

내부탱크 저장 시스템에서 9% 니켈강재 구조물의 설계 안전성에 관한 연구

† 김 청 균 · 최 동 열
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터
(2001년 11월 5일 접수, 2001년 11월 20일 채택)

Design Safety Analysis of 9% Nickel Steel Structure in Inner Tank Storage System

Chung Kyun Kim and Dong Yul Choi
Tribology Research Center, Hongik University
(Received 5 November 2001 ; Accepted 20 November 2001)

요 약

본 연구에서는 9% 니켈강재로 제작된 완전 방호식 내부탱크 구조물의 설계 안전성 문제를 유한요소법으로 해석하고자 한다. 내부탱크 구조물에 대한 수치적 해석결과에 의하면 내부탱크에 부착된 톱가더와 스티프너는 내부탱크의 변형율과 응력을 제어하는 중요한 역할을 하고 있다. 내부탱크에 작용하는 여러 하중에서 초저온 액체에 의한 유체정압은 -162°C 의 초저온 온도하중보다 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그러나, 내부탱크에 작용하는 자중량 좌굴하중에 의한 영향은 내부탱크 구조물이 충분한 강도로 이미 설계되어 있으므로 대단히 작게 나타났지만, 특히 톱가더나 스티프너의 역할은 미미한 것으로 나타났다.

Abstract - This paper presents the design safety analysis of the inner tank structure, which is manufactured by 9 percent nickel steel sheets in the full containment type LNG storage tank. The FEM computed results indicate that top girder and several stiffener rings of the inner tank play an important role for controlling the deformation and stress intensity of the inner tank structure. The hydrostatic pressure due to cryogenic fluids gave more influential to the deformation of the inner tank wall compared with that of a cryogenic temperature of -162°C . But, the deformation and stress of the inner tank, which is produced by the buckling loads, are very small because the external load is not applied to the top of the inner tank. This indicates the role of top girder and stiffener rings of the inner tank model is not important in full containment LNG storage tank.

Key words : Inner Tank, LNG Storage Tank, Design Safety, Top Girder, Stiffener

1. 서 론

메탄을 주성분으로 하는 LNG를 안전하게 저장하기 위한 저장탱크는 초저온 특성이 우수한 소재를 사용하여 특별한 성능을 보장할 수 있는 안전설계와 엄격한 제작공정에 의해 건설된다. 특히, -162°C 의 초저온 액체와 직접 접촉하는 내부탱크는 9% 니켈강재와 같이 초저온

특성이 우수한 재질을 사용하여야 하고, 초저온 하중을 포함한 여러 가지 외부하중에 대해 안전 구조물 역할을 담당해야 한다.

내부탱크는 초저온 액체를 안전하게 보관하고, 가스나 액체의 누설이 발생되지 않도록 해야 하며, 동시에 각종 하중에 견딜 수 있는 구조물로 제작되어 LNG 저장탱크 시스템으로써의 안전성을 충분히 확보할 수 있어야

한다. 이러한 내부탱크 구조물을 안전하게 제작하기 위해서는 초저온 특성이 대단히 우수한 9% 니켈강재 후판(thick plate)으로 제작한 방호식의 LNG 저장탱크(containment type LNG tank)와 변형거동 특성이 우수한 스테인레스 박판(thin plate)으로 제작한 멤브레인식의 LNG 저장탱크(membrane type LNG storage) 두가지 모델이 채택하고 있다.^[1]

9% 니켈강재의 방호식 내부탱크는 소재의 초저온 특성에 크게 의존하므로 내부탱크의 안전성을 확보하기 위해서는 두께(저장탱크의 저장용량이 140,000m³인 경우는 최대 25.1cm의 두께를 설계됨)를 두껍게 설계해야 한다. 그러나, SUS 304L 소재로 제작된 멤브레인식 저장탱크는 2mm 이하의 박판으로 제작되므로 건설비용이 저렴하다는 특성이 있지만, 설계 고유기술개발과 제작공정이 어렵기 때문에 이들 두가지 내부탱크 모델은 LNG 저장탱크 건설단계에서 항상 경쟁 관계에 있다.

