

완전 밀폐식 LNG 저장탱크에서 코너 프로텍션 구조물의 설계 안전성에 관한 수치적 연구

† 김 청 균 · 조 승 현

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과
(2004년 5월 8일 접수, 2004년 6월 23일 채택)

Numerical Study on the Design Safety of Corner Protection Structure in Full Containment LNG Storage Tank

Chung Kyun Kim and Seung Hyun Cho

Department of Mechanical and System Design Engineering

Hongik University, Seoul 121-791, Korea

(Received 8 May 2004 ; Accepted 23 June 2004)

요 약

본 논문은 완전 밀폐방식의 LNG 저장탱크에서 코너 프로텍션과 2차 바닥판에 걸리는 최대 von Mises 응력과 최대 변위량을 유한요소법으로 해석하였다. LNG 저장탱크의 시운전 과정에서 질소가스로 탱크에 채워져 있는 공기를 퍼징하기 위해 코너 프로텍션에 공급할 수 있는 최대 가스압력은 1,500Pa이다. 코너 프로텍션과 2차 바닥판에 공급된 가스압력 1,500Pa에 의한 구조물 자체의 안전성은 대단히 높다. 그러나, 내부탱크와 같은 9% 니켈강재로 제작된 코너 프로텍션과 2차 바닥판에 8,475Pa의 높은 가스압력을 공급하면 2차 바닥판에는 833MPa의 최대 von Mises 응력이 걸리고, 1.9m의 대변형이 2차 바닥판의 중심부에서 발생하여 크게 뒤틀리며, 소성변형 또는 파괴가 일어날 수도 있다는 해석결과를 제시하고 있다.

Abstract - In this paper, the maximum von Mises stress and maximum displacement of the corner protection and secondary bottom structures have been analyzed using a finite element analysis technique. The design criterion of the corner protection is 1,500Pa for a normal nitrogen gas purging process at the beginning stage of start-up procedure. This pressure is very safe for the structure safety of the corner protection and secondary bottom plates. The corner protection and secondary bottom plates fabricated by 9% nickel steel sheet may plastically be distorted and fractured for the increased gas pressure of 8,475Pa, which produces the maximum von Mises stress of 833MPa and maximum displacement of 1.9m at the center of secondary bottom plate.

Key words : Corner protection, Secondary bottom plate, LNG, Full containment storage tank

1. 서 론

완전 밀폐식 LNG 저장탱크(full containment LNG storage tank)에서 내부탱크와 외부탱크 사이에 위치한 코너 프로텍션(corner protection)과 2차 바닥판(secondary bottom plate)은 내

부탱크에서 사용한 소재와 같은 9% 니켈강재를 사용하여 2차 바닥판에서 5m 높이까지 설치한다.

보통은 5mm 두께의 9% Ni 강재로 제작되는 코너 프로텍션과 2차 바닥판은 내부탱크로부터 누출되는 LNG를 잠시 체류시키고, 외부탱크로부터 유입되는 열원을 보다 안정적으로 차단함으로써 LNG의 누설 안전성을 확보해주는 저장탱크의 누설을 차단하기 위한 안전 구조물이다. 외부탱크와 코너 프로텍션의 외벽사이 공간에는 셀룰러 글라스 단열재를 배설하여 외부로부터 유입되는 열이동을 차단함으로써 누설된 LNG의 급격한 기화현상을 방지하여 LNG 저장탱크 시스템의 안전성을 확보하는 중요한 역할을 한다.

