



코너프로텍션 설치에 따른 멤브레인 LNG 저장탱크 시스템의 응력 및 변형거동 특성에 관한 수치해석

김청균

홍익대학교 트리보·메카·에너지기술 연구센터
(2009년 10월 28일 접수, 2009년 12월 16일 수정, 2009년 12월 16일 채택)

Numerical Analysis on the Stress and Deformation Characteristics of LNG Membrane Storage Tank System with Corner Protection

Chung Kyun Kim

Research Center for Tribology, Mechatronics and Energy Technology Hongik University, Seoul
121-791, Korea

(Received 28. October. 2009, Revised 16. December. 2009, Accepted 16. December. 2009)

요약

본 연구에서는 LNG 저장탱크의 단열재 공간에 설치된 코너프로텍션에 작용하는 응력 및 변형거동 특성을 FEM으로 해석하였다. 제시된 코너프로텍션은 기존의 멤브레인식 LNG 저장탱크의 강도안전성과 LNG 누출안전성을 증대시킬 수 있다. LNG 저장탱크 시스템에 작용하는 응력과 변위 거동량을 단열재 상자, 멤브레인 내부탱크, PC 외부탱크에 대하여 해석하였다. 유한요소법으로 계산한 해석결과에 의하면, 내부탱크와 외부탱크 사이에 코너프로텍션을 설치한 새로운 LNG 멤브레인 저장탱크의 응력과 변형 거동량은 기존의 LNG 저장탱크에 비하여 현저하게 줄어드는 경향을 보여주고 있다. 이러한 현상은 LNG 저장탱크 시스템의 강도 안전성이 코너프로텍션을 설치함에 따라서 강성도가 증가하기 때문인 것으로 설명될 수 있다.

Abstract - In this study, the stress and deformation characteristics of corner protection in which is fabricated in an insulation area have been analyzed using a finite element method. The proposed corner protection may increase the strength and leakage safeties of conventional LNG storage system. The stress and deformation of LNG storage tank system are computed for an insulation panel box, membrane inner tank, and prestressed concrete outer tank. The FEM computed results indicate that the stress and displacement of new membrane LNG tank system with a corner protection between an inner tank and an outer tank are reduced in comparison to those of a conventional membrane LNG tank. This is explained that the strength safety of LNG membrane tank system may be increased due to a strength stiffness of a corner protection.

Key words : corner protection, membrane, stress, displacement, strength safety, FEM

*주저자: cckim_hongik@nate.com

1. 서론

LNG 저장탱크는 천연가스를 -162°C 의 초저온으로 액화시켜 안전하게 저장하기 위해 제작한 특수탱크이다. LNG 저장탱크는 LNG에 의한 초저온 온도하중, 유체정압 및 동압하중, 외부하중 등을 모두 고려하여 안전하게 견딜 수 있도록 국제적으로 인증된 엄격한 설계기준에 의거 건설된다.

LNG를 안전하게 저장할 수 있도록 SUS 304 강판에 특수한 주름형상을 넣어서 제작한 멤브레인 패널으로 건설한 멤브레인식 LNG 저장탱크는 평택기지의 $100,000\text{m}^3$ 급 지상식 저장탱크와 인천기지의 $200,000\text{m}^3$ 급 지중식 LNG 저장탱크 두 부류가 있다.

멤브레인으로 제작한 내부탱크의 외곽에는 단열재 박스가 채워지고, 이 박스의 외곽으로 예응력 콘크리트(prestressed concrete)로 건설한 PC 외부탱크가 자리잡고 있다. PC 외부탱크의 상부에는 링빔(ring beam)으로 연결되는 RF루프에 의해 완전밀폐식(full containment type)의 외부탱크가 완성된다.

