

안전밀폐식 저장탱크에서 내부탱크 바닥판의 설계안전성 해석 PART2 : 온도하중을 고려한 경우

조승현¹ · 김청균¹ · 김영규²

¹홍익대학교 기계시스템디자인공학과

²한국가스안전공사 가스안전시험연구원

An Analysis on the Design Safety of Inner Tank Bottom plate in Full Containment LNG Storage Tank PART2 : including Thermal Loading

Seung Hyun Cho¹ · Chung Kyun Kim¹ · Young Gyu Kim²

¹Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

²Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation

1. 서론

에너지 다변화정책과 무공해 청정에너지라는 장점으로 인하여 국내뿐만 아니라 세계적으로 천연가스의 수요는 매우 큰 폭으로 증가하고 있다. 이와 같은 수요로 인하여 천연가스를 저장하기 위한 9% 니켈강식과 멤브레인식 저장탱크가 지상식(above-ground) 또는 지중식(in-ground)으로 건설중에 있고 국내에서도 140,000m³급의 대형 액화천연가스 저장탱크가 현재 지상식으로 운영중에 있으며, 건설되고 있다. 9% 니켈강은 -162℃의 초저온 하중에 높은 인성과 강도성, 적은 열팽창계수, 그리고 우수한 가공성과 용접성으로 인해 1956년 미국의 ASTM과 1977년 일본의 JIS 규격으로 제정된 이래 LNG 저장탱크 재료로 폭넓게 사용되고 있다.

액화천연가스는 메탄을 주성분으로 하는 혼합가스로서 액화시키면 약 1/600로 부피가 압축되는 특성을 가지고 있기 때문에 압축하게 되면 운송과 저장측면에서 안전성과 효율성이 증가한다. 이러한 천연가스를 액화하여 저장하기 위한 지상식 저장탱크는 정수압, 풍압, 지진뿐만 아니라 초저온 온도하중에도 안전하게 응답해야만 하는데 일반적으로 액화천연가스의 정수압과 온도하중에 의한 설계 안전성을 검토하고 있다[1].

따라서 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 액화천연가스(LNG)가 충전되는 동안 발생할 수 있는 온도하중 조건에 의한 9% 니켈강식 내부탱크의 설계

안전성을 해석하고자 한다.

2. 해석모델 및 해석조건

9% 니켈강으로 제작된 내부탱크의 열하중 안전성 해석을 위하여 본 해석에서는 그림 1과 같이 1/4형태의 축대칭 모델을 사용하였다. 해석에 사용된 요소는 4개의 노드를 갖는 Bilinear Thin-shell 요소로서 복잡한 판 구조물뿐만 아니라 곡선형태의 셸에도 적합하며 비선형 해석에 특히 유용한 요소이다. 해석프로그램은 선형해석뿐만 아니라 비선형 해석에도 높은 정확도가 검증된 유한요소 상용 프로그램인 MENTAT/MARC7.3을 사용하였다[2]. 모델이 사용된 요소와 절점의 개수는 각각 5131개와 5261개이다.

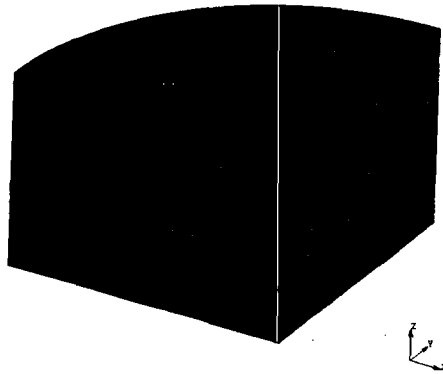


그림 1. 유한요소 해석모델

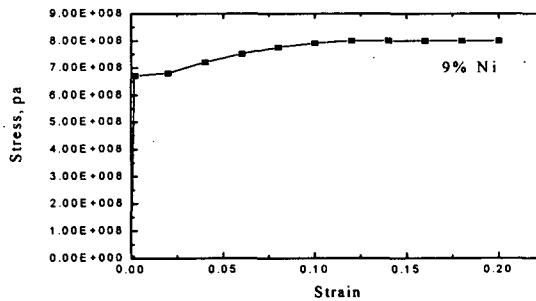


그림 2. 9% Ni강의 응력-변형률 곡선

그림 2는 LNG 저장탱크의 소재로 사용된 9% Ni강의 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 9% Ni강의 기계적-열적 특성값은 다음과 같다.

