

유체정압을 고려한 9% 니켈강재 내부탱크 바닥판의 설계 안정성에 관한 수치적 연구

† 김 청 균 · 김 한 구

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과
(2004년 5월 8일 접수, 2004년 6월 18일 채택)

Numerical Study on the Design Safety of 9% Nickel Based Inner Tank Bottom Plate in Terms of Hydrostatic Pressure

Chung Kyun Kim and Han Goo Kim

Department of Mechanical and System Design Engineering

Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received 8 May 2004 ; Accepted 18 June 2004)

요 약

본 논문은 완전 밀폐방식의 LNG 저장탱크에서 9% 니켈강재로 제작된 내부탱크 바닥판의 응력과 변위량에 대한 거동특성을 제시하고 있다. 내부탱크에 LNG가 유입되면서 바닥판이 최대 유체정압을 받는 경우, 내부탱크의 바닥판에 걸리는 응력과 변위량 분포를 내부탱크 바닥판의 기울기, 환상판 두께와 길이의 설계함수로 고찰하였다. 계산 결과에 의하면, 140,000m³ 저장용량의 내부탱크에서 바닥판의 기울기는 100~200 : 1 정도로 최적화 설계를 하는 것이 응력특성 측면에서 우수하다. 또한, 내부탱크 환상판의 두께는 20mm 정도, 환상판의 길이는 3m 이상으로 설정하는 것이 저장탱크의 안정성을 확보할 수 있다.

Abstract - This paper presents the stress and deformation characteristics of 9% nickel based inner tank bottom plate in full containment LNG storage tank. When a maximum hydrostatic pressure applies the bottom plate of inner tank, the maximum stress and displacement distributions of the bottom plate have been analyzed as functions of inclined angle of the bottom plate, and the thickness and length of the annular plate between the shell plate and bottom one. The calculated results indicate that the taper of the bottom plate is recommended by 100~200 : 1 for 140,000m³ storage capacity of the inner tank. The results recommend that the thickness of the annular plate is around 20mm and the length is greater than 3m for a maximum hydrostatic pressure of 140,000m³ tank capacity.

Key words: LNG, Inner tank, Hydrostatic pressure, Annular plate, Full containment storage tank

1. 서 론

액화천연가스(LNG)를 안전하게 저장하기 위해 개발된 완전 밀폐방식의 LNG 저장탱크(full

containment LNG storage tank)는 -162℃의 LNG를 저장하기 위한 내부탱크(inner tank)와 단열재를 사이에 두고 건설되는 외부탱크(outer tank)로 구성된다. 완전 밀폐식의 내부

탱크는 초저온 액체와 직접 접촉하기 때문에 초저온 안전성이 우수한 9% 니켈강재를 사용하고, 초저온 액체를 안전하게 저장할 수 있을 정도의 구조 안전성을 독립적으로 확보한 자립식 구조물(self-supporting structure) 형태를 취하고 있다. 또한, 외부탱크는 예응력 콘크리트(Prestressed Concrete : PC) 구조물로 건설되어 내부탱크로 전달되는 외부의 모든 하중을 차단하고, 내부탱크에서 누설된 LNG에 의한 폭발사고와 같은 안전상의 문제점이 제기될 경우 저장탱크 구조물 시스템의 안전성을 확보해주는 중요한 역할을 담당한다.

LNG는 증발성이 매우 높은 -162°C 의 초저온 액체이므로 상온에 노출되면 급격한 증발가스 압력 상승으로 밀폐된 저장탱크의 안전성이 크게 위협받기 때문에 초저온 탱크는 열유입을 차단할 수 있는 완벽한 단열조건을 요구한다. 또한, 내부탱크 구조물은 자체 하중에 안전한 자립식을 채택하고 있기 때문에 초저온 액체에 의한 유체정압(fluid hydrostatic pressure)을 충분히 견딜 수 있도록 안전설계를 해야 한다.

내부탱크와 외부탱크가 독립적으로 저장탱크의 역할을 완벽하게 수행해야 밀폐식 저장탱크의 안전성을 충분히 확보할 수 있기 때문에 이들에 대한 안전설계는 대단히 중요하다[1]. 특히, LNG를 직접 저장하는 내부탱크의 설계 안전성은 대단히 중요하며, 본 연구에서는 내부탱크에 저장된 초저온 액체에 의한 유체정압 하중조건 변동에 따른 내부탱크의 바닥판을 중심으로 설계 안전성을 수치적으로 해석하고자 한다.