멤브레인식 LNG 저장탱크는 1960년대 초반에 프랑스의 Technigaz사에 의해 세계 최초로 건설된 이후로, 일본의 IHI, MHI, KHI에 의해 새로운 타입의 멤브레인 고유기술이 개발되었고, 한국에서는 김청균 [1,2]에 의해 개발된 멤브레인 원천기술로 $200,000\text{m}^3$ 급 멤브레인식 LNG 저장탱크가 LNG 생산기지에 적용되어 2008년 준공되었다.

우리나라에서 $200,000\text{m}^3$ 급의 초대형 멤브레인식 LNG 저장탱크가 일본기술에 의해 4기가 인천기지에 건설되었으나, 14호기에서 메탄가스가 누출되는 사고가 2005년에 처음 발생하였다. 그 이후로 2006년에는 15~17호기에서 잇따라 가스누출 사고가 발생하면서 국제적인 관심사로 떠올랐다[3-5]. 이들 멤브레인식 LNG 저장탱크는 일본의 멤브레인 설계기술에 의해 건설되었지만, 저장탱크 4기 모두가 준공한 지 3년이 채 안 되는 저장탱크로 LNG 저장탱크 시스템의 안전성에 문제가 있지 않나 하는 의문점을 강하

게 제기하였다.

따라서 본 연구에서는 이러한 안전성 문제점을 착안하여 기존의 멤브레인식 LNG 저장탱크의 강도안전성을 보강할 수 있도록 내부탱크와 외부탱크 사이의 단열재 공간에 코너프로텍션을 설치하였다. 이러한 설계수정을 통해 멤브레인 내부탱크, 단열재 패널 상자, PC 외부탱크의 응력 및 변형거동 특성을 유한요소법으로 해석하였다.

II. FEM 해석모델 및 해석조건

2.1. 해석모델

본 연구에서 고려한 SUS 304 멤브레인 패널 용접식 LNG 저장탱크의 강도 안전성을 높이기 위해 단열재 공간에 코너프로텍션을 추가로 설치한 것을 기본모델로 하여 해석하였다.

요약하면, Fig. 1에서 보여준 것처럼 LNG 저장탱크의 코너지역에 SUS 304 강판으로 제작한 코너프로텍션을 설치하여 탱크에 가해지는 하중에 안전할 정도의 강도 및 가스누출 안전성을 동시에 확보하자는 것이다. LNG를 저장하는 내부탱크에는 특수 주름형상을 갖는 멤브레인 패널로 제작한다. 이 멤브레인 패널을 예응력 콘크리트(PC)로 제작한 외부탱크의 내벽면에 고정하기 위한 기다란 앵커, 내부탱크와 외부탱크 사이에 열유입을 차단하기 위해 나무상자 단열재 등을 설치하여 건설한 밀폐형 구조물 형상을 하고 있다.

2.2. 해석조건

초대형 멤브레인식 LNG 저장탱크의 내부탱크와 외부탱크 사이의 공간에 설치한 코너프로텍션의 응력과 변형거동 안전성을 해석하기 위해 MARC[6] 유한요소해석 프로그램을 사용하였다. 여기서 코너프로텍션에 대한 FEM 해석을 위해 2차원의 축대칭 4각요소(axisymmetric quadrilateral element)를 사용하기로 한다. 또한, 멤브레인 패널은 탄성거동을 하기 때문에

Table 1. Material properties.

Material Properties	PC	Plywood	SUS 304
Compressive strength, MPa	50	12	275
Thermal expansion coefficient, $\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}$	10	4.5	14.2
Thermal conductivity, W/mK	2.326	0.17445	9
Specific heat, J/kg · K	920.9	1,500	308
Mass density, kg/m^3	2,450	750	7,000

