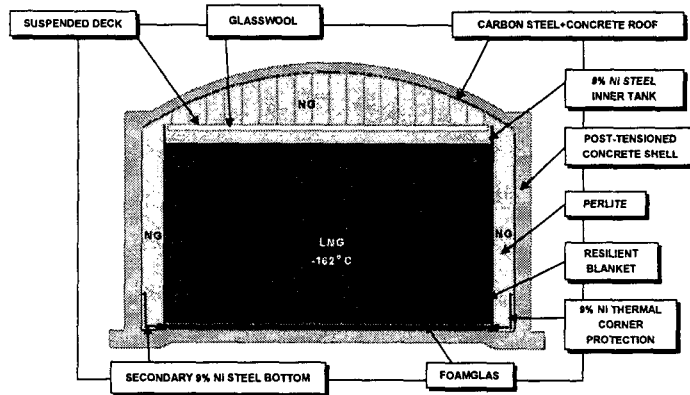
본 연구에서 직접적인 비교 대상인 완전방호식 탱크와 멤브레인 탱크에 대한 일반적인 개념에 대해서 정리하면 다음과 같다.

### 3.1 완전방호식 저장탱크

완전방호식 탱크(그림 1)의 근본적인 특징은 액체 메탄이 자립형 9% 니켈강 내부 탱크 안에 정수학적으로 완전히 방호되고 증기는 내부 탱크가 파손될 경우 역시 액을 방호할 수 있도록 둘러싸고 있는 콘크리트 탱크 내에 완전히 방호되고 있다는 것이다. 이 탱크에는 콘크리트 탱크에 라이닝된 탄소강 증기 차단막이 있고 열 충격으로부터 바닥 모서리를 보호하기 위한 얇은 9% 니켈강 라이너가

있다.

내부 탱크와 외부 탱크 사이의 공간은 탱크 위의 증기 공간과 연결되어 있으며 펄라이트 단열재로 채워져 있다. 이 연구의 목적상 탱크 바닥 밑의 단열재는 증기공간과 연결되어 있다고 가정한다.



<그림 1> 완전방호식 LNG 저장탱크 개략도

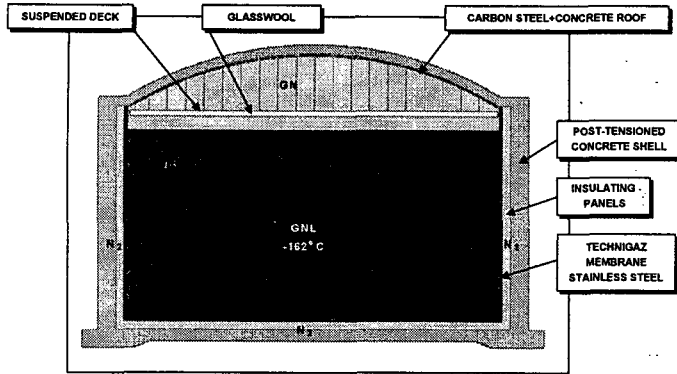
### 3.2 멤브레인 저장탱크

멤브레인 탱크(그림 2)는 완전방호식 탱크의 것과 사실상 동일한 콘크리트 외부 탱크를 가지고 있다 (이들은 동일한 것으로 이 연구에서는 가정한다). 그러나 내부 탱크는 큰 파형의 주름들이 접혀있는 얇은(2.0 mm) 스테인리스 강판으로 구성되어 있다. 이 멤브레인 라이너는 LNG의 정수압 하중을 견디기에 불충분하나 액밀성과 기밀성의 역할을 수행한다. 정수압 하중은 내력 다공질 단열 블록을 통하여 콘크리트 탱크로 전달된다. 이들 다공질 단열 블록들은 폴리우레탄이나 PVC 거품 제품으로 그 앞면과 뒷면에 합판이 붙어있다.

이 탱크는 습기를 차단하는 기능을 가진 습기 차단막(moisture vapor barrier)의 라이닝이 콘크리트 내벽에 시공되어 있다.

멤브레인과 콘크리트 탱크 사이의 단열 공간은 탱크의 증기 공간으로부터 분리되어 있다. 이 공간 내의 메탄 농도를 감시하고 그 압력을 정상 운전 범위 내에 유지하기 위하여 질소 통기장치(nitrogen breather system)가 설치되어 있다. 이 질소장치는 누출이 있는 경우 단열공간의 가스 치환(purge)에 사용하며, 처음 기밀시험(암모니아시험)을 하는데도 사용한다.

멤브레인을 통한 작은 양의 메탄의 누출도 멤브레인 단열공간 감시장치(Membrane Insulation Space Monitoring System: MISMS)를 사용하여 감시할 수 있다.