본 연구에서는 LNG와 직접 접촉하면서 하중지지와 밀봉 내구성을 동시에 확보해야 하는 내부탱크의 바닥판 구조물에 대한 설계 안전성을 유한요소법으로 해석하고자 한다. 즉, 내부탱크의 측벽은 LNG와 접촉하는 액위에 따라 유체정압, 유체동압, 초저온 하중을 비균일하게 받지만, 내부탱크의 바닥판은 항상 균일한 -162°C 의 초저온 하중과 모든 위치에서 동일한 유체정압을 받도록 설계되어 있다. LNG를 저장하는 내부탱크의 바닥면은 LNG의 저장용량에 따라 저장하는 내부탱크의 크기와 바닥면의 설계형상에 따라 특별한 응력거동 특성을 나타내기 때문에 내부탱크 구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 특별한 설계 안전성 연구가 진행되어야 한다.

2. 수치적 연구

2.1. 해석조건

내부탱크의 바닥판은 -162°C 의 LNG를 안전하게 저장하기 위해 초저온 액체인 LNG에 의한 유체정압과 초저온 온도하중에 대하여 안전하게 변형거동을 해야 한다. 이러한 역할을 안전하게 수행하기 위해 필요한 내부탱크 바닥판의 안전설계는 다음과 같은 기준과 가정을 만족해야 한다. 즉,

- 내부탱크 바닥면의 중심부는 항상 동심원에서 상하로 거동하도록 설계해야 한다.
- 내부탱크의 바닥면과 측벽면이 만나는 코너부는 원주면을 따라서 변형거동이 일어나지 말아야 한다.
- 내부탱크의 모든 판재를 연결하는 용접부의 결함이나 잔류응력은 존재하지 않는 것으로 가정한다.

2.2. 해석모델

내부탱크 바닥판에 대한 해석모델은 Fig. 1에서 보여주는 것처럼 내부탱크가 축대칭 형상을 하기 때문에 내부탱크의 1/4만을 수치해석 대상으로 고려하였다. 유한요소해석에 사용된 요소는 4개의 노드를 갖는 Bilinear Thin-shell 요소로 복잡한 판재 구조물뿐만 아니라 곡선형태의 셸 구조물에도 적용할 수 있다. 탱크 구조물의 응력과 변위량 특성을 검토하기 위해 사용한 유한요소해석 프로그램은 선형 및 비선형 유한요소해석을 모두 수행할 수 있는 MARC를 사용하였다[2].

본 연구에서 사용한 내부탱크의 재질은 9% 니켈강으로 Table 1에서 제시한 데이터처럼 항복강도는 670MPa 이고, 탄성계수는 191GPa 로 탄소강보다는 기계적 강도가 비교적 높기 때문에 초저온 액체와 직접 접촉하는 완전 밀폐식 저장탱크의 내부탱크 소재로 사용한다. Table 1은 내부탱크 소재로 널리 사용하는 9% 니켈강재의 기계적 특성치를 요약한 해석 데이터이다.

Fig. 2는 내부탱크에 LNG를 모두 채웠을 경우 내부탱크의 측벽과 바닥판에 가해지는 유체정압 하중분포를 보여주고 있다. 여기서 내부탱크 측벽의 셸 구조물과 바닥판이 만나는 코너부에서 중심부를 향하여 높이가 올라가는 경사면 형태를 하고, 내부탱크 바닥판의 가장자리인 코너부에는 측벽의 셸 플레이트와 바닥판을 안전하게 연결할 수 있는 두꺼운 환상판(annular plate)이 설치되어 내부탱크 구조물의 안전성을 확보하게 된다.

