

코너프로텍션의 경량화를 위한 수치적 연구

조승현*, 한주현*, 김청균*, 김영규**

*홍익대학교 기계시스템디자인공학과

**한국가스안전공사 가스안전연구개발원

Numerical study on Corner Protection of LNG storage tank for reducing weight

Seung Hyun Cho*, Joo Hyun Han*, Chung Kyun Kim*, Young Gyu Kim**

*Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

**Institute of Gas Safety R&D, Korea Gas Safety Corporation

1. 서론

9% 니켈강식 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.

코너프로텍션에 관한 연구는 국내·외에 걸쳐 많이 진행되고 있는데, 모든 연구가 5mm 두께의 9% 니켈강으로 제작된 것으로서 자립식에 관한 것이다[1,2,3].

따라서 본 논문에서는 멤브레인식 LNG저장탱크의 내부탱크에서 초저온 LNG가 누설되는 조건에서 멤브레인과 동일한 소재인 SUS304로 제작된 코너프로텍션의 설계 안전성을 유한요소법을 이용하여 연구하고자 한다[4].

2. 해석모델 및 조건

그림 1은 코너프로텍션의 하중조건을 나타낸 그림이다. 멤브레인식 LNG 저장탱크의 단열재는 합판(Plywood)과 PUF로 구성되어 있는데, 이러한 단열재가 코너프로텍션의 외부에 압력으로 가해진다. 합판과 PUF의 밀도가 각각 100kg/m^3 , 750kg/m^3 이므로 단열재의 압력은 약 336Pa로 계산되어진다. 코너프로텍션의 내부에 가해지는 액압은 내부탱크로부터 LNG액이 누설되어 코너프로텍션의 최고 높이까지 LNG액이 가득한 경우에 해당하는 액압을 고려하였다.

또한 -162°C 의 초저온 LNG액이 누설되는 경우이므로 코너프로텍션의 전체온도가 상온인 20°C 에서 -162°C 로 감온되는 온도조건도 고려하여 열적-기계적해석(Thermo-mechanical analysis)을 수행하였다.

그림 2는 코너프로텍션의 유한요소해석을 위한 모델로서 본 논문에서는 구속조건의 완전성과 계산시간의 단축을 위해 1/4모델을 사용하였다. 모델의 절단면에는 절단면 경계조건을 고려하였고, 높이방향으로의 지지를 위해 그림에서 보여 주는 바와 같이 강체를 모델링하였다.

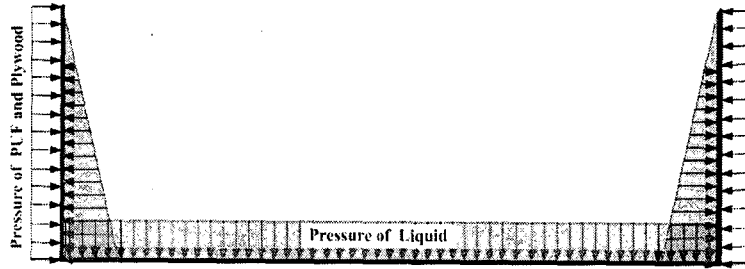


그림 1. 코너프로텍션의 하중조건

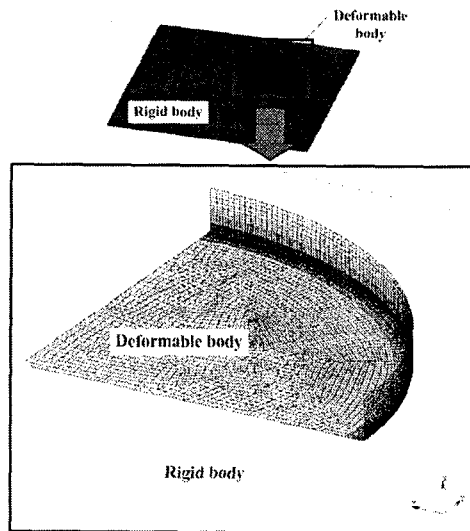


그림 2. 코너프로텍션의 유한요소 모델

3. 결과 및 고찰

3.1 모서리부 설계

코너프로텍션의 취약한 모서리부에는 보강판을 붙임으로써 구조적 안전성을 추구한다. 본 논문에서는 모서리부 설계를 위해 다구찌법을 적용하였고 그림 3은 다구찌법의 설계인자를 표시한 그림이다. 모서리부의 설계인자로는 보강판의 높이방향 두께와 높이, 바닥의 환상판(Annular plate)의 폭과 두께와 같이 모두 4개이다. 모서리부를 제외한 코너프로텍션의 두께는 2mm로 일정하다고 가정하였다.