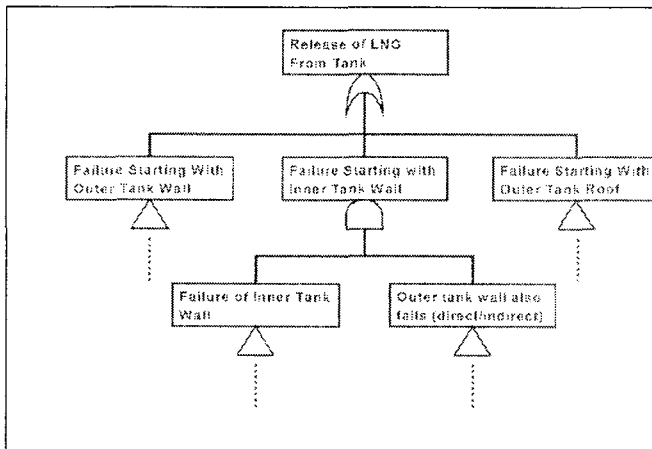


<그림 2> 멤브레인 LNG 저장탱크의 개략도

#### 4. 평가 방법

외부누출에 대한 고장수목은 다음의 3개의 주된 가지들로 구성되고, <그림 3>과 같이 나타낼 수 있다.

- 1) 외부 콘크리트 탱크의 벽이나 바닥의 고장과 더불어 시작되는 고장
- 2) 콘크리트 지붕과 더불어 시작하는 고장
- 3) 내부 탱크의 동체의 고장과 더불어 시작하는 고장



<그림 3> 외부누출에 대한 하부 고장수목(예)

각각의 경우에 있어 최초 고장의 원인은 다음의 사건으로 인해 더욱 세분화된 다. 예를 들어 외부 콘크리트 벽체나 바닥의 고장들은 다음과 같은 원인들로 발생할 수 있다.

- 1) 외부 화재
- 2) 항공기 충돌
- 3) 강풍/태풍

4) 홍수

5) 다음의 원인들로 인한 구조의 손상

- 동결융기나 파일의 손상에 의한 지반 이동
- 콘크리트 시공의 잠재적 결함 또는 프리스트레스의 고장

멤브레인 탱크의 콘크리트 탱크의 충수시험 등의 안전조치가 적절한 곳에 포함되어 있다.

완전방호식 탱크와 멤브레인 탱크에 대하여 많은 사건들이 동일하다. 차이가 있는 곳에서는 수목(tree)의 다른 사건들이나 가지들을 위에서 설명한 것처럼 각 경우에 대하여 사용하였다.

지붕의 최초 고장은 다음의 원인들로 분류 한다.

- 1) 외부 원인(적설하중과 낙뢰)
- 2) 지붕 건설의 결함으로 인한 구조적 고장
- 3) 과압, 과잉충전 및 진공으로 인한 운전상의 고장
- 4) 펌프 철거 시 펌프 낙하로 인한 충격
- 5) 외부 공장에서의 폭발

내부 탱크의 최초 고장은 다음의 원인들로 분류 한다.

- 1) 펌프 낙하와 내부 비행물체로 인한 운전고장은 다음과 같이 분류 한다:
  - 외부탱크도 같이 고장을 일으키는 사건들
  - 외부탱크에 간접적으로 고장을 일으키는 사건들(예, 최초 충격보다는 LNG로부터의 열 충격으로 인함)
- 2) 위와 같은 운전상 고장, 그러나 외부탱크의 간접적 고장 원인으로 인함
- 3) 지진고장들 - 이들은 내부 탱크에 먼저 고장을 일으키는 것으로 평가 된다.
- 4) 구조적 결함(최초 충전 중 고장과 정상운전 중 고장으로 분류)
- 5) 멤브레인 전체에 걸친 차압으로 인한 멤브레인의 이탈로 인한 고장

또한 각 탱크에 대하여 동일하게 평가되는 두 가지의 추가적 고장수목을 포함 시켜서 증기누출 빈도(즉, 내부 탱크는 팬찮은데 외부 탱크가 고장)와 내부누출 빈도(즉 외부 탱크의 고장이 없는 내부탱크의 고장)를 평가한다. 이들 두 수목의 가지들은 LNG 외부 누출에 대한 수목 내의 관련 게이트들로부터 간단히 얻은 것이며, 모두 LNG 외부 누출에 포함된다.

## 5. 평가 결과

전통적인 완전방호식 탱크 모델과 초기 KOGAS 멤브레인 탱크 및 4 종류의 개선된 KOGAS 멤브레인 탱크 모델에 대해서 FTA를 통한 정량적 위험성 평가 결과 다음의 <표 1>과 같은 결과를 얻었다.

<표 1> 정상사상의 사고빈도

구분	FT	MT	MT:개선 1	MT:개선 2	MT:개선 3	MT:개선 4
외부누출	$1.63 \times 10^{-6}$	$4.47 \times 10^{-6}$	$1.73 \times 10^{-6}$	$1.73 \times 10^{-6}$	$1.46 \times 10^{-6}$	$1.45 \times 10^{-6}$
내부누출	$1.08 \times 10^{-4}$	$1.33 \times 10^{-4}$	$1.05 \times 10^{-4}$	$1.05 \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-4}$	$1.03 \times 10^{-4}$
증기누출	$1.80 \times 10^{-4}$	$8.02 \times 10^{-5}$	$8.02 \times 10^{-5}$	$8.02 \times 10^{-5}$	$8.02 \times 10^{-5}$	$8.02 \times 10^{-5}$

위의 위험성평가 결과를 멤브레인 저장탱크의 기술보유국에서 동 저장탱크의 안전성 검증을 위해 수행한 다음의 <표 2> 및 <표 3>의 평가결과와 비교해 볼 때 유사한 결과가 도출되었음을 알 수 있다.