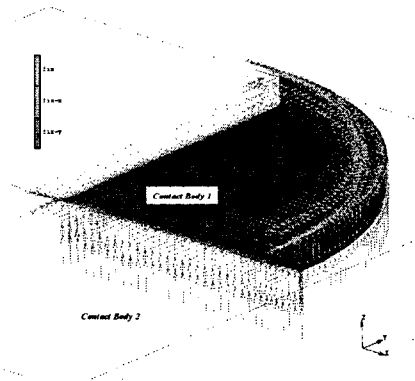
140,000m³ 저장용량의 LNG 저장탱크에 설치된 코너 프로텍션 구조물은 5mm 니켈강재를 사용하고, 바닥면의 직경은 86m, 높이는 5m 정도로 건설하기 때문에 내부의 압력변화에는 대단히 안전하지만, 외부에서 유입되는 압력은 설계 제한치(1,500Pa) 이상으로 공급될 경우는 탱크 구조물이 급격하게 손상 받을 수 있다. 즉, 코너 프로텍션을 비롯한 2차 바닥판은 하중을 충분히 지지하기 위한 구조물이 아니기 때문에 설계조건 이상의 외부 압력을 받으면 크게 위험해질 수 있다. 따라서, 저장탱크의 질소가스 퍼지과정에서 코너 프로텍션에 공급되는 질소가스의 압력은 보통 1,500Pa 이하로 엄격하게 제한하고 있다[1].

본 논문에서는 LNG 저장탱크의 누설 안전성을 확보하기 위해 건설된 코너 프로텍션과 2차 바닥판에 외부로부터 공급된 가스압력이 1,500MPa의 설계조건 이상으로 가해지는 비정상적인 가스압 유입의 경우에 대한 구조물의 설계 안전성을 유한요소법으로 해석을 수행하였다. 해석적 연구를 통하여 코너 프로텍션과 2차 바닥판 구조물의 안전성을 비교함으로써 상대적으로 취약한 구조물을 고찰하고자 한다.

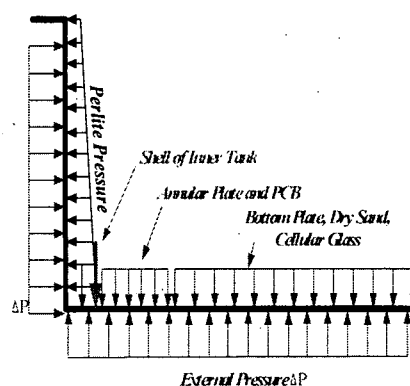
2. 해석모델 및 하중조건

완전 밀폐식 LNG 저장탱크의 코너 프로텍션과 2차 바닥판 구조물에 대한 설계 안전성을 해석하기 위해 Fig. 1(a)과 같이 4개의 노드를 갖는 Bilinear Thin-shell 요소를 사용하여 1/4 형태의 코너 프로텍션과 2차 바닥판을 축대칭 모델로 해석하였다.

코너 프로텍션의 측벽과 2차 바닥판에 가해지는 하중조건은 Fig. 1(b)에서 보여주는 것과 같이 내부탱크와 셸 플레이트의 무게를 모두 포함하였고, 내부탱크와 코너 프로텍션 사이에 설치된 PCB, 건사(dry sand), 셀룰러 글라스(cellular glass)의 무게도 동시에 고려하여 해석하였다. 또한, 코너 프로텍션의 측벽면에 작용하는 루즈 펄라이트(loose perlite) 단열재의 균일한 압력도 고려하였다. 이와 같이 코너 프로텍션 구조물에 가해지는 모든 하중을 요약하면, Table 1과 같다. 본 해석을 위해 사용한 9% 니켈강재의 기계적, 열적 특성치는 Table 2에서 제시하고 있다.



(a) 1/4 FEM model



(b) Load conditions

Fig. 1. FEM model and boundary conditions for a corner protection and secondary bottom plates

Table 1. Various Loads for FEM analysis of the corner protection structure.

Annular plate loads of inner tank	1880Pa	Bottom plate loads of inner tank	392.4Pa
PCB loads	5797.7Pa	Dry sand loads	3590.5Pa
-	-	Cellular glass loads	264.9Pa
total loads	7677.7Pa	total loads	4247.8Pa

※ Side wall weight of inner tank : 922,300kg

Table 2. Mechanical and thermal properties of 9% Ni based steel

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

코너 프로텍션 구조물의 응력과 변위량 특성을 검토하기 위해 사용한 유한요소해석 프로그램은 선형 및 비선형 유한요소해석을 모두 수행할 수 있는 MARC[2]이고, 코너 프로텍션과 2차 바닥판 구조물 내부에서 가해지는 Fig. 1(b)과 같은 하중조건을 고려하기 위해 MARC의 접촉모델(contact model)을 사용하였다.