내부탱크는 일반적으로 유체정압(hydrostatic pressure), 초저온 하중(cryogenic load), 가스압(gas pressure), 롤오버 하중(rollover load), 지진하중(seismic load) 등의 영향을 받지만, 정상상태의 작동조건에서는 유체정압과 초저온 하중에 의한 안정성 검토가 지배적이기 때문에 이에 대한 내부탱크의 설계 안전성에 대하여 고찰하고자 한다. 내부탱크는 LNG를 안전하게 저장하고 운전하기 위해서 각종 하중에 충분히 견딜 수 있는 구조물로 제작되고, 내부탱크 벽면의 내외부에는 톱가더(top girder)와 스티프너(stiffener)를 설치하여 추가적인 안전성을 확보토록 설계한다. 따라서, 본 논문에서는 내부탱크 시스템에 대한 설계 안전성을 유한요소해석 프로그램인 MARC^[2]를 사용하여 해석하고자 한다.

2. 소재 및 해석조건

2.1. 사용소재

본 해석에 사용된 내부탱크 재료 9% 니켈강은 Table 1에서 제시한 것처럼 -162℃의 초저온 하중과 기계적 하중을 충분히 지지할 수 있는 우수한 인성과 고강도성, 대단히 작은 열팽창 특성을 갖고 있다. 또한, 재료의 가공성과 용접성도 우수하기 때문에 미국에서는 1956년에 ASTM 규격으로, 그리고 일본에서는 1977년에 JIS 규격으로 각각 정하였고,

지금은 국내에서 건설되는 LNG 저장탱크의 내부탱크 소재로 널리 사용하고 있다.

2.2. 작동조건

내부탱크의 측벽면에서 발생할 수 있는 변형과 좌굴 안정성을 확보하기 위해 내부탱크의 상단부에는 T-형상의 톱가더를 설치하고, 내부탱크의 상단부에서 중간부로 내려가면서 T-형상 또는 L-형상의 스티프너를 Fig. 1과 같이 여러 개를 설치한다.

본 해석에서는 T850×400×15/25 크기의 톱가더를 내부탱크의 상단부에 1개 설치하고, 내부탱크의 상단부로부터 중간부를 따라서 발생하는 변형과 좌굴에 의한 안전성을 해결하기 위해서 L200×90×9/14 크기의 스티프너를 5~8 정도 내부탱크의 내벽 또는 외벽에 설치하는 것이 일반적이다.^[3]

LNG 내부탱크에 작용하는 하중은 Fig. 2(a)에서 보여주는 것과 같이 LNG 자중량에 의한 유체정압과 Fig. 2(b)에서 제시한 -162℃의 초저온 액체에 의한 온도하중 두가지로 나누어 고찰할 수 있다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1. 변형거동 해석

(1) 보강링이 없는 내부탱크

Figs. 3과 4는 Fig. 1에서 보여준 톱가더나 스티프너와 같은 보강링을 설치하지 않은 내

Table 1. Physical and thermal properties of inner tank.

| Material type | 9% Ni |
|--|-----------------------|
| Elastic modulus, Pa | 2.1×10 ¹¹ |
| Poisson's ratio | 0.3 |
| Mass density, kg/m ³ | 8,000 |
| Thermal expansion coefficient at -200℃, μm/m·K | -9.2×10 ⁻⁶ |
| Thermal conductivity at -200℃, W/m·K | 16 |
| Specific heat at 100C, J/kg·K | 510 |

