

초저온 하중을 고려한 내부탱크 바닥판의 설계 안정성에 관한 유한요소해석

† 김 청 균 · 조 승 현
홍익대학교 기계·시스템디자인공학과
(2004년 5월 20일 접수, 2004년 6월 23일 채택)

FE Analysis on the Design Safety of Inner Tank Bottom Plate in Terms of Cryogenic Temperature Loadings

Chung Kyun Kim and Seung Hyun Cho
Department of Mechanical and System Design Engineering
Hongik University, Seoul 121-791, Korea
(Receive 20 May 2004 ; Accepted 23 June 2004)

요 약

본 논문은 내부탱크 바닥판의 중심부에서 바닥판의 가장자리인 코너부로 연결되는 반경 방향의 거리를 따라서 바닥판에 걸리는 von Mises 응력, 변위량, 회전 뒤틀림 모멘트를 나타내고 있다. 계산결과에 의하면 내부탱크를 냉각하는 초기과정에서 LNG의 충전율, 즉 LNG와 직접 접촉하는 반경방향 거리는 내부탱크의 바닥판에 대하여 중요한 영향을 미치게 된다. 내부탱크에 공급된 -162°C 의 액상 LNG와 내부에서 증발된 -80°C 의 LNG 가스가 내부탱크의 바닥판과 환상판, 측벽면 등에 접촉하면서 온도차 하중에 의한 열적거동 특성을 위치에 따라 서로 다르게 보여주고 있다. 유한요소해석 결과로부터, LNG의 증발가스와 초저온 액체(-162°C)에 의한 온도차는 바닥판의 열적 불안정성을 일으키는 원인으로 작용하며, 이러한 열적 뒤틀림 현상은 내부탱크 시스템의 안전성을 위협할 수도 있다.

Abstract - This paper presents von Mises stress, deformation, and rotating distortion moment characteristics of inner tank bottom plate as a function of a cryogenic temperature difference along the radial distance from the center area to the corner one. The calculated results show that the filling level of LNG at the beginning of the cool-down process is very important for the design safety analysis of the inner tank. Obviously the thermal loading by a temperature difference between the LNG vapor gas of -80°C and a LNG temperature of -162°C affects to the thermal related characteristics of the bottom plates and annular one. From the computed results, the temperature difference by a vapor gas and liquid of LNG may lead to the thermal instability of the bottom plate. This phenomenon may cause the system failure of an inner tank.

Key words : Cryogenic temperature, LNG, Inner tank, Bottom plate, Annular plate

1. 서 론

천연가스를 액화시켜 생산된 액화천연가스

(LNG)는 메탄(CH_4)을 주성분으로 하는 탄화수소 계열의 청정 에너지이다. 특히, LNG는 풍부한 매장량과 저렴한 가격으로 인해 오늘날과

같이 환경을 증시하는 사회적 분위기에 맞물리면서 새로운 연료 에너지 자원으로 확고하게 자리를 잡아가고 있다.

천연가스는 생산지에서 소비지까지 파이프를 이용하여 가스상태로 직접 운반하는 경우와 천연가스를 액화시킨 LNG를 특수하게 제조한 선박이나 차량으로 필요한 지역까지 운반하는 두 가지 경우가 있다. 섬 지역이나 우리나라와 같이 지역적으로 고립된 특별한 경우에는 액화된 천연가스를 LNG 선박으로 수송하여 인수기지의 LNG 저장탱크에 액상으로 잠시 저장하였다가 최종 소비자에게는 LNG를 기화시켜 가스상태로 파이프 네트워크를 통하여 공급한다.

액상의 초저온 LNG를 안전하게 저장하기 위해 개발된 완전 밀폐식 LNG 저장탱크는 9% 니켈강재로 제작된 내부탱크와 예응력 콘크리트(prestressed concrete)로 제작된 외부탱크, 그리고 외부로부터 유입되는 열원을 차단하기 위한 단열재 등으로 구성되어 있다. LNG와 직접적으로 접촉하면서 저장 기능을 갖고 있는 완전 밀폐식 저장탱크의 내부탱크는 초저온 특성이 대단히 우수한 9% 니켈강재로 제작되었기 때문에 탱크의 저장용량에 적합한 시스템 안전설계를 추진하면 된다.