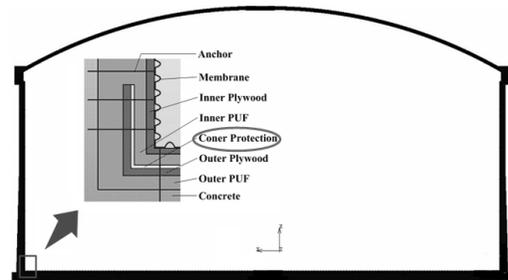
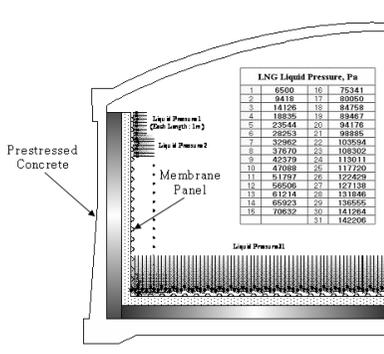
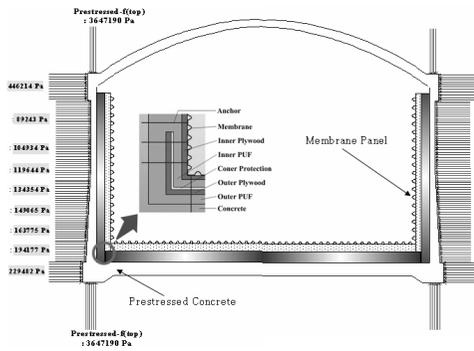


Fig. 1. Typical membrane type LNG storage tank with a corner protection.

축대칭 선형요소를 채택하였고, 단열재로는 합판과 폴리우레탄폼 소재를 사용하였으며, 이들에 대한 물리치는 Table 1과 같이 주어진다.



(a) Hydrostatic pressure



(b) Side wall pressure

Fig. 2. Boundary conditions of membrane type LNG storage tank.

2.3. 경계조건

LNG 저장탱크에 코너프로텍션을 추가로 설치함에 따라 내부탱크, 외부탱크, 단열재 박스에 영향을 주는 복합하중은 LNG에 의한 유체정압과 온도하중, 증발가스(boil-off gas) 압력, PC탱크 구조물에 작용한 외부하중 등을 거론할 수 있다.

Fig. 2(a)는 14만³급의 LNG를 저장할 수 있도록 제작된 멤브레인식 LNG 저장탱크의 내부탱크에 작용하는 유체정압 하중조건을 나타낸 것이고, Fig. 2(b)는 PC 외부탱크의 외벽면에 작용하는 외부하중 조건을 각각 보여주고 있다. 여기서 내부탱크에 작용하는 초저온 온도는 -162℃가 균일하게 작용한다고 가정한다.

III. 응력 및 변형거동 해석결과 고찰

기존의 멤브레인식 LNG 저장탱크에서 강도 안전성을 보장하기 위해 내부탱크와 외부탱크 사이의 단열재 공간에 별도로 설치한 코너프로텍션의 탱크타입 4가지를 Fig 3에서 보여주고 있다. 여기서 고려한 코너프로텍션은 내부탱크가 파손되어 LNG가 누설되어도 1차적으로 코너프로텍션 탱크가 누출 LNG를 안전하게 체류시킬 수 있다.

따라서 본 연구에서는 Fig. 3에서 제시한 4가지의 코너프로텍션 탱크타입에 대한 강도 안전성을 저장탱크의 코너부에 가까운 측벽면 지역 A와 바닥면 지역 B, 그리고 코너부에서 약간 떨어진 바닥면의 C지역을 중심으로 나누어 해석하였다.

Figs. 4~8은 Fig. 3에서 제시한 코너프로텍션 멤브레인 탱크타입에 대한 강도안전성을 나타내는 응력 및 변위거동 해석결과를 보여준 것이다. 여기서 제시한 결과는 코너프로텍션의 측벽면과 바닥면을 따라서 예측한 것으로 코너프로텍션의 설치여부에 따라 달라지는 특성을 잘 나타내고 있다.