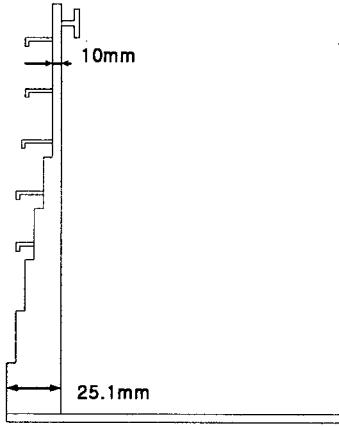
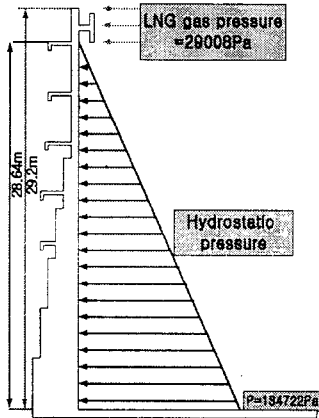
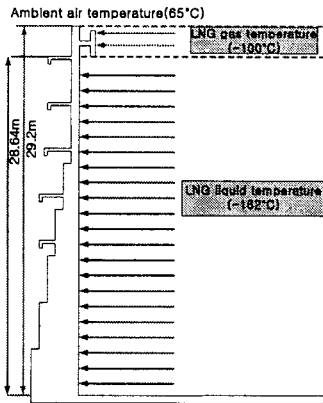


Fig. 1. Top girder and stiffener rings of the inner tank.

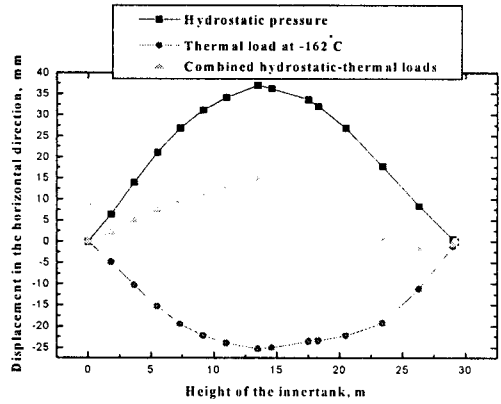


(a) Hydrostatic pressure

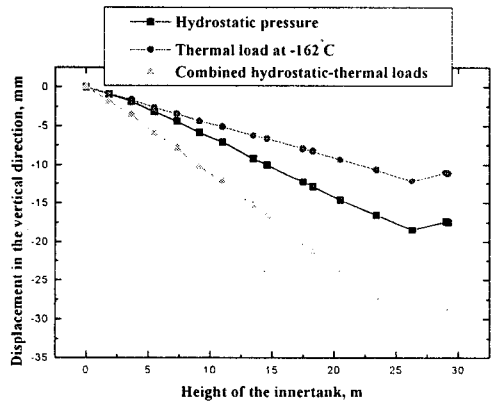


(b) Thermal load

Fig. 2. Applied loadings for inner tank.



(a) Horizontal direction



(b) Vertical direction

Fig. 3. Displacement of the inner tank without top girder and stiffener rings.

부탱크에 세가지 하중, 즉 유체정압, 초저온 하중, 유체정압과 초저온 하중이 동시에 작용하는 경우에 대한 변위량에 대한 해석결과를 제시하고 있다.

보강링이 없는 경우에 발생하는 변위량을 보여준 Fig. 3의 해석결과에 의하면, 유체정압에 의한 내부탱크 측벽면의 변형량이 -162°C 의 초저온 하중에 의한 변형량보다 크게 발생하고 있음을 제시한다. 즉, Fig. 3(a)에서 유체정압에 의한 수평방향의 팽창 변위량 38.6mm 는 -162°C 의 초저온 온도하중에 의해 발생된 수축 변위량 25.3mm 에 비해 1.52 배 이상 크게 발생되고, 유체정압과 온도하중이 동시에 작용하는 정상상태에 비해서는 2.57배로 크게 발생하기 때문에 내부탱크는 유체정

