



LNG 저장탱크의 지붕 구조물에 관한 최적설계 연구

†김청균 · 김한구

홍익대학교 기계 · 시스템디자인공학과
(2005년 11월 21일 접수, 2005년 12월 13일 채택)

Optimized Design of Roof Structure in LNG Storage Tank

†Chung Kyun Kim · Han Goo Kim

Department of Mechanical and System Design Engineering Hongik University, Seoul 121-791, Korea
(Received 21 November 2005, Accepted 13 December 2005)

요 약

본 논문은 다구찌 설계방법을 이용하여 LNG 저장탱크의 지붕 구조물에 대한 최적설계 조건을 확보하기 위해 FEM 해석을 수행하였다. 다구찌 설계방법은 저장탱크 구조물의 설계인자에 가장 큰 영향을 미치는 파라미터를 고찰하고 최적화 하는데 유용한 결과를 제시하였다. 다구찌 설계방법으로 수행된 FEM 해석결과에 따르면, LNG 저장탱크 지붕 구조물의 최적설계에 필요한 인자로 지붕 중심부의 두께를 언급하고 있다. 안전하면서 효율적인 지붕을 건설하기 위한 철근 콘크리트 지붕의 초기 구조물 설계는 반경 방향의 H빔과 원주방향의 L빔을 가능한 작은 수량으로 배열하고 두꺼운 지붕 구조물을 갖춘 LNG 외부탱크가 최적이라는 해석결과를 제시한다.

Abstract – In this paper, the optimized design of a roof structure for a LNG outer tank has been analyzed using the Taguchi design method. This method may efficiently optimize the design parameters of a LNG roof structure in terms of H beam and L beam structures, and a thickness of a concrete structure. The FEM computed results indicate that the thickness of a concrete structure is a dominant factor of a roof structure design. The H and L beam structures do not affect a maximum stress and deformation of a reinforced roof structure. This means that H and L beam structures only support a dead weight of a concrete roof during a consolidation of a reinforced concrete. Based on the computed results by the Taguchi design method, the number of beams and thickness of a reinforced concrete are given as $H=30$, $L=7$, and $t=1.2$ m.

Key words : Taguchi design method, LNG storage tank, Roof structure, SN ratio

I. 서 론

지하에 묻혀있는 천연가스(natural gas)를 액화한 액화천연가스(Liquefied Natural Gas: LNG)는 특별하게 제작된 초저온 안전탱크에 저장된다. 이러한 LNG는 청정에너지 자원으로 최근 사용량이 급증하고 있으며, 특히 동북아시아 국가들을 중심으로 LNG 산업이 확대되고 있다. LNG 저장탱크는 -162°C 의 초저온 액체와 직접 접촉하여 온도하중과 액압하중의 일부 또는 전부를 담당하는 내부탱크(inner tank)와 내 · 외부로부터 공급되는 여러 종류의 하중을 담당하여 LNG 저장탱크의 최종 안전성을 보장하는 외부탱크(outer tank) 두 가지

구조물로 구성된다.

외부탱크는 지진이나 풍압과 같은 환경적 하중과 미사일이나 비행기와 같은 다양한 형태의 비행체 충돌에 의해 발생하는 하중은 물론 최악의 경우 내부탱크의 파손에 따른 LNG에 의한 정적하중 및 동적하중을 모두 담당해야 하므로 이에 적합한 강도 안전성을 항상 확보하고 있어야 한다. LNG 저장탱크는 보통 하중을 담당하는 외부탱크의 측벽면(side wall)은 실린더 형상을 하고 지붕은 돔(dome) 형상을 하고 있으며 이들 사이의 경계면에는 원주방향을 따라 링빔(ring beam) 구조물로 연결함으로써 측벽면과 돔 형상의 지붕 구조물의 하중과 모멘트에 대한 안전성을 상호 보완한 철근 콘크리트(reinforced concrete) 구조물로 양생하여 외부탱크는 완성된다.