LNG 저장탱크에는 LNG에 의한 유체정압[1]과 비상시의 롤오버(roll-over) 하중, 그리고 초저온 하중 등이 직접적으로 작용하게 된다. 내부탱크에 유체정압이 작용하는 조건은 탱크에 많은 양의 LNG가 채워질 경우에 큰 하중조건으로 작용하지만, LNG를 스프레이 장치로 충전하는 초기 공급단계에서 LNG에 의한 유체정압은 대단히 작으며, 동시에 롤오버 하중이 일어날 가능성은 없기 때문에 본 해석에서는 배제하였다.

따라서, 본 연구에서는 140,000m³ 저장용량을 갖는 내부탱크의 설계 안전성을 검토하기 위해서 구조적으로 취약성을 들어내고 있는 내부탱크의 측벽면과 바닥면을 연결하는 지역을 중심으로 바닥판의 설계 안전성을 유한요소해석으로 고찰하고자 한다. 내부탱크의 안전성을 확보하기 위해 해석된 내부탱크의 바닥판은 일정한 기울기를 갖도록 설계되어 있고, 이것은 내부탱크에 채워지는 LNG의 액위에 따라 탱크에 걸리는 응력과 변위거동 특성이 크게 달라지는 현상을 초저온 온도의 함수로 고찰하고자 한다.

2. 해석모델 및 해석조건

9% 니켈강재로 제작된 내부탱크의 초저온 하중 변화에 따른 구조물의 설계 안전성을 해

석하기 위하여 Fig. 1에서 보여준 것과 같은 1/4형태의 축대칭 모델을 사용하였다. 내부탱크의 초저온 특성 해석에 사용된 요소(element)는 4개의 노드를 갖는 Bilinear Thin-shell 요소로 복잡한 판재를 포함한 곡선형태의 셸 구조물에도 적합하므로 비선형 유한요소해석에 특히 유용한 요소이다. 본 해석에 사용된 프로그램은 선형 해석뿐만 아니라 비선형 해석에도 정확도가 대단히 높은 것으로 검증된 유한요소 프로그램 MENTAT/MARC를 사용하였다[2]. 유한요소 해석모델에 사용된 요소와 절점의 개수는 5131과 5261로 각각 주어진다.

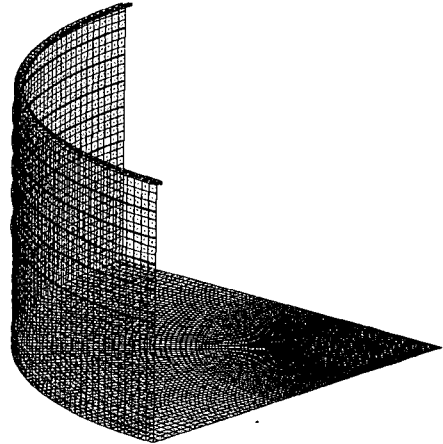


Fig. 1. Finite element model for an inner tank.

Table 1. Mechanical and thermal properties for 9% nickel based steel.

Material properties	Values
Elasticity modulus	191[GPa]
Density	8,000[kg/m ³]
Poisson's ratio	0.3
Yield strength	670[MPa]
Ultimate strength	800MPa
Thermal expansion coefficient at -200°C	-9.2[$\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$]
Thermal conductivity at -200°C	16[W/m · K]
Specific heat at -100°C	510[J/kg · K]

내부탱크의 열적 거동특성을 해석하기 위해 필요한 9% 니켈강재에 대한 기계적, 열적 데이터를 Table 1에서 제시하고 있다. 내부탱크를 제작하기 위해 사용된 9% 니켈강재는 상대

적으로 기계적 강도가 높고, 초저온 특성이 대단히 우수한 것으로 알려져 있다.

