

LNG 저장탱크 코너프로텍션의 설계안전성에 관한 수치적 연구

조승현 · 김청균

홍익대학교 기계시스템디자인공학과

Numerical Study on Safety Design of Corner Protection in LNG Storage Tank

Seung Hyun Cho · Chung Kyun Kim

Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

1. 서론

LNG 저장탱크의 코너프로텍션은 5mm 두께의 9% Ni 강재를 저장탱크 바닥면에서 5m 높이까지 내부탱크와 외부탱크 사이에 설치한 안전구조물로서 내부탱크 코너부의 강도 안전성을 확보하고 내부탱크 파손으로 누설된 초저온 액체를 잠시 저장시킬 수 있는 안전장치이다. 코너 프로텍션의 외벽측에는 검은색의 셀룰라글라스 단열재를 배열하여 단열처리하고 내부탱크에 설치된 주펌프로 5m 높이로 설치된 코너 프로텍션 내부에 잠시 저장된 LNG를 인접한 탱크로 이송하는데는 약 하루정도 걸리는 것으로 설계된다[1].

코너프로텍션은 바닥면의 직경이 86m이고 높이가 5m인 대단히 큰 구조물이지만 강재의 두께는 5mm로서 외부에서 가해지는 압력에 매우 취약한 구조이다. 이러한 코너프로텍션에 외압이 가해지는 경우는 퍼지작업을 할 때가 유일한데, 퍼지작업을 할 때 KHI 설계조건에 의하면 N_2 가스의 최대 압력은 $15gf/cm^2$ 이다.

따라서 본 논문에서는 코너프로텍션에 외압이 설계조건 이상으로 가해지는 비정상적인 경우와 내부탱크에서 초저온 LNG가 누설되는 조건에서 9% 니켈강식 코너프로텍션의 설계 안전성을 유한요소법을 이용하여 연구하고자 한다.

2. 해석모델 및 해석조건

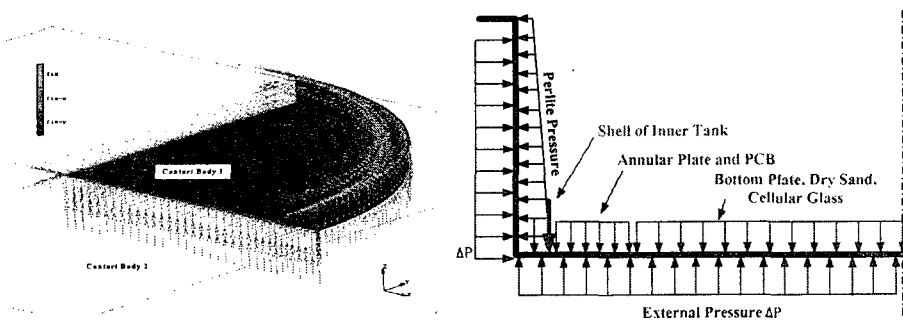
9% 니켈강으로 제작된 코너프로텍션의 설계안전성 해석을 위하여 본 해석에서는 Fig. 1(a)과 같이 4개의 노드를 갖는 Bilinear Thin-shell 요소를 사용하여 1/4형태의 축대칭 모델로 해석하였다.[2]

코너 프로텍션의 바닥판에 가해지는 하중조건은 Fig. 1(b)에서 보여주는 바와 같이 내부탱크의 환상판(Annular Plate), 바닥판(Bottom Plate), 셸(Shell)의 무게를 모두 고려하였고, 내부탱크와 코너 프로텍션 사이에 설치되어 있는 PCB, 건사(Dry Sand), Cellular Glass의 무게도 역시 고려하여 해석하였다. 또한, 코너 프로텍션의 측벽면에 작용하는 루즈 펄라이트(Loose Perlite)의 압력을 고려하였다. Fig. 1(c)는 코너프로텍션의 모서리의 형상을 나타낸 그림이다. 이와 같이 코너 프로텍션에 가해지는 하중은 Table 1과 같다. 코너 프로텍션 내부에서 가해지는 하중조건을 고려하기 위하여 접촉모델(Contact Model)을 사용하였다.

