

# 완전방호식 LNG 저장탱크 내부탱크 구조물의 설계 안전성에 관한 연구

최동열 · 김성원 · 김청균  
홍익대학교 트라이볼로지 연구센터

## A Study on the Design Safety of Inner Tank Structure in Full Containment LNG Storage Tank

Dong Yul Choi · Sung Won Kim · Chung Kyun Kim  
*Tribology Research Center, Hongik University*

### 1. 서론

초저온 상태의 액체를 안전하게 저장하기 위해서는 저온특성이 대단히 우수한 소재를 사용하여 특별한 성능을 보장할 수 있는 설계와 엄격한 제작공정에 의해 LNG 저장탱크는 건설된다. 특히,  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체와 직접 접촉하는 내부탱크는 초저온 특성이 우수한 재질을 사용하여야 하고, 초저온 하중을 포함한 여러 가지 하중에 안전 구조물 역할을 담당해야 한다.

내부탱크는 초저온 액체를 안전하게 보관하고, 누설발생(가스와 액체)이 없도록 해야 하고, 동시에 각종 하중에 견딜 수 있는 구조물로 제작되어 저장탱크 시스템의 안전성을 확보할 수 있도록 제작되어야 한다. 이러한 안전 구조물을 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 모델을 채택하고 있다.

9% 니켈강재의 방호식 내부탱크는 소재의 초저온 특성에 의존하므로 내부탱크의 안전성을 확보하기 위해서는 두께(저장탱크의 저장용량이  $140,000\text{m}^3$ 인 경우 25.1cm의 두께를 갖음)를 급격하게 증가시키기 때문에 발생하는 특징이 있고, 2mm 이하의 두께를 갖는 SUS 304L 소재로 제작된 멤브레인식 저장탱크는 건설비용이 저렴하다는 특성이 있지만 설계 고유기술개발과 제작공정이 대단히 어렵기 때문에 이들 두가지 내부탱크 타입은 LNG 저장탱크 건설에서 항상 경쟁 관계에 있다.

내부탱크는 LNG에 의한 유체정압, 초저온 하중, 가스압, 물오버 하중, 지진하중에 영향을 받지만, 특별한 위험 사항이 발생하지 않는 한 유체정압과 초저온 하중에 대한 안정성 검토가 일반적이다. 내부탱크는 LNG를 안전하게 저장하기 위해서 각종 하중에 충분히 견딜 수 있는 구조물로 제작된 내부탱크에 튜가더와 스티프너를 추가로 설치한다. 본 논문에서는 내부탱크의 형상이 T-형상의 튜가더와 스티프너가 설치된 내부탱크와 그렇지 않은 내부탱크에 대해 설계 안전성을 유한요소법으로 해석하고자 한다.

### 2. 해석조건

#### 2.1 사용소재

차림식을 채택하고 있는 완전 방호식 저장탱크는 LNG와 직접 접촉하는 내부탱크에는 9% 니

켈강 소재를 널리 사용하며, Table 1은 본 해석에 사용된 내부탱크 재료인 9% 니켈강으로 -162°C의 초저온 하중에 기계적 특성을 유지할 수 있는 우수한 인성과 고강도성, 대단히 작은 열팽창 계수, 재료의 가공성과 용접성이 우수하기 때문에 미국에서는 1956년에 ASTM 규격으로, 일본에서는 1977년에 JIS 규격으로 정하여 LNG 저장탱크에 사용되고 있다.

Table 1. Physical and thermal properties of inner tank

Material type	9% Ni
Young's modulus, Pa	$2.1 \times 10^{11}$
Poisson's ratio	0.3
Mass density, kg/m <sup>3</sup>	8000
Thermal expansion coefficient at -200°C, $\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$	$-9.2 \times 10^{-6}$
Thermal conductivity at -200°C, W/m · K	16
Specific heat at 100C, J/kg · K	510

## 2.2 작동조건

Fig. 1에서 9% 니켈강으로 제작된 내부탱크의 최상단부 변형과 좌굴 안정성을 확보하기 위해 T-형상의 톱가더(Top-girder)를 설치한다. 톱가더는 T-형상 또는 L-형상으로 설계하는데, 본 해석에서는 T850×400×15/25 가더를 내부탱크의 상단부에 1개 설치하였다. 내부탱크의 상단부와 중간부의 변형과 좌굴에 의한 안전성을 해결하기 위해 5~8 정도의 스티프너(Stiffener)를 내부탱크의 내벽이나 외벽에 용접으로 설치한다. 여기서는 L200×90×9/14의 스티프너를 5개 설치한 내부탱크 모델에 대하여 해석하였다.