3. 해석 결과

3.1. 내부탱크의 표면온도가 균일하게 감소하는 경우

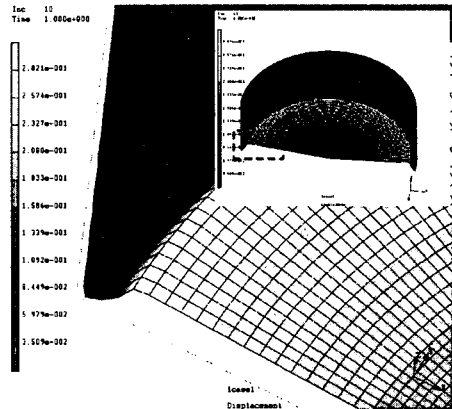
LNG와 직접 접촉하는 내부탱크는 소재의 특성상 상온과 초저온 사이를 번갈아 가면서 완만하게 상승하거나 또는 냉각하도록 운영해야 탱크 구조물의 안전성을 확보할 수 있다. 따라서, LNG를 내부탱크에 안전하게 유입하거나 송출하기 위해서는 엄격한 운전 절차에 따라 탱크를 채우거나 비우는 과정을 반복적으로 완만하게 진행해야 한다.

빈 탱크에 LNG를 채우기 위해서는 내부탱크의 온도를 서서히 냉각시킬 수 있도록, 탱크의 루프에 설치한 스프레이 장치를 사용하여 LNG를 내부탱크에 서서히 살포한다. 높이 매달은 노즐에서 분무된 LNG는 내부탱크의 바닥면과 측벽면을 초저온 상태로 냉각하다가 LNG 액위가 일정한 높이에 도달하면 LNG를 공급하는 절차를 엄격하게 준수해야 안전하다.

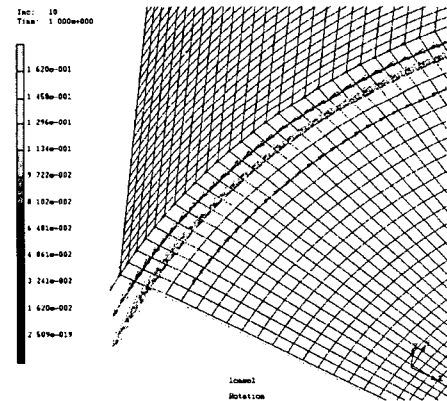
-162℃의 LNG를 내부탱크에 저장하기 위해서는 탱크를 서서히 냉각하는 기간(cool-down period)을 거쳐서 탱크에 LNG를 채우는 과정에서 탱크 구조물에 걸리는 변형거동과 응력 특성을 고찰하고자 한다. 이것을 위해 본 해석에서는 저장탱크의 내부온도가 20℃ 상온에서 -162℃의 초저온 상태까지 냉각하는 기간을 몇 단계의 온도구간(20, 0, -40, -80, -120, -162℃)으로 나누어 탱크에 걸리는 응력과 변형거동 특성을 해석하였다. 본 연구는 탱크에 작용하는 초저온 특성을 고찰하기 위한 연구이기 때문에 초저온 액체가 내부탱크를 채우면서 발생하는 LNG에 의한 유체정압과 롤오버에 의한 하중은 고려하지 않았다.

Fig. 2(a)는 내부탱크의 표면 온도가 초기의 20℃ 상온에서 -162℃의 초저온으로 냉각되면서 내부탱크의 벽면과 바닥면에 발생된 변형거동 특성을 보여주고 있다. 초저온 하중이 가해지면서 내부탱크의 측벽면과 바닥판의 환상판이 만나는 코너 지역에서 비교적 큰 변형 거동량이 발생하고, 특히 환상판과 바닥판이 만나는 지역에서 28cm 정도의 큰 변위량이 위로 솟아오르는 결과를 제시하고 있다. 이것은 내부탱크 바닥판이 200 : 1의 기울기를 갖도록

제작되었기 때문에 바닥면이 초저온에 의해 수축되면서 Fig. 2(a)에서 보여준 변형거동 패턴을 보여주고 있다. 해석결과에 의하면 바닥판의 환상판과 바닥판이 용접으로 연결되는 부위에서 가장 큰 변형량이 발생되고 있음을 알 수 있다.



(a) Displacement



(b) Rotating distortion moment

Fig. 2. Displacement and rotating distortion moment distributions of an inner tank for a temperature variation from a room temperature, 20℃ to a cryogenic temperature, -162℃.