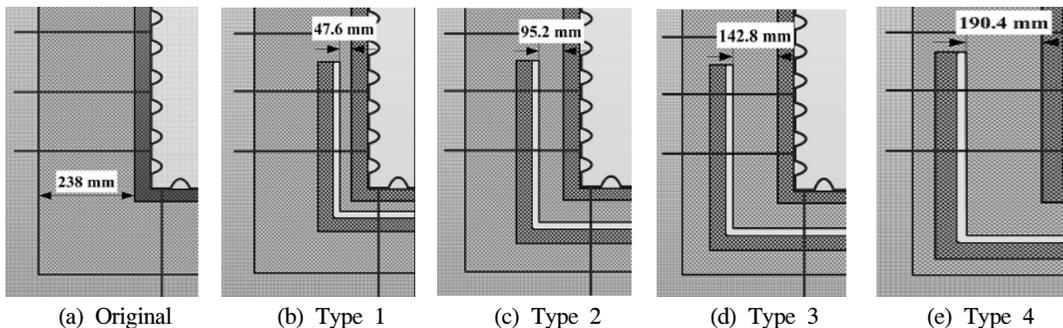
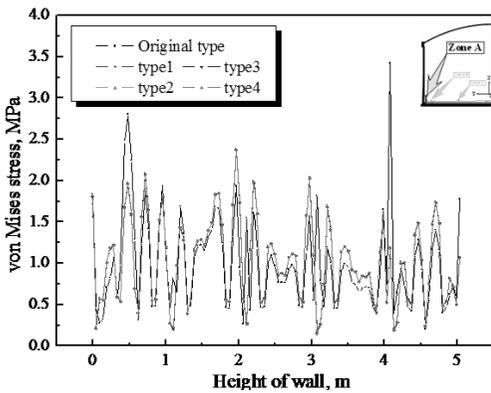
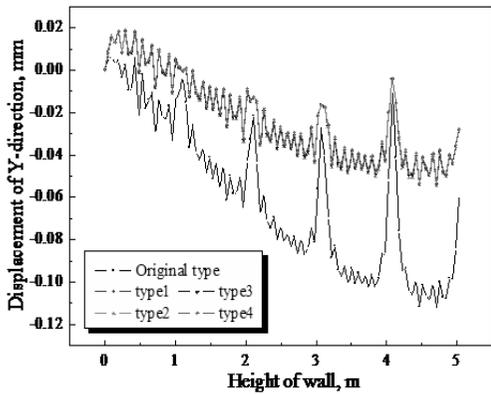


Fig. 3. Various types of corner protection.



(a) von Mises stress intensity



(b) Radial displacement

Fig. 4. Stress intensity and radial displacement of plywood panel box along the wall height at zone A.

Fig. 4는 LNG 저장탱크의 단열재 내부공간에 설치한 코너프로텍션 때문에 발생하는 A지역의 응력과 변위거동 특성을 단열재 박스의 측벽면 높이를 따라서 해석한 결과이다.

Fig. 4(a)에서 보여준 A지역의 단열재 박스에 대한 von Mises 최대응력 해석결과를 보면, 1m 간격으로 설치한 앵커의 높이를 따라서 변동이 크게 발생하지만, 전반적으로 규칙적인 응력거동 패턴을 보여주고 있다. 해석결과에 의하면, 코너프로텍션을 설치한 경우의 최대응력은 코너프로텍션을 설치하지 않은 기존의 단열재 박스 구조물에 비해 약간 낮은 것으로 나타났다. 또한, Fig. 4(b)에서 제시한 반경방향의 변위 거동량은 코너프로텍션을 설치함에 따라 수축되는 변형량이 크게 줄어드는 것을 보여주고 있다. 특히,

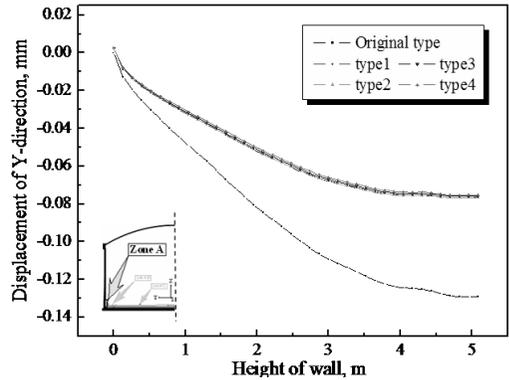


Fig. 5. Radial displacement of prestressed concrete outer tank along the wall height at zone A.