- | | |
|---|--|
| <p>① 기계적 특성값</p> <ul style="list-style-type: none"> • 영계수(E) : 191GPa • 밀도(σ) : 8,000kg/m³ • 포아송비(ν) : 0.3 • 항복응력(σ_y) : 670MPa • 극한응력(σ_u) : 800MPa | <p>② 기계적 특성값</p> <ul style="list-style-type: none"> • 열팽창계수 : $-9.2\mu\text{m/m} \cdot \text{K}(-200^\circ\text{C})$ • 열전도 : $16\text{W/m} \cdot \text{K}(-200^\circ\text{C})$ • 비열 : $510\text{J/kg} \cdot \text{K}(100^\circ\text{C})$ |
|---|--|

3. 해석 결과

3.1 저장탱크의 전체표면 온도가 균일하게 감소하는 경우

그림 3은 LNG 저장탱크에 LNG액이 채워지는 프로세스를 나타낸 그림이다. -162°C 의 초저온 LNG를 저장하기 위해서는 cool down 기간을 거쳐 저장탱크의 상층에서 그림과 같이 LNG액을 분무하면서 충전한다. 이때 초저온 온도하중에 의한 변형거동특성을 해석하기 위해서 본 해석에서는 저장탱크의 내부온도가 상온 20°C 에서 Cool down기간과 충전기간에 해당되는 $0, -40, -80, -120, -162^\circ\text{C}$ 로 완전하게 균일한 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 이때 내부온도 -162°C 인 경우는 LNG액이 충전된 경우에 해당되는데 LNG가 충전된 경우에 유체정압은 고려하지 않았다.

그림 4(a)는 저장탱크의 전체표면 온도가 상온 20°C 에서 -162°C 로 감소하여 일정할 때 LNG 저장탱크에서 발생한 변위량을 나타낸 그림이다. 저장탱크의 바닥면이 200:1의 기울기를 가지고 있는 Cone 형태이기 때문에 LNG액에 의한 수축으로 인하여 그림에서 보여주는 바와 같이 M자형태의 변형분포가 발생하는데 최대 변위량은 Annular plate와 Bottom plate의 경계면에서 수직방향으로 발생하였고, 벽면에서 저장탱크의 안쪽방향으로 가장 작은 변위량이 발생하였다.

그림 4(b)는 저장탱크의 전체표면 온도가 상온 20°C 에서 -162°C 로 일정할 때 LNG 저장탱크에서 발생한 회전량을 크기와 방향으로 표현한 그림이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 Annular plate를 제외한 Wall plate와 Bottom plate는 시계방향으로 회전하고 있고, Annular plate에서는 반시계방향으로 회전하고 있는데 특히 Annular plate와 Bottom plate의 경계면에서 가장 큰 회전량이 발생하였다.

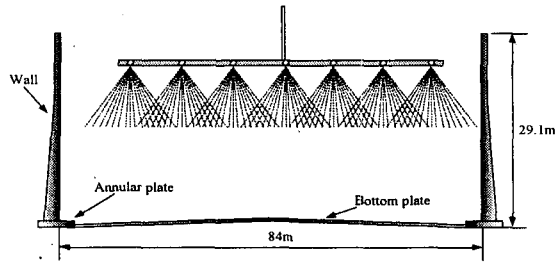
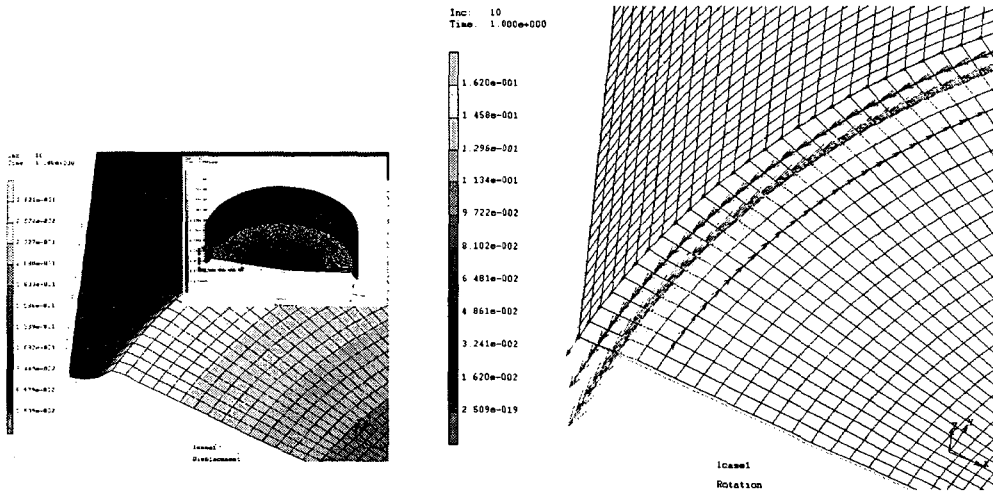