내부탱크의 측벽면에 스티프너 링을 설치해야 하는 간격은 다음과 같은 식으로 계산된다. 즉,

$$L = \frac{2.6 E_m (t/D)^{5/2} \times D}{P_{cr}} + 0.45 D^{1/2} t^{1/2}$$

여기서,

$L$  = 스티프너 링의 부착간격

$$P_{cr} = 2P = 2 \times 1.676 \times 10^{-3} = 3.352 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$$

$t$  = 내부탱크 측벽면의 평균두께

$$E_m = \text{탄성계수} = 191.24 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$D$  = 내부탱크 직경 = 8,400 cm

LNG 내부탱크에 작용하는 하중은 Fig. 2(a)에서 제시한 LNG 자중량에 의한 유체정압(Hydrostatic pressure)과 Fig. 2(b)의 -162°C 초저온 액체에 의한 온도하중 두가지로 나누어 검토할 수 있다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 보강링이 없는 저장탱크

Figs. 3(a)와 (b)는 보강링이 없는 저장탱크에서 하중(유체정압, 초저온 하중, 유체정압과 초저

은 하중을 동시에 고려한 세가지 경우)이 작용할 경우에 대해 해석한 수평방향과 수직방향의 변위량을 각각 보여주고 있다. 수평방향의 변위량을 나타낸 Fig. 3(a)의 해석결과에 의하면, 초저온 액체에 의해 발생하는 유체정압이 내부탱크 측벽면에 작용할 경우 발생된 팽창 변위량 38.6mm는  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 온도하중에 의해 발생하는 수축 변위량 25.3mm에 비해 1.52배 이상 크게 발

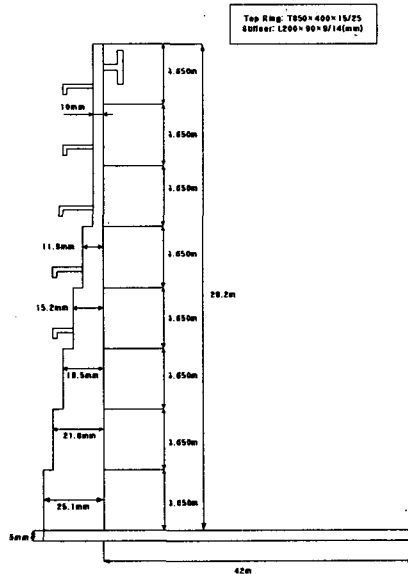
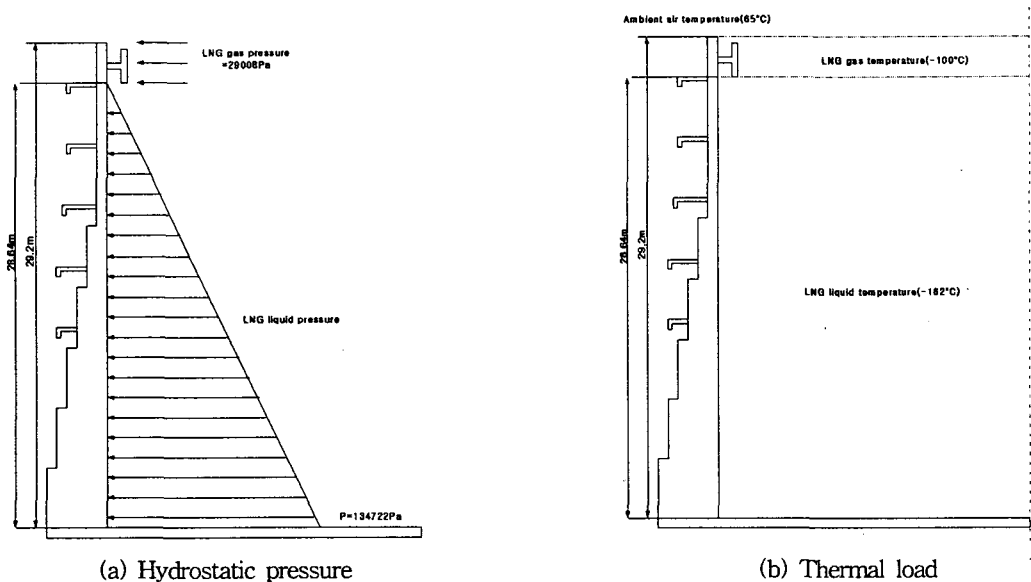


Fig. 1 Top girder and stiffener of inner tank



(a) Hydrostatic pressure

(b) Thermal load

Fig. 2 Applied loadings in inner tank

생되고, 유체정압과 온도하중을 동시에 고려한 정상상태에 비해서는 2.57배로 크게 발생하기 때문에 유체정압과 초저온 하중이 동시에 작용하는 정상작동에서는 저장탱크가 안전성 측면에서 보다 유리함을 알 수 있다.