코너프로텍션을 설치하지 않은 LNG 저장탱크의 단열재 박스의 반경방향 변위량은 바닥면보다는 측벽면의 위쪽으로 올라갈수록 크게 증가하고 있음을 알 수 있다.

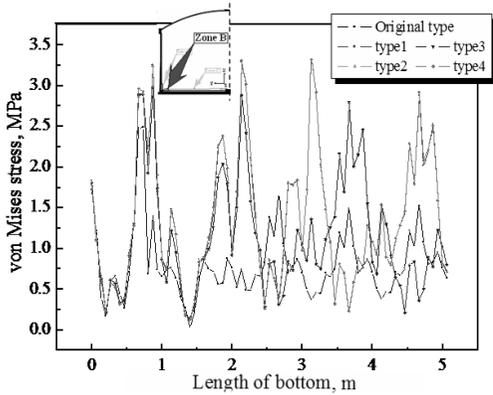
단열재 공간에 코너프로텍션을 설치한 LNG 저장탱크에서 단열재 박스에 걸리는 응력과 변위거동 특성을 보면, 코너프로텍션을 설치하지 않은 경우의 단열재 박스에 작용하는 응력은 약간 높지만 변형거동은 더 크게 벌어지는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 LNG 저장탱크의 단열재 공간에 설치한 코너프로텍션 때문에 발생하는 응력 콘크리트(prestressed concrete) 외부탱크의 측벽면 높이를 따라서 작용하는 A지역의 응력거동 특성을 보여주고 있다.

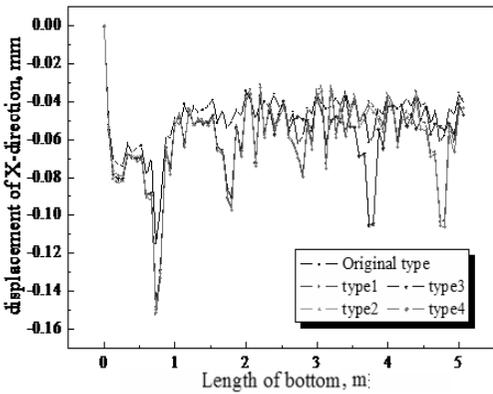
Fig. 5에서 제시한 A지역의 PC 외부탱크에 대한 반경방향의 변위 거동량은 코너프로텍션의 설치위치에 따라 달라지는 변동폭이 거의 없으면서 낮게 유지되는 것에 비하여, 코너프로텍션을 설치하지 않은 경우의 변형거동 수축량은 위로 올라가면서 크게 증가하는 것으로 나타났다. 즉, PC 외부탱크 구조물의 높이 5m 지역에서 코너프로텍션을 설치하면 수축 변형량이 약 반으로 줄어들어 안전성을 확보하고 있다.

Fig. 6은 LNG 저장탱크의 단열재 공간에 코너프로텍션을 설치하여 단열재 박스의 바닥면을 따라서 작용하는 B지역의 응력과 변형거동 특성을 보여주고 있다.