또한, Fig. 2(b)에서는 동일한 조건에서 온도 변화에 따라 내부탱크 코너부 부근의 환상판을 중심으로 발생하는 비틀림 변형거동 특성을 보여주고 있다. Fig. 2(b)의 해석결과에 의하면, 내부탱크의 코너부와 내부탱크의 바닥판에서는 시계 방향으로 뒤틀리는 작은 회전 변형거동이

발생하고, 환상판 지역에서는 반시계 방향으로 크게 뒤틀리는 회전 변형 거동량이 발생되고 있음을 보여준다. 이것은 기하학적으로 경사진 바닥면과 환상판, 그리고 코너부의 강성도 차이에 의해 내부탱크의 코너부에서 이와 같은 특별한 회전 뒤틀림 모멘트(rotating distortion moment)가 발생하는 특이한 현상이 발생하는데, 이것은 환상판 주변의 대변형 가능성을 제기하는 하나의 징조이다[3].

Fig. 2의 해석결과는 LNG를 저장하는 내부탱크가 상온에서 초저온 상태로 변동하중을 받게 되면, 탱크의 환상판 코너 부근을 중심으로 200 : 1로 경사진 바닥판이 솟아오르면서 반시계 방향으로 크게 뒤틀리는 모멘트가 발생되어 초저온 하중을 받는 저장탱크는 불안정해지기 때문에 필요한 바닥판은 강성도와 초저온 특성을 갖추어야 한다는 결과를 제시하고 있다.

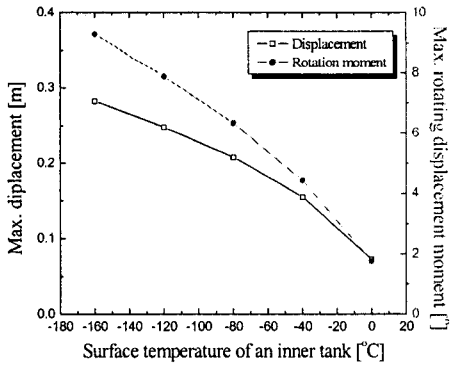
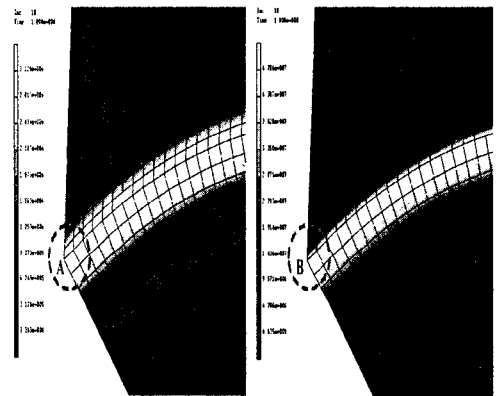


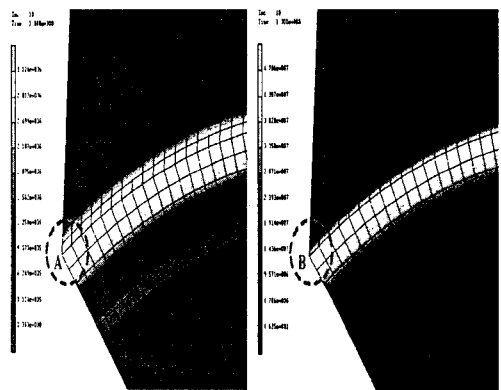
Fig. 3. Maximum displacement and maximum rotating deformation of an inner tank structure as a function of a cooling temperature.

