

방류독 일체형 LNG 저장탱크의 안전성 비교 연구

서흥석, 양영명, 홍성호, 김지훈
한국가스공사 연구개발원

A Comparison study for the safety of LNG Storage Tanks without Dike

H.S. Seo, Y.M. Yang, S.H. Hong, J.H. Kim
R&D Division, Korea Gas Corporation

1. 서론

국제적인 기술규격인 EN 1473과 현재 제정중인 prEN 265002 규격에 의하면 방류독 일체형 저장탱크는 9% Ni강 내부탱크와 프리스트레스 콘크리트 외부탱크로 구성된 완전방호식과, 멤브레인(STS304) 내부탱크와 프리스트레스 콘크리트 외부탱크로 구성된 멤브레인식으로 구분할 수 있다. 국내의 평택, 인천, 통영 LNG 생산기지에는 두 가지 방식의 저장탱크가 모두 건설되어 있으며, 통영 생산기지에는 LNG 저장탱크 설계기술의 발전에 의한 새로운 규격을 적용한 방류독 일체형 완전방호식 저장탱크가, 평택과 인천에는 방류독 일체형 완전방호식 저장탱크의 규격이 부재했던 때에 추진된 방류독을 포함한 멤브레인식 저장탱크와 9% Ni강 저장탱크가 각각 건설되었다.

LNG 저장탱크의 경우 70년대 후반까지는 단일방호 형태가, 70년대 중반부터 80년대 후반까지는 주로 이중방호 형태가, 80년 중반부터는 완전방호식 탱크가 건설되기 시작하였으며, 기술개발 반영 및 안전성과 경제성 개선 측면에서 향후 방류독 일체형 저장탱크가 시장을 주도할 것으로 예상된다. 외국의 경우 기준에 의거하여 이중방호식 및 완전방호식의 경우 별도의 방류독 없이 건설되고 있고, 멤브레인식 탱크의 경우도 별도의 방류독을 설치하지 않는 형태에 대해 유럽에서 검토되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내에 건설된 완전방호식 저장탱크와 한국가스공사에서 국산화 설계한 멤브레인식 저장탱크의 주요설계사항을 비교하고, 각 탱크형식의 설계 특이 사항에 따른 안전성 평가를 국내외 평가 사례와 해석 결과를 토대로 방류독 일체형 LNG 저장탱크의 안전성에 대한 현황과 개선사항을 검토, 분석하였다.

2. LNG 저장탱크의 안전성 비교

저장탱크는 다양한 사고 위험으로부터 안전하게 보호되어야 하므로, 이를 위해 서 위험성 평가를 실시하고 있다. 방류독 일체형 저장탱크의 경우는 외부탱크의 형식은 동일하고 내부탱크 및 단열구조가 상이하므로 이 부분이 주요 검토 대상이다.

2.1 저장탱크 사고유형에 따른 안전성 비교

1) 저장탱크 외부충격에 따른 안전성 평가

외부 충격에 의해 저장탱크는 자연재해, 비산물 등의 충격, 주변설비의 화재 등에 의해 벽체 균열 발생 또는 붕괴, 지붕의 붕괴 등의 상황이 발생할 수 있다. 저장탱크에 작용하는 비산물체(Missile)로 인한 충격하중은 설계시의 고려 사항으로서 국내 및 국제적인 적용 규정은 원자력 발전소 건설시 적용하는 비산물체에 의한 충격하중을 적용하는 것이 일반적이다. 이 비산물체에 의한 외부탱크의 파손은 발생가능하지 않으며, 이는 저장탱크의 형식에는 무관한 사항이다.

일반적으로 완전방호식이나 멤브레인 저장탱크 설계에는 비산물체에 의한 충격을 충분히 고려하지만, 완전방호식이 멤브레인 저장탱크보다는 외부충격에 안전하다는 인식이 팽배하여 발생 불가능한 시나리오를 가정하여 저장탱크 외부탱크에 균열 및 붕괴가 발생한 상황에 대해 위험성 평가를 해석적 관점을 통하여 검토하고 완전방호식과 멤브레인식 저장탱크의 안전성을 비교하고자 한다.