Fig. 6(a)에서 보여준 B지역의 단열재 박스에 대한 von Mises 최대응력을 보면, 앵커가 설치된 1m 간격을 따라서 전반적으로 높은 응력거동 패턴을 나타내고 있다. FEM 해석결과에 의하면, 코너프로텍션을 설치하지 않은 경우의 최대응력은 전반적으로 높게 나타났다. 또한, 코너프로텍션 탱크타입 1처럼 내부탱크에 근접되게 설치할수록 최대응력은 상대적으로 높



(a) von Mises stress intensity



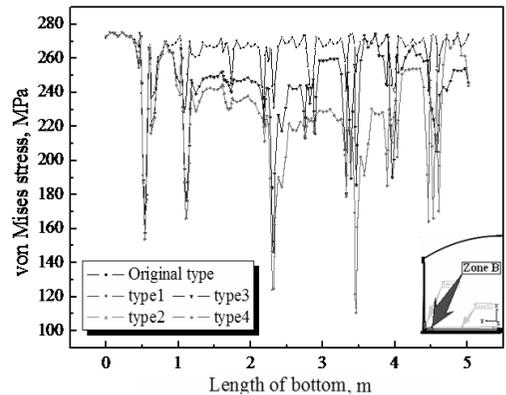
(b) Depth displacement

Fig. 6. Von Mises stress and depth displacement of plywood panel box near tank corner along the bottom plate at zone B.

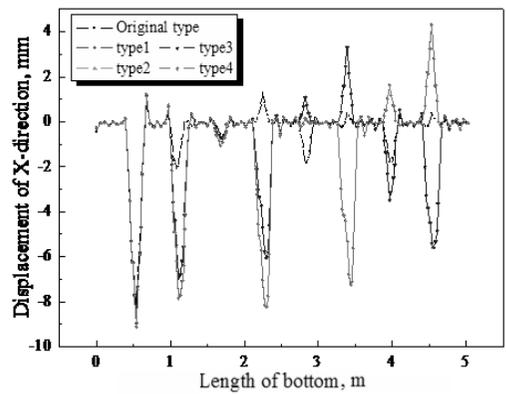
게 나타났다. 또한, Fig. 6(b)에서 보여준 수직방향의 침하량은 코너프로텍션을 설치함에 따라 침하량이 약간 줄어드는 결과를 제시하고 있다. 결과적으로 코너프로텍션을 내부탱크에서 멀리 떨어지도록 설치한 경우의 침하량이 더 작게 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 LNG 저장탱크의 단열재 공간에 코너프로텍션을 설치할 때 멤브레인 패널로 제작한 내부탱크의 바닥면을 따라서 작용하는 B지역의 응력과 변형거동 특성을 보여주고 있다.

Fig. 7(a)에서 보여준 B지역의 멤브레인 내부탱크에 대한 von Mises 최대응력을 보면, 앵커가 설치된 1m 간격을 따라서 높은 응력거동 패턴을 나타내고, 코너지역보다는 탱크의 중심지역으로 약간 이동한 3m 지역에서 가장 높게 나타났다. FEM 해석결과에 의하면,



(a) von Mises stress intensity

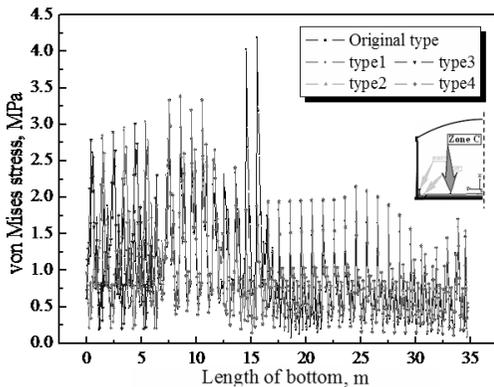


(b) Depth displacement

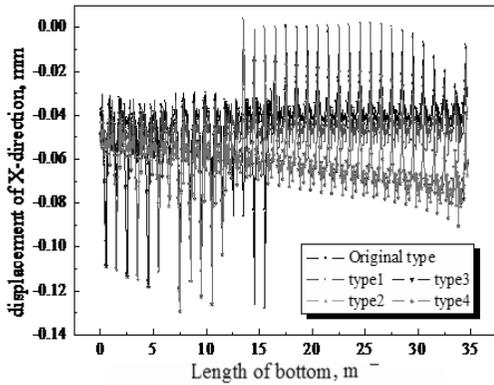
Fig. 7. Von Mises stress and depth displacement of membrane panel inner tank near tank corner along the bottom plate at zone B.

