

# 다구찌법을 이용한 LNG 저장탱크 Roof 구조물의 최적설계에 관한 연구

김한구, 조승현, 김청균  
홍익대학교 기계시스템디자인공학과

## The Study on Optimized Design of LNG Storage Tank Roof Structure using Taguchi Method

Han Goo Kim, Seung Hyun Cho, Chung Kyun Kim  
Department of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University

### 1. 서론

LNG 저장탱크(LNG Storage Tank)는  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 LNG를 저장하기 위한 초대형 저장탱크로 한국이나 일본과 같이 불가피하게 LNG선으로 운송해야 하는 나라에서 대단히 중요한 LNG 설비이다.

LNG 저장탱크에서 가장 중요한 기능은 외부에서 유입되는 모든 하중에 대하여  $-162^{\circ}\text{C}$ 의 LNG를 안전하게 저장해야 하고 내부탱크 붕괴 시 유입되는 LNG에 대하여 일시적 누설 차단성과 하중 지지성을 확보하고 있어야 한다. 만약, 이러한 기능을 유지하지 못하여 발생하는 LNG 저장탱크의 붕괴는 엄청난 인명과 재정적 손실을 가져올 뿐 아니라 주변 지역에 심각한 환경오염을 발생하게 된다. 따라서, LNG 저장탱크의 구조적 특성을 파악하는 것은 설계에 있어서 상당히 중요한 부분이다.[1]

본 연구에서는 외부하중에 대하여 안정성을 확보하고 있어야 하는 LNG 저장탱크 roof 구조물 시공시 사용되는 철판구조물의 구성 및 roof 두께가 roof 구조물 안정성에 미치는 영향성을 파악하기 위하여 유한요소해석을 수행하였으며 다구찌법을 적용하여 최적설계안을 제시하고자 한다.

### 2. 본론

#### 2.1 해석모델 및 해석조건

해석모델은 Fig. 2-1에서 보여주는 바와같이 LNG 저장탱크를 해석대상으로 고려하였다. LNG 저장탱크는 8개와 6개의 노드를 갖는 Solid 요소를 사용하여

모델링 하였고 H빔과 L빔으로 구성되어 있는 철골 구조물은 2개의 노드를 갖는 Beam 요소로 모델링 하였다. 해석에 사용된 LNG 저장탱크 재질은 콘크리트로써 압축강도가 50MPa, 탄성계수는 30.4GPa이고 철골 구조물의 재질은 인장강도가 270MPa, 탄성계수는 207GPa로써 LNG 저장탱크 제작에 적합한 소재를 사용하였다. 해석에 사용된 경계조건은 LNG 저장탱크가 지상에 고정되어 있다고 가정하였으며 하중조건은 BS7777코드[2]에 제시되어 있는 Live load를 roof 구조물에 가하였다. 이때 사용한 해석 프로그램은 상용 유한요소해석 프로그램인 MSC/NASTRAN[3]으로 SOL 101을 사용하였다.

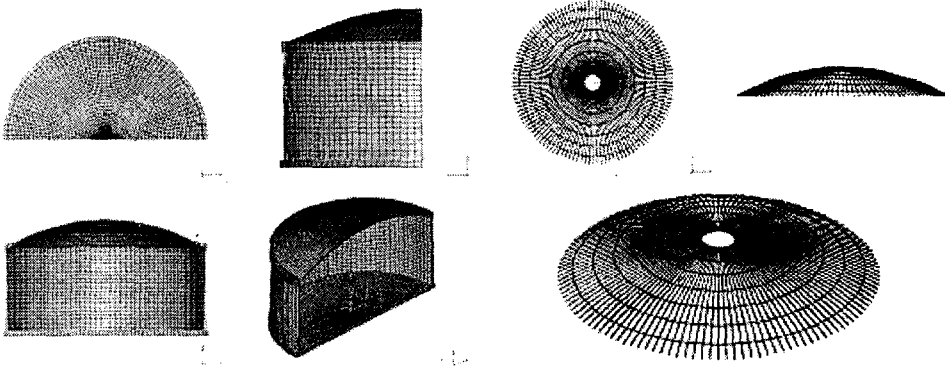


Fig. 2-1 LNG storage tank and steel beam structure FE model

## 2.2 다구찌 방법

다구찌법은 실험과 설계의 최적조건을 결정하는 기준을 특성치의 산포로 정하는데 특성치의 산포가 가장 적은 실험조건을 최적조건으로 결정하며 특성치의 산포는 SN값에 의해 알 수 있다.