압과 초저온 하중이 동시에 작용하는 경우의 내부탱크보다 더 안전하다고 할 수 있다. 이러한 해석 데이터는 9% 니켈강으로 제작된 저장탱크에서 유체정압에 의한 내부탱크의 변형문제가 -162°C의 초저온 하중에 의한 열 변형 문제보다 더욱 크다는 사실은 9% 니켈강재의 초저온 특성이 대단히 우수하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 초대형 LNG 저장탱크의 안전성을 보장하기 위해서는 유체정압에 의한 최대 변위량과 초저온 액체에 의한 최대 변위량 진폭을 가능한 작게 설계하는 것이 대단히 중요하고, 이것은 피로강도에 의한 안전성 문제와 연결되기 때문에 중요한 안전 파라미터가 된다. 이러한 안전설계를 위해서는 가능한 저장탱크의 높이를 낮게 유지하거나, 또는 최대 변위량이 발생하는 위치에 톱가더나 스티프너와 같은 여러 가지 형태의 안전 구조물을 설치하여 내부탱크의 변위량 발생을 적극 억제할 수 있도록 설계하는 것이 필요하다.

또한, 수직방향의 수축 변위량을 나타낸 Fig. 3(b)의 해석결과에 의하면 유체정압과 초저온 하중이 동시에 작용하는 경우에 발생하는 최대 변위량 30mm는 초저온 온도하중에 의해 발생하는 최대 변위량 11.1mm에 비하여 2.7배 정도로 크게 수축되고, 유체정압에 의해 발생하는 최대 변위량 17mm에 비해서는 1.76배로 중간 정도의 변위량을 나타낸다. 이러한 해석결과는 수직방향의 수축량이 모든 하중조건에 대하여 항상 수축되는 방향으로 축적되기 때문이다. 즉, 수직방향의 변위량은 내부탱크 구조물의 측면면이 주저앉은 형태의 침하량으로 나타나지만, 수직방향의 변형량은 바닥면의 지반에 의해 충분히 지지되므로 안전성에는 전혀 문제가 될 수 없다.

(2) 보강링이 있는 내부탱크

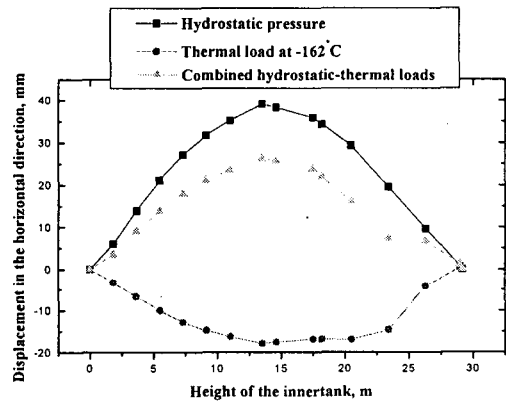
Fig. 4는 Fig. 1의 모델처럼 톱가더와 스티프너가 설치된 내부탱크에 대한 변형 거동량 해석결과로 보강링이 없는 경우의 해석결과와 유사한 변형거동 패턴을 보여주고 있다.

즉, 수평방향으로 팽창된 변위량을 나타낸 Fig. 4(a)의 해석결과에 의하면, 유체정압에 의해 발생된 변위량은 38.3mm로 가장 크게 팽창되었고, 초저온 액체에 의한 변위량은 17.9mm로 수축되지만 보강링이 설치 안된 경우와 마찬가지로 유체정압에 의한 팽창 변

