

# 완전밀폐식 저장탱크에서 내부탱크 바닥판의 설계안전성 해석

## PART1 : 유체정압을 고려한 경우

김한구<sup>1</sup> · 조승현<sup>1</sup> · 김청균<sup>1</sup> · 김영규<sup>2</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 기계시스템디자인공학과

<sup>2</sup>한국가스안전공사 가스안전시험연구원

### An Analysis on the Design Safety of Inner Tank in Full Containment LNG Storage Tank with Geometric Condition

#### PART1 : including Hydrostatic Pressure

Han Goo Kim<sup>1</sup> · Seung Hyun Cho<sup>1</sup> · Chung Kyun Kim<sup>1</sup> · Young Gyu Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

<sup>2</sup>Institute of Gas Safety Technology, Korea Gas Safety Corporation

## 1. 서 론

완전 밀폐식 LNG 저장탱크(Full Containment LNG Storage Tank)는  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 LNG를 저장하기 위한 내부탱크(Inner Tank)와 단열재를 사이에 두고 건설되는 외부탱크(Outer Tank)의 간단한 초대형 저장탱크로 한국이나 일본과 같이 불가피하게 LNG선으로 운송해야 하는 나라에서 대단히 중요한 LNG 설비이다.

밀폐식 저장탱크에서 기능상 가장 중요한 내부탱크는  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 LNG를 안전하게 저장하고, 이송해야 하는 직접적인 기능성, 하중지지 안전성을 100% 확보하고 있어야 한다. 또한, 외부탱크는 외부에서 유입되는 모든 하중과 내부탱크로부터 유입되는 일시적 누설 차단성과 하중지지성을 확보하고 있어야 한다. 따라서, 완전 밀폐식 저장탱크가 2개의 탱크, 즉 내부탱크와 외부탱크가 안전성을 독자적으로 확보하고 있어야 하고, 동시에 안전성을 효과적으로 보완하는 시스템으로 구성되어 있기 때문에 자립식 저장탱크라 하는 이유가 여기에 있다.

본 연구에서는 LNG와 직접 접촉하면서 하중지지와 밀봉 내구성을 동시에 확보하고 있어야 하는 내부탱크의 바닥판 구조물의 설계 안전성을 해석하고자 한다. 즉, 내부탱크 구조물의 안전성을 확보하기 위해서 내부탱크의 벽면에는 LNG의 접촉위치에 따라 유체정압 또는 동압 및 초저온 하중을 비균일하게 받고 있지만, 내부탱크의 바닥면에는 항상 균일한  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 초저온 하중과 유체정압을 받도록 설계되어 있다. 그러나, 초대형 내부탱크의 바닥면은 내부탱크의 크기와

바닥면의 설계형상에 따라 특별한 응력거동 특성을 나타내기 때문에 구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 이에 대한 설계 안전성 연구가 진행되어야 한다.

## 2. 해석모델 및 해석조건

내부탱크의 바닥판에 대한 설계는  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 LNG를 안전하게 저장하기 위해서 유입된 초저온 액체의 정압과 온도하중에 대해 안전하게 변형하고, 응답해야 한다. 이것을 위해 내부탱크 바닥판의 설계는 다음과 같은 안전설계 기준과 가정을 만족해야 한다. 즉,

- 1) 내부탱크 바닥면의 중심부는 항상 동심원에서 상하로 거동해야 한다.
- 2) 내부탱크의 바닥면과 측면이 만나는 코너부의 변형거동은 없다고 가정한다.
- 3) 판재를 연결하는 용접부의 결합이나 잔류응력은 존재하지 않는 것으로 가정한다.

해석모델은 Fig. 2-1에서 보여주는 바와 같이 LNG 저장탱크가 축대칭 형상을 하고 있으므로 LNG 저장탱크의 1/4만을 수치해석 대상으로 고려하였다. 해석에 사용된 요소는 4개의 노드를 갖는 Bilinear Thin-shell 요소로서 복잡한 판 구조물뿐만 아니라 곡선형태의 셀에도 적합하며 비선형 해석에 특히 유용한 요소이다. 해석프로그램은 선형 및 비선형 유한요소 해석 상용프로그램인 MARC 7.3을 사용하였다[2].