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

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

SN값이 큰 경우가 설계 파라메타들이 LNG 저장탱크 roof 구조물에 발생하는 응력과 변위량을 줄이는데 효과적임을 의미한다. 다구찌 최적설계에서 망소특성을 채택한 이유는 해석을 선행해 본 결과 LNG 저장탱크 roof 구조물에 발생하는 최대응력과 최대변위량의 값이 roof 구조물의 안정성에 가장 큰 영향을 미치기 때문이다. 따라서, roof 구조물을 제외한 다른 부분이 강도적으로 충분히 안정

한 상태에서는 roof에 발생되는 최대응력과 최대변위량이 적을수록 유리하다.

본 논문에서는 SN값을 사용하여 설계 파라메타들이 LNG 저장탱크 roof구조물의 최적설계에 미치는 영향을 간이분석법을 통하여 분석하였고 각각의 파라메타들이 특성값에 미치는 기여율을 계산하였다.[4,5]

### 2.3 설계 파라메타와 직교배열표

LNG 저장탱크 roof의 최적설계에 사용된 파라메타는 반경방향 H빔 부재의 개수, 원주방향 L빔 부재의 개수, roof 구조물 가운데 부분의 두께이다.

Table 1. Factors and levels for Taguchi method

		Factors		
		A (H빔 개수)	B (L빔 개수)	C (Roof 두께)
Level	1	120	7	0.6
	2	60	14	0.9
	3	30	28	1.2

Table 2. Analysis layout of orthogonal array table of  $L_9(3^4)$

Analysis No. \ Factors	A	B	C	e
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

이와 같이 모두 4개의 파라메타들은 Table 1에 보여주는 바와같이 각각 3개의 수준으로 설계하였다. e는 다구찌 설계의 에러항을 나타낸다. 이와같이 총 4개의 파라메타를 3수준으로 나누어 3수준계 직교배열표인  $L_9(3^4)$ 형을 사용하였으며 Table 2에 나타내었다.

### 3. 해석결과 및 고찰

Table 3은 Table 2의 직교배열표에 의한 9개 모델을 해석하여 LNG 저장탱크 roof 구조물에서 발생한 최대응력과 최대변위량의 SN비를 나타낸 표이다. Roof 구조물에 발생하는 최대응력이나 최대변위량 값이 작을수록 구조물의 안전에 유리하다면 앞에서 언급한 망소특성을 이용하여 SN비를 계산하는 것이 합리적이다. SN비를 계산하기 위해서 주어진 경계조건에 의해서 발생하는 최대응력과 최대변위량 값을 사용하였다.

Table 3. S/N ratios for maximum stress and displacement in LNG tank roof

Analysis No.	Max. Stress	Displacement
1	-117.66	65.10
2	-114.13	66.77
3	-111.38	67.91
4	-114.02	66.72
5	-111.54	67.83
6	-117.48	65.15
7	-108.71	67.79
8	-115.95	65.05
9	-112.89	66.83

망소특성으로 계산된 SN비가 클수록 최대응력, 최대변위량이 낮게 발생한 것이 된다. 해석 결과에 의하면 최대응력의 SN비를 기준으로 하였을 때 7번째 해석모델이 -108.71로 가장 적합한 모델이고, 최대변위량의 SN비를 기준으로 하였을 때는 3번째 해석모델이 67.91로 가장 적합한 모델인 것을 알 수 있다. 따라서 위의 2개모델을 기준으로 가장 적합한 모델을 선정하는 것은 쉽지 않지만 상대적으로 높은 최대응력과 최대변위량이 발생한 1,8번째 모델을 제외하면 모두가 적합한 모델인 것으로 판단된다.