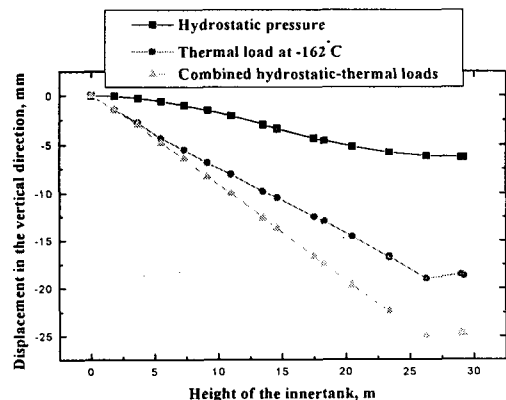
형량이 보다 큰 문제로 대두되고 있음을 알 수 있다. 또한, Fig. 4(b)에서 제시한 수직방향의 수축 변위량은 최대 23mm로 Fig. 4(a)의 수평방향 팽창 변위량 38.3mm과 비교하면 66.5%에 해당하는 것으로 크게 안정된 값으로 문제가 되지 않는다.

3.2. 좌굴 안전성 해석

내부탱크에 작용하는 수직방향의 하중은 자중량과 톱가더나 스티프너와 같은 보강링에 의해 지지되는 단열재의 일부 자중량을 고려할 수 있는데, 본 연구에서는 Table 2에서 제시한 좌굴하중(니켈강재의 자중량)에 의해 발생하는 좌굴 안전성에 대한 해석을 하였다.



(a) Horizontal direction

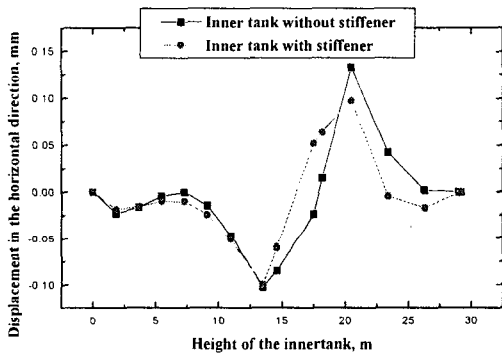


(b) Vertical direction

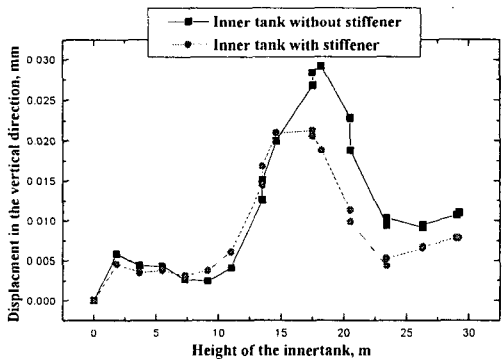
Fig. 4. Displacement of the inner tank with top girder and stiffener rings.

Table 2. Gravitational load along the height of inner tank wall.

| Height, m | Gravitational load, N |
|-----------|-----------------------|
| 0 | 9246401.92 |
| 3.65 | 7351450.4 |
| 7.3 | 5705744.24 |
| 10.95 | 4559529.8 |
| 14.6 | 3660272.56 |
| 18.52 | 2905668.84 |



(a) Horizontal direction



(b) Vertical direction

Fig. 5. Displacement of the inner tank with and without safety enforced rings.

Fig. 5(a)의 해석결과에 의하면 튱거더나 스티프너 구조물이 없는 경우에 수평방향으로 발생된 변형량은 최대 0.133mm가 팽창되고, 0.098mm가 수축되는 변형거동 패턴을 보여주고 있다. 이 때에 발생된 최대 좌굴 변동

폭은 0.231mm이지만 유체동압이나 -162°C 의 온도하중에 비해서는 극히 작은 변형 거동량이다. 그러나, 보강링이 설치된 경우의 수평방향 변형량은 최대 0.103mm가 팽창되고, 0.1mm가 수축되는 변형패턴을 보여주며, 이들의 최대 좌굴 변동폭은 0.203mm를 나타낸다. 결국 보강링이 설치한 저장탱크의 수평방향 좌굴 안전성은 보강링을 설치하지 않은 경우에 비하여 약 13.8% 더 안정됨을 알 수 있다.