LNG 저장탱크의 재질은 9% 니켈강으로써 항복강도가  $670\text{MPa}$ 이고 탄성계수는  $191\text{GPa}$ 로 높기 때문에 LNG 저장탱크 제작에 적합한 소재이다.

Fig. 2-2에는 LNG 저장탱크에 LNG액이 완전히 채워졌을 경우 저장탱크에 가해지는 정수압을 나타내고 있다.

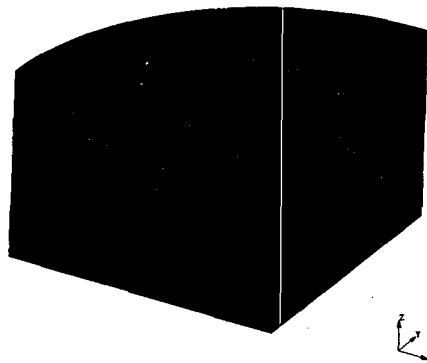


Fig. 2-1 LNG 저장탱크 1/4 유한요소 모델.

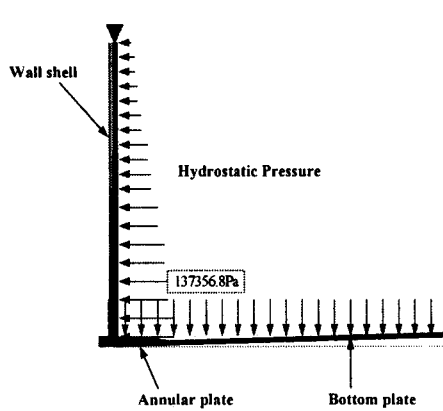


Fig. 2-2 LNG 저장탱크에 가해지는 정수압 조건.

### 3. 해석결과 및 고찰

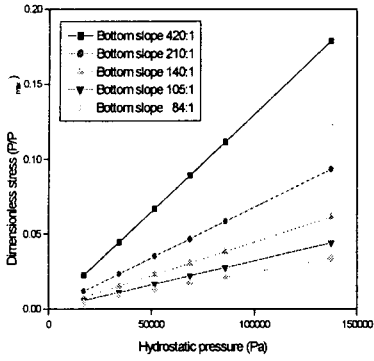
#### 3-1. LNG 저장탱크 바닥판의 기울기 변화에 따른 최대응력 및 변위량의 변화

LNG 저장탱크에서 LNG 액위가 증가함에 따라 탱크내부의 정수압이 점점 증가하게 된다. 이때 LNG 저장탱크 바닥판의 기울기가 다른 경우 LNG 저장탱크 바닥판에 발생하는 최대응력과 변위량의 변화를 비교하여 보았다.

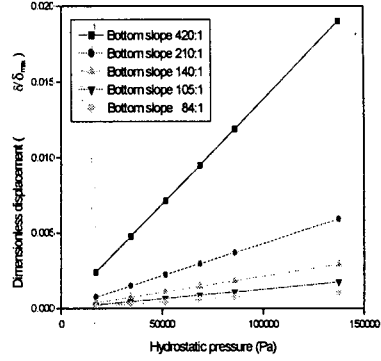
Fig. 3-1은 LNG 저장탱크 바닥판의 기울기가 다른 경우 LNG 액위가 증가함에 따른 최대응력과 변위량의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 3-2는 LNG액이 저장탱크에 완전히 채워졌을 때 바닥판 중앙부 높이에 따른 최대응력과 변위량의 변화를 나타내고 있다. 이때 바닥판이 평판인 경우와 바닥판 가운데 높이가 100mm(420:1)인 경우를 비교해 보면 발생하는 최대응력값의 차이가 5배 이상 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 최대응력과 변위량의 값이 급격히 감소하다가 LNG 저장탱크 바닥판 중앙부 높이가 200mm 이상이 될 때를 기준으로 하여 변화량의 변화가 완만해 지는 것을 볼 수 있다. 하지만 바닥판 가운데 높이가 증가할수록 벽과 바닥판이 이루는 각도가 점점 90도를 벗어나게 되므로 90도를 벗어나지 않는 한도내에서 바닥판 중앙부 높이를 결정해야 할 것이다.

Table 3-1에는 바닥판 기울기가 각각 다른 경우에 대한 벽과 바닥판사이의 각도를 나타내었다.