Table 1 코너 프로텍션 해석을 위해 고려한 하중조건

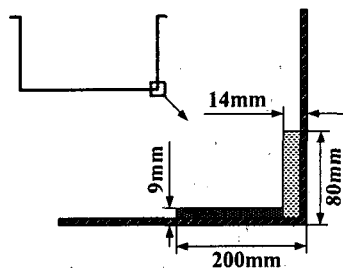
Annular Plate Loads of Inner Tank	1880Pa	Bottom Plate Loads of Inner Tank	392.4Pa
PCB Loads	5797.7Pa	Dry Sand Loads	3590.5Pa
-	-	Cellular Glass Loads	264.9Pa
Total Loads	7677.7Pa	Total Loads	4247.8Pa

※ 내부탱크의 벽면 무게 : 922.3Ton



(a) 1/4 유한요소 모델

(b) 경계조건



(c) 모서리 형상

그림. 1 코너 프로텍션의 해석모델

Table 1 Mechanical and thermal properties of 9% Ni steel

Properties	Value	Properties	Value
Elasticity module [GPa]	191	Ultra 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
poison's ratio	0.3	Thermal conductivity [W/m · K] at -200°C	16
Yield strength [MPa]	670	Specific heat [J/kg · K] at -100°C	510

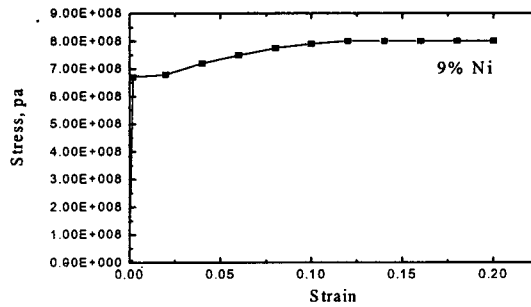


그림 2. 9% Ni강의 응력-변형률 곡선

그림 2는 코너 프로텍션의 소재로 사용된 9% Ni강의 응력-변형률 곡선이며 Table 2는 9% Ni강의 기계적-열적 특성값을 나타낸 표이다.

3. 결과

3.1 외압이 작용한 모델

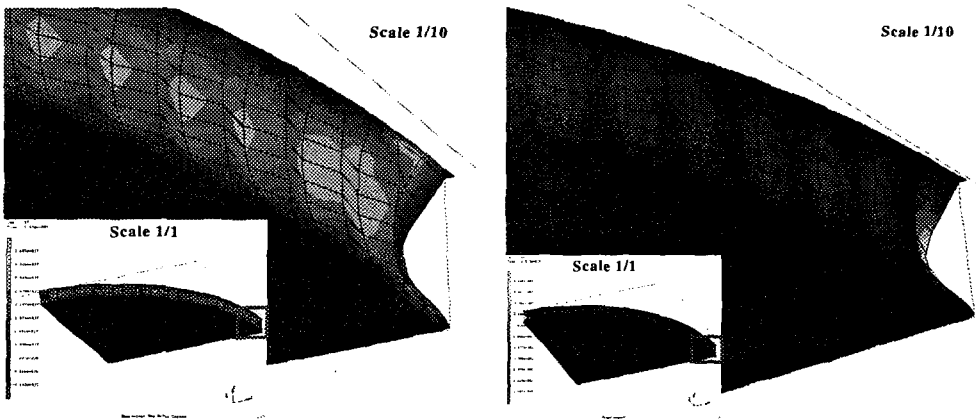
Fig. 3은 코너 프로텍션의 외부에 공급할 수 있는 최대 가스압력 1,500Pa(KHI의 설계조건)이 가해졌을 때 발생하는 von Mises 응력과 변위량 분포를 나타낸 결과이다. Fig. 3의 해석결과에 의하면, 측벽의 코너부에서 36.89MPa의 최대 von Mises 응력과 116.9mm의 최대 변위량이 발생하였다. 여기서 내부탱크의 바닥판 밑에 있는 코너 프로텍션의 바닥 가운데 부분은 Table. 1에서 언급한 바와 같이 내부탱크, 건사, Cellular Glass의 무게를 고려하면 최소 4,248Pa 이상의 가스압이 코너 프로텍션에 가해져야 변형이 발생한다.

따라서, Fig. 4는 4,248Pa의 가스압이 코너 프로텍션에 가해졌을 때 발생한 응력과 변위량 분포를 보여주고 있다. 최대 von Mises 응력 91,98MPa과 최대 변위량 144.6mm는 측벽의 코너부에서 발생하였다.