내부탱크로 유입된 LNG에 의해 상온에서 초저온까지 탱크가 냉각하게 되면, 내부탱크에서 발생된 최대 변위량과 최대 회전 변위량 모멘트 변화를 Fig. 3에서 제시하고 있다. 9% 니켈강재로 제작된 내부탱크의 표면온도가 상온 20°C에서 0°C로 떨어지면서 발생된 최대 변위량은 0.073m, 회전 모멘트는 1.75°만큼 뒤틀림 변형이 각각 발생하였다. 저장탱크의 온도를 지속적으로 냉각하면 탱크에 걸리는 최대 변위량과 회전변형 모멘트 각도는 지속적으로 변화가 발생하다가 저장탱크의 표면온도가 -162°C

에 도달하면 0.282m와 9.28°로 크게 상승한다. 결국, 내부탱크는 온도의 냉각과정을 거치면서 28.2cm와 9.28°라는 큰 변화량이 발생하였음에도 불구하고 안전한 것은 온도변화를 서서히 탱크에 가하였기 때문에 구조물 자체가 열 충격력에 의해 발생될 수 있는 심각한 응력 상승을 피할 수 있기 때문이다. 탱크의 안전을 위해 완만한 냉각과정이라는 절차에 따라 LNG의 유입과 유출을 진행하고는 있지만, 외부의 하중조건과 연계되는 상황이 일어나면 저장탱크 시스템의 안전성은 실제의 사고 사례에서 나타나듯이 크게 위협을 받을 가능성이 매우 높다[3].



(a) For a surface temperature, 0°C of a tank



(b) For a surface temperature, -162°C of a tank
Fig. 4. von Mises stress distributions near the corner zone between the shell structure and the bottom plate for two given body temperatures of an inner tank during a cool-down period.

Fig. 4는 LNG 저장탱크의 표면온도가 0℃와 -162℃로 균일할 때, 저장탱크에서 발생한 von Mises 응력분포를 보여주는 결과로, 최대 von Mises 응력은 저장탱크의 코너부를 중심으로 발생하는 것을 알 수 있다. 내부탱크의 온도가 0℃인 경우에 대한 Fig. 4(a)의 해석결과에 의하면, 저장탱크의 벽면 아래 코너부 A지역에서 최대응력 3.1MPa이 발생하고, 환상판(annular plate)에서는 상대적으로 작은 응력이 발생한다. 또한, 내부탱크의 온도가 -162℃로 LNG가 채워진 경우에 대한 Fig. 4(b)의 해석결과에 따르면, 코너부 근처의 환상판 끝단 B지역에서 47.8MPa의 최대응력이 발생하였다. Fig. 4의 해석결과에서 보여준 것처럼 상온에서는 LNG 저장탱크의 응력거동은 3.1MPa로 대단히 안정적이지만, LNG가 채워져 -162℃의 초저온 상태로 가면 15.4배 이상으로 크게 증가한다. 그래도 이 때의 최대응력 47.8MPa은 Table 1에서 제시한 항복응력에 비하여 크게 낮은 탄성구간에 있기 때문에 안전하다. 이것은 저장탱크를 상온에서 천천히 냉각시킴으로써 탱크가 초저온 충격력을 받지 않았기 때문에 안전하다는 것이지, 만약 초저온 탱크를 빠른 속도로 냉각시킬 경우는 열 충격력에 의해 대단히 위험해질 수 있다.

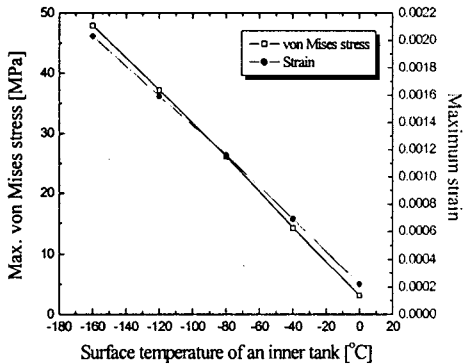


Fig. 5. Maximum von Mises stress and maximum strain for a moderately decreasing temperature from a room temperature to a cryogenic temperature.

Fig. 5는 저장탱크가 상온에서 초저온 상태로 냉각되는 동안 내부탱크에서 발생한 최대

von Mises 응력과 최대 변위량을 저장탱크 걸리는 현재의 표면온도에 따라 해석한 결과를 보여준다. 내부탱크 구조물의 온도가 떨어지면서 발생하는 최대 von Mises 응력은 Fig. 4에서 보여준 것처럼 환상판(annular plate)과 셸 플레이트가 서로 만나는 내부탱크의 코너부에서 발생하지만, 최대 변위량은 환상판과 바닥판이 만나는 연결부에서 위로 솟아오르는 변형거동 특성을 확인할 수 있다. Fig. 5에서는 내부탱크가 초기의 0℃에서 LNG가 채워진 초저온 -162℃로 냉각될수록 내부탱크에 걸리는 응력과 변형율이 선형적으로 증가하고 있다는 사실은 저장탱크의 거동특성이 안정적이라는 것과 최대 응력은 탄성구역에서 거동하고 있으므로 충분히 안전하다는 해석결과를 제시하고 있다.