<표 2> 탱크형식별 사고빈도 분석 결과(프랑스 Technigaz)

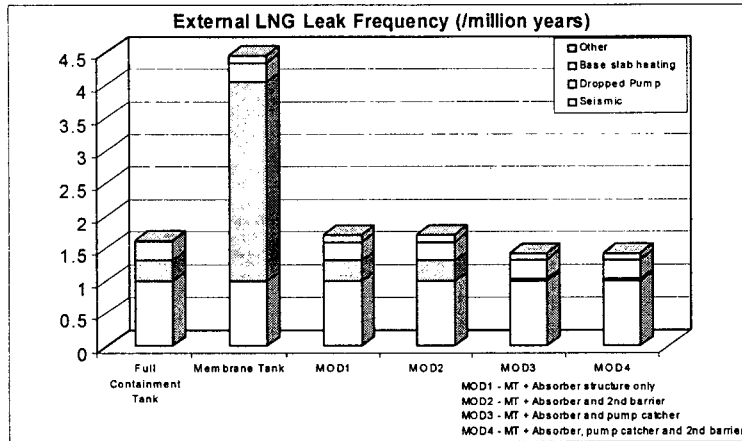
누출	저장탱크	확률(연간)		
		최소	평가값	최대
외부 액체 누출	멤브레인 (개선 후)	$1 \times 10^{-6}$	$7.6 \times 10^{-6}$ ( $2.4 \times 10^{-6}$ )	$2 \times 10^{-4}$
	자립식	$2 \times 10^{-6}$	$1.7 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-4}$
외부 가스 누출	멤브레인	$5 \times 10^{-6}$	$6.1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-3}$
	자립식	$4 \times 10^{-6}$	$6.3 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$
내부 액체 누출	멤브레인	$7 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
	자립식	$8 \times 10^{-6}$	$1.4 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$

<표 3> 탱크형식별 사고빈도 분석 결과(일본 Tokyo Gas Co.)

구분	설계 및 검사 결함	자연재해	탱크 운전 실패	특별한 사건	전체
멤브레인 탱크	$1 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-10}$	$7 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-7}$
완전방호식 탱크	$7 \times 10^{-10}$	$6 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-10}$	$7 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-7}$
단일방호식 탱크 (방류독 있음)	$3 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-10}$	$7 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-5}$
단일방호식 (방류독 없음)	$3 \times 10^{-9}$	$4 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-14}$	$7 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-7}$

## 6. 결 론

LNG 저장탱크에 대한 위험성은 외부 LNG 누출 빈도로 정량적으로 비교될 수 있으며 다음의 <그림 4>와 같이 평가되었다.



<그림 4> 외부 LNG 누출 빈도

본 연구의 FTA를 이요한 위험성평가 결과 및 설계개선을 통한 안전성 개선은 다음과 같이 요약 정리할 수 있다.

- 1) 펌프 낙하로 인한 손상을 줄이기 위해 개선된 멤브레인 LNG 저장탱크와 완전방호식 LNG 저장탱크로부터의 외부누출 위험도에 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(개선 모델 1)는 완전방호식 저장탱크와 유사한 위험도 수준이 예상된다. 펌프 캐처(개선모델 3-완전방호식 저장탱크에는 설치되지 않은 것으로 가정)는 이 위험도를 보다 감소시킨다.
- 3) 외부 LNG 누출 빈도에서 기타 다른 차이는 매우 작고, 두 탱크 사이의 중요한 차이로 간주되지 않는다.
- 4) 콘크리트 외부 탱크에 대한 충수시험(hydrotest)으로 인하여 멤브레인 저장탱크의 증기 누출 빈도에 있어 약간의 감소 효과가 있는 것으로 평가되었다.

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. 이것은 LNG 저장탱크의 실질적인 완전성(integrity)은 탱크의 본질적 안전성(inherent integrity)에 달려 있으며, 이것은 보강재, 채택된 설계여유, 설치된 안전장치 등에 따라 달라진다. 따라서 완전방호식 탱크가 2개의 분리된 자립형 내부탱크와 외부탱크를 갖는다는 것만

으로 이것이 멤브레인 저장탱크 시스템에 비해서 상대적으로 안전하다는 것을 의미하는 것은 아니다.

## 7. 참고 문헌

- 1) AEA Tech., “Comparative Risk Assessment of LNG Tank Designs”, 한국 가스안전공사, 2004.5
- 2) SN Technigaz and AEA Technology, “Quantification and comparison of the risk of LNG storage concepts-membrane and full containment”, LNG 12(Perth, Australia), 1998
- 3) Tokyo Gas Co., Ltd., “Quantitative risk assessment of LNG above-ground tanks based on past operating records of LNG regasification terminals and life cycle assessment”, WGC 2003(Tokyo, Japan)
- 4) EN 1473(Installation and equipment for liquefied natural gas - Design of onshore installations), CEN, 1997