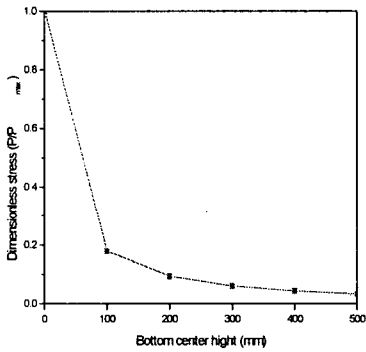


(a) 최대응력

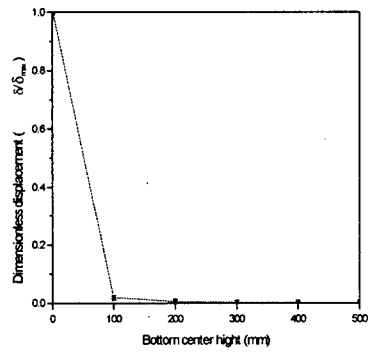


(b) 변위량

Fig. 3-1 LNG 저장탱크 바닥판의 기울기가 다른 경우 정수압이 증가함에 따른 최대응력과 변위량의 변화.



(a) 최대응력



(b) 변위량

Fig. 3-2 LNG액이 저장탱크에 완전히 채워졌을 때 바닥판의 중앙부 높이에 따른 최대응력과 변위량의 변화.

Table 3-1. LNG 저장탱크 바닥판 중앙부 높이변화에 따른 벽과 바닥판 사이의 각도

Bottom center hight	Bottom slope	Wall & Bottom Angle
100mm	420:1	89.86°
200mm	210:1	89.73°
300mm	140:1	89.59°
400mm	105:1	89.45°
500mm	84:1	89.32°

### 3-2. LNG 저장탱크 Annular plate의 두께 변화에 따른 최대응력 및 변위량의 변화

Fig. 3-3은 LNG 저장탱크의 Annular plate 두께변화에 따른 최대응력과 변위량의 변화를 나타내고 있다. LNG 저장탱크의 Annular plate 두께가 바닥판 두께와 같은 5mm 일 때와 이보다 5mm증가한 10mm일 때 발생하는 최대응력이 50%정도 감소하는 것을 알 수 있다. 변위량의 경우는 Annular plate의 두께가 20mm를 기준으로 변위량의 변화가 완만해지는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3-4는 LNG액이 저장탱크에 완전히 채워졌을 때 Annular plate의 두께에 따른 최대응력과 변위량의 변화를 나타낸 것이다. 이때 최대응력과 변위량의 변화량을 모두 관찰해 보면 Annular plate의 두께가 20mm이상 정도에서 변화량이 완만하게 변하는 것을 알 수 있다. 특히, LNG 저장탱크의 Annular plate 두께가 10mm와 15mm일 때 최대응력값이 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 하지만 Fig. 3-5에 나타난 것과 같이 Annular plate의 두께가 변화함에 따라 최대응력이 발생하는 위치가 각각 달라지는 것을 알 수 있다.

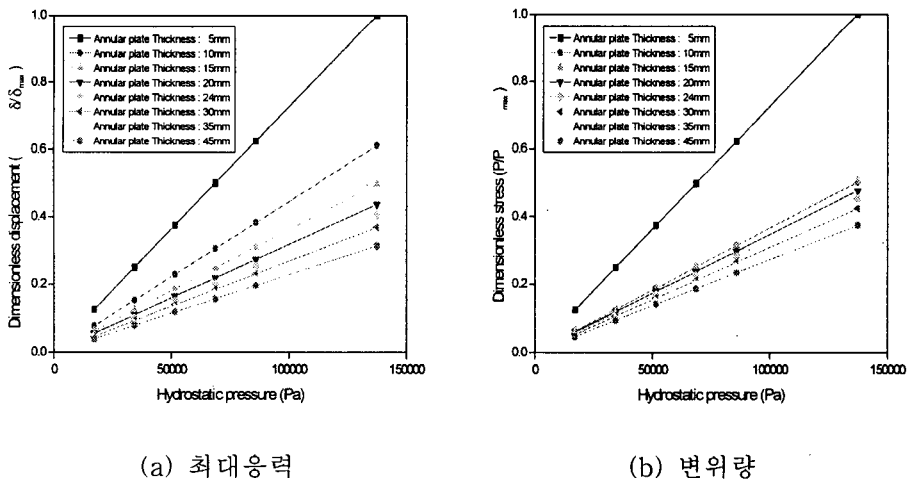
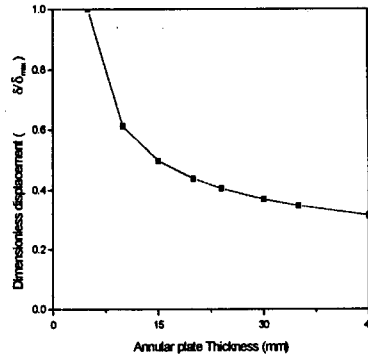
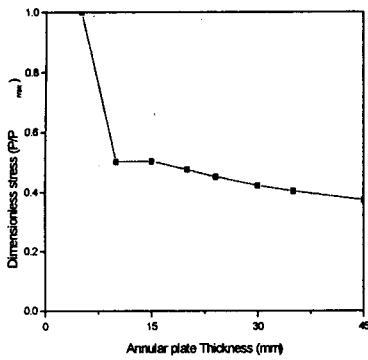