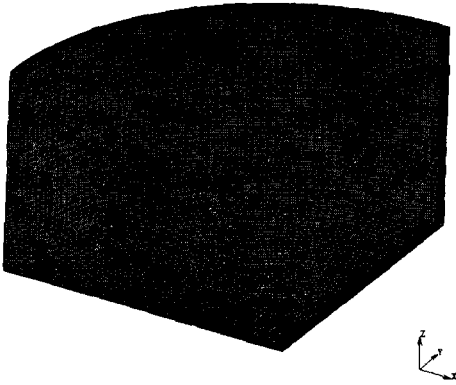


Fig. 1. One quarter model of the inner tank for a finite element analysis.

Table 1. Material properties of 9% nickel based steel.

Properties	Values
• Elastic modulus, GPa	191
• Density, kg/m ³	8,000
• Poisson's ratio	0.3
• Yield strength, MPa	670
• Ultimate Strength, MPa	800

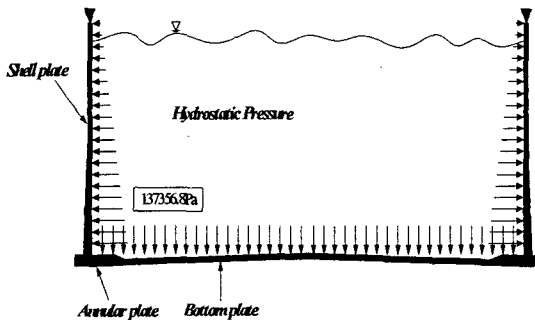


Fig. 2. Hydrostatic pressure distribution of inner tank.

3. 해석결과 및 고찰

3.1. 내부탱크 바닥판 기울기의 영향

Fig. 2에서 보여준 것처럼 내부탱크의 측벽면은 셸 플레이트를 바닥면에서 위쪽으로 올라가면서 계단식으로 두께가 줄어들도록 제작하고,

균일한 유체정압을 받고 있는 내부탱크의 바닥판은 안전성을 고려하여 일정한 기울기를 갖도록 설계한다. 즉, 내부탱크의 바닥판은 측벽면과 만나는 환상판 부근에서 출발하여 내부탱크 바닥판의 중심부로 이동할수록 표고(ground level)가 일정 비율로 높아지는 기울기 형상을 하고 있다.

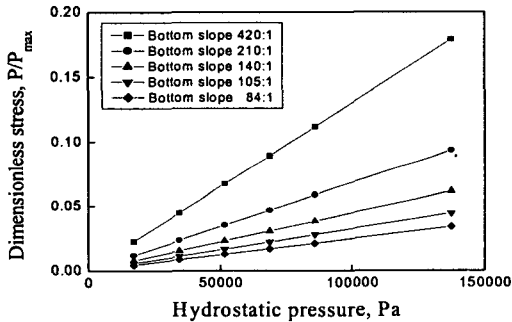
이러한 기울기 형상을 갖는 내부탱크 바닥판에 스프레이(spray) 방식으로 점진적으로 유입되는 LNG는 액위가 상승함에 따라 탱크내의 유체정압은 비례하여 증가하기 때문에 기울기에 따른 응력이나 변위량 변화에 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 연구에서는 140,000m³의 저장용량을 갖는 내부탱크의 바닥판 기울기가 변화함에 따라 내부탱크에 걸리는 최대응력과 변위량을 수치 해석적으로 고찰하였다.

내부탱크에 저장된 LNG 액위의 변동에 의해 달라지는 유체정압이 내부탱크 바닥판에 걸리는 최대응력과 변위량 특성을 Figs. 3과 4에서 각각 보여주고 있다. 즉, Figs. 3과 4에서 제시한 해석결과는 내부탱크 바닥판의 기울기가 달라질 경우 바닥판에 걸리는 최대응력과 변위량의 변화를 무차원으로 제시한 것이다. 내부탱크 바닥판에 관련된 Fig. 3의 해석결과에 의하면, 바닥판의 기울기는 저장탱크 용량에 적합한 기울기 설계조건이 있을 것이라는 해석 데이터를 제시하고 있다. 즉, 본 연구에서 140,000m³의 저장용량을 갖는 내부탱크의 경우는 바닥판의 기울기를 100 : 1~200 : 1 정도로 유지하면 적합할 것이라는 설계안전 데이터를 보여주고 있다.