표1은 코너프로텍션의 모서리부 설계를 위한 설계인자와 수준을 나타낸 표로서 본 논문에서는 $L_9(3^4)$ 형의 직교배열표에 의해 모두 9개의 설계모델을 모델링하였다. 즉, 4개의 설계인자가 3수준을 가지면 모두 81개의 설계모델이 나오지만 다구찌법에 의해 9개의 해석모델로 81개의 해석결과를 대변하는 것이다[5].

본 논문에서는 망소특성, 즉 특성치의 값이 작을수록 좋은 경우의 SN값을 적용하였는데, 망소특성의 정의는 다음과 같다.

$$SN = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 SN값이 큰 경우가 그때의 설계 파라메타들이 von Mises 응력을 줄이는데 효과적이라는 것을 의미한다.

표1. 다구찌법에 의한 설계인자와 수준

		Factors			
		A, mm	B, mm	C, mm	D, mm
Levels	1	2	2	100	100
	2	4	4	200	200
	3	8	8	400	400

표2. von Mises 응력의 SN비

Analysis No.	SN ratio
1	-50.8
2	-50.7
3	-50.7
4	-50.1
5	-50.5
6	-
7	-50.4
8	-
9	-

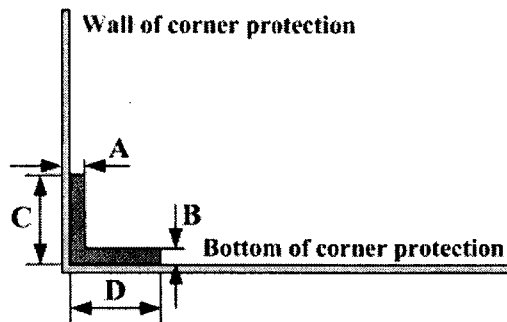
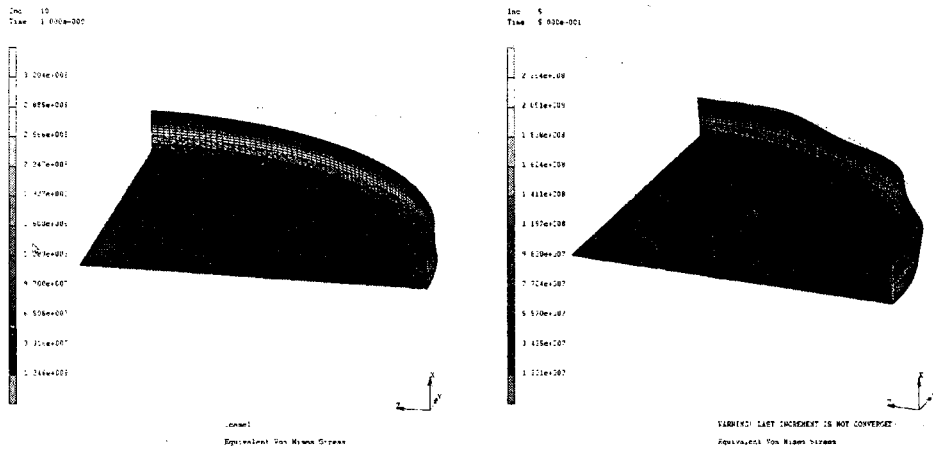


그림 3. 다구찌법에 의한 코너프로텍션 모서리부의 설계변수
표2의 해석결과에 의하면 모델 4가 SN비의 값이 -50.1로서 가장 크기 때문에

본 논문에서 고려한 설계인자의 조합으로는 가장 우수한 모델로 판단된다. 즉, 바닥은 모두 2mm로 균일하고, 벽면이 400mm높이까지는 4mm의 두께를 가지고 400mm이상에서는 2mm의 두께를 가지는 코너프로텍션이 가장 우수한 모델로 결정되었다.