코너 프로텍션의 내부에서 가해지는 가스압이 계속 증가하여 7,678Pa에 도달하면, 내부탱크의 환상판(Annular Plate)의 밑에 있는 코너 프로텍션 바닥판(2nd Bottom Plate)에서 변형이 발생하기 시작한다. Fig. 5는 코너 프로텍션에 7,678Pa의 가스압이 가해졌을 때 발생한 응력과 변위량 분포로서, 최대 von Mises 응력은 측벽의 코너부에서 232.4MPa이 발생하였고, 최대 변위량은 바닥판의 코너의 가운데에서 1.694m가 발생하였다. 이 때에 코너부의 벽면에서 발생한 최대 변위량은 170mm로 바닥판에 비하여 크게 작다.

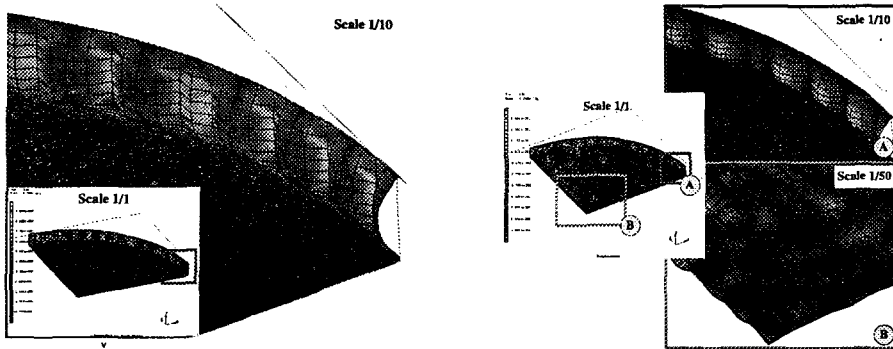
Fig. 6은 코너 프로텍션의 내부에서 가해지는 가스압이 최대 8,475Pa이 가해졌을 때 발생한 응력과 변위량으로서 최대 von Mises 응력은 2차 바닥판의 코너 가장자리가 위치해 있는 곳에서 처음으로 항복응력 이상인 833MPa이 발생하였고, 최대 변위량은 2차 바닥판의 가운데에서 1.908m가 발생하였다. 이때 측벽면에서 발생한 변위량은 178mm로 바닥판에 비하여 크게 작다.

결국, 코너 프로텍션에서 파단이 일어날 수 있는 가스압 조건은 8,475Pa 정도로 밸브의 설계 제한치 1,500Pa보다 5.6배 이상 높게 가해야 코너부에서 파단이 일어나기 때문에 대단히 높은 압력을 가해야 한다.



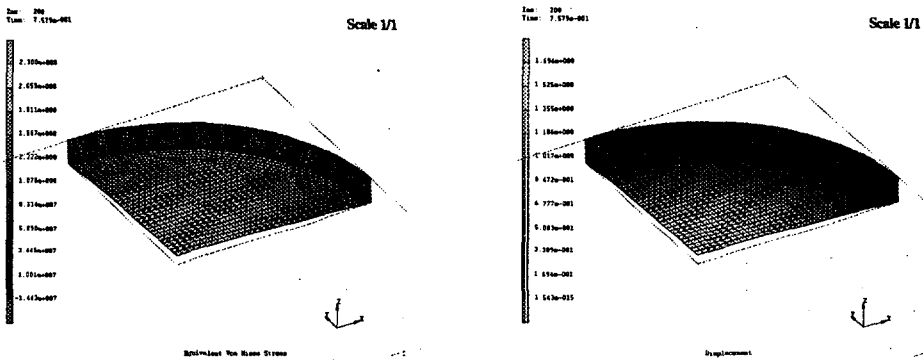
(a) 벽면의 최대 von Mises 응력(36.89MPa) (b) 벽면의 최대 변위량(116.9mm)

Fig. 3 코너 프로텍션에 가할 수 있는 최대 설계 압력인 1,500Pa의 가스압이 코너 프로텍션에 가해진 경우 코너 프로텍션에 발생하는 von Mises 응력과 변위량 분포도