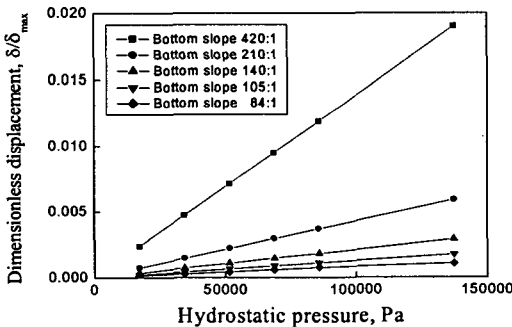
또한, Fig. 4는 LNG를 내부탱크에 완전히 채웠을 경우, 즉 내부탱크에 걸리는 유체정압이 최대일 때 바닥판 중앙부의 높이 변화에 따라 내부탱크에 걸리는 최대응력과 변위량 변화를 무차원으로 나타낸 결과이다. 결국, 바닥판 중심부의 표고를 어느 정도 높이면 저장탱크에 걸리는 최대응력과 변위량은 급격하게 줄어드는 경향을 보여주고 있다. Fig. 4에서 바닥판을 기울기가 없는 평판인 경우와 바닥판의 중앙에 높이가 100mm(기울기 420 : 1)인 경우를 비교하면, 탱크에 걸리는 최대 응력값이 5배 이상으로 큰 차이를 나타내고 있다. 내부탱크 바닥판의 표고를 높이면, 즉 기울기를 증가시키면 탱크의 최대응력과 변위량은 급격하게 수렴하는 경향을 보여준다. LNG를 채운 내부탱크의 바닥판 중앙부 높이가 200mm로 올라가면 응력, 변형거동 조건이 완만하게 수렴하므로 바닥판 기울기에 대한 안정된 설계조건을 찾아낼 수 있다.

이러한 해석 데이터를 140,000m³ 저장용량의 9% 니켈강재식 저장탱크에 적용한 설계조건과 비교하면 안전하다는 결과를 도출할 수 있다. 즉, 100,000m³를 초과한 초대형 LNG 내부탱크에서 측벽면과 바닥면의 기울기에 관련된 설계 기준각도를 보통 90° 이내로 규정하고 있다[3]. 따라서, Fig. 5의 해석결과에 의하면, 제시한 기울기 조건에서 제시한 각도는 89.73°~89.45°로 90° 이하를 나타내기 때문에 내부탱크의 안전한 설계조건이 된다.

LNG를 직접 저장하는 내부탱크의 기울기는 어느 정도 확보하는 것이 내부탱크의 안전설계에 필요하다는 사실을 Figs. 3, 4와 5의 해석결과에서 제시하고 있다. 즉, 140,000m³ 정도의 초대형 저장탱크는 바닥판의 중앙부를 높게 설치하는데, 보통 100~200 : 1 정도의 기울기를 확보하고, 코너부의 각도는 89.5° 정도로 제작하는 것이 내부탱크의 안전성을 확보하는 안전설계 범위에 해당된다는 사실을 제시하고 있다.

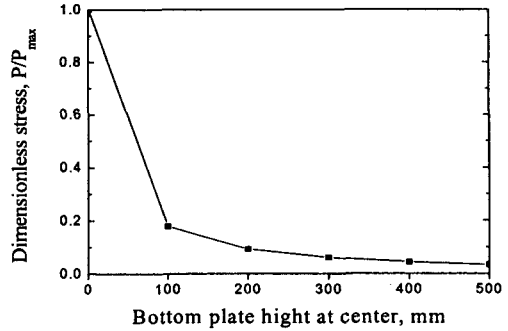


(a) Dimensionless maximum stress

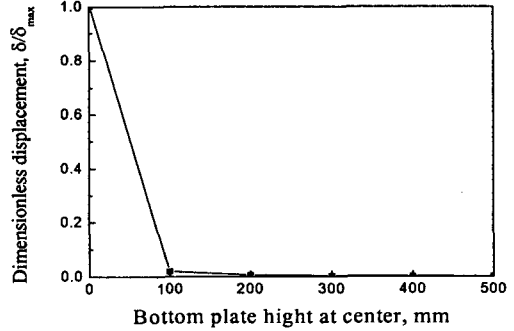


(b) Dimensionless maximum displacement

Fig. 3. Dimensionless maximum stress and displacement for various values of an inclined bottom plate as a function of hydrostatic pressure of inner tank.