코너프로텍션을 설치하지 않은 경우의 최대응력이 비교적 높게 나타났고, 코너프로텍션을 내부탱크에 근접하여 설치할 경우의 응력이 높다는 사실을 보여준다. 또한, Fig. 7(b)에서 제시한 수직방향의 침하변위 거동량은 코너프로텍션을 설치함에 따라 침하되는 변위량이 약간 줄어드는 경향을 보여주고는 있지만, 코너프로텍션을 설치하지 않거나 또는 내부탱크에 근접되게 설치할수록 멤브레인 바닥면에서의 침하 현상은 크게 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 LNG 저장탱크의 단열재 공간에 설치한 코너프로텍션 때문에 코너부로부터 약간 떨어지게 설치한 단열재 박스의 바닥면 길이를 따라서 작용하는 C지역의 응력과 변형거동 특성을 보여주고 있다.



(a) von Mises stress intensity



(b) Depth displacement

Fig. 8. von Mises stress and depth displacement of plywood panel box along the bottom plate at zone C.

Fig. 8(a)에서 보여준 C지역의 단열재 박스에 대한 von Mises 최대응력을 보면, 코너프로텍션을 설치한 경우의 최대응력은 코너부근에서 높게 나타나지만, 코너부근에서 멀리 떨어진 15m 지역에서는 크게 줄어드는 경향을 보여준다. 반면에 코너프로텍션이 없는 단열재 패널의 바닥면에서는 15m 지역에서 가장 높은 응력이 걸리고, 응력강도도 코너프로텍션을 설치한 경우에 비해 전반적으로 높게 작용하는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 8(b)에서 제시한 수직방향의 침

하변위 거동량은 코너부근에서 크게 발생하다가 13m 정도를 지나면서 많이 완화되는 경향을 나타낸다. 특히 침하량 감소는 코너프로텍션을 멤브레인 내부탱크에 근접되게 설치한 경우에 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구는 기존의 LNG 저장탱크와는 달리 내부탱크와 외부탱크사이의 단열재 공간에 별도의 코너프로텍션을 추가한 새로운 LNG 저장탱크 구조물의 응력 및 변형거동 특성을 FEM으로 해석하였다.

FEM 구조해석 결과에 의하면, 기존의 멤브레인식 LNG 저장탱크에 멤브레인 패널로 제작한 코너프로텍션을 추가적으로 설치할 경우 단열재 상자, 멤브레인 내부탱크, PC 외부탱크에 작용하는 응력은 상대적으로 낮아지고, 변위 거동량 또한 줄어드는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 단열재 공간에 코너프로텍션을 설치함에 따라 프로텍션 구조물이라는 강성체를 삽입하면서 저장탱크 시스템의 강성도가 상대적으로 높아지기 때문이다. 따라서 기존의 멤브레인식 LNG 저장탱크에 코너프로텍션을 추가하면 강도안전성이 향상된다는 사실을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 김청균 외, “LNG 저장탱크용 멤브레인 구조 및 그 제조방법,” 대한민국, 프랑스 특허등록 (1995).
- [2] 김청균 외, “LNG 저장탱크용 회전 열변형 거동방식의 개선된 T-형 멤브레인 구조물,” 대한민국, 중국, 인도 특허등록 (1997).
- [3] 권순철, “인천LNG 가스누출 이유 있었네,” 경향신문 (2007. 7. 5).
- [4] 박양수, “가스저장시설 관리체계 ‘구멍,’” 문화일보 (2007. 10. 24).
- [5] 김영환, “충도LNG 저장탱크가스누출 원인도 파악 못해,” 한겨레신문 (2007. 2. 9).
- [6] “MARC user’s manual,” Version K6.1, MARC Analysis Research Co. (1996).