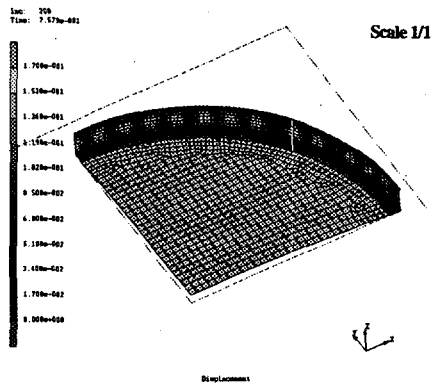


(a) 벽면의 최대 von Mises 응력(91.98MPa) (b) 벽면의 최대 변위량(144.6mm)

Fig. 4 4,248Pa의 가스압이 코너 프로텍션에 작용하는 경우 코너 프로텍션에 발생하는 von Mises 응력과 변위량 분포도

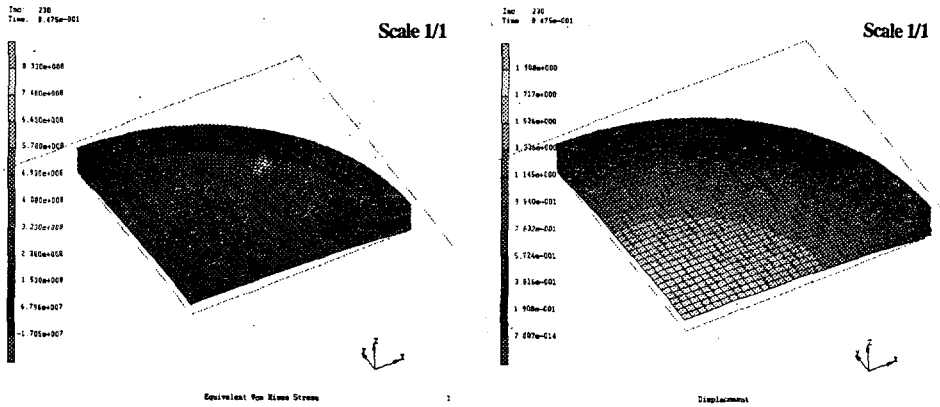


(a) 바닥판의 최대 von Mises 응력(230MPa) (b) 바닥판의 최대 변위량(1.694m)

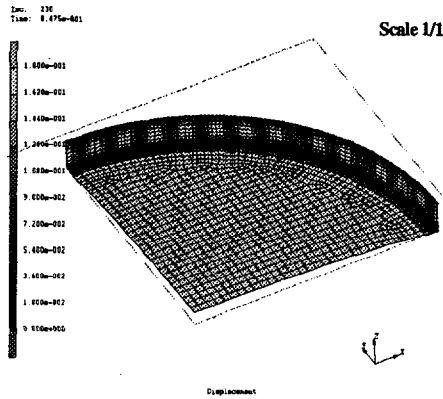


(c) 벽면의 최대 변위량(170mm)

Fig. 5 7,678Pa의 가스압이 코너 프로텍션에 작용하는 경우 코너 프로텍션에 발생하는 von Mises 응력과 변위량 분포도



(a) 바닥판의 최대 von Mises 응력(833MPa) (b) 바닥판의 최대 변위량(1.908m)

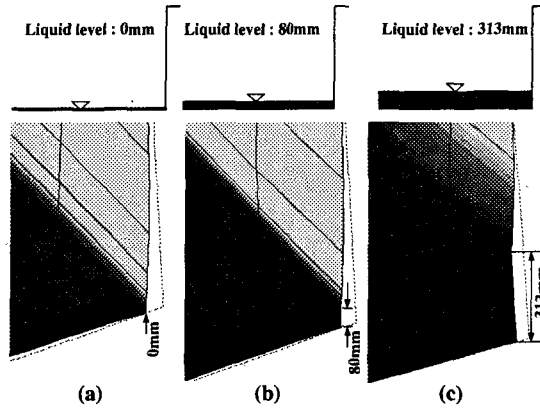


(c) 벽면의 최대 변위량(178mm)

Fig. 6 8,475Pa의 가스압이 코너 프로텍션에 작용하는 경우 코너 프로텍션에 발생하는 von Mises 응력과 변위량 분포도

3.2 액화천연가스가 누설된 모델

지금까지 LNG 저장탱크의 코너프로텍션에 가스압이 가해지는 경우에 대해 코너프로텍션의 안전성 해석에 관한 결과를 살펴보았다. 코너프로텍션이 가장 큰 목적은 내부탱크의 파손으로 인해 누설된 액화천연가스를 일정시간동안 보관하는 역할이다. 따라서 비상시 액화천연가스가 누설되었을 때 코너프로텍션의 안전성을 검토하기 위해 Figs. 7(a)~(c)와 같이 액화천연가스가 누설된 3개의 가상모델을 해석하였다. Fig. 7(a)는 액화천연가스가 코너프로텍션의 바닥면을 완전히 적신 경우이고 Fig. 7(b)는 누설된 액화천연가스의 높이가 80mm인 모델이며, Fig. 7(c)는 코너프로텍션이 바닥으로부터 313mm높이까지 액화천연가스가 누설된 모델이다.