Fig. 2-2과 Fig. 2-3에는 해석모델 중에 가장 작은 최대응력값을 나타내는 7번째 해석모델과 가장 큰 최대응력값을 나타내는 1번째 해석모델의 응력분포를 보여주고 있다. Fig. 2-2에 나타난 해석결과는 주어진 하중에 대하여 철골 구조물의 끝부분과 링빔에 응력이 집중되는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 2-3에 나타난 해석결과는 철골 구조물 끝부분에만 응력이 집중되는 현상을 볼 수 있다. 따라

서, 7번째 해석모델의 최대응력값이 작게 나타난 이유는 철골 구조물에 집중되는 하중을 링빔과 나누어 가짐으로써 철골 구조물 끝부분에 발생하는 최대응력값이 작아진다고 판단할 수 있다.

Fig. 2-2과 Fig. 2-3에는 해석모델 중에 가장 작은 최대변위량을 나타내는 3번째 해석모델과 가장 큰 최대변위량을 나타내는 8번째 해석모델의 변위량을 보여 주고 있다. 해석결과에 나타난 바와같이 두 모델 모두 roof 구조물의 가운데 부분에서 최대변위량이 발생하였다. 따라서, 변형형상은 비슷하지만 3번째 해석모델이 상대적으로 roof 구조물의 가운데 부분의 두께가 두껍고 원주방향의 철골 구조물인 H빔의 개수가 많기 때문에 최대변위량 작게 나타난 것으로 판단된다.

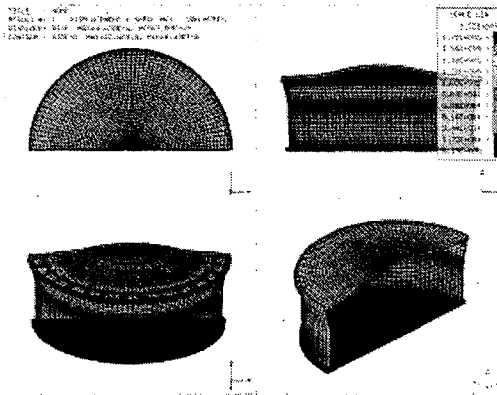


Fig 2-2 Stress distribution of LNG storage tank of 7th. Taguchi model

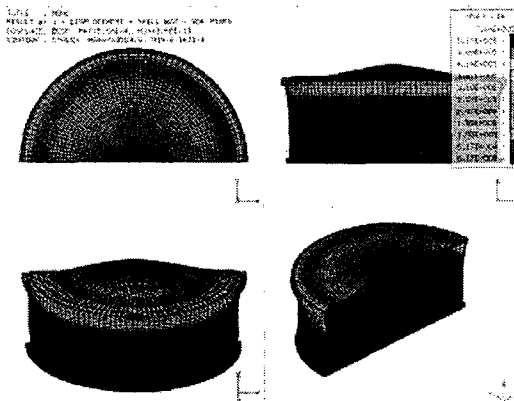


Fig 2-3 Stress distribution of LNG storage tank of 1st. Taguchi model

Table 4와 Table 5는 최대응력과 최대변위량에 대해서 계산한 LNG 저장탱크 roof 구조물 강도에 영향을 미치는 각 설계 파라메타들의 기여도를 나타낸 표이다. 표에 의하면 roof 구조물 두께가 최대응력과 최대변위량을 줄이는 데 각각 69.01%와 94.53%의 영향을 미치는 가장 중요한 설계 파라메타임을 알 수 있었다. 다음으로 최대응력에 대해서는 H빔의 개수가 19.92%로 영향을 미쳤으며 최대변위량에 대해서는 L빔의 개수가 3.23%로 두께에 비해서는 거의 미비한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