3. 해석결과 및 고찰

외부탱크와 코너 프로텍션 또는 2차 바닥판 사이의 공간에는 다음과 같은 4가지의 가스압력이 외부로부터 공급되었다는 가정을 할 경우, 5mm 두께의 판재 구조물에서 발생하는 von Mises 응력과 변위량 분포를 유한요소법으로 해석하였다.

- 1) 1,500Pa : 140,000m³ 용량의 저장탱크에서 코너 프로텍션과 2차 바닥판에 공급 가능한 최고 가스압력의 설계 기준치

- 2) 4,248Pa : 코너 프로텍션의 설계 안전성을 검토하기 위해 임의로 공급한 가스압력이지만, 이것은 내부탱크와 단열재의 자중량과 유사하게 고려한 하중구역
- 3) 7,678Pa : 코너 프로텍션의 설계 안전성을 검토하기 위해 임의로 공급한 가스압력이지만, 2차 바닥판에 처음으로 의미있는 응력과 대변형이 발생하는 조건을 고려한 하중구역
- 4) 8,475Pa : 코너 프로텍션의 설계 안전성을 검토하기 위해 임의로 공급된 가스압력이지만, 구조물이 손상을 받게되는 조건을 고려한 하중구역

Fig. 2는 코너 프로텍션의 외벽과 외부탱크의 내벽 측면에 형성된 공간을 따라서 최대 1,500Pa의 가스압력이 공급한다고 가정할 경우, 코너 프로텍션 구조물에 걸리는 von Mises 응력과 변위량 분포를 보여준 해석 결과이다. Fig. 2의 결과에 의하면, 코너 프로텍션 측벽의 코너부에서 36.89MPa의 최대 von Mises 응력과 116.9mm의 최대 변위량이 각각 발생되고 있다. 공급된 가스압력이 1,500Pa의 기준 설계치에서는 대단히 안정적으로 탄성응력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 해석결과는 Table 1에서 제시한 여러 종류의 하중이 내부탱크의 2차 바닥판에 가해지고 있다는 사실을 고려하면 당연한 결과이다. 본 해석에서 고려한 셀 구조물, 단열재 등과 같은 자중량을 고려하면, 코너 프로텍션에 가하는 가스압력은 최소한 4,248Pa 이상으로 가스압력을 공급해야 구조물에 대한 안전성 해석에서 의미있는 결과를 예상할 수 있다.

따라서, 코너 프로텍션과 2차 바닥판의 외벽 공간에 4,248Pa의 가스압력을 공급할 경우 코너 프로텍션 구조물에서 발생하는 von Mises 응력과 변위량 분포도를 Fig. 3에서 보여주고 있다. 외부압력 4,248Pa이 공급될 경우 코너 프로텍션에 걸리는 최대 von Mises 응력 91.98MPa와 최대 변위량 144.6mm가 코너 프로텍션의 측벽면 중앙에서 발생하고 있음을 잘 보여주고 있다.

그러나, 이들 응력과 변위량은 코너 프로텍션 구조물을 아직도 탄성변형 구간에서 안전하게 작동하고 있다는 데이터로 안전하다. Fig. 3(b)의 해석결과에 의하면, 2차 바닥판에서 변위량이 어느 정도 발생하는 현상을 감지할 수 있다.