표 2-1 비산물체에 의한 저장탱크 각 부위의 충돌해석 결과

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

충돌 후 저장탱크의 변위분포인 표 2-1에 의하면 충돌부위에서 변형이 24~77cm 가량 발생하고 있다. 특히, 그림 2-1과 같이 지붕에 45° 각도에서 충돌한 경우에 두께가 60cm인 점을 감안할 때 변위가 77cm가 발생하는 것으로 유추해 보면 충돌에 의하여 저장탱크 붕괴가 발생할 것이다. 또한 최저 변위가 발생한 외부탱크 상단 45° 충돌의 경우에도 24mm 변위가 발생하므로 동일한 결과를 보일 것으로 판단된다. 콘크리트의 특성이 강재와는 달리 연성이 낮은 재질이고, 실제 충돌 상황에서는 발생 가능한 다양한 변수들로 인하여 붕괴 가능성을 피할 수 없을 것이다. 이것은 멤브레인식 및 완전방호식 모두 동일한 외부탱크 구조를 가진다는 점에서 동일한 붕괴 가능성을 가지고 있다고 할 수 있다.

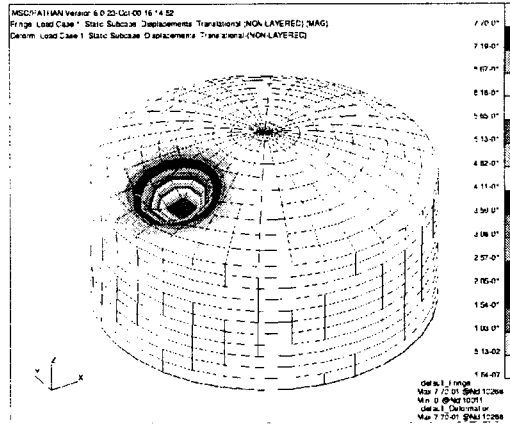


그림 2-1 비산물체 충돌에 따른 변형 (지붕-45도)

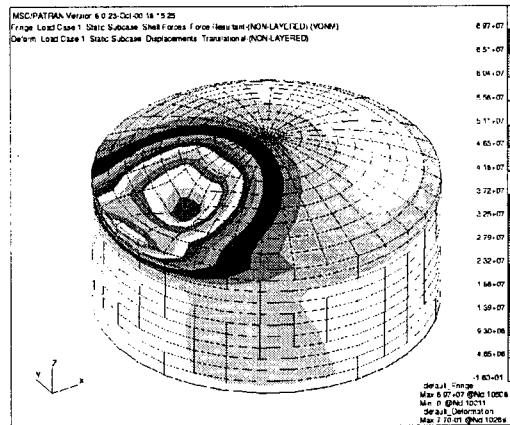


그림 2-2 비산물체 충돌에 따른 응력분포
(지붕-45도)

외부탱크의 상단, 45°의 경우에 극한응력보다 낮은 수치가 발생한 것은 외부탱크와 지붕이 만나는 부위의 철근콘크리트 두께가 두꺼워서 강도가 확보되었고 충돌각도가 45°로 비스듬히 충격이 가해졌기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 설계규격 이상의 엄청난 외부충격 하중이 작용했을 경우 완전방호식 저장탱크 및 멤브레인식 저장탱크와 같은 방류독 일체형 저장탱크의 붕괴를 피할 수는 없다. 이것은 발생 불가능한 극단적인 상황이므로 설계에 따른 안전성 평가와는 개념을 달리하지만, 두 방류독 일체형 저장탱크에 동일한 붕괴가 발생하고 외조의 붕괴에 의한 내부탱크의 파괴가 필연적인 점을 감안한다면 동일한 안전성을 가지고 있다고 유추할 수 있다.

표 2-2 외부탱크 붕괴에 따른 연쇄효과

사고 유형	완전방호식	멤브레인식
지붕 붕괴	suspended deck 파괴 → 내부탱크 및 단열시스템 붕괴 → LNG의 급속한 기화 → 대규모 화재 가능성	
지붕 균열	지붕 vapour barrier 손상 → 균열부로 NG 확산 → 화재 가능성	
지붕 화재	저장탱크 내부의 손상 가능성 없음	
외부탱크 붕괴	vapour barrier 손상 → 단열시스템 붕괴 → LNG의 급속한 기화 → 대규모 화재 가능성	내부탱크의 손상 → LNG의 유출 및 급속한 기화 → 대규모 화재 가능성
외부탱크 균열	단열 성능 저하 → 과도한 NG 발생	vapour barrier 및 내조 부분 손상 가능성 → NG의 유출

저장탱크의 외부탱크 파괴에 따른 연쇄효과 및 내부탱크의 안전성 평가를 표 2-2와 같이 요약할 수 있다. 즉, 저장탱크의 지붕 붕괴와 외부탱크의 붕괴에 따른 안전성은 멤브레인식과 완전방호식이 동일한 형태를 보인다.

