KIGAS Vol. 16, No. 6, pp 48~54, 2012
(Journal of the Korean Institute of Gas)
http://dx.doi.org/10.7842/kigas.2012.16.6.48

고장수목분석법을 이용한 액화천연가스 저장탱크 형식별 위험성 비교 평가

이승림*·†김한상
*한국가스안전공사 가스안전연구원, 가천대학교 기계·자동차공학과
(2012년 11월 13일 투고, 2012년 12월 20일 수정, 2012년 12월 25일 채택)

The comparative risk assessment of LNG tank designs using FTA

Seung Rim Lee*·†Han Sang Kim
**Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation*
Department of Mechanical and Automotive Engineering, Gachon University
(Received November 13, 2012; Revised December 20, 2012; Accepted December 25, 2012)

요 약

최근 LNG 저장탱크 시장에서는 지상식 멤브레인 LNG 저장탱크의 대용량화 용이성, 친환경성, 내부탱크로부터의 낮은 누출 가능성(완만한 누출속도의 증가) 등의 장점으로 동 탱크의 건설에 대한 적극적인 검토가 이루어지고 있다. 이 논문에서는 고장수목분석법(FTA)을 활용하여 기존의 완전방호식 LNG 저장탱크와의 비교 위험성평가를 통해 멤브레인 LNG 저장탱크의 안전성을 분석하였다. 위험성평가 결과는 추가적인 안전장치를 갖지 않는 초기 멤브레인 LNG 저장탱크를 제외하고 두 형식의 LNG 저장탱크가 매우 유사한 위험수준을 가지는 것으로 나타났다.

Abstract - Building above-ground membrane LNG storage tanks have been recently actively reviewed because they have advantages in ease of large capacity, environmental friendliness, and low possibility of gas leakage of the inner tank (slow increase of leakage speed). In this paper, the safety of membrane LNG storage tanks was ensured through comparative risk assessment of full-containment LNG storage tanks and membrane LNG storage tanks by using Fault Tree Analysis (FTA). Risk assessment results showed that both types of tanks have very similar level of risk except for the membrane storage tanks without additional safety equipments (early model).

Key words : LNG Storage Tank(LNG 저장탱크), Fault Tree Analysis(고장수목분석법), Risk Assessment(위험성 평가)

Ⅰ. 서 론

최근 완전방호식 탱크가 주류를 형성하고 있는 LNG 저장탱크 시장에서는 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 한국, 프랑스 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, 유럽 표준기구인 CEN에서는 멤브레인 탱크를 완전방호식과 대등한 안전성을 갖는 것으로 인정해 동등한 조건(별도의 방류둑을 건설하지 않는)으로 구매자에 의해 입찰에 붙여지고 있다.

†Corresponding author:hskim70@gachon.ac.kr
Copyright ⓒ 2012 by The Korean Institute of Gas

따라서 본고에서는 국내에서 건설이 검토되고 있는 지상식 멤브레인 저장탱크와 완전방호식 저장탱크를 대상으로 고장수목분석법(FTA; Fault Tree Analysis)을 이용한 상대적 위험성 비교평가를 통해 멤브레인 탱크의 안전성에 대한 객관적인 데이터를 확보하고자 한다. 고장수목분석법은 사고의 원인이 되는 장치의 이상이나 고장의 다양한 조합 및 작업자 실수 원인을 규명하는 방법으로서 설계 또는 운전단계에 있는 공정위험성평가시 사고의 발생빈도와 예상 사고시나리오를 추정하는데 적용된다. 통상 정량적 위험성평가에서는 사고빈도(frequency)와 사고영향(consequency)을 동시에 고려한 위험을 평가하는데, 동 연구에서는 두 형식의 LNG 저장탱크 사고영향은 탱크 용량 및 콘크리트 외부탱크의 형식이 같기 때문에 동일하다고 가정하고 사고빈도 비교를 통해 상대적인 위험을 평가하였다.

Ⅱ. LNG 저장탱크 관련 사고사례 및 위험분석

2.1. 사고사례

해외의 LNG 설비 관련 주요 사고를 요약하면 Table 1과 같다. LNG 저장탱크 자체 사고는 1944년 클리블랜드 탱크 파손사고와 1971년의 라스페지아 사고를 들 수 있으며 이들 사고로 내부탱크 재질 개선과 LNG 층상화 방지를 위한 안전장치가 개선되는 계기가 되었다. LNG 저장탱크 관련 사고는 이를 Table 내발생지에 표기하였다.