†주저자:chungkyunkim@empal.com

외부탱크의 지붕은 H빔과 L빔을 배열한 철골과 그 위에 철근 콘크리트로 양생한 두꺼운 구조물로 건설된다. 적합한 강도를 갖는 돔 형상의 지붕 구조물은 LNG 저장탱크의 내부에 저장된 LNG가 증발하면서 발생하는 가스(BOG) 압력과 지진이나 비행체와 같은 환경적 외부하중에 대해 충분한 안전성을 확보하고 있어야 한다. 이것을 위해 기존의 LNG 저장탱크는 충분한 강도 안전성을 갖도록 H빔과 L빔을 배열하고, 두꺼운 콘크리트 구조물을 건설한다. 그러나 이러한 설계는 지붕의 자중량을 증가시키고, LNG 저장탱크에 가해지는 다양한 하중에 오히려 불안정할 수 있으므로, 가능한 지붕 구조물에 대한 최적설계로 지붕의 자중량을 줄이는 안전 설계기술이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 LNG 저장탱크의 지붕 구조물에 대한 강도설계 안전성을 확보하기 위해 필요한 철골 구조물의 구성과 지붕의 두께에 대한 해석을 MSC/NASTRAN[1]으로 수행하고, 다구찌 설계방법을 이용하여 최적설계안을 제시하였다.

II. 해석모델 및 해석조건

Fig. 1(a)는 외부탱크 구조물의 강도설계 안전성을 해석하기 위해 사용한 유한요소 해석모델로 실린더 형상의 측벽면과 돔 형상의 지붕, 이들을 연결하는 링빔(ring beam)의 3가지 핵심요소로 구성된다. 또한 Fig. 1(b)는 외부탱크 지붕을 해석하기 위해 강재로 제작된

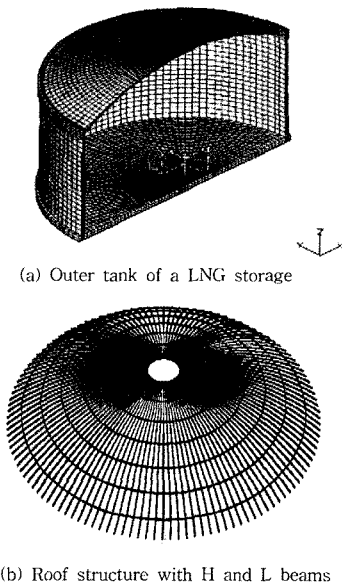


Fig. 1. FE model.

Table 1. Mechanical properties of beam structure and reinforced concrete.

Mechanical properties	Beam structure	Reinforced concrete
Compression strength, MPa	-	50
Tensile Strength, MPa	270	-
Elastic Modulus, GPa	207	30.4

H빔과 L빔을 배열한 구조물로, 이들 빔의 수량과 배열하는 방식에 따라 지붕 구조물의 안전성이 확보되고, 이들 구조물 위에는 콘크리트를 양생하여 외부탱크의 지붕 구조물을 완성한다.

본 연구에서 LNG 저장탱크 지붕의 안전성을 해석하기 위해 8개와 6개의 노드(node)를 갖는 솔리드 요소(solid element)를 사용하여 모델링하였고, H빔과 L빔으로 구성된 철골 구조물은 2개의 노드를 갖는 빔 요소(bean element)로 모델링하였다. 이러한 FEM 해석모델을 다구찌 설계방법을 이용한 최적설계와 연계함으로써 안정된 지붕 구조물 안전설계를 제시할 수 있다.