다구찌해석에 의한 9개 모델의 유한요소해석에서 6, 8, 9번째 모델은 변형거동이 좌굴형상과 같고, 대변형이 발생하여 계산이 수렴하지 않았기 때문에 가장 바람직하지 않은 모서리형상이라고 판단된다.



(a) 4번째 모델 (b) 6번째 모델

그림 4. 다구찌법에 의한 코너프로텍션 모서리부 모델의 von Mises 응력 분포

3.2 스티프너(Stiffner) 설계

다구찌법에 의해 코너프로텍션의 모서리부에 설치할 보강판의 형상이 벽쪽으로 2mm 두께로 0.4m의 높이로 결정되었다. 그러나 코너프로텍션에 모서리부 보강판을 보강하여도 그림 5(b)와 같이 0.233m의 큰 변위량이 코너프로텍션의 바닥으로부터 약 0.9m에서 발생하는 것으로 계산되었다. 모서리부에 보강판을 설치하지 않은 코너프로텍션의 경우는 그림 5(a)와 같이 0.7m 높이에서 약 0.602m의 변위량이 발생하였다.

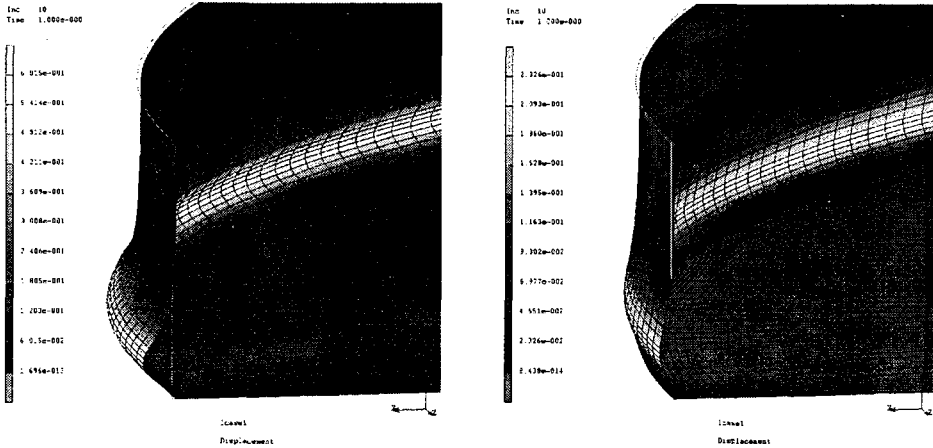
따라서 변위량을 억제하기 위해서 본 논문에서는 그림 6과 같은 스티프너를 최대변위량이 발생한 위치에 설치하여 계산을 수행하였다.

3.2.1 1차 스티프너 설치

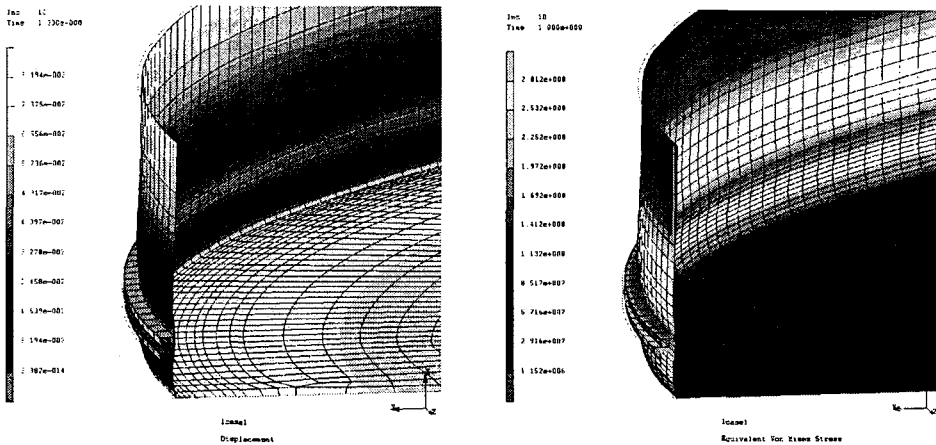
보강판이 설치된 다구찌 4번째 모델의 최대변위량이 발생한 위치가 0.9m이고 다음으로 크게 발생한 위치가 1.2m였다. 따라서 폭 0.3m이고 두께가 2mm인 스티프너를 코너프로텍션의 벽에 0.9m와 1.2m위치에 설치하여 해석을 수행하였다.