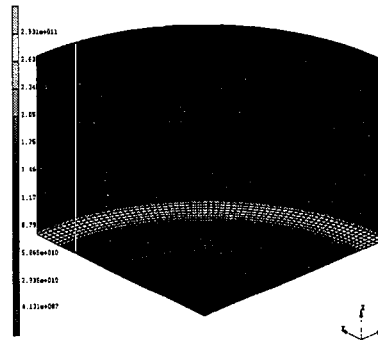
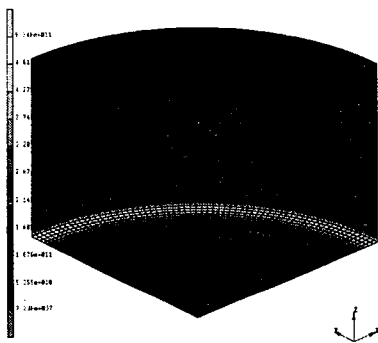
Fig. 3-3 LNG 저장탱크 Annular plate의 두께변화에 따른 최대응력과 변위량의 변화.



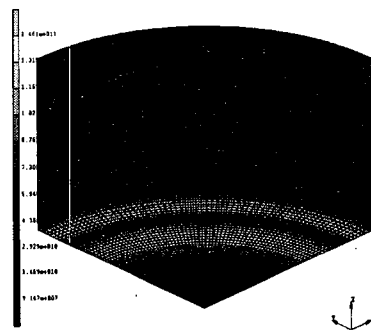
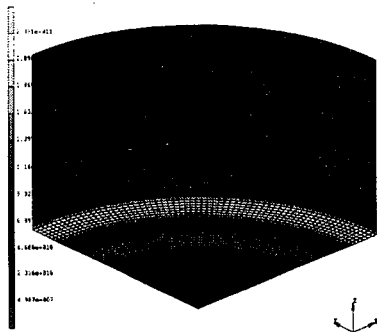
(a) 최대응력

(b) 변위량

Fig. 3-4 LNG액이 LNG 저장탱크에 완전히 채워졌을 때 Annular plate의 두께 변화에 따른 최대응력과 변위량의 변화.



(a) Annular plate thickness=5mm (b) Annular plate thickness=10mm



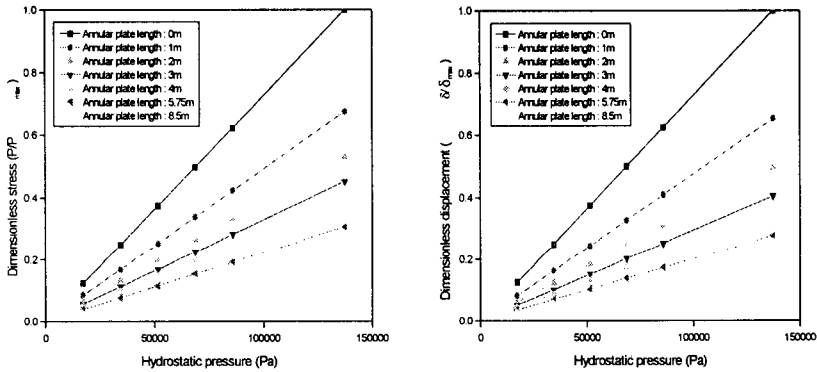
(c) Annular plate thickness=15mm (d) Annular plate thickness=45mm

Fig. 3-5 LNG 저장탱크 Annular plate의 두께가 변화함에 따라 발생하는 최대응력의 위치변화.