3.2. 벽면온도가 -80℃로 일정하고 바닥면은 LNG로 채워진 경우

LNG가 저장탱크에 채워지면서 LNG 액위가 저장탱크 구조물에 미치는 초저온 영향을 고찰하기 위해서 Fig. 6과 같은 해석 모델을 고려한다. 즉, 200 : 1의 기울기를 갖는 바닥면에 LNG를 공급하면 Fig. 6에서 보여준 것처럼 LNG는 내부탱크의 가장자리부터 탱크의 중심부를 향하여 점진적으로 채워지기 시작한다. 이 때에 LNG를 직접 접촉하는 표면은 -162℃로 되지만, 증발가스와 접촉하는 내부탱크의 측벽면 온도는 증발가스에 의해 -80℃로 일정하다고 가정한다. LNG의 액위를 h, 바닥판의 중심에서 LNG가 접촉하는 경계까지의 거리를 d로 나타내면 바닥면을 채우는 LNG의 액위에 대한 해석을 수행할 수 있다.

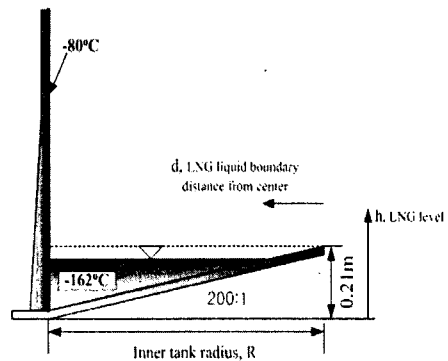


Fig. 6. Inner tank filled with a liquefied natural gas for a wall temperature of -80℃.

Table 2에서 제시하는 것처럼 저장탱크의 중심부로부터 LNG가 채워진 거리, 즉 LNG의 액위를 표시하는 것과 같은 의미를 나타내는 것으로 저장탱크의 온도분포, 응력, 변위량 분포에 대한 해석결과를 각각 제시하고자 한다. 즉, LNG가 채워지는 액위에 따라 초저온이 저장탱크에 미치는 거동특성을 해석하기 위해 LNG를 공급하면, 저장량에 따라 d/R 의 비가 100, 90.4, 74.4, 50.5, 35, 0%가 된다. 만약 LNG를 최대 0.21m까지 채워진 경우, 즉 LNG를 바닥면에 모두 차도록 한 $d/R=0$ 인 경우를 나타낸 것으로 Table 2에서 Case 6에 해당한다.

Table 2. Case studies for various LNG filling levels during a cool-down period.

	LNG boundary from the center, d[m]	LNG level from the bottom, h[m]	d/R[%]
Case 1	42	0	100
Case 2	39	0.015	92.9
Case 3	32	0.05	74.4
Case 4	21	0.105	50.5
Case 5	15	0.135	35
Case 6	0	0.21	0

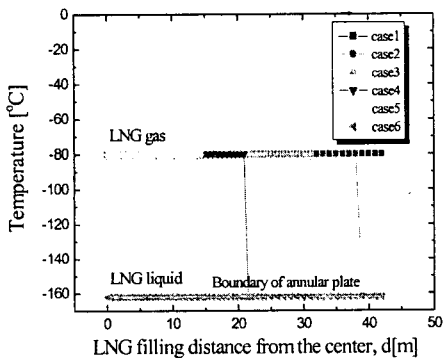


Fig. 7. Temperature for various cases depending on the filling levels of LNG as a function of radial distance from the center of the tank.