그림 3. LNG액의 충전 양상



(a) 변위량

(b) 회전량

그림 4. LNG 저장탱크의 전체표면 온도가 -162°C 로 일정할 때 저장탱크에서 발생한 변위량과 회전량 분포

그림 5는 이와 같이 LNG액의 냉각에 의해 저장탱크에서 발생한 최대 변위량과 최대 회전량을 저장탱크의 표면온도에 따라 나타낸 그림이다. 저장탱크의 표면온도가 상온 20°C 에서 0°C 로 감소할 때 각각 0.073m 와 1.75° 가 발생한 이후 저장탱크의 온도가 감소함에 따라 완만하게 상승하여 저장탱크의 표면온도가 -162°C 로 감소하면 각각 0.282m 와 9.28° 로 상승하였다.

그림 6은 LNG 저장탱크의 전체표면 온도가 각각 0°C 와 -162°C 일 때 저장탱크에서 발생한 von Mises 응력분포를 보여주는 그림으로서 최대 응력은 저장탱크의 코너부분에서 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 6(a)에서 최대 응력분포는 저장탱크의 벽면 아랫부분과 Annular plate에 걸쳐서 발생하는데 반함 그림 6(b)에서 발생한 최대 응력 분포는 Annular plate의 끝단에서 발생하였다. 즉 저장탱

크의 표면온도가 낮아질수록 최대 von Mises 응력이 발생하는 위치가 저장탱크의 Annular plate 끝단으로 이동한다.

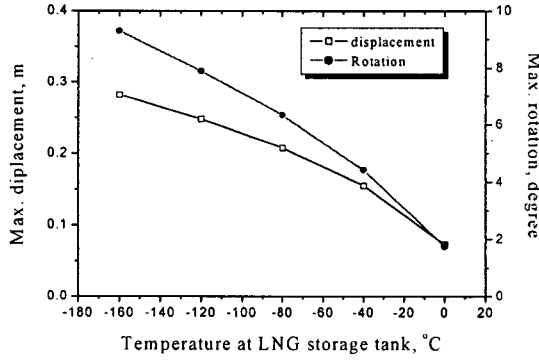
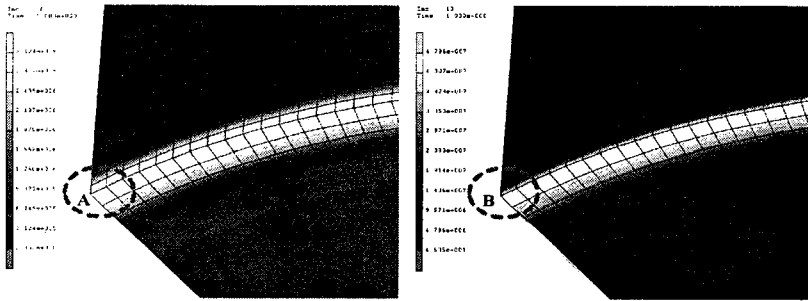


그림 5. LNG 저장탱크의 전체표면 온도가 균일하게 감소할 때 저장탱크에서 발생한 최대 변위량과 최대 회전량



(a) 저장탱크의 표면온도 : 0°C (b) 저장탱크의 표면온도 : -162°C

그림 6. LNG 저장탱크에서 발생한 von Mises 응력 분포

그림 7은 이와 같이 LNG액의 냉각에 의해 저장탱크에서 발생한 최대 von Mises 응력과 최대 변위량을 저장탱크의 표면온도에 따라 나타낸 그림이다. 최대 von mises 응력은 위에서 언급한 바와 같이 Annular plate와 Wall plate가 만나는 코너부에서 발생하였고, 최대 변위량은 Annular plate와 Bottom plate가 만나는 부분에서 발생하였다. 온도가 상온 20°C에서 0°C~-162°C로 감소할수록 거의 선형적으로 상승하였다.