LNG 저장탱크의 지붕 구조물을 구성하고 있는 철골과 철근 콘크리트 구조물을 동시에 해석하기 위해 사용된 경계조건을 보면, 외부탱크의 내측벽 구조물은 지상에 고정되어 있고, 지붕은 링빔에 의해 실린더 형상의 측벽면에 연결되며, 저장탱크에 가해진 하중은 BS 7777 기준[2]에서 제시한 법선방향 하중(normal live load)이 지붕 구조물에 가해진다고 가정하고 해석하였다. 본 연구에서는 LNG 외부탱크 구조물에 대한 강도 해석을 위해 MSC/NASTRAN의 SOL 101을 사용하였다. FEM 해석에 사용된 철골과 철근 콘크리트 구조물의 재질에 대한 데이터는 Table 1[3]에서 제시하였다.

III. 다구찌 설계법

다구찌 설계방법(Taguchi design method)[4]을 이용하여 지붕 구조물에 대한 최적화 설계를 추구한 본 연구는 이미 다양한 분야[5,6]에서 설계의 적합도 경향을 파악하기 위해 구조물 설계에 적용하여 많은 성과를 거두었다. 다구찌 설계방법은 짧은 해석시간과 적은 비용으로 가장 효과적인 설계를 할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 설계변수가 많지 않은 LNG 지붕 구조물을 최적설계하기 위해 반경방향으로 설치된 H빔 부재의 수량, 원주방향으로 배열된 L빔 부재의 수량, 지붕 구조물의 중앙부 두께를 고려한 조건에서 LNG 외부탱크 지붕 구조물의 강도 안전성에 가장 큰 영향을 미치는

설계인자를 다구찌 설계방법으로 도출하고자 한다.

3.1. 다구찌 해석방법

지붕 구조물에서 외부하중과 LNG의 증발가스 압력에 관련된 강도 안전성을 확보하기 위해 H빔과 L빔의 수량과 지붕의 두께는 설계 측면에서 대단히 중요하다. 지붕 구조물에 다구찌 설계방법을 적용하여 최적설계를 하고자 하는 것은 구조물의 배열에 따라 건설단가와 링빔에 미치는 총중량 측면에서 중요한 의미를 갖고 있다. 다구찌 설계방법을 지붕 구조물에 적용하면, 지붕 구조물의 FEM 해석에서 최소한의 H빔과 L빔을 사용하여도 강도 안전성을 보장할 수 있고, 가능한 지붕의 총중량을 줄여서 탱크의 건설단가를 낮출 수 있는 최적의 설계안을 구현하는 것이 중요하다.

따라서, 다구찌 설계방법은 실험 계획법에 따른 해석을 통하여 설계의 최적조건을 결정하는 기준으로 특성치의 산포도가 가장 작은 조건을 선정한다. 특성치의 산포도는 SN비(signal to noise ratio)에 의해 표현되며, SN비 값은 특성치의 성질에 따라 다음과 같이 정의되는 것이 일반적이다.

- 1) 망소특성(특정 목표치가 작을수록 좋은 경우) : 응력, 변위, 마모, 진동, 불량률 등과 같은 파라미터가 작을수록 좋은 경우이다.
- 2) 망대특성(특정 목표치가 클수록 좋은 경우) : 강도, 두께, 수명, 연소효율 등과 같은 파라미터가 클수록 좋은 경우이다.

본 연구에서는 응력과 변위 측면에서 망소특성, 즉 특성치의 값이 적을수록 좋은 경우의 SN비를 적용하였다. 여기서 망소특성을 채택한 이유는 저장탱크의 지붕 구조물에 걸리는 설계기준 목표치에서 적은 수량의 빔 구조물에 의해 강도를 크게 확보할수록 총중량을 줄일 수 있어 가장 효과적인 최적설계를 추진할 수 있다. 결국 돛 형상의 지붕 구조물에서 발생하는 최대응력과 최대변위가 LNG 저장탱크의 지붕 구조물의 안전성에 가장 큰 영향을 미치기 때문에 강도와 두께 측면에서 망소특성을 채택하게 되었다.

Fig. 1(b)에서 보여준 지붕 구조물에 걸리는 최대응력을 다구찌 설계방법으로 최대한 낮추기 위해 빔의 배열과 지붕의 두께를 최적조건으로 계산하였다. 다구찌 방법을 수행하기 위한 SN 기준값은 다음의 식으로 결정된다.