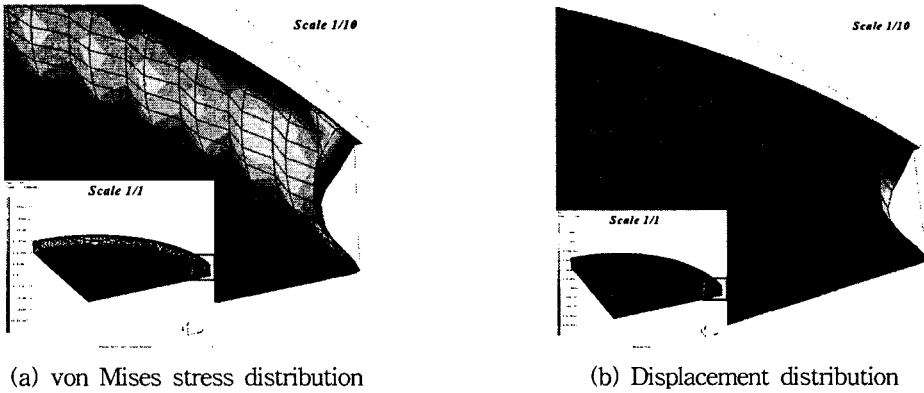


Fig. 2. von Mises stress and displacement distributions of the corner protection for a gas pressure of 1,500Pa.

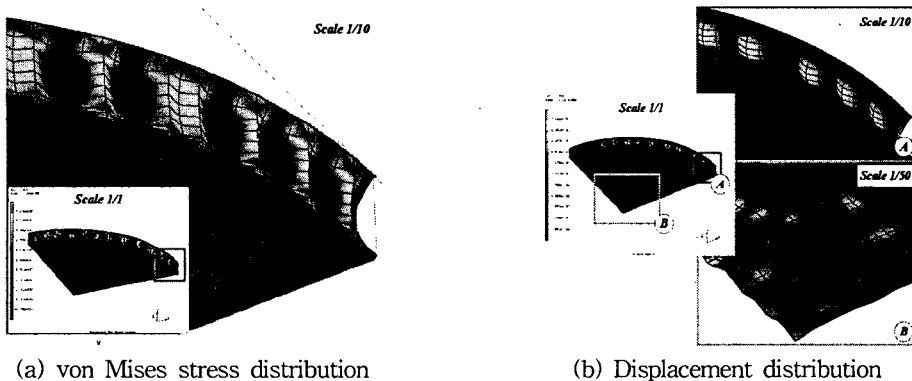


Fig. 3. von Mises stress and displacement distributions of the corner protection and secondary bottom plate for a gas pressure of 4,248Pa.

코너 프로텍션과 외부탱크 사이의 측벽 및 2차 바닥판의 단열재 공간에 공급되는 가스압력을 올려서 7,678Pa에 도달하면, 코너 프로텍션을 변형시키기는 물론 내부탱크의 환상판(annular plate) 아래의 2차 바닥판(2nd bottom plate)에서 응력은 작지만 대단히 큰 변형이 발생하기 시작한다. Fig. 4는 코너 프로텍션에 가해진 가스압력이 7,678Pa일 경우 코너 프로텍션과 2차 바닥판에 걸리는 von Mises 응력과 변위량 분포도를 각각 보여주고 있다. 즉, Fig. 4에서 최대 von Mises 응력은 코너 프로텍션의 측벽 코너부에서 232.4MPa이 발생하지만, 최대 변위량은 2차 바닥판의 코너 중심부에서 1.7m가 위로 솟아오르는 큰 변형이 발생하였다. 그러나, 코너 프로텍션 코너부의 벽면에서 발생한 최

대 변위량은 170mm로 2차 바닥판에서 발생한 변위량에 비하여 10% 정도로 대단히 낮은 변위량을 보여준다. 이것은 코너 프로텍션 공간에 외부 가스압력을 공급할 경우 코너 프로텍션 측면보다는 2차 바닥판에서 과도한 변위량에 의해 문제가 일어날 가능성이 높다는 것을 보여준다. 그러나, 코너 프로텍션에 공급된 가스압력 7,678Pa 정도에 의해 코너 프로텍션에 걸리는 최대 응력 230MPa 정도는 아직 탄성 응력 구역에 있기 때문에 구조적으로는 안전하다고 볼 수 있다. 단, 변형량이 대단히 크게 발생되므로 위험하지만, 2차 바닥판의 위쪽에는 단단한 단열재에 의해 채워져 있으므로 실제의 변형거동에서는 많은 억제력을 받는다.