본 해석 데이터에 의하면 9% 니켈강으로 제작된 저장탱크에서는 초저온 액체인 유체정압에 의한 내부탱크의 변형문제가  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 하중에 의한 열변형 문제보다 더욱 크다는 사실은 9% 니켈강재의 초저온 특성이 대단히 우수하기 때문이다. 그래서 초대형 LNG 저장탱크의 안전성을 보장하기 위해서는 유체정압에 의한 최대 변위량과 초저온 액체에 의한 최대 변위량 진폭을 작게 설계하는 것이 대단히 중요하고, 이것은 피로강도에 의한 문제와 연결되기 때문에 안전설계를 해야 한다. 이러한 안전설계를 위해서는 가능한 저장탱크 높이를 낮게 유지하거나, 또는 최대 변위량이 발생하는 위치에 톱가더나 스티프너와 같은 좌굴하중 안전 구조물보다는 내부탱크의 변위량 발생을 적극 억제할 수 있는 보강된 안전 구조물을 설치하는 것이 필요하다.

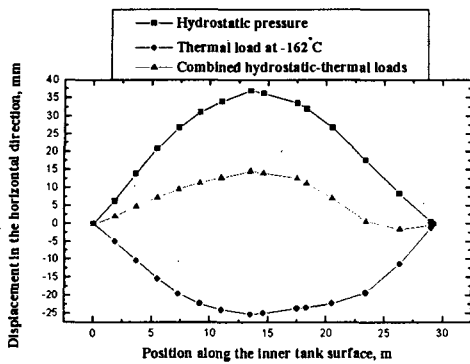
또한, 수직방향의 수축 변위량을 나타낸 Fig. 3(b)의 해석결과에 의하면 유체정압과 초저온 하중이 동시에 작용하는 경우에 발생하는 최대 변위량 30mm는 초저온 온도하중에 의해 발생하는 최대 변위량 11.1mm에 비하여 2.7배 정도로 가장 많이 수축되고, 유체정압에 의해 발생하는 최대 변위량 17mm에 비해서는 1.76배로 중간 변위량을 나타낸다. 수직방향의 수축량은 모든 하중 조건에 대하여 항상 수축되는 방향으로 작용하는데, 이것은 내부탱크 구조물의 측면면을 변형시키면서 내부탱크의 상단부가 주저앉은 형태로 되지만, 수직방향의 변형량은 지반에서 충분히 받쳐주므로 전혀 문제가 될 수 없다.

Fig. 4는 보강링이 없는 저장탱크에서 유체정압, 초저온 하중, 유체정압과 초저온 하중을 동시에 고려한 세가지 경우에 대하여 해석한 von Mises 응력값을 보여주고 있다. Fig. 5의 해석결과에 의하면, 유체정압과  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체가 동시에 작용하기 때문에 발생하는 von Mises 최대 응력값 670MPa는  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 온도하중에 의해 발생하는 저장탱크 바닥면의 von Mises 최대 응력값 400MPa에 비하여 1.67배 이상 크게 발생되고, LNG의 유체정압에 의해 발생하는 경우도 1.67배 크게 발생함을 알 수 있다.