(a) Dimensionless maximum stress



(b) Dimensionless maximum displacement

Fig. 4. Dimensionless maximum stress and displacement as a function of a height of the bottom plate at the center of the inclined bottom plate.

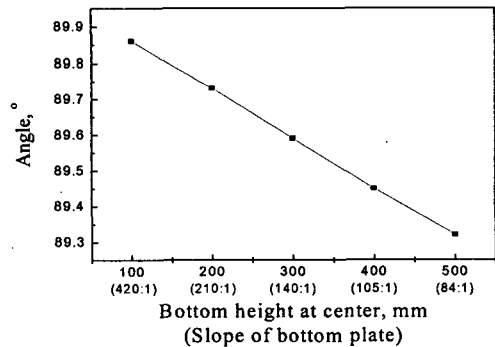


Fig. 5. Angle between side wall and bottom plate of inner tank as a function of bottom slope.

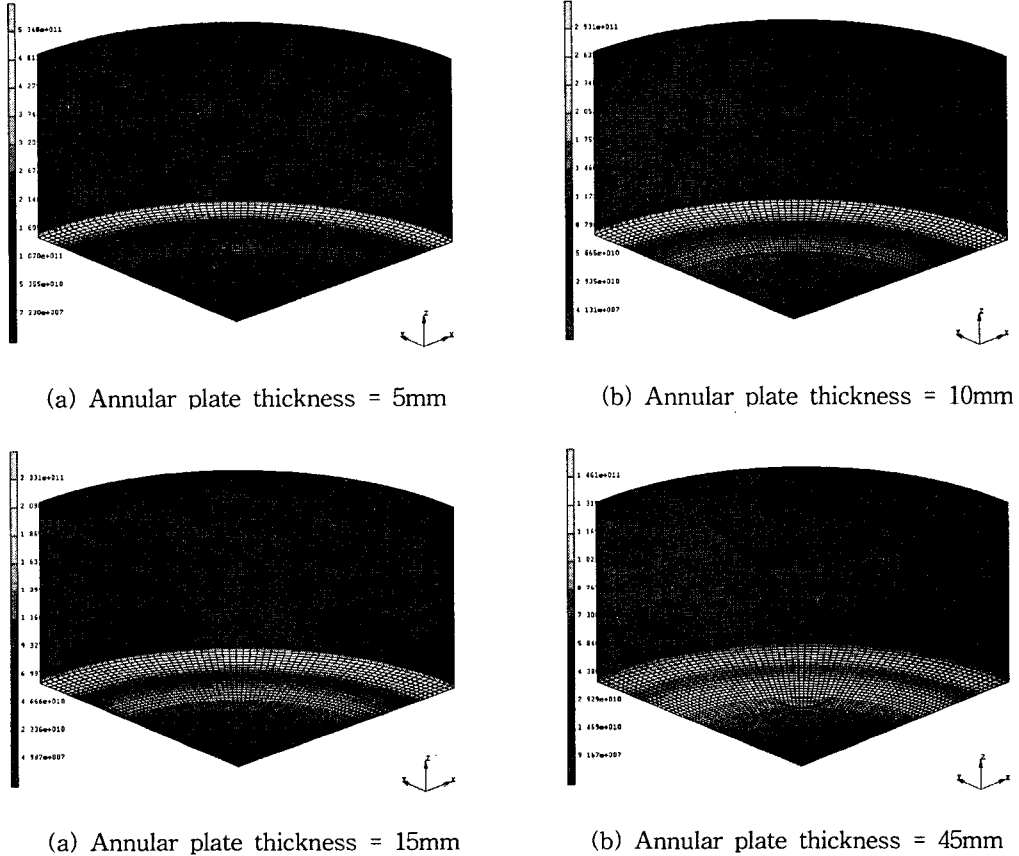


Fig. 6. Stress distribution of inner tank for various values of an annular plate thickness.