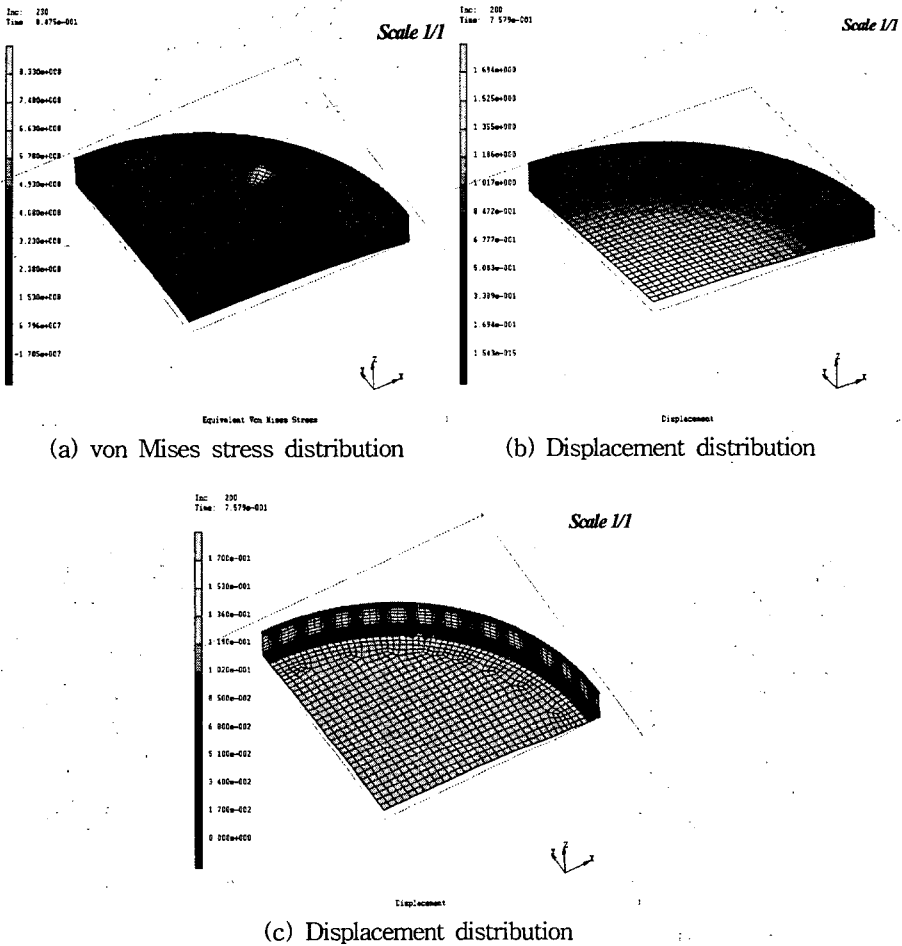


Fig. 4. von Mises stress and displacement distributions of the corner protection and secondary bottom plate for a gas pressure of 7,678Pa.

코너 프로텍션과 2차 바닥판의 단열재 공간에 공급하는 가스압력을 크게 증가시켜 8,475Pa 정도의 가스압을 접하게 되면 Fig. 5에서 제시한 해석 결과처럼 최대 von Mises 응력이 2차 바닥판의 코너 가장자리 부근에서 처음으로 사용소재의 항복응력(약 670MPa)을 완벽하게 넘어선 833MPa이 발생하고, 최대 변위량은 2차 바닥판의 가운데에서 1.9m나 솟아올라 큰 문제가 될 것으로 예상된다. 여기서 9% 니켈강 소재의 항복강도와 과단강도를 넘었다는 것은 탱크가 파손되었다는 것을 의미한다. 그러나, 코너 프로텍션의 측벽면에서 발생한

변위량은 178mm로 2차 바닥판의 변위량에 비하여 상대적으로 대단히 작은 변위량을 발생한다.