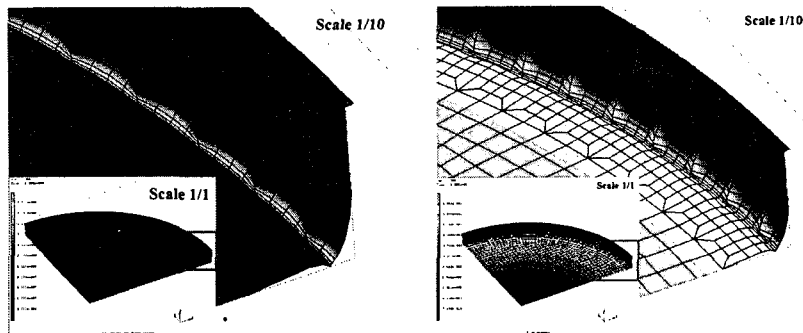
- (a) 액화천연가스가 누설되어 코너프로텍션의 바닥면에 깔린 경우
- (b) 누설된 액화천연가스의 액위가 80mm인 경우
- (c) 누설된 액화천연가스의 액위가 313mm인 경우

Fig. 7 액화천연가스가 누설된 모델

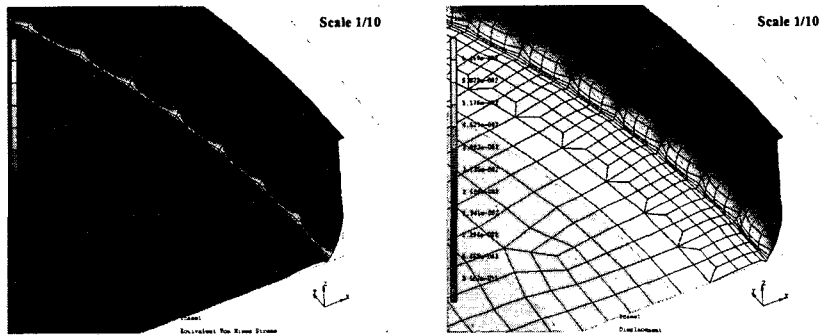
Figs. 8(a), (b)는 Fig. 7(a)의 모델에서 발생한 von Mises 응력과 변위량을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 최대 von Mises 응력은 코너프로텍션의 모서리를 보강하기 위해 설치된 보강판의 끝단에서 279.2MPa이 발생하였다. 보강판의 끝단에서 가장 큰 응력이 발생한 것은 변형에 의한 기계적 응력과 온도차에 의한 열응력 때문이다. 즉, Fig. 8(b)에서 보여주는 것과 같이 -162°C 의 초저온에 의해 코너프로텍션의 바닥면이 수축하면서 벽면은 안쪽방향으로 변형을 하려고 하지만 코너프로텍션의 모서리에 설치된 보강판이 변형을 억제하는 역할을 하기 때문이며, 바닥면의 온도는 -162°C 이고 벽면의 온도는 열전도에 의해 -16°C 까지 냉각되는데 보강판의 끝단에서 가장 큰 온도차가 발생하여 열응력이 가장 크게 발생하였기 때문이다. 한편 최대 변위량은 코너프로텍션의 벽면에서 안쪽방향으로 65.54mm가 발생하였다.

Figs. 9(a),(b)는 액화천연가스가 코너프로텍션의 바닥면으로부터 80mm까지 누설된 모델에서 발생한 von Mises 응력과 변위량 분포를 나타낸 그림이다. Figs. 8에 비해 변형된 지역이 넓어지면서 변형에 의한 기계적 응력이 다소 완화되면서 최대 von Mises 응력이 270.6MPa로 감소하였고, 최대 변위량도 64.69mm로 미소하지만 감소하였다.