2) 저장탱크 내부 손상에 따른 안전성 평가

외부탱크의 경우 완전방호식과 멤브레인식이 동일한 구조이므로 사고유형에 다른 차이가 크게 나타나지 않는다. 그러나 내부탱크의 손상은 두 저장탱크의 구조가 전혀 상이함에 의해 발생 가능성 측면에서부터 다양성이 존재하게 된다. 표 2-3은 저장탱크에 발생 가능한 다양한 내부탱크 사고유형을 정리한 것이다. 내부탱크의 균열에 따라 누출된 LNG는 코너 프로텍션이 설치되어 있지 않을 경우에는 외부탱크에 손상을 가할 수 있다. 그러나 완전방호식 및 멤브레인식은 모두 이러한 안전장치를 갖추고 있으므로 실질적인 손상가능성은 없다. Rollover 등에 의한 과압이 발생하면 내부탱크 및 suspended deck등에 영향을 미치게 된다. 저장탱크 형식에 따른 손상 가능성이 다르게 평가되는 부분은 1차 펌프의 낙하 또는 suspended deck의 붕괴 등이다. 이 경우는 LNG의 액위에 따라 손상의 정도가 차이를 나타낸다. LNG가 낙하물의 낙하속도를 완화하여 바닥부의 손상 가능성을 줄여 주기 때문이다. 액위가 최저상태일 경우를 고려하면 5mm 두께로 이루어진 완전방호식이 주름을 가진 2mm 두께의 멤브레인식에 비해 안전성 측면에서 유리하다고 판단할 수도 있으나 그 효과는 거의 동일하다.

또 하나의 차이는 과충전 등에서 나타날 수 있다. 완전방호식의 경우에 LNG의 과충전으로 단열공간에 냉열이 침투하게 되고 이것은 증기 차단막에 손상을 가할 수 있게 된다. 그러나, 멤브레인식은 과충전이 되더라도 내부탱크와 외부탱크의 사이 공간에 LNG 또는 NG가 침투할 수 없기 때문에 유리한 구조라 할 수 있다. 내부탱크와 외부탱크 사이의 공간에 과압이 발생할 경우에는 두 형식의 저장탱크가 모두 손상될 위험에 처하게 된다. 내부탱크에 LNG가 채워져 있다면 압

력의 상쇄에 의해 위험도를 줄일 수 있으나, 저장탱크내부에 압력이 가해진 상태가 아니라면 9% Ni 바닥판과 멤브레인 바닥판이 모두 손상 가능성에 직면하게 된다. 그러나, 전체적인 손상의 정도 및 범위는 멤브레인 내부탱크가 변형에 유연한 구조를 이루고 있기 때문에 완전방호식에 비해 덜할 것이며, 국부적인 손상 가능성도 낮은 것으로 판단된다.

표 2-3 저장탱크 내부의 사고 유형 및 효과

사고 유형	완전방호식	멤브레인식
내부탱크 균열 발생	코너 프로텍션에 의해 외부탱크의 손상 가능성 없음	
rollover 등에 의한 과압 발생	내부 탱크 손상 가능성 존재	
over filling	단열공간으로 LNG 유출 Vapour Barrier 손상 가능	내부탱크 손상 가능성 낮음
suspended deck 붕괴	저장탱크 내부의 LNG 액위에 따라 바닥부의 손상 가능성이 변동됨.	
내부탱크 바닥부 과압 발생	저장탱크 내부가 비워져 있을 경우 내부탱크 손상 발생 가능성 높음.	

2.2 해외 연구사례에 따른 안전성 비교

1) 개별적 평가에 따른 저장탱크의 안전성 비교

표 2-4의 결과들은 코너 프로텍션 개념이 도입되기 이전의 연구 결과로서 두 형식의 저장탱크의 안전성을 비교하기 위해 수행한 결과는 아니다. 오히려 각각의 저장탱크에 대한 안전성 검토를 수행한 결과에 따라 규정한 수치이므로 개별적인 평가에 대한 신뢰도는 상당히 높다고 할 수 있다. 코너 프로텍션의 개념이 없더라도 고려 대상인 9%Ni강 저장탱크와 평택에 건설된 멤브레인 저장탱크는 완전방호식으로 분류할 수 있다. 두 형식의 평가 결과는 모두 별도의 방류독이 있는 저장탱크를 대상으로 하고 있으나, 사고 유형이 방류독 유무가 영향을 주지 않는 범위이므로 일체형 저장탱크의 설계와 비교 가능할 것으로 판단된다.