2.2. 형식별 위험요소 확인

LNG 저장탱크 형식별 주요 위험요소는 Table 2와 같다.

이 위험성평가는 저장탱크 형식에 따른 위험성을 비교하기 위해 수행된 것이나 형식에 따라 달라지는 것은 사고발생 가능성 계산에 적용되는 신뢰도 값이며, 사고 시나리오 및 사고 영향은 두 가지 형식의 탱크 모두 강재 내부탱크와 콘크리트 외부탱크의 이중 구조의 동일 용량으로 설계된다는 것에 따라 같은 형태로 간주한다.

외부 LNG 유출은 내부 탱크가 파손되는 것과 외부 콘크리트 탱크가 파손되는 것이 동시에 이루어질 때 가능하며, 단순히 외부탱크의 파손만 있는 경우에는 외부 증기 누출이라는 형태로 사고가 나타나는 것으로 가정하였다. 또한 가장 큰 위험요인은 펌프를 들어 올릴 때 운전자의 실수, 호이스트의 파손 혹은 열차단기(thermal breaker)에서의 강도저하 등으로 펌프가 탱크 바닥으로 떨어지면서 내조에 구멍을 만드는 경우이다. 이를 막기 위한 방법으로 바닥의 내조두께를 두껍게 하거나 호이스트를 이중으로 설치하여 절차적 방법에 의해 보다 안전하게 작업을 수행할 수 있다.

또 하나의 주요 위험요인은 탱크 바닥 가열기의 고장이다. 바닥 가열기의 고장은 토양을 동결시키며, 이는 외부 탱크의 파손으로 연결된다. 바닥 가열기 고장의 가장 큰 원인은 제어시스템의 고장이 될 것이다.

Ⅲ. 위험성 비교 평가

3.1. 평가 개요

본 연구는 한국에 이미 건설되어 운전 중인 2 가지 탱크 설계형식, 즉 멤브레인(membrane)식 탱크와 완전방호(full containment)식 탱크를 정량적 위험성 비교평가를 Fault Tree+툴을 사용한 고장수목분석법(FTA, Fault Tree Analysis)을 이용하여 수행하였다. 정량적 위험성평가(QRA, Quantitative Risk Assessment)는 사고빈도분석(Frequency Analysis)과 사고영향분석(CA; Consequence Analysis)의 조합으로 위험을 산출하는데 본 연구에서는 두 가지 형식의 탱크가 모두 거의 동일한 형식의 외부탱크를 가지는 구조로 LNG나 LNG 증기가 외부로 누출되는 시나리오는 같다고 가정하고 고장수목분석법을 통한 사고빈도분석을 통해 비교평가를 실시하였다.

사고발생가능성을 분석하는 정량적 위험성평가 방법은 여러 가지가 있으며 대표적으로 FTA(Fault Tree Analysis, 결함수목분석)와 ETA(Event Tree Analysis, 사건수목분석)가 있다. 각각의 방법은 분석의 시작점을 어디에 두는 가에 따라 전개하는 방법이 달라진다.

FTA를 이용한 분석의 경우, 예상되는 사고를 시작점(정상사상)으로 하여 그 원인을 찾아내야 하며, 시나리오를 선정한 후 해당 시나리오에 대한 원인을 찾아내 분석하는 장점이 있다. 이 때 같이 고려되는 안전장치는 사고의 발생을 방지하는 원천적 장치를 적용하게 된다.

3.2. 평가 대상

본 연구에서 직접적인 비교 대상인 완전방호 탱크와 멤브레인 탱크는 다음 Fig. 1 및 2와 같다.[2), 3)]

멤브레인 탱크에 대하여는 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.