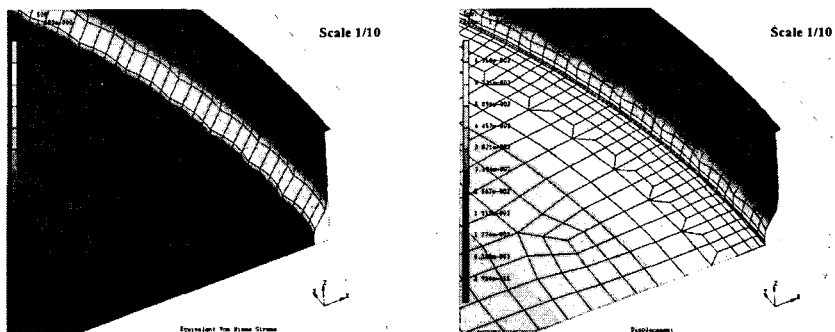
Figs. 10(a),(b)는 액화천연가스가 코너프로텍션의 바닥면으로부터 313mm까지 누설된 모델에서 발생한 von Mises 응력과 변위량 분포를 나타낸 그림으로서 Figs. 9보다도 훨씬 넓은 지역에서 변형이 발생하였는데, 특히 코너프로텍션의



(a) 벽면의 최대 von Mises 응력(279.2MPa) (b) 벽면의 최대 변위량(65.54mm)
 Fig. 8 액화천연가스가 누설되어 바닥면에 깔린 경우 코너프로텍션에서 발생한 von Mises 응력과 변위량 분포도



(a) 벽면의 최대 von Mises 응력(270.6MPa) (b) 벽면의 최대 변위량(64.69mm)
 Fig. 9 액화천연가스가 누설되어 바닥면으로부터 80mm의 높이까지 찬 경우에 코너프로텍션에서 발생한 von Mises 응력과 변위량 분포도



(a) 벽면의 최대 von Mises 응력(76.37MPa) (b) 벽면의 최대 변위량(63.68mm)
 Fig. 10 액화천연가스가 누설되어 바닥면으로부터 313mm의 높이까지 찬 경우에 코너프로텍션에서 발생한 von Mises 응력과 변위량 분포도

벽면에서 안쪽으로 변형이 많이 된 것을 알 수 있다. 이것은 액화천연가스가 코너프로텍션의 모서리에 설치된 보강판보다 높은 액위를 가지면서 5mm두께의 코너프로텍션 벽면에서 많은 변형이 발생하였기 때문이다. 이와 같은 이유로 von Mises 응력 역시 5mm두께의 벽면으로 넓게 분포하면서 76.37MPa으로 급격히 감소하였다.

4. 결론

본 논문에서는 코너프로텍션의 안전성 설계를 연구하기 위해 크게 2가지 경우에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다.

첫째, KHI 설계기준과 같이 1500Pa(15gf/cm²)이하의 외압이 가해지는 경우는 안전성에 전혀 문제가 발생하지 않았으나 8,475Pa(84.75gf/cm²)이상의 압력이 외부에서 가해진다면 내부탱크의 벽면과 접하고 있는 바닥면에서부터 9% 니켈강의 항복강도 이상의 응력이 발생된다.

둘째, 내부탱크로부터 액화천연가스가 누설되어 코너프로텍션이 -162℃의 초저온에 노출되는 경우 액화천연가스의 액위에 따른 3가지 모델에 대해 해석을 수행하였는데, 액화천연가스에 의한 코너프로텍션은 안전하였다. 액화천연가스에 의한 온도차가 큰 경계면에서 열응력이 크게 발생하였으나 주된 응력의 원인은 수축에 의한 기계적 응력이었다. 이러한 수축에 의해 발생하는 변형은 모서리부에 설치된 보강판이 상당부분 억제하는 역할을 하기 때문에 액화천연가스가 바닥면에서 보강판의 높이인 80mm까지 차는 경우에는 응력이 200MPa 발생하지만 보강판 높이 이상으로 액위가 높아지면 벽면의 변형량이 커지면서 오히려 응력이 낮아진다. 이와 같은 결과는 내부탱크로부터 액화천연가스가 누설되어 보강판 높이까지 액위가 올라가기 전에 코너프로텍션의 구조안전성에 가장 중요한 시점이기 때문에 이때 비상조치를 취해야 할 것이다.

5. 참고문헌

- [1] LNG 저장탱크의 안전장치, 한국가스안전공사.
- [2] "MARC user's manual," Version K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.