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

SN비가 클 경우의 설계 파라미터들은 LNG 저장탱

크의 지붕 구조물에서 발생하는 최대의 응력과 변위량을 줄이는 효과가 있다는 것을 의미한다. 따라서 지붕 구조물을 제외한 다른 부분은 강도적으로 충분한 안전성을 확보한 상태에서 최대응력과 최대변위를 작게, 그리고 고르게 분포하도록 설계 파라미터를 설정하는 것이 중요하다.

3.2. 설계 파라미터와 직교 배열표

다구찌 설계방법을 이용한 해석에 사용된 3개의 설계 파라미터와 각 파라미터의 수준(level) 3개를 Table 2에서 제시하고 있다. 즉, Fig. 1에서 보여준 지붕의 강도를 최적의 조건으로 설계하기 위해 반경방향을 따라서 H빔은 30~120개, 원주방향의 L빔은 7~28개로 각각 배열하고, 지붕의 중앙부에서 측정된 두께는 0.6~1.2 m로 설정하였다. 또한, Table 3에서 제시한 것처럼 다구찌 설계방법을 이용한 최적화 설계를 하기 위해 총 4개의 파라미터를 3개 수준으로 나누어 3개 수준계 직교 배열표인 $L_9(3^4)$ 을 사용하였고, ⊕는 다구찌 설계법을 수행하기 위해 필요한 오차항을 나타낸 것으로 설계에 영향을 주는 설계요소는 아니다.

Table 2. Factors and levels for Taguchi design method.

	Factors			
	No.	Ⓐ [No. of H beam]	Ⓑ [No. of L beam]	Ⓒ [Roof thickness]
Level	1	120	7	0.6
	2	60	14	0.9
	3	30	28	1.2

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

Exp. No.	Factors			
	Ⓐ	Ⓑ	Ⓒ	ⓔ
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

IV. 해석결과 및 고찰

LNG 외부탱크의 지붕 구조물에 대한 강도 안전성을 해석하기 위해 제시한 다구찌 설계방법은 지붕 구조물에 걸리는 최대응력과 최대변위가 낮게 유지될수록, 즉 망소특성을 채택한 구조물은 보다 안전하다는 설계방법이다. 따라서 지붕 구조물에 적합한 경계조건과 사용조건을 고려하여 계산된 최대응력과 최대변위를 기반으로 SN비를 계산하고, 이들 두 가지 해석결과를 기초

Table 4. SN ratios for maximum stress and displacement on the roof structure of LNG outer tank.

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

로 저장탱크 구조물에 대한 최적설계, 즉 H빔과 L빔 구조물의 수량과 철근 콘크리트 지붕의 두께를 다구찌 설계방법에 의거 선정하면 최적의 설계를 할 수 있다.

Table 4는 Table 3의 직교 배열표에서 제시한 9개의 실험적 모델을 해석하여 Fig. 1에서 보여준 외부탱크의 지붕 구조물에서 발생한 최대응력과 최대변위에 관련된 SN비를 각각 나타내고 있다. 여기서 제시한 FEM 해석결과에 의하면 지붕 구조물에 걸리는 안정된 최대응력은 273 KPa이고 SN비는 가장 큰 -108.71로 7번 모델을 제시하지만, 최대변위는 0.4 mm이고 SN비는 67.91로 가장 큰 3번 모델이 비교적 적합한 모델로 제시되고 있다. Table 4에서 제시한 모델 7번과 3번의 해석결과에 따르면 변위량 측면에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났기 때문에 특히 지붕 구조물의 강도를 고려하고 여기에 시공성이나 가격요소를 고려하여 설계하면 될 것이다. 이러한 해석결과에서 저장탱크 지붕 구조물에 대한 최적설계로 7번 모델의 경우는 H빔의 수량은 30개, L빔의 수량은 7개, 지붕 콘크리트 두께는 1.2 m로 설계하거나, 또는 3번 모델처럼 H빔의 수량을 120개, L빔의 수량을 28개, 지붕 콘크리트 두께는 1.2 m로 건설하는 것이 바람직하다는 최적설계 데이터이다.