Table 1. Major accidents related to LNG facilities worldwide[1]

발생지	사고 개요	발생 내용 개요
알제리, 스키다시	- 2004년 - 27명 사망, 80여명 부상, 8억 달러 재산 손실	당시에는 발전기용 스팀보일러의 폭발로 인한 것으로 추정되었으나, 정밀 조사가 실시되면서 알루미늄으로 제작된 콜드박스의 균열로 LNG가 누출됐고 증기운을 형성해 폭발된 것이 더욱 신빙성을 얻고 있음.
트리니다드토바고	- 2004년 - LNG Train 3기 파손	가스터빈 폭발
영국, 텔리	- 1989년 - 2명 화상	천연가스를 방출하는 기화기를 냉각하는 동안 배수밸브는 각 기화기를 열게 하는데, LNG가 기화기에 유입될 때 배수밸브 하나가 닫히지 않아 LNG가 대기 중에 누출되었고 약 30초간 화재 발생
미국, 프린슨	- 1985년 - 6명 부상, 통제실 내부 창문 파손	작은 알루미늄 용기에서 패치판의 용접이 액화 냉각상자로부터 떨어져 가스가 누출되어 화재 발생
인도네시아, 본탕	- 1983년 - 3명 사망	열교환기 밸브가 잠겨 압력이 상승하여 열교환기가 파손되고 폭발. 배출된 라인의 장해(작업자 실수) 및 내부 유출이 동체에 과도한 압력 요인으로 작용, 폭발 발생
미국, 커브포인트	- 1979년 - 2명 사망, 300만 달러의 재산손실	전기도관의 부실한 밀봉재로 인해 전기 개폐기건물의 낡은 펌프로부터 LNG 증기가 누출되었고, 누출된 천연가스는 플랜트 작업자가 펌프를 멈추기 위해서 스위치 작동 시 폭발 발생. 이 사고로 미국 전기관련코드(NFPA 70)가 개정됨.
미국, 매리랜드	- 1979년 - 갑판 일부분 파손	LNG선에서 하역 작업 중 배관의 체크밸브 이상으로 소량의 LNG가 누출. 같은 해 매사츄세츠에서도 비슷한 사고 발생
아랍에미리트, 다스섬 (LNG 탱크)	- 1978년	LNG 탱크의 하부 배관 연결 부위가 파손되어 가스가 누출되었으나 점화되지 않음. 모든 배관의 지붕 연결 기술의 계기가 됨.
알제리아, 아르쥬 (LNG 탱크)	- 1977년 - 1명 사망	지중식 저장탱크 꼭대기의 파손된 밸브장치에서 유출된 LNG의 냉열로 1명 사망. 대략 1,500 ~ 2,000 m^3의 LNG가 유출되었으나 화재는 발생하지 않음.
Aquarius (LNG 탱크)	- 1977년	LNG선에 로딩 작업 중 LNG가 탱크를 넘침. 작업 편의상 고액위 알람 장치 제거가 원인이 됨.
미국, 뉴욕 (LNG 탱크)	- 1973년 - 40명 사망	탱크의 비금속 라이너의 구멍을 보수작업 동안 LNG 저장탱크의 내부 화재로 인하여 탱크지붕 붕괴. 가연성 라이너 및 단열재의 빠른 연소, 천연가스의 포켓이 내부 압력의 급격한 상승을 초래함.
캐나다, 몬트리올	- 1972년 - 5명 부상	기화된 천연가스가 질소라인을 역류하여 조종실로 유입된 후 작업자가 담배를 피우기 위해 라이터를 켜는 순간 폭발
이탈리아, 라스페지아 (LNG 탱크)	- 1971년	밀도가 다른 LNG를 저장하는 과정에서 두 종류의 LNG를 완벽히 혼합시키지 못함. 이 같은 층상화현상은 저장탱크의 운영미숙에 의해 발생한 것으로 추정. 밀도차가 48시간 동안 지속되자 많은 양의 가스가 폭발적으로 팽창하는 롤오버 현상이 발생. 이 사고를 계기로 LNG 저장탱크마다 롤오버 안전장치를 설치하게 됨.
미국, 포틀랜드 (LNG 탱크)	- 1969년 - 4명 사망	탱크 건설 작업 시 작업미숙으로 천연가스가 탱크내부로 유입되어 폭발
영국, 켄베이섬 (LNG 탱크)	- 1965년 - 1명 중화상	탱크 유지 관리 중 소량의 LNG 누출
알제리아, 아르쥬	- 1964년	LNG를 선적하는 도중에 낙뢰에 의해 누설가스 점화
미국, 클리브랜드 (LNG 탱크)	- 1944년 - 131명 사망, 225명 부상 - 가옥 79세대, 차량 217대 및 공장 2채 파손	탱크를 추가 건설한 후 운전 중 탱크가 파괴(부적절한 재료의 사용이 탱크 내조의 취성파괴를 일으켰고 3년의 운전기간 중 보냉재에도 균열이 발생하면서 저장탱크 자체가 파괴), 이 때 유출된 LNG가 도로에까지 범람했고 하수관으로 확산되면서 발화. LNG 역사상 최초의 대형 참사로 기록됨.