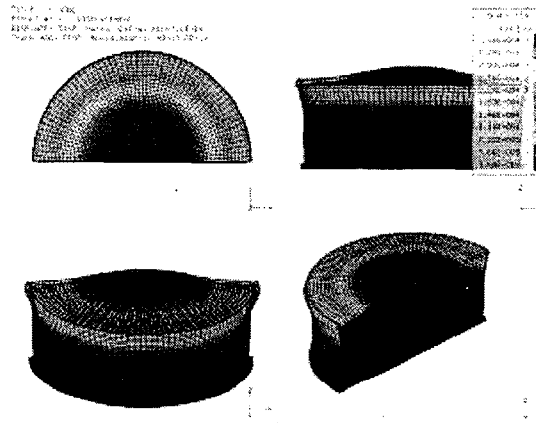


Fig 2-4 Displacement of LNG storage tank of 3th. Taguchi model

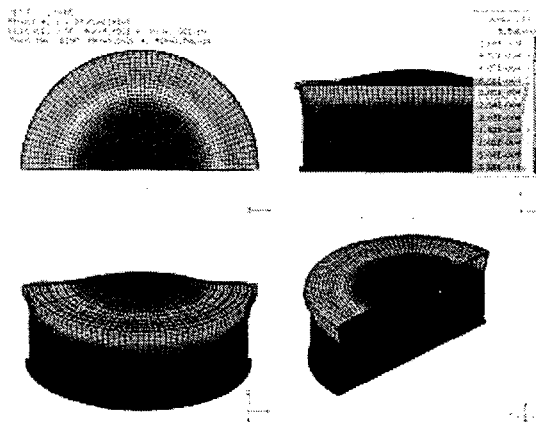


Fig 2-5 Displacement of LNG storage tank of 8th. Taguchi model

Table 4. Factors affecting maximum stress in LNG tank roof

		A	B	C	e	Sum
Levels	1	-343.16	-340.39	-351.09	-342.08	-1376.71
	2	-343.04	-341.61	-341.03	-340.32	-1366.00
	3	-337.54	-341.75	-331.62	-341.35	-1352.26
Difference of level		5.62	1.36	19.46	1.76	28.21
Affecting ratio [%]		19.92	4.83	69.01	6.24	100.0

Table 5. Factors affecting maximum displacement in LNG tank roof

		A	B	C	e	Sum
Levels	1	199.78	199.61	195.30	199.76	794.44
	2	199.69	199.65	200.32	199.71	799.38
	3	199.67	199.89	203.53	199.67	802.76
Difference of level		0.11	0.28	8.23	0.09	8.71
Affecting ratio [%]		1.22	3.23	94.53	1.01	100.0

#### 4. 결론

본 논문에서는 LNG 저장탱크 roof 구조물 시공시 사용되는 철골 구조물에 대한 최적설계를 다구찌법과 유한요소법을 사용하여 수행하였다. 해석은 LNG 저장탱크 roof 구조물에 사용되는 철골구조물인 H빔과 L빔의 개수에 따른 3개의 모델과 roof 구조물 가운데 부분의 두께를 고려하여 모두 9개의 다구찌 해석모델을 계산하였다. 각각의 해석모델에 대한 LNG 저장탱크 roof 구조물의 안전성 평가는 주어진 하중에 의하여 발생하는 최대응력과 최대변위량의 망소특성을 적용하여 판단하였다.

해석결과 해석에서 고려한 3가지 파라미터 중 roof 구조물의 두께가 주어진 하중에 대하여 발생하는 최대응력과 최대변위량에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며 H빔과 L빔 개수의 영향은 미비한 것으로 나타났다. 따라서, LNG 저장탱크 roof 구조물 설계시 강도보강을 위해서는 roof 구조물의 두께를 늘리는 것이 가장 효과적이라고 판단된다. 또한, roof 구조물에 사용되어진 H빔과 L빔이 강도에 미치는 영향은 미비하므로 roof 구조물 시공작업시 문제가 되지 않는다면 H빔과 L빔의 개수를 최소화 하여도 LNG 저장탱크 roof 구조물 안정성에는 거의 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

## 5. 참고문헌

- [1] 김청균, 김한구, "LNG 저장탱크의 고유 모드 및 주파수 응답성에 관한 연구," 2004 춘계학술발표회 논문집, 한국가스학회, pp. 233-242, 2004
- [2] "Flat-bottomed, vertical cylindrical storage tanks for low temperature service-BS7777,"1993.
- [3] "MSC/NASTRAN User's Guide, "Basic Dynamic Analysis", The MacNeal-Schwendler Co., 1993.
- [4] 박경진, "자동차 분야에서의 최적설계기술의 응용," 월간 기계설계, pp. 82-89, September, 2002.
- [5] 송서일, 실험계획법, 한경사, June, 2001.