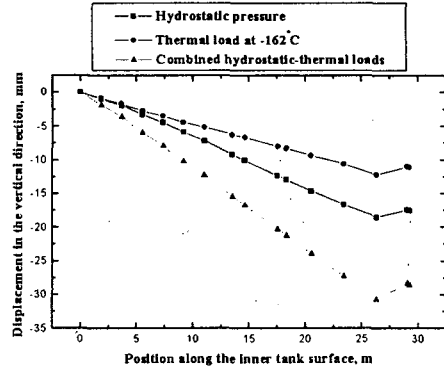
### 3.2 보강링이 있는 저장탱크

Figs. 5(a)와 (b)는 보강링이 설치된 저장탱크에서 하중(유체정압, 초저온 하중, 유체정압과 초저온 하중을 동시에 고려한 세가지 경우)이 작용할 경우에 대하여 해석한 수평방향과 수직방향의 변위량을 각각 보여주고 있다. 수평방향의 변위량을 나타낸 Fig. 5(a)의 해석결과에 의하면, LNG 유체정압에 의해 발생된 변위량이 38.3mm로 가장 크게 팽창되고,  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체에 의해 발생하는 변위량은 17.9mm로 수축되지만 보강링이 설치 안된 경우와 마찬가지로 유체정압에 의한 변형량이 보다 큰 문제로 대두되고 있음을 알 수 있다. 결국 9% 니켈강으로 제작된 저장탱크에서 유체정압에 의한 변형문제가 초저온 하중에 의한 열변형 문제보다 더욱 크다는 사실은 9% 니켈강재의 초저온 특성이 대단히 우수하다는 것이다. Fig. 5(b)에서 제시된 수직방향의 수축 변위량은 최대 23mm로 Fig. 7의 수평방향 최대 팽창 변위량 38.3mm에 비교하면 66.5%에 해당하는 것으로 문제가 되지 않는다.

Fig. 6은 보강링이 설치된 저장탱크에서 여러 가지 하중이 작용할 경우에 대한 von Mises 응력값을 보여주고 있다. Fig. 8에 의하면, 유체정압과  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 온도 하중에 의해 발생하는 von Mises 최대 응력값 750MPa는  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 액체의 온도하중에 의해 발생하는 von Mises 최대 응력값 410MPa에 비하여 1.8배 이상 크게 발생되고, LNG의 유체정압에 의해 발생하는 von Mises 최대 응력값 410MPa에 비해서는 1.8배로 유사한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.



(a) horizontal direction



(b) vertical direction

Fig. 3 Displacement of inner tank without stiffener

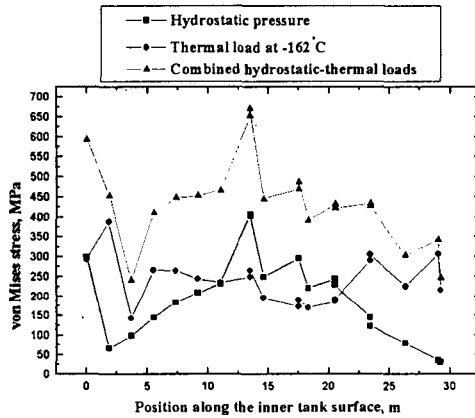
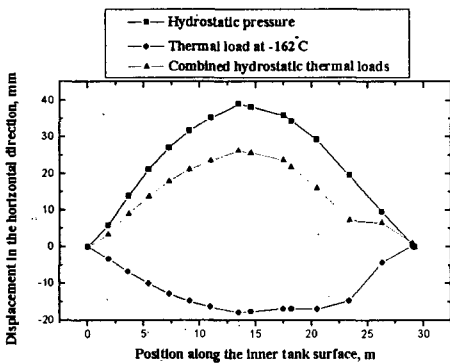
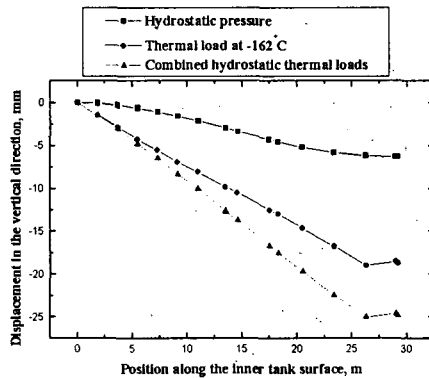