Table 2. Cause analysis results of major expected accident modes

탱크 형식	주요 예상사고 모드	주요 원인
완전 방호식 탱크	External leak(LNG)	• 지진, 펌프낙하, 바닥가열 시스템 고장 등
	Vapor leak	• 탱크 결함, 철 구조물(지붕) 파손, 바닥가열 시스템 고장 등
	Internal leak(LNG)	• 지진, 불량재질, 펌프낙하로 내벽 파손 등
멤브레인식 탱크	External leak(LNG)	• 펌프낙하, 지진, 바닥가열 시스템 고장 등
	Vapor leak	• 철 구조물(지붕) 파손, 바닥가열 시스템 고장, 외벽 결함 등
	Internal leak(LNG)	• 지진, 펌프낙하, 멤브레인 결함 등

- 멤브레인 내부 탱크는 펌프의 낙하에 대비하여 보강판(reinforced plate)이 설치된다.
- 설계 개선 모델 1의 멤브레인 탱크에는 펌프의 낙하에 대비한 보호용으로 보강판에 충격 흡수 구조물(impact 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(secondary 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.

3.3. 평가 방법

FTA 수행에 있어서 다음의 3 가지 유형의 누출(release)을 정상사상(top event)으로 상정하고 각 경우의 사고빈도를 평가하였다. 고장률 데어터는 영국 ESR Tech.사의 엔지니어링 데어터를 활용하였다.

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

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

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

다음의 Fig. 4에서 6은 멤브레인 저장탱크의 외부 LNG 누출에 대한 정상사항, 중간사상 및 기본사상에 대한 고장수목을 나타낸다.

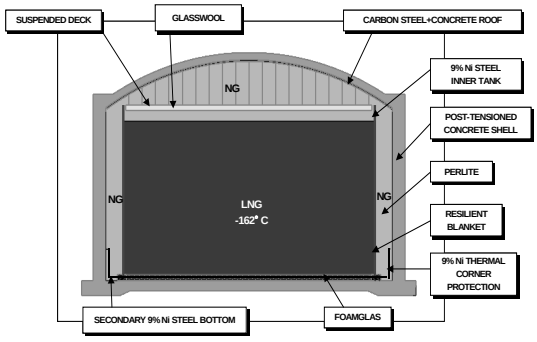

Fig. 1. A schematic of full-containment LNG storage tank.

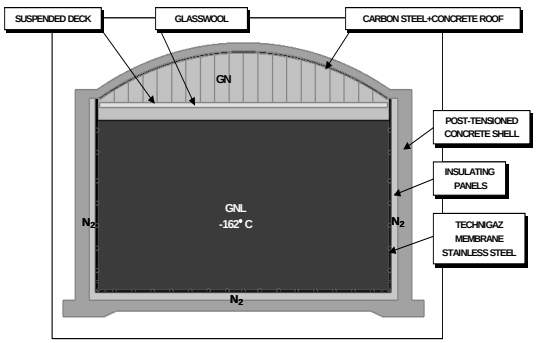

Fig. 2. A schematic of membrane LNG storage tank.

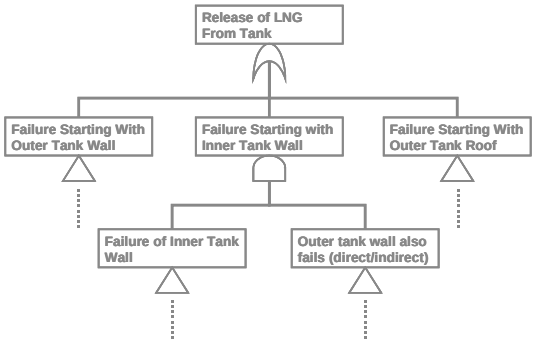

Fig. 3. A fault tree of LNG external leak (example).