### 3-3. LNG 저장탱크 Annular plate의 반경방향 길이 변화에 따른 최대응력 및 변위량의 변화

Fig. 3-6은 LNG 저장탱크 Annular plate의 반경방향 길이변화에 따른 최대응력과 변위량의 변화를 나타내고 있다. LNG 저장탱크 Annular plate의 반경방향의 길이가 0m일때와 1m증가했을 때 발생하는 최대응력과 변위량의 차이를 비교해 보면 35~40% 정도 감소하는 것을 알 수 있다.

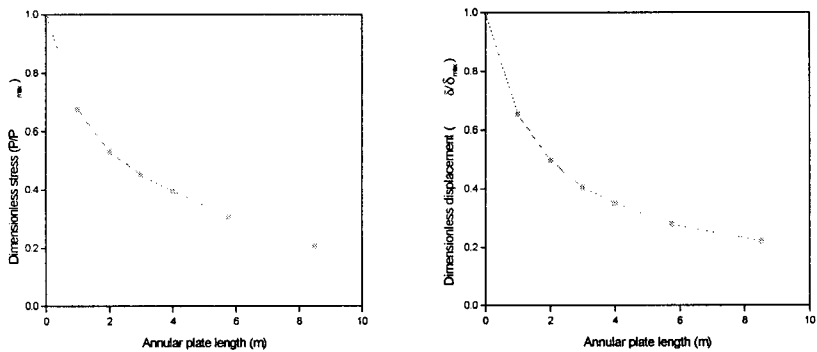
Fig. 3-7은 LNG액이 저장탱크에 완전히 채워졌을 때 Annular plate의 반경방향 길이변화에 따른 최대응력과 변위량의 변화를 나타낸 것이다. 이 때 최대응력과 변위량의 변화량을 모두 관찰해 보면 Annular plate의 반경방향길이가 3m이상 정도에서 변화량이 완만하게 변하는 것을 알 수 있다.



(a) 최대응력

(b) 변위량

Fig. 3-6 LNG 저장탱크 Annular plate의 반경방향 길이변화에 따른 최대응력과 변위량의 변화.



(a) 최대응력

(b) 변위량

Fig. 3-7 LNG액이 LNG 저장탱크에 완전히 채워졌을 때 Annular plate의 반경방향 길이변화에 따른 최대응력과 변위량의 변화.

#### 4. 결 론

1) LNG 저장탱크의 바닥판 설계시 바닥판이 평판일 경우와 기울기를 가지고 있을 때의 최대응력값을 비교해 보면 응력값의 차이가 5배 이상 발생한다. 따라서 위에서 해석한 결과와 같이 바닥판의 중앙부 높이를 최대응력과 변위량의 변화가 완만해지는 200mm 이상 유지하는 것이 바람직하다. 하지만 벽과 바닥판의 각도가 90도에서 88.9도를 유지하여야 한다.

2) LNG 저장탱크의 Annular plate 두께가 탱크 설계시 바닥의 두께와 같은 5mm일 때와 5mm 증가한 10mm 일 때 최응력값을 비교해 보면 응력값이 50% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 Annular plate 두께를 최대응력과 변위량의 변화가 완만하게 변화하는 20mm이상 유지하는 것이 바람직하다.

3) LNG 저장탱크 Annular plate의 반경방향 길이가 탱크 설계시 0m 일 때와 1m일때를 비교해 보면 최대응력과 변위량이 35-40%정도 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 Annular plate의 반경방향 길이를 최대응력값과 변위량의 변화가 완만하게 변화하는 3m이상 유지하는 것이 바람직하다.

#### 5. 참고문헌

- [1] 김청균 외, "완전방호식 LNG 저장탱크 내부탱크 구조물의 설계 안전성에 관한 연구", 2001 추계학술발표회 논문집, 한국가스학회, pp. 122-129, 2001.
- [2] "MARC user's manual," Version K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.