3.2. 환상판 두께의 영향

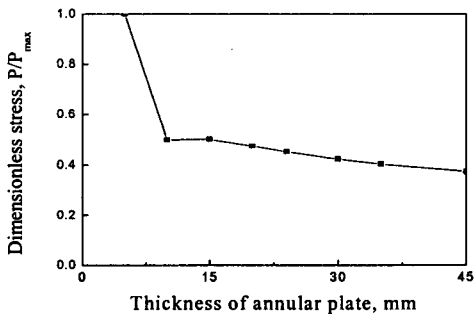
내부탱크의 코너부는 측벽면의 셸 플레이트와 바닥판의 환상판(annular plate)을 용접으로 연결한 부위로 보통은 용접부에서 집중응력을 받는 취약 지역으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 내부탱크 바닥판의 가장자리에 위치한 환상판 두께의 변화에 따라 내부탱크에 걸리는 무차원 최대응력과 변위량을 제시하였다.

Figs. 6과 7은 내부탱크에 LNG가 최고 액위로 채워져 있는 탱크가 최대의 유체정압을 받는 경우에 대한 해석결과를 보여주고 있다. 4 종류의 두께(5, 10, 15, 45mm)를 갖는 환상판에 유체정압이 작용하는 경우 내부탱크에 걸리는 응력분포를 Fig. 6에서 보여주고 있다. 바닥판의 환상판 두께가 증가하면서 내부탱크의 최

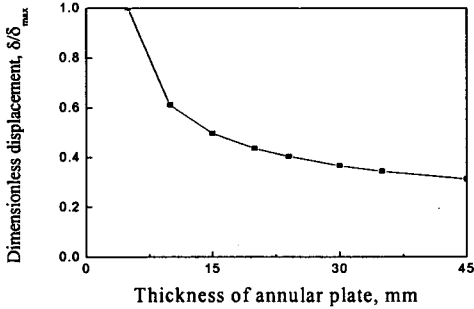
대응력은 내부탱크 코너부에서 중앙부로 이동하면서 최대응력이 크게 줄어드는 현상을 관찰할 수 있다. 이것은 내부탱크의 환상판 두께를 바닥판의 두께와 비교하여 어느 정도 범위 이내로 설계하면 내부탱크에 걸리는 응력과 변위량을 분산, 완화시킬 수 있으므로 최적의 설계 데이터를 얻을 수 있다는 해석결과이다.

Fig. 7은 내부탱크 환상판(annular plate of inner tank)에서 두께가 변화함에 따라서 환상판을 중심으로 내부탱크에 걸리는 최대응력과 변위량의 변화를 무차원으로 나타낸 것이다. 내부탱크의 환상판 두께가 바닥판 두께와 같은 5mm일 때와 환상판의 두께가 10mm로 2배 증가하였을 경우 바닥판에 걸리는 최대응력은 50% 이상으로 크게 감소하는 것을 알 수 있

다. 또한, 환상판의 두께를 20mm 이상으로 계속 증가하면, 응력이나 변위량이 완만하게 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 그러나, 환상판의 두께가 증가하여도 응력이나 변위량은 일정하게 수렴하는 현상을 관찰할 수 있다. 이것은 바닥판의 가장자리에 위치한 환상판의 두께가 어느 정도 증가하면, 즉 환상판과 셸 플레이트를 용접에 의해 연결하는 것이 보다 안전해지기 때문에 보통은 셸 플레이트와 환상판의 두께를 거의 유사하게 설계하는 것이 바람직하고, 환상판과 바닥판의 두께는 완만하게 용접하여 연결하면 안전한 바닥판 구조물이 제작된다.



(a) Dimensionless maximum stress



(b) Dimensionless maximum displacement

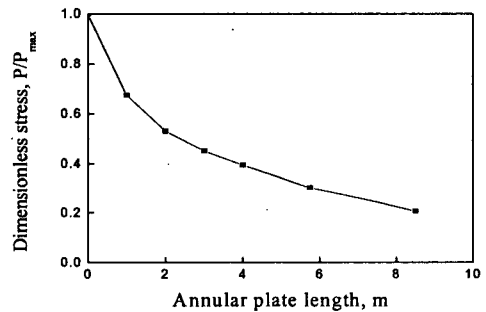
Fig. 7. Dimensionless maximum stress and displacement as a function of annular plate thickness for a maximum LNG hydrostatic pressure of inner tank.