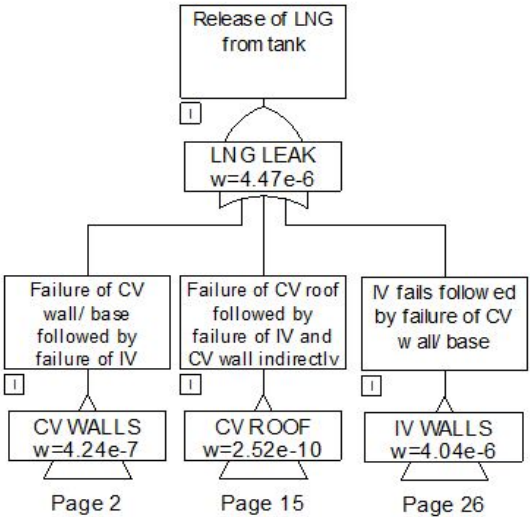

Fig. 4. The top event of LNG external leak for membrane LNG storage tank.

Table 3. Frequency ranges for hazard assessment (BS EN 1473)

구분	발생 가능성	발생 빈도
구간 1	F > 1.0E-02/yr	자주 혹은 어느 정도 확실한 사건
구간 2	1.0E-02/yr ~ 1.0E-04/yr	가능하지만 그다지 자주 일어나지 않는 사건
구간 3	1.0E-04/yr ~ 1.0E-06/yr	드문 사건
구간 4	1.0E-06/yr ~ 1.0E-08/yr	매우 드문 사건
구간 5	F < 1.0E-08/yr	있음직하지 않은 사건
구간 6	F ≪ 1.0E-08/yr	매우 사실 같지 않은 사건

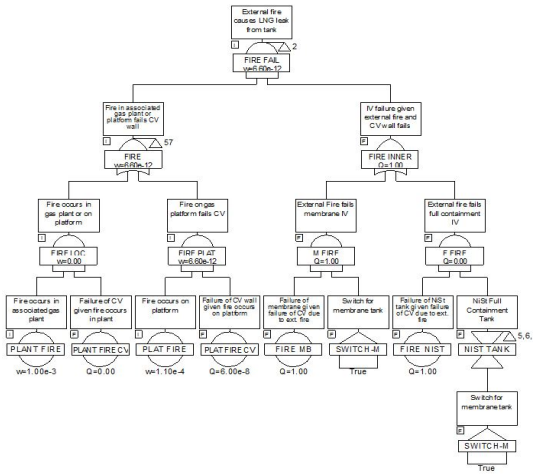

Fig. 5. An intermediate event of LNG external leak for membrane LNG storage tank (example).

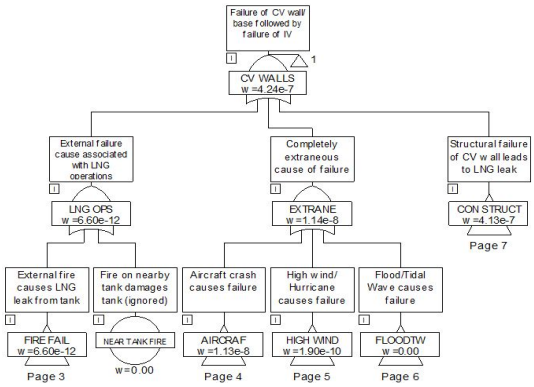

Fig. 6. Basic events of LNG external leak for membrane LNG storage tank (example).

Table 4. Top event frequencies

구 분	FT	MT	MT: 개선 1	MT: 개선 2	MT: 개선 3	MT: 개선 4
외부누출 (전체)	1.63×10^{-6}	4.47×10^{-6}	1.73×10^{-6}	1.73×10^{-6}	1.46×10^{-6}	1.45×10^{-6}
외부누출 (지진제외)	6.32×10^{-7}	3.47×10^{-6}	7.29×10^{-7}	7.29×10^{-7}	4.55×10^{-7}	4.55×10^{-7}
증기누출 (전체)	1.80×10^{-4}	8.02×10^{-5}	8.02×10^{-5}	8.02×10^{-5}	8.02×10^{-5}	8.02×10^{-5}
증기누출 (지진제외)	1.80×10^{-4}	8.02×10^{-5}	8.02×10^{-5}	8.02×10^{-5}	8.02×10^{-5}	8.02×10^{-5}

주) FT : Full-containment Tank(완전방호식 탱크)
MT : Membrane-containment Tank(멤브레인식 탱크)

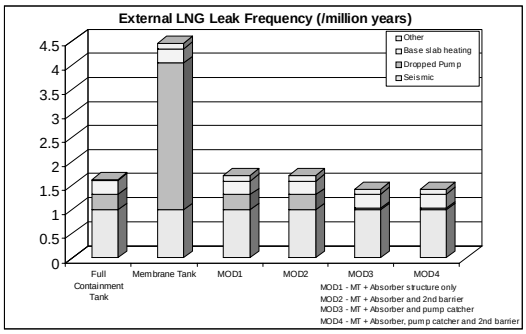

Fig. 7. Frequencies of external LNG leak.