그림 6은 1차 스티프너를 설치한 후 코너프로텍션에서 발생한 변위량과 응력분포결과를 보여주는 그림이다. 해석결과에 의하면 코너프로텍션에서 발생한 최대

von Mises 응력은 281.2MPa으로 스티프너가 없는 모델에 비해 약 12.3%가 감소하였고, 최대변위량은 0.082m가 최상단부에서 발생하여 무려 65%가 감소한 것으로 계산되었다.



(a) 보강판이 설치되지 않음 (b) 보강판이 설치됨(다구찌 4모델)
 그림 5. 코너 프로텍션에서 발생한 최대변위량 분포



(a) 변위량 분포 (b) 응력 분포

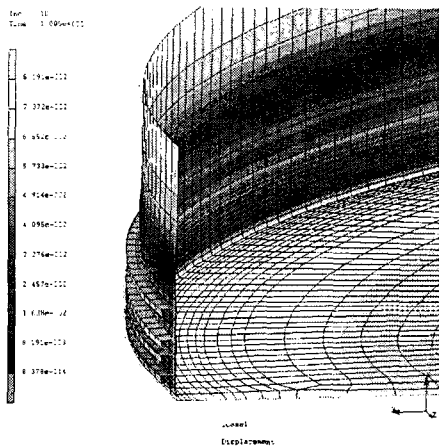
그림 6. 1차 스티프너(0.9m, 1.2m 높이)를 설치한 코너프로텍션에서 발생한 변위량과 von Mises 응력 분포

3.2.2 2차 스티프너 설치

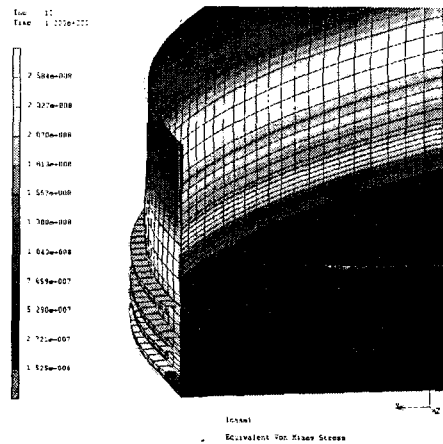
바닥판으로부터 0.9m와 1.2m에 스티프너를 설치한 코너프로텍션은 변위량과 von Mises 응력이 설치하지 않은 코너프로텍션과 비교하면 각각 65%와 12.3%이 감소한 것으로 파악되었다. 그러나 von Mises 응력이 281MPa으로 코너프로

택션의 소재인 SUS304의 항복강도인 275MPa보다 높은 값으로서 코너프로텍션이 탄성영역을 넘어서게 되었다. 따라서 그림 6(a),(b)에서 보여주는 바와 같이 벽면에서 높은 변위량과 von mises 응력이 발생한 위치인 0.5m와 1.8m의 위치에 2차 스티프너를 보강하여 해석을 수행하였다.

그림 7은 2차 스티프너를 설치한 코너프로텍션에서 발생한 변위량과 von Mises 응력을 나타낸 그림으로서 벽면에서 발생한 변위량과 von Mises 응력이 매우 감소한 것을 알 수 있다. 최대변위량은 1차 스티프너만을 설치한 그림 6(a)와 동일하게 벽의 상단부에서 0.082mm가 발생하였고, 최대 von Mises 응력은 258.4MPa이 발생하였다.