표 2-4 완전방호식과 멤브레인 저장탱크의 사고발생 빈도

사고 유형	9% Ni강식	멤브레인식
내부탱크 균열에 따른 대량 누출	1×10E-5회/년	8.8×10E-6회/년
과압에 의한 대량 누출	1×10E-6회/년	5.3×10E-6회/년
부압에 의한 대량 누출	4.9×10E-3회/년	2.9×10E-10회/년
과충전에 의한 대량 누출	3.1×10E-4회/년	1.2×10E-5회/년
유입배관 파열에 의한 대량 누출	6×10E-6회/년	1.4×10E-7회/년
송출배관 파열에 의한 대량 누출	6×10E-6회/년	2.5×10E-5회/년

표 2-4에서의 사고발생빈도는 사고에 따른 영향을 분석한 것이 아니고 단순히 사고의 발생 가능성만을 표시한 것이다. 내부탱크 균열에 따른 대량 누출, 부압에 의한 대량 누출, 과충전에 의한 대량 누출, 유입배관 파열에 의한 대량 누출에서는 멤브레인식이, 기타 다른 사고 유형에서는 9% Ni강식이 낮게 나타났다. 대부분의 발생빈도가 큰 차이 없이 유사하게 나타난 것은 두 형식의 저장탱크 안전성에 차이가 없다는 것을 설명해 준다. 특이한 것은 부압에 의한 대량 누출의 경우 9% Ni강식이 상당히 높게 나타난 것이다. 이것은 9% Ni강식 저장탱크의 내부탱크 단열시스템에 의해 부압 발생 가능성이 높아진 것이라 판단된다.

2) 유럽의 안전성 평가

저장탱크 형태에 상관없이 동일한 시나리오를 적용한 정량적 위험성 평가를 2회에 걸쳐 미국의 Battelle 연구소와 영국의 AEA에서 수행하였으며, 방류독이 없는 완전방호식 저장탱크와 멤브레인식 저장탱크의 안전성에 초점을 맞추어 비교/분석하였다. 정량적 위험성 평가 결과에 따라 지진에 의한 손상도가 매우 높게 나타나며, 가스의 누설과 내부탱크 누설 등은 두 형식에 따른 차이가 나타나지 않는다고 보았다. 전체적인 안전성 측면에서는 완전방호식이 우수한 것으로 드러났으나 그 차이는 극히 작으며, 기존 평택의 멤브레인 저장탱크를 개선한 코너 프로텍션 개념을 가진 멤브레인 저장탱크는 완전방호식과의 안전성 차이가 거의 유사한 것을 알 수 있다. 멤브레인 저장탱크에 대해서는 질소 치환 시스템과 펌프 낙하에 따른 안전성을 주요 고려 사항으로 삼았다.

3. 결론

1. 외조파괴에 따른 안전성은 저장탱크의 형식에 무관하며, 외부탱크의 붕괴 및 균열에 따른 연쇄효과에서만 차이를 나타낸다.
2. 두 형식의 저장탱크의 내부 손상은 균열, 과압, 과충전, 내부 구조물 붕괴 등에 의해 손상 진행 경로는 차이를 보이나, 안전성 측면에서는 동일하다.
3. 유럽 등의 해외 연구 사례 분석에 따른 저장탱크의 사고 발생 가능성은 동일하며, 내부탱크의 구조적인 차이에 의해 부분적인 차이만을 보인다.

4. 참고문헌

1. 김용웅, 김효, Alain Goy, Jean Claude, Sadao Goto, "LNG 저장탱크의 방류독 기능 및 안전성 국제세미나", 한국가스안전공사, (2002)
2. N. Ketchell, R. Robinson, "Quantification and comparison of the risk of LNG storage concepts-membrane and full containment", SN Technigaz and AEA Technology
3. J.P. Budliger, J.P. Carriere, "Comparative Evaluation of Safety Aspects of Optional Internal Structures for the Third Reservoir at Montoir De Bretagne and Assessments of Effects of the Third Reservoir on Hazard Levels at LNG Facility", Battelle, (1980)