Fig. 6은 상기의 데이터를 의미있게 그린 것으로 코너 프로텍션과 2차 바닥판 구조물에 걸리는 최대 von Mises 응력과 변위량이 외부에서 공급된 가스압력 조건에 따라 크게 달라지고 있음을 보여주고 있다. 즉, 공급된 가스압력이 내부탱크와 단열재 등의 자중량보다 낮은 구간에서는 코너 프로텍션 구조물에서 최대응력과 최대 변위량이 발생하지만, 아직은 안전한 탄성구간에 있다는 것을 알 수 있다. 그러나, 공급된 가스압력이 이 구간을 넘어서면 코

완전 밀폐식 LNG 저장탱크에서 코너 프로텍션 구조물의 설계 안전성에 관한 수치적 연구

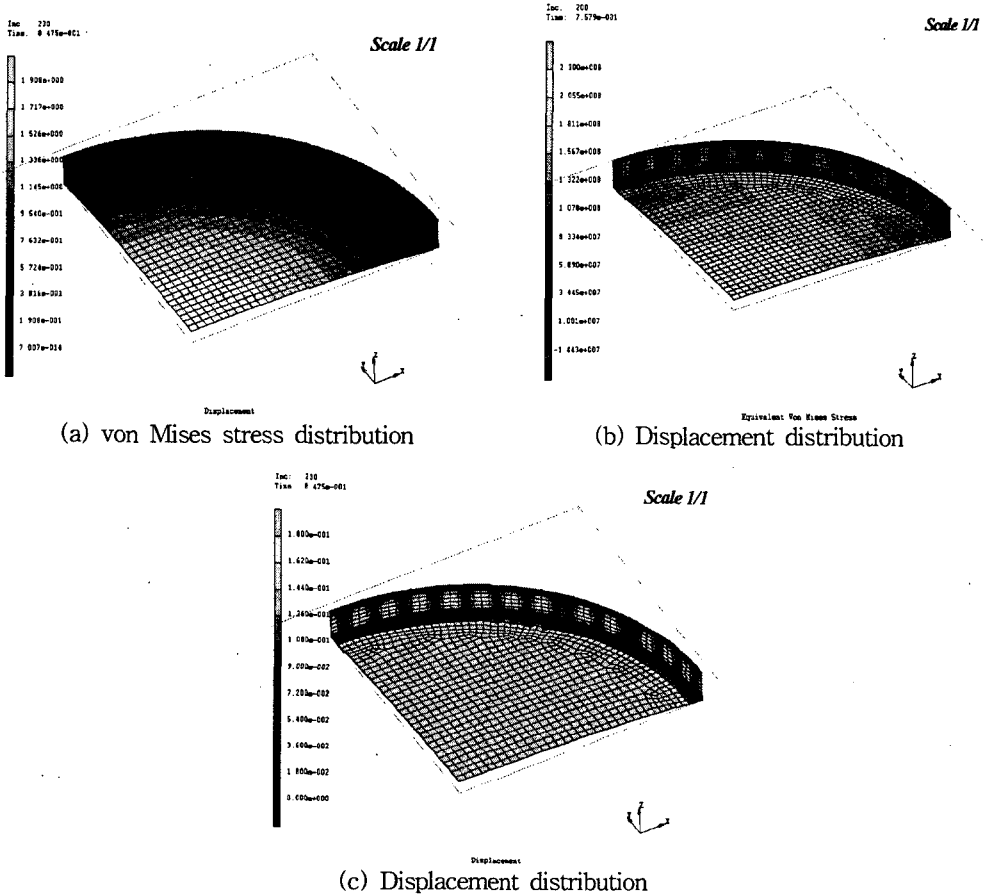


Fig. 5. von Mises stress and displacement distributions of the corner protection and secondary bottom plate for a gas pressure of 8,475Pa.