Fig. 7은 LNG가 내부탱크에 채워지면서 경사진 바닥면의 온도가 저장탱크의 중심으로부터 코너부를 향하여 충전되는 LNG의 경계선까지 거리로 Table 2에서 제공한 데이터를 그

림으로 나타낸 것이다. Fig. 7에서 Case 1은 LNG를 탱크의 루프 천정에 설치된 스프레이 장치를 사용하여 LNG를 분무하는 단계로 공급된 LNG가 증발되면서 내부탱크 바닥면의 온도가 -80°C 로 균일한 상태를 나타낸 결과이다. Case 3은 내부탱크의 코너부에서 LNG가 채워지기 시작하여 바닥판 중심부에서 32m까지는 LNG의 증발가스 온도인 -80°C 를 유지하고, 이후 코너부까지 10m 거리는 LNG로 채워지기 때문에 초저온 -162°C 를 유지하게 된다. 그리고, Case 6은 내부탱크의 바닥판 전구간이 LNG에 의해 모두 채워졌기 때문에 LNG의 -162°C 를 균일하게 유지한 초저온 상태를 나타낸다.

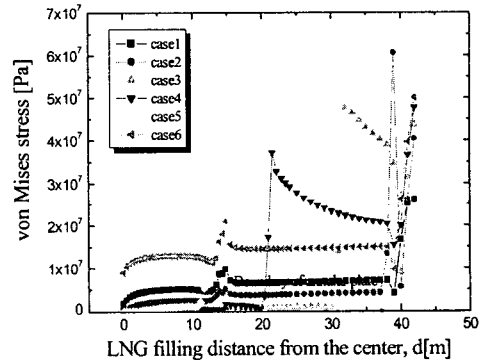


Fig. 8. von Mises stress for various cases depending on the filling levels of LNG as a function of radial distance from the center of the tank.

Fig. 8은 내부탱크 바닥면에 채워지는 LNG의 액위 6가지 경우에 대하여 발생하는 von Mises 응력을 내부탱크의 중심부로부터 내부탱크 코너부까지 나타난 반경방향 거리에 대하여 계산한 결과이다. Fig. 8의 결과에서 알 수 있듯이 LNG가 채워지면서 LNG가 직접 접촉하는 경계선을 중심으로 최대 응력이 발생하고 있는데, 이것은 LNG가 채워진 경계선을 기점으로 온도차(-80°C 와 -162°C)에 의한 열응력이 최대가 되기 때문이다. 또한, LNG가 내부탱크의 바닥면을 채우는 과정에서 발생하는 또 다른 최대응력은 LNG가 환상판을 경계로 코너부 지역에서 큰 응력이 집중되고 있음을 보여준다. Fig. 8에서 LNG를 채우기 시작하여 바닥면이 LNG로 모두 충전되기 이전까지는 LNG의 경계선에서

발생되는 최대응력이 지속적으로 감소하지만, 내부탱크 바닥판이 LNG에 의해 모두 채워지는 단계에 도달하면 바닥판의 중심부에 걸리는 응력은 오히려 증가하고, 탱크 전체면에 걸리는 응력차는 상대적으로 줄어드는 안정화 현상이 발생된다. 이것은 LNG가 바닥판을 모두 LNG로 적시면서 바닥판재에 가해지는 온도차 하중은 없어지고, 중심부의 경사도에 의한 영향을 받기 때문에 일어나는 현상으로 생각된다.

Fig. 9는 내부탱크에 채워지는 LNG의 표고(liquid level)에 따라서, 즉 내부탱크의 중심부로부터 코너부를 연결하는 반경방향의 길이 합수로 여러 가지 경우에 대해 바닥판에서 발생하는 변위량을 나타낸 결과이다. Fig. 8에서 제시한 응력거동 특성과 유사하게 LNG가 접촉하는 부위는 -162°C 의 온도하중을 받고, LNG와 직접 접촉하지 않는 증발가스 지역은 -80°C 의 온도영향을 받기 때문에 이들 온도차를 나타내는 경계 지역에서 최대 변형량이 발생된다. 또한, 바닥면의 환상판 지역은 두께가 달라지기 때문에 이곳을 중심으로 다시 한번 큰 변형량이 발생되고 있음을 알 수 있다. Fig. 9에서 보여준 해석결과에 의하면, 바닥판에 LNG를 채우는 정도에 따라 변형량은 지속적으로 증가하지만, 채우는 정도가 어느 단계에서는 변형 거동량이 줄어들어 LNG가 채워지면서 안정화를 이루다가 LNG를 바닥판에 모두 채우는 단계(Case 6)에 도달하면 변형 거동량은 Case 1($d/R=100$)의 경우처럼 오히려 안전된 상태로 접어들다.