Fig. 4 von Mises stress of inner tank without stiffener



(a) horizontal direction



(b) vertical direction

Fig. 5 Displacement of inner tank with stiffener

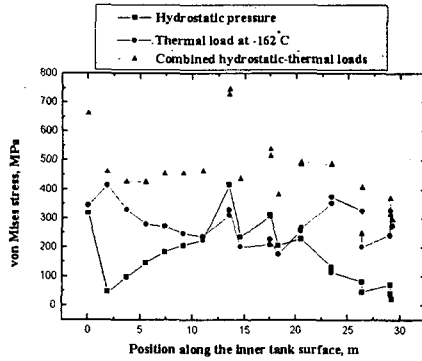
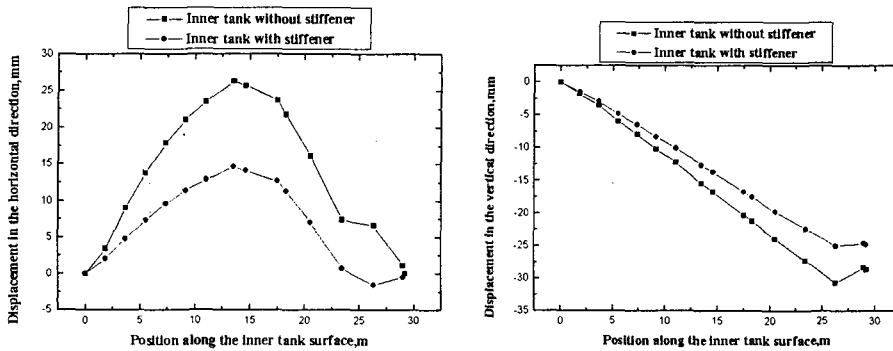


Fig. 6 von Mises stress of inner tank with stiffener

### 3.3 보강링이 있는 내부탱크와 보강링이 없는 내부탱크의 비교

Fig. 7(a)은 유체정압과  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 하중을 동시에 작용하는 내부탱크에 대한 변형거동 특성으로 보강링이 설치하지 않은 경우에 비하여 약 34%(9.4mm) 줄어든 설계 안전성을 보여준다. Fig. 7(b)에서 유체정압과  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 하중이 동시에 작용하는 내부탱크에 대한 변형거동 특성으로 보강링을 설치한 경우가 보강링을 설치하지 않은 경우에 비하여 약 23%(7mm) 줄어든 안전성을 보여준다. 이러한 해석결과는 9% 니켈강으로 제작된 내부탱크의 안전성을 확보하기 위해서는 톱가더나 스티프너와 같은 안전 구조물을 설치하는 것이 바람직하나, 현재의 보강링 구조물은 설치를 하지 않은 저장탱크에 비해 23%~78% 향상된 안전성을 보여주고 있다. 향후 9% 니켈강 저장탱크에서도 새로운 안전 구조물을 설계하여 보다 향상된 안전성을 확보토록 하는 내부탱크 구조물의 안전설계가 중요하다.

Fig 8은 유체정압과  $-162^{\circ}\text{C}$ 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. 응력거동 해석 측면에서 보면 9% 니켈강으로 제작된 내부탱크의 응력 안전성을 확보하기 위해서 톱가더나 스티프너와 같은 안전 구조물을 설치하지만 별다른 영향을 주지 못하고 있음을 알 수 있다.



(a) horizontal direction

(b) vertical direction

Fig. 7 Displacement between inner tank without stiffener and inner tank with stiffener

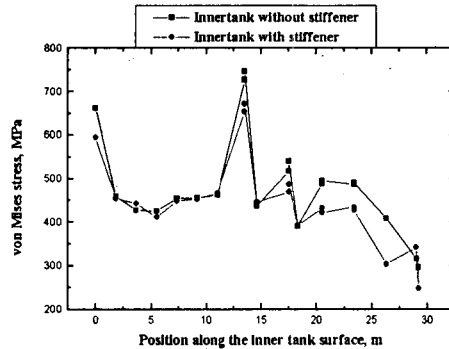


Fig. 8 von Mises stress in vertical direction between inner tank without stiffener and inner tank with stiffener

### 3.4 좌굴 안전성 해석

Fig. 10(a)은 Table 2에서의 좌굴하중에 의해 수평방향으로 발생된 변형량을 나타낸 결과로 보강링이 없는 경우는 최대 변위량 0.133mm가 팽창되고, 0.098mm가 수축되는 변형 패턴을 보여주고, 이들의 최대 좌굴폭은 0.231mm를 나타낸다. 그러나 보강링이 설치된 경우의 수평방향 변형량은 최대 변위량 0.103mm가 팽창되고, 0.1mm가 수축되는 변형패턴을 보여주며, 이들의 최대 좌굴폭은 0.203mm를 나타낸다. 결국 보강링이 설치한 저장탱크의 수평방향 좌굴 안전성은 보강링을 설치하지 않은 경우에 비하여 약 13.8% 더 안정됨을 알 수 있다.