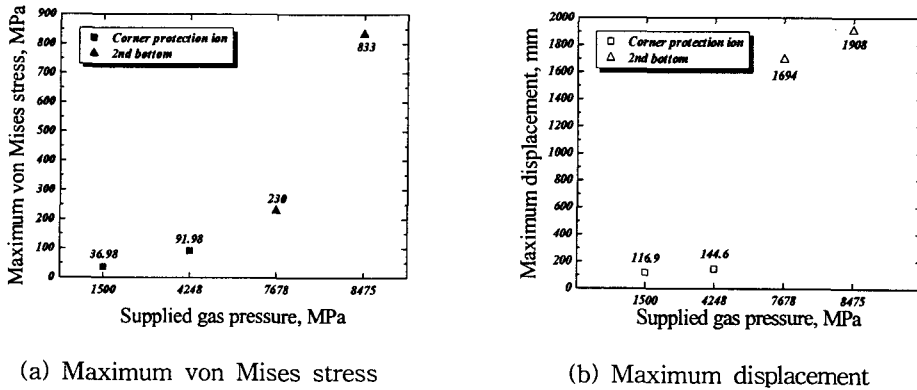


Fig. 6. Maximum von Mises stress and maximum displacement of the corner protection and secondary bottom plate as a function of a supplied gas pressure.

너 프로텍션보다는 2차 바닥판 구조물로 위험성이 급격하게 이동하여 보다 큰 최대응력과 대변형 거동량이 발생되고, 궁극적으로 파손에 도달할 수 있다는 해석 데이터를 제시하고 있다.

요약하면, 코너 프로텍션이나 2차 바닥판에 공급된 가스압력에 의해 이 구조물들이 파단될 가능성이 있는 하중은 8,475Pa 정도로 매우 높은 값이다. 즉, 코너 프로텍션에 공급하는 가스압력 제한치 1,500Pa보다 5.6배 이상으로 높은 가스압력을 가해야 코너 프로텍션과 2차 바닥판에 관련된 설계 안전성을 고찰하는 의미를 갖는다.

4. 결 론

본 연구에서는 완전 밀폐식 LNG 저장탱크에서 누설 안전성을 확보하기 위해 내부탱크와 외부탱크 사이에 건설하는 코너 프로텍션과 2차 바닥판의 외경부를 따라서 공급된 가스압력에 의해 발생된 응력과 변형 거동량을 유한요소해석으로 고찰하여 보조탱크 구조물의 설계 안전성에 검토하였다.

140,000m³ 저장용량의 완전 밀폐식 저장탱크에서 코너 프로텍션과 2차 바닥판 구조물은 공급 가스압력의 설계 제한치로 제시된 1,500Pa의

경우는 대단히 안전하다. 5mm 두께의 판재로 제작한 직경 86m, 높이 5m인 9% 니켈 구조물 탱크가 손상을 받기 위해서는 8,475MPa 정도의 외부 가스압력이 공급되어야 가능하다. 즉, 1,500Pa의 설계안전 기준치 대비 5.6배 이상의 높은 가스압력을 공급해야 코너 프로텍션이나 2차 바닥판 구조물이 손상을 받을 가능성이 있다. 특히, 코너 프로텍션보다는 2차 바닥판이 더 취약한 해석결과를 보여주고 있다.

그러나, 안전 측면에서 코너 프로텍션이나 2차 바닥판과 같은 구조물의 설계와 작동 측면에서 탱크 시스템의 안전성을 동시에 확보할 수 있는 새로운 안전감시 체계라 할 수 있는 변위량 감지기술, 또한, 외부로부터 가스를 공급하는 밸브의 작동에 대한 신뢰성과 안전성을 보장할 수 있는 새로운 통합제어 안전관리 시스템으로의 전환이 필요하다.

5. 참고문헌

- [1] "Tongyoung LNG Terminal Project Report by Kawasaki Heavy Industries", KHI, (2002)
- [2] "MARC user's manual", Ver. K7.3, MARC Analysis Research Co., (1996)