Fig. 2는 Table 4에서 가장 큰 SN비 -108.71을 나타

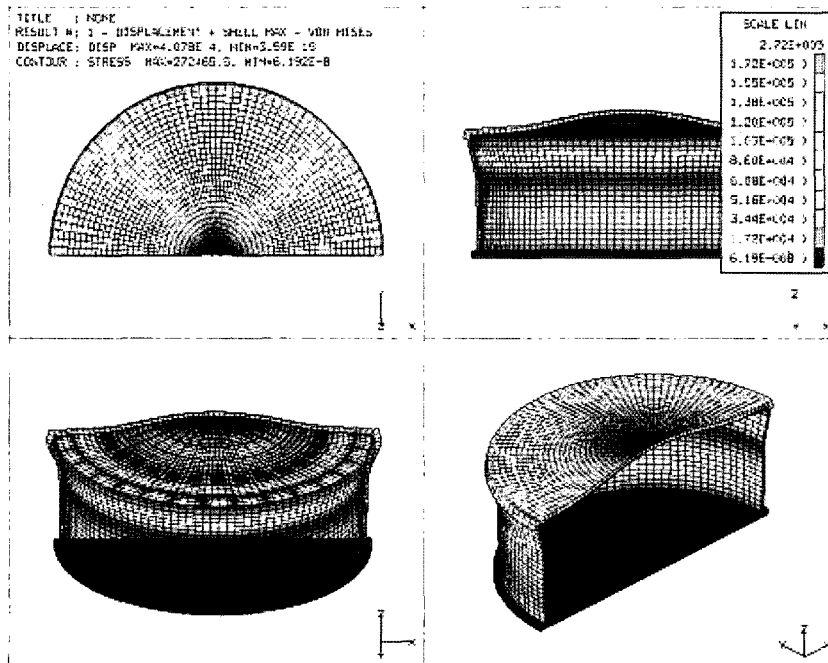


Fig. 2. Stress distribution of LNG outer tank for the seventh Taguchi model, which shows the lowest stress on the reinforced roof structure.

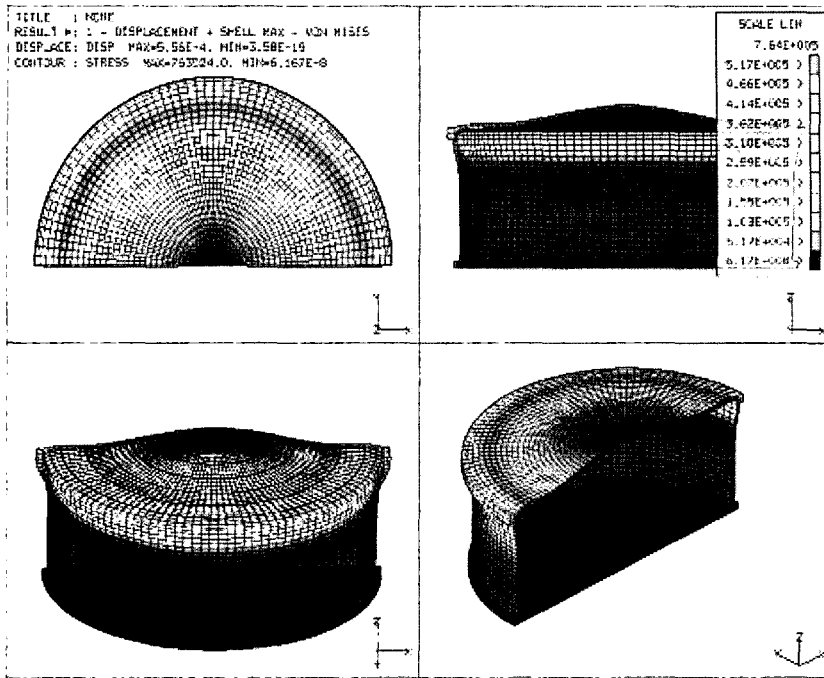


Fig. 3. Stress distribution of LNG outer tank for the first Taguchi model, which shows the highest stress on the reinforced roof structure.