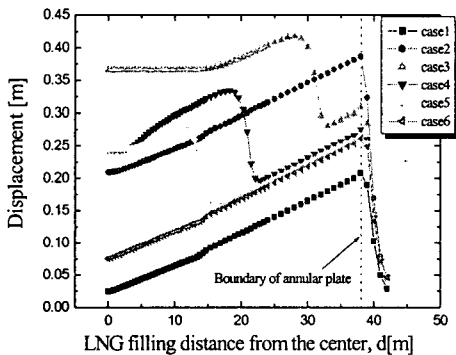


Fig. 9. Displacement for various cases depending on the filling levels of LNG as a function of radial distance from the center of the tank.

응력과 변위량 거동특성을 보여준 Figs. 8과 9의 해석결과처럼 LNG를 공급하여 바닥판을 채우는 과정에서 발생된 응력이나 변위량은 상대적으로 불안정하고, LNG를 완벽하게 채워서 바닥판의 온도가 균일한 조건에 도달하면 바닥판은 보다 안전해진다는 사실을 잘 나타내고 있다. 따라서, 저장탱크에 LNG를 공급하기 위해서는 반드시 점진적인 냉각과정을 거쳐야 하고, LNG는 천천히 충전하다가 바닥판에 LNG를 모두 채우게 되면 그 때부터 충전속도를 빠르게 진행해도 좋을 것이라는 해석결과를 제시한다.

4. 결 론

저장탱크에 LNG를 채우는 과정에서 LNG의 초저온 하중에 의한 발생될 수 있는 탱크의 불안정성을 극복하기 위해 LNG 저장탱크는 점진적인 냉각이 필요하기 때문에 스프레이 분무방식을 사용하여 LNG를 공급한다. 특히, 내부탱크 바닥판의 구매에 의한 LNG의 고입 현상은 바닥판에 걸리는 응력과 변형량 거동특성을 불균일하게 하고, 이것은 내부탱크의 안전성에 영향을 미치게 된다.

본 연구에서 제시한 해석결과에 의하면 저장탱크의 바닥판에 채워지는 LNG가 액상인 지역과 가스상인 지역의 온도차에 의해 응력과 변형특성이 다르게 나타나고, 환상판 지역에서는 소재의 두께차에 의한 응력이 높아진다는 사실을 알 수 있다. 특히, 바닥판에 LNG가 채워지는 경계선이 탱크의 중심부에서 코너부로 이동하면서 응력이나 변형량이 증가하다가 다시 완화되어 바닥면을 LNG로 모두 채워지면 온도차가 없어지기 때문에 안정적인 거동특성을 보여준다. 결국, LNG를 내부탱크에 공급하여 채우는 초기단계의 안전성이 가장 중요하고, 위험한 과정이라는 사실을 잘 알 수 있다.

본 연구에서 해석한 데이터에 의하면, LNG의 액위가 0.015m 즉, 환상판을 겨우 채운 경우에 경계 지역에서 가장 큰 응력이 발생한다. 그러나, -162°C 의 초저온 온도하중에 의한 열변형 거동은 소재의 탄성범위 이내에서 발생하기 때문에 온도하중에 의한 안전성은 확보하고 있다.

5. 참 고 문 헌

- [1] 김청균 외, "완전 밀폐식 저장탱크에서 내부탱크 바닥판의 설계 안전성 해석," 2003

- 춘계학술발표회 논문집, 한국가스학회, pp. 165-172, (2003)
- [2] "MARC user's manual," Version K7.3, MARC Analysis Research Co., (1996)
- [3] Investigation Study Report for Tongyoung LNG Storage Tank, TK-203 by Incok Co, (2003)