Table 5. Frequency analysis result for the LNG tank designs (Technigaz, France)[4]

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

Table 6. Frequency analysis result for the LNG tank designs (Tokyo Gas Co., Japan)[5]

구분	설계 및 검사 결함	자연 재해	탱크 운전 실패	특별한 사건	전체
멤브레인 탱크	1×10^{-8}	3×10^{-8}	3×10^{-10}	7×10^{-8}	1×10^{-7}
완전방호식 탱크	7×10^{-10}	6×10^{-8}	3×10^{-10}	7×10^{-8}	1×10^{-7}
단일방호식 탱크 (방류둑 없음)	3×10^{-5}	4×10^{-7}	3×10^{-10}	7×10^{-8}	3×10^{-5}
단일방호식 (방류둑 있음)	3×10^{-9}	4×10^{-7}	3×10^{-14}	7×10^{-8}	5×10^{-7}

3.4. 평가 기준

사고발생 빈도에 대한 평가기준은 국내에는 제정되어 있지 않으며 유럽의 EN 14620-1에 다음의 Table 3과 같이 제시되고 있다.

3.5. 평가 결과

전통적인 완전방호식 탱크 모델과 초기 국산화멤브레인 탱크 및 4 종류의 설계 개선된 국산화 멤브레인 탱크 모델에 대해서 FTA를 통한 정량적 위험성 평가 결과 다음의 Table 4 및 Fig. 7과 같은 결과를 얻었다.

위의 위험성평가 결과를 멤브레인 저장탱크의 기술보유국 프랑스와 일본에서 동 저장탱크의 안전성 검증을 위해 수행한 다음의 Table 5 및 6의 평가결과와 비교해 볼 때 유사한 결과가 도출되었음을 알 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 연구의 FTA를 이용한 멤브레인식 LNG 저장탱크에 대한 상대적인 위험성평가 결과 및 평가결과를 활용한 설계개선을 통한 안전성 향상은 다음과 같이 요약 정리할 수 있다.[6]

1) 펌프 낙하로 인한 손상을 줄이기 위해 개선된 멤브레인 LNG 저장탱크와 완전방호식 LNG 저장탱크로부터의 외부누출 위험도에 있어서의 그 차이는 매우 작고, 분석의 불확도 범위 내에 존재한다.

2) 멤브레인 저장탱크에 알루미늄 박판 형태의 2차 차단막(secondary 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(개선모델 3-완전방호식 저장탱크에는 설치되지 않은 것으로 가정)는 이 위험도를 보다 감소시킨다.

4) 외부 LNG 누출 빈도에서 기타 다른 차이는 매우 작아 두 탱크 간 의미 있는 차이는 없다.

결과적으로 개선되지 않은 멤브레인 저장탱크(초기 모델)를 제외하고 예측된 위험도 수준은 매우 유사해서 각각의 탱크는 동일한 위험도 수준을 나타내는 것으로 평가되었다.

향후 설계 개선 모델 중 안전성, 경제성, 시공성 등을 포함한 최적 개선(안)에 대한 검토가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 LNG플랜트 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Y.W. Ma, S.R. Lee, K.B.Yoon, "The investigation of accidental case for LNG terminal", KIGAS Vol. 10, No.4, pp.47-51, (2006)
[2] EN 1473(Installation and equipment for liquefied natural gas - Design of onshore installations), CEN, (1997)
[3] BS EN 14620-1～5(Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0℃ and -165℃), CEN, (2006)
[4] SN Technigaz and AEA Technology, "Quantification and comparison of the risk of LNG storage concepts-membrane and full containment", LNG 12(Perth, Australia), (1998)
[5] 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), (2003)
[6] S. R. Lee, J. W. Cho, B. K. Kwon, "A study for the safety improvement of above ground membrane LNG storage tanks", KIGAS 2004 fall conference, pp.123-129, (2004)