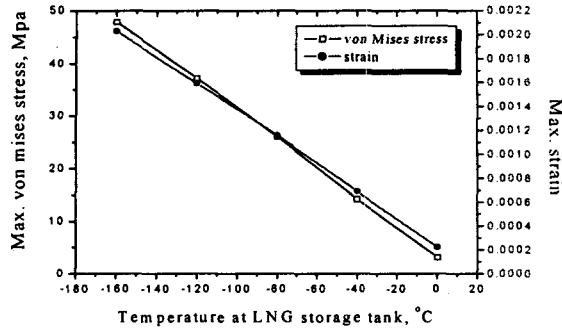


그림 7. LNG 저장탱크의 전체표면 온도가 균일하게 감소할 때 저장탱크에서 발생한 최대 von Mises 응력과 최대 변형률

3.2 저장탱크의 벽면온도가 -80°C 로 일정하고 바닥면에 LNG액이 채워지는 경우

LNG액은 액화되면 부피가 1/600로 줄어들기 때문에 운송 및 저장이 용이하여 운송 및 저장할 때 용이한 장점이 있다. 그러나 LNG액은 공기보다 가벼워 누출되면 대기중으로 날아가는데 이때 액화할 때와 반대로 600배로 팽창하게 된다. 따라서 상온에서 -162°C 의 LNG 액을 저장탱크에 저장할 때 LNG가 공기중으로 기화하지 않도록 N_2 를 이용하여 저장탱크를 냉각하는데 이 기간을 질소치환 기간이라고 한다. 이와 같이 질소치환 기간을 거치게 되면 저장탱크는 LNG액을 저장하기에 알맞은 온도로 냉각하게 된다. 그림 8은 저장탱크의 액위가 높아지면서 LNG액이 저장탱크에 미치는 영향을 파악하기 위한 해석 모델로서 질소치환기간을 거친 후 저장탱크에 LNG액이 저장되는 모습을 나타낸 그림이다. 저장탱크의 바닥면은 200:1의 기울기를 가진 cone형상이기 때문에 그림 3과 같이 LNG액이 충전되면서 저장될 때 그림 8과 같이 저장탱크의 가장자리부터 차게 된다. 이때 저장탱크의 벽면온도는 -80°C 로 일정하다고 가정하였고, 액위를 h , 바닥의 중심에서 LNG액의 경계까지를 d 로 표현하였다. 본 논문에서는 Table 1과 같이 LNG액에 의한 극저온이 저장탱크에 미치는 영향을 해석하기 위해 LNG의 저장량이 증가하면서 d/R 의 비가 100, 90.4, 74.4, 50.5, 35, 0%가 되어 최대 0.21m까지 차오르는 경우에 대해 해석하였다.

그림 9는 LNG액이 저장탱크에 채워지면서 탱크의 바닥면의 온도를 저장탱크의 중심으로부터 LNG액의 경계까지 거리로 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 case1의 경우는 바닥면의 온도가 -80°C 로 균일한데 이것은 LNG액이 전혀 없는 것을 의미하며, case6과 같이 바닥면의 온도가 -162°C 로 균일한 것은 바닥면의 중심높이까지 LNG액이 채워진 것을 의미한다.

그림 10은 저장탱크의 바닥면에서 발생한 변위량을 저장탱크의 중심으로부터 LNG액의 경계까지 거리로 나타낸 그림으로서 중심으로부터 LNG액의 경계가 42m, 39m 또는 0m와 같이 LNG액이 완전히 없거나 Annular plate에만 있는 경우, 완전히 바닥면을 채운 경우는 최대 변위량이 Annularplate와 bottom plate의 경계에서 발생하는 것을 알 수 있다.

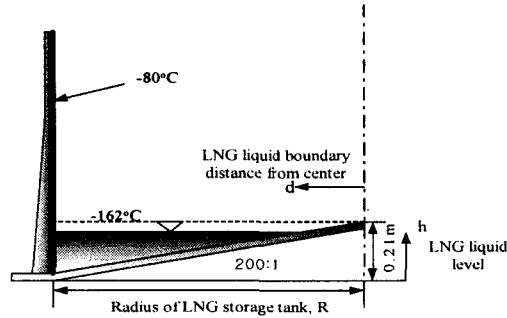


그림 8. 저장탱크의 벽면온도가 -80°C 로 일정할 때 저장탱크의 바닥에 LNG액이 채워지는 모습

Table 1. LNG 저장탱크 바닥면의 온도조건이 저장탱크에 미치는 영향에 관한 해석조건

	LNG liquid boundary from center(d), m	LNG liquid level from Bottom(h), m	d/R, %
Case1	42	0	100
Case2	39	0.015	92.9
Case3	32	0.05	74.4
Case4	21	0.105	50.5
Case5	15	0.135	35
Case6	0	0.21	0

그러나 LNG 액이 점점 채워지면서 Annular plate의 경계를 지나 Bottom plate를 적시면 Bottom plate의 LNG 액의 경계면에서 최대변위량이 발생한다. 이와 같은 해석결과는 LNG액이 채워지는 과정에서 저장탱크의 바닥면이 LNG액의 온도에 따라 심하게 거동함을 의미한다.