Fig. 10(b)은 Table 2에서의 좌굴하중에 의해 수직방향으로 발생된 변형량을 나타낸 결과로 보강링이 없는 경우는 1차 좌굴 모드에서 0.003mm가 수축되는 변형 패턴을 보여 주고 있다. 그러나 보강링이 설치된 경우의 수직방향 변형량은 1차 좌굴모드에서 최대 변위량 0.0213mm가 수축되고, 2차 좌굴모드에서 0.003mm가 수축되는 변형 패턴을 보여 주고 있다.

Fig 11은 보강링이 없는 저장탱크에서 Table 2에서의 좌굴하중에 의한 von Mises 응력분포도 1차 좌굴 모드가 나타나는 20m 부근에서 von Mises 최대응력 40MPa가 발생하고, 2차 좌굴 모드가 나타나는 13m 부근에서 최대응력 25MPa이 발생한다.

보강링이 설치된 저장탱크에서 좌굴하중이 작용하는 경우 1차 모드가 나타나는 20m 부근에서 von Mises 최대응력 39.6MPa가 발생하고, 2차 좌굴모드가 나타나는 13m 부근에서 von Mises 최대응력 24MPa이 발생하고 있음을 알 수 있다

Table 2 Gravitational load along the height of inner tank

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

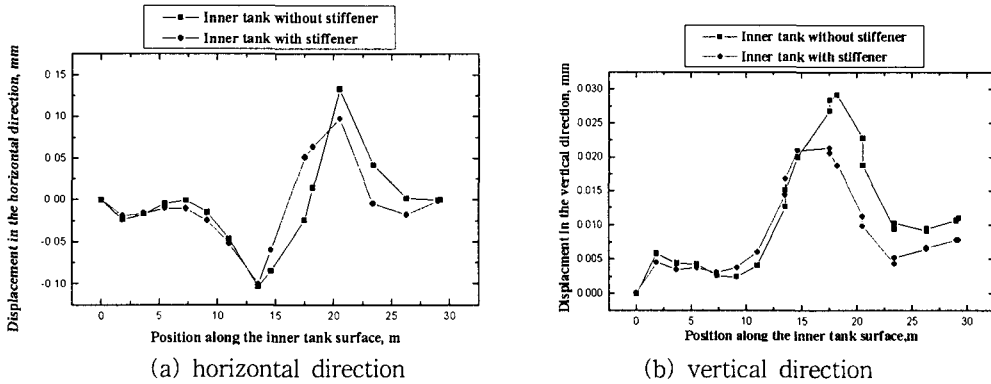


Fig. 10 Displacement between inner tank without stiffener and inner tank with stiffener

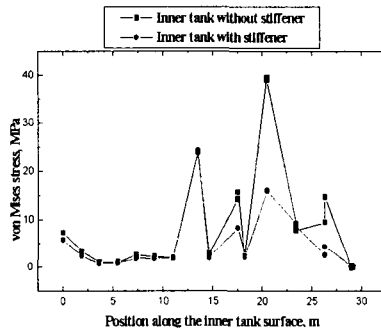


Fig. 11 von Mises stress between inner tank without stiffener and inner tank with stiffener

#### 4. 결론

9% 니켈강으로 제작된 초대형 LNG 저장탱크는 초저온 특성이 대단히 우수하기 때문에 열 변형문제에 대해서는 안전하지만, 내부탱크 구조물의 응력 측면에서 특히 저장탱크의 중앙부와 바닥면에서 발생하는 응력이 높기 때문에 9% 니켈 강재는 변형 거동보다는 구조물의 강도 측면에서 상대적으로 덜 안전하다는 사실이다. 그래서 9% 니켈강으로 제작된 내부탱크의 안전성을 확보하기 위해서는 톱가더나 스티프너와 같은 안전 구조물을 설치하는 것이 바람직하며, 현재의 보강링 구조물은 설치를 하지 않은 저장탱크에 비해 23%~78% 향상된 안전성을 보여주고 있다.

좌굴 하중에 의한 저장탱크 구조물의 응력에 대한 안전성 해석결과에 의하면 저장탱크에서 보강링은 좌굴에 의한 응력해석에서 별다른 영향을 미치지 못한다는 사실이다. 9%니켈강으로 제작된 저장탱크의 응력 안전성은 좌굴에 의한 문제보다는 저장탱크에 작용하는 유체정압이나 초저온 하중에 의한 탱크 구조물의 안전성을 검토하는 것이 안전설계를 위해 중요하다는 사실을 보여주고 있다.

#### 5. 참고문헌

1. "MARC user's manual," Version K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.
2. Bathe, K. J., "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, Inc., 1982.