Fig. 5(b)는 Table 2의 좌굴하중에 의해 수직방향으로 발생된 변형량을 나타낸 결과이다. 보강링이 없는 경우는 1차 좌굴모드에서 0.003mm가 수축되는 변형 패턴을 보여준다. 그러나, 보강링이 설치된 경우의 수직방향 변형량은 1차 좌굴모드에서 최대 변위량 0.0213mm가 수축되고, 2차 좌굴모드에서 0.003mm가 수축되는 작은 좌굴변형 패턴을 보여준다.

내부탱크의 자중량에 의한 좌굴은 튱거더나 스티프너 링의 설치 유무에 관계없이 작게 발생되고, 보강링이 설치한다 해도 14% 이내로 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 해석 데이터는 내부탱크 구조물이 거대하다는 것을 고려하면 기존의 튱거더와 스티프너에 의한 안전 구조물 설계를 탄성 에너지 흡수력이 우수한 스프링 지지방식⁴⁾으로 설계변경을 시도할 필요가 있다.

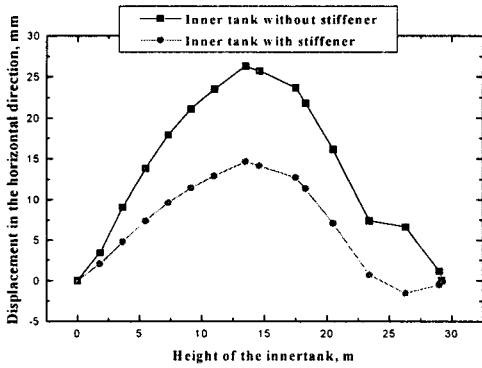
3.3. 보강링 설치 유무에 따른 내부탱크의 설계 안전성 해석

(1) 변형거동 및 응력특성

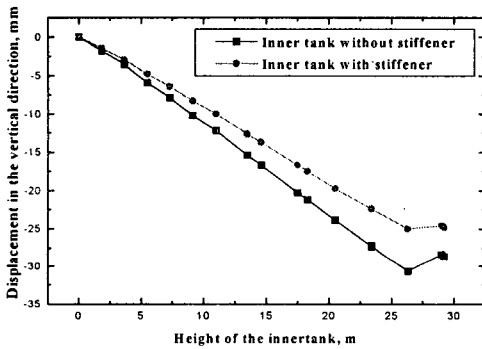
앞에서 제시한 유한요소해석 결과에 의하면, 내부탱크의 측벽면에는 튱거더와 스티프너의 설치 유무에 따라 내부탱크 구조물의 설계 안전성에 다음과 같은 특징적 차이점을 제시하고 있다.

Fig. 6(a)는 내부탱크에 유체정압과 -162°C 의 초저온 하중이 동시에 작용한다고 가정할 경우에 수평방향의 팽창 변형 거동량을 제시한 결과로 보강링을 설치한 경우가 설치하지 않은 경우에 비하여 약 34%(9.4mm) 줄어든 설계 안전성을 보여주고 있다. Fig. 6(b)는 유체정압과 -162°C 의 초저온 하중이 동시에 작용하는 내부탱크에 대한 수직방향의 수축 변위량 특성으로 보강링을 설치한 경우가 보강링을 설치하지 않은 경우에 비하여 약 23%(7mm) 줄어든 안전성을 보여주고 있다. 이러한 해석결과는 9% 니켈강으로 제작된 내부탱크 구조물이 안전성을 확보하기 위해

서는 톱가더나 스티프너와 같은 안전 구조물을 설치하는 것이 바람직하다는 것이다.



(a) Horizontal direction



(b) Vertical direction

Fig. 6. Displacement of the inner tank with and without top girder and stiffener rings.