그림 11은 저장탱크의 바닥면에서 발생한 von Mises 응력을 저장탱크의 중심으로부터 LNG액의 경계까지 거리로 표현하였다. 그림에서 알 수 있듯이 LNG액이 채워지면서 나타나는 LNG액의 경계선에서 최대 응력이 발생하는데 이것은 LNG액의 경계선에서 온도차에 의한 열응력이 최대가 되기 때문이다. 또한 LNG액이 채워지는 과정동안 최대 응력은 LNG액이 Annular plate의 폭에 접

수해 있을 때 LNG액의 경계선에서 발생하지만 LNG액이 채워지면서 최대 응력은 저장탱크의 벽면과 바닥면의 경계에서 발생하며 크기는 점점 감소하게 된다. 그러나 LNG액이 바닥면을 완전히 적시게 되면 저장탱크의 벽면과 바닥면이 만나는 위치에서 최대 응력이 다시 상승하여 발생하게 된다.

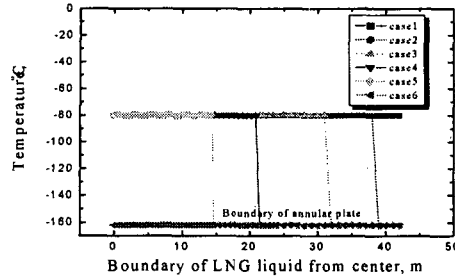


그림 9. LNG 액의 경계에 따라 저장탱크의 바닥면에서 반지름 방향으로 발생한 온도분포

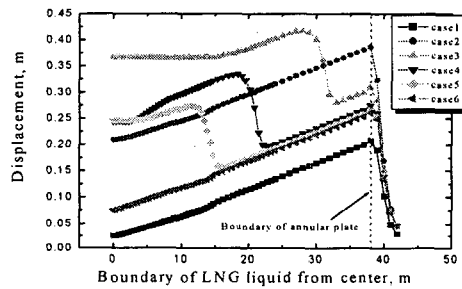


그림 10. LNG 액의 경계에 따라 저장탱크의 바닥면에서 반지름 방향으로 발생한 변위량 분포

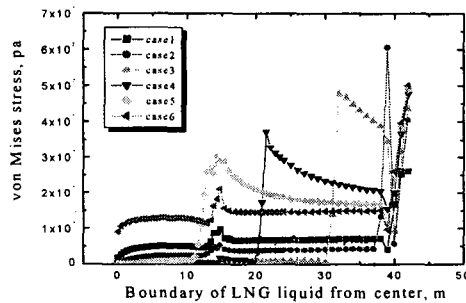


그림 11. LNG 액의 경계에 따라 저장탱크의 바닥면에서 반지름 방향으로 발생한 von Mises 응력 분포

4. 결론

LNG를 충전하기 전 단계인 Cool down 기간이나 충전하는 동안 저장탱크의 바닥면의 변형거동은 온도에 민감하게 반응한다. Cool down 기간과 같이 내부탱크의 온도가 균일하게 냉각되는 경우는 두께가 24mm인 Annular plate와 5mm두께의 Bottom plate가 만나는 경계에서 온도에 민감하다. 한편, LNG액이 충전되는 과정에서 내부탱크의 바닥면 액위에 따라 온도분포가 달라지면 LNG액의 경계를 따라 응력과 변위량이 다른 지역에 비하여 높게 발생하는데 Cool down 경우와 마찬가지로 Annular plate와 Bottom plate의 경계에서 가장 큰 열변형 거동과 응력이 발생한다. 특히 LNG액의 액위가 0.015m 즉, Annular plate만을 채운 경우에 경계에서 가장 큰 응력이 발생한다. 그러나 -162℃의 초저온 온도하중에 의한 열변형 거동은 소재의 탄성범위 내에서 발생하기 때문에 온도하중에 안전하다고 할 수 있다.

5. 참고문헌

- [1] 김청균 외, "완전방호식 LNG 저장탱크 내부탱크 구조물의 설계 안전성에 관한 연구", 2001 추계학술발표회 논문집, 한국가스학회, pp. 122-129, 2001.
- [2] "MARC user's manual," Version K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.