3.3. 환상판 반경방향 길이의 영향

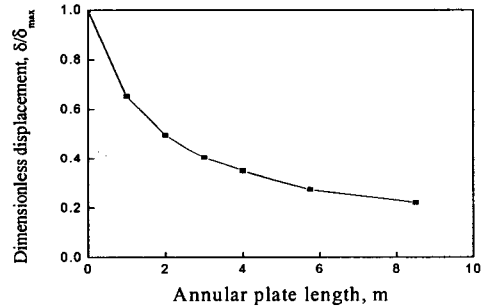
Fig. 8은 내부탱크의 바닥판 가장자리에 위치한 환상판의 반경방향 길이 변화에 따라 발생하는 최대응력과 변위량에 대한 해석결과를 제시하고 있다. 내부탱크 환상판의 반경방향

길이를 크게 할수록 내부탱크에 걸리는 응력과 변형거동 안전성은 크게 향상되고 있음을 Fig. 8에서 잘 보여주고 있다. 내부탱크의 환상판 길이를 증가시키면 특히 내부탱크의 코너부, 즉 환상판과 셸 플레이트가 용접으로 만나는 부위에서 집중적으로 걸리던 응력을 환상판의 반경을 따라서 중심을 향하도록 하여 분산시키는 효과가 있다. 저장탱크의 용량이 140,000m³인 내부탱크에서 환상판을 반경방향으로 3m 이상을 확보하면 안정적인 응력과 변형량이 발생되고 있음을 알 수 있다.

상기의 유한요소해석 결과에서 제시한 것처럼 내부탱크 바닥판은 탱크의 코너부에서 중심부로 향하면서 일정한 기울기를 확보해야 하고, 셸 플레이트와 환상판, 그리고 환상판과 바닥판이 연결되는 판재의 두께와 길이는 저장탱크의 용량에 적합한 최적조건으로 설계해야 내부탱크는 안전성을 확보하게 된다.



(a) Dimensionless maximum stress



(b) Dimensionless maximum displacement

Fig. 8. Dimensionless maximum stress and displacement as a function of annular plate length in radial direction for a maximum LNG hydrostatic pressure of inner tank.

4. 결 론

9% 니켈강재로 제작된 내부탱크에 유체정압이 작용하는 경우, 내부탱크의 바닥판에서 가장 중요한 역할을 하는 바닥판의 기울기와 환상판의 두께 및 길이에 관련된 치수조건을 고려한 유한요소해석을 수행하여 다음과 같은 설계 안전성을 고찰하였다.

- 내부탱크의 바닥판은 평면으로 제작하기보다는 일정한 기울기를 갖도록 설계하는 것이 내부탱크의 안전성에 보다 유리함을 알 수 있다. 저장탱크의 용량이 140,000m³ 정도로 큰 경우는 바닥판의 기울기를 100~200 : 1 정도로 설정하는 것이 안전하다.
- 내부탱크 코너부의 셸 플레이트와 바닥판을 용접으로 연결하는 환상판 지역은 셸 플레이트와 환상판의 두께를 근접되게 설정하고, 환상판의 반경방향 길이는 가능한 길게 제작하는 것이 내부탱크에 걸리는 응력과 변위량을 줄일 수 있다.

완전 밀폐식 LNG 저장탱크에서 9% 니켈강재로 제작된 내부탱크가 LNG 자체의 유체정압에 의해 발생하는 니켈 구조물의 응력과 변위량 특성을 고찰한 해석결과에 의하면, 내부탱크 바닥판의 기울기와 환상판의 크기를 최적의 조건으로 설계하는 것이 저장탱크의 안전성을 확보하는 중요한 변수라는 것을 설명하고 있다.

5. 참 고 문 헌

- [1] 김청균 외, "완전방호식 LNG 저장탱크 내부탱크 구조물의 설계 안전성에 관한 연구", 2001 추계학술발표회 논문집, 한국가스학회, 122-129 (2001)
- [2] "MARC user's manual", Ver. 7.3, MARC Analysis Research Co., (1996)
- [3] "Tongyoung LNG Terminal Project Report by Kawasaki Heavy Industries", KHI, (2002)