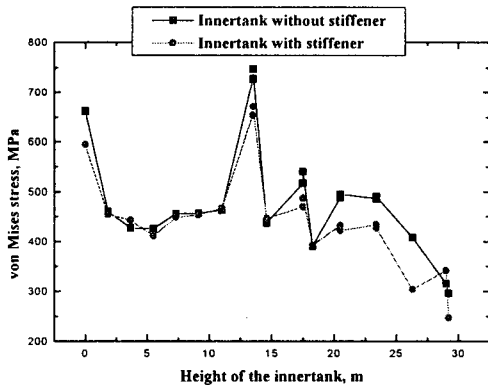


Fig. 7. von Mises stress distribution with and without top girder and stiffener rings.

Fig. 7은 유체정압과 -162°C 의 초저온 하중이 동시에 작용하는 내부탱크에 대한 응력거동 특성으로 보강링을 설치한 경우가 보강링을 설치하지 않은 경우에 비하여 탱크 중간부에 약 9.3%(64MPa) 줄어든 안전성을 보여준다. 그러나, 이러한 해석결과를 응력거동 해석 측면에서 보면 9% 니켈강으로 제작된 내부탱크의 응력 안전성을 확보하기 위해서 톱가더나 스티프너와 같은 안전 구조물을 설치하지만, 변위 거동량 측면보다는 별다른 영향을 주지 못하고 대단히 안정된 설계라는 사실을 알 수 있다.

(2) 좌굴 특성

9% 니켈강재의 내부탱크 측벽면에 설치된 톱가더와 스티프너 링은 좌굴 안정성에 별다른 영향을 주지 못하는 구조물이라는 사실이다. 그러나, 저장탱크 용량이 $140,000\text{m}^3$ 일 경우에 내부탱크는 직경 8.5m, 높이 29.2m, 최대 두께 25.1cm인 초대형 구조물로 제작된다는 측면을 고려하면, 비록 좌굴 발생량이 작게 나타났다고 할지라도 좌굴에 관련된 새로운 타입의 안전 구조물, 즉 스프링 지지 안전장치를 도입할 필요성이 있다.

4. 결 론

9% 니켈강재로 제작된 내부탱크 구조물의 안전성은 유체정압에 의한 영향이 가장 크지만, -162°C 의 초저온 액체에 의한 영향도 무시할 수는 없다. 그러나, 일반적으로 LNG 저장탱크는 유체정압과 초저온 하중이 동시에 작용하므로 유체정압이나 초저온 하중이 단독으로 작용하는 경우보다는 설계 안전성이 상대적으로 증가한다. 또한, 톱가더와 스티프너 링 구조물을 내부탱크에 설치할 경우는 내부탱크의 반경방향 변위량 발생을 억제하지만, 응력발생에는 별다른 영향을 주지 못하고 있다.

또한, 내부탱크의 자중량에 의해 발생한 좌굴은 대단히 작은 것으로 나타났고, 좌굴의 각 모드에서 계산된 좌굴 변동폭은 가능한 최대로 작게 설계하는 것이 안정됨을 알 수 있다. 내부탱크에 설치된 톱가더와 스티프너 링 구조물은 좌굴하중에 의한 변형량이나 응력에 별다른 영향을 주지 못하고 있다. 특히, 이러한 보강링 구조물은 좌굴 변위량이나 응력에 미치는 영향이 작기 때문에 설계 안전

성을 확보할 수 있는 새로운 기술개발이 필요함을 알 수 있다.

결국, 9% 니켈강으로 제작된 LNG 저장탱크의 설계 안전성은 좌굴에 의한 문제보다는 저장탱크에 작용하는 유체정압이나 초저온하중에 의한 탱크 구조물의 안전성을 검토하는 것이 더 중요하고, 차후에는 틱거더나 스틱프너보다 안전성이 향상된 새로운 보강링에 대한 기술개발이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 김청균, 김영규, "LNG 저장탱크의 현황과 동향," 가스안전지, 제18권, 제4호, pp.66-71, 1992.
2. "MARC user's manual," Version K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.
3. 포항종합제철(주), 9% Ni강의 품질특성, 1995.
4. 김청균, 실용신안출원번호 2001-4761, "액화천연가스 저장탱크" 2001.