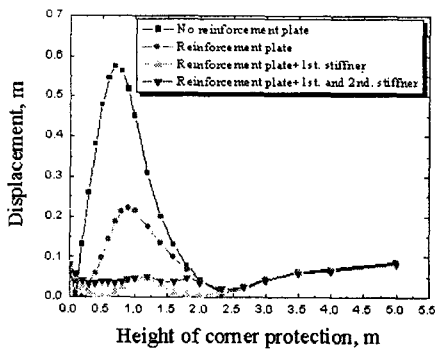


(a) 변위량 분포

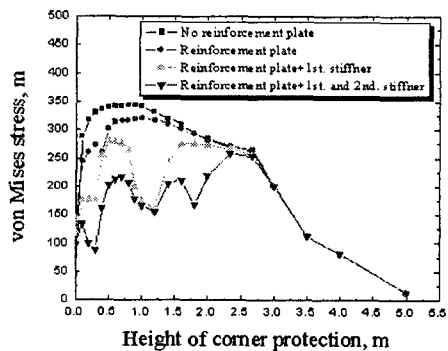


(b) 응력 분포

그림 7. 2차 스티프너(0.5m, 1.8m 높이)를 추가 설치한 코너프로텍션에서 발생한 변위량과 von Mises 응력 분포



(a) 변위량 분포



(b) 응력 분포

그림 8. 모서리부의 보강판과 스티프너의 설치에 따라 코너프로텍션의 벽에서 발생한 변위량과 응력 비교

따라서 2차 스티프너를 추가함으로써 코너프로텍션은 탄성영역내에서 안정적

인 거동특성을 할 수 있게 되었다.

그림8은 모서리부 보강판과 스티프너가 코너프로텍션에 미치는 영향을 파악하기 위해 코너프로텍션 벽면의 높이에 따라 발생한 변위량과 응력을 비교한 그래프로서 보강판과 스티프너의 영향이 매우 큰 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 멤브레인식 LNG저장탱크에서 LNG누설시 구조적 안전을 위해 코너프로텍션을 설치하는 경우에 대해서 설계와 해석을 수행하였다. 소재는 멤브레인과 동일한 소재인 SUS304를 사용하여 최대 액압과 -162°C 의 초저온을 동시에 고려하였다.

구조적 안전성을 계산하기 위해 9% 니켈강식 LNG 저장탱크의 코너프로텍션은 모서리부에 보강판을 설치하는데, 본 논문에서는 다구찌 최적설계법을 적용하여 보강판의 형상을 결정하였다. 본 논문에서 적용한 설계인자의 개수와 수준범위에서는 보강판이 높이방향으로 2mm의 두께로 400mm인 경우가 가장 바람직한 형상으로 판단되었다.

그러나 보강판을 설치하여도 코너프로텍션에서 탄성영역을 넘어서는 von Mises 응력이 발생하여 최대 변위량과 최대 응력이 발생하는 위치에 스티프너를 1차, 2차에 나누어 설치하여 해석을 수행하였다. 해석결과에 의하면 바닥판으로부터 0.5m, 0.9m, 1.2m, 1.8m 높이에 스티프너를 설치하면 코너프로텍션이 탄성영역 범위내에서 안정적인 거동특성을 나타내었다.

5. 참고문헌

1. 김형식, 홍성호, 서홍석, 양영철 “ASME Section VIII Div. 2에 따른 LNG 저장탱크 코너프로텍션의 설계개념 고찰,” KIGAS Vol. 5, No. 3, pp. 73-79, September, 2001.
2. 김형식, 홍성호, 서홍석, “LNG저장탱크 코너프로텍션의 설계사양에 따른 건전성 비교,” KIGAS Vol. 6, No. 4, pp. 33-39, December, 2002.
3. 조승현, 김청균, “LNG 저장탱크 코너프로텍션의 설계안전성에 관한 수치적 연구,” 한국가스학회 추계학술대회 논문집, pp. 000-000, 2003.
4. “MARC user’s manual,” Version K6.1, MARC Analysis Research Co., 1996.
5. 박성현, “현대실험계획법,” 민영사, 2003.