낸 7번 모델의 LNG 저장탱크 지붕 구조물에 대한 응력분포를 제시한 FEM 해석결과로 최대응력 273 KPa은 철골 구조물과 림빔(ring beam)이 연결되는 이음부에서 응력이 집중되고 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 3은 Table 4에서 가장 작은 *SN*비 -117.66을 나타낸 1번 모델의 LNG 저장탱크 지붕 구조물에서 발생된 응력분포로 최대응력 764 KPa은 모델 7번처럼 철골 구조물과 림빔이 연결되는 이음부에서 응력이 집중되고 있다. 이들 1번 모델과 7번 모델은 서로 간에 2.8배라는 가장 큰 응력차를 나타내고, 1번 모델에 비하여 7번 모델은 응력분산이 잘되어 상대적으로 낮은 최대응력을 유지한다. 지붕 구조물에서 가장 낮은 응력을 발생하는 원인은 7번 모델은 지붕 구조물에 걸리는 하중을 H빔에 의해 지지되기보다는 대부분의 하중을 지붕의 콘크리트 구조물에 의해 응력분포가 분산되기 때문이다. 반면에 1번 모델은 지붕에 걸리는 하중을 콘크리트 구조물에 의해 지지되기보다는 대부분의 하중을 림빔과 연결되는 H빔에 의해 지지되기 때문에 림빔과 H빔이 연결되는 연결부에서 가장 큰 응력을 발생하게 된다. 따라서 1번 모델에서는 응력집중에 의한 파괴 가능성이 상대적으로 높기 때문에 응력분산이 잘되도록 콘크리트 구조물을 두껍게 설계한 7번 모델이 보다 안전한 설계가 된다.

Fig. 4는 Table 4에서 가장 큰 *SN*비 67.91을 나타낸 3번 모델에 대한 변위분포 FEM 해석결과로, 최대변위는 지붕 구조물의 중앙부에서 발생되고 있으나, 발생된 최대변위 0.402 mm는 다른 해석모델에 비하여 가장 낮은 값을 나타낸다. 또한 Fig. 5는 Table 4에서 가장 작은 *SN*비 65.05를 나타낸 8번 모델의 LNG 저장탱크 지붕 구조물에서 발생된 변위분포로 최대변위 0.56 mm는 모델 3번처럼 지붕 구조물의 중심부에서 발생하지만 여타 다른 모델에 비하여 가장 높은 최대변위 0.56 mm를 나타낸다. 상대적으로 가장 낮은 최대변위가 발생하는 3번 모델은 특히 1.2 m의 두꺼운 콘크리트 구조물과 120개로 많이 배열된 H빔에 의해 변위량이 분산되는 효과를 기대하는 반면에 8번 모델은 0.6 m의 얇은 콘크리트 구조물에 의해 최대변위가 오히려 집중되는 현상을 관찰할 수 있다.

Table 5와 6은 *SN*비를 기준값으로 하여 저장탱크의 지붕 구조물에서 발생하는 최대응력과 최대변위에 직접적으로 영향을 미치는 파라미터의 수준합(level sum)과 기여율(affecting ratio)을 간접 분석법을 이용하여 계산한 결과를 제시하고 있다. 수준차(level difference)는 각 파라미터의 수준합 중에서 가장 큰 수와 가장 작은 수의 차이를 나타낸 것이고, 기여율은 수준차의 합(sum of level difference)에 대한 각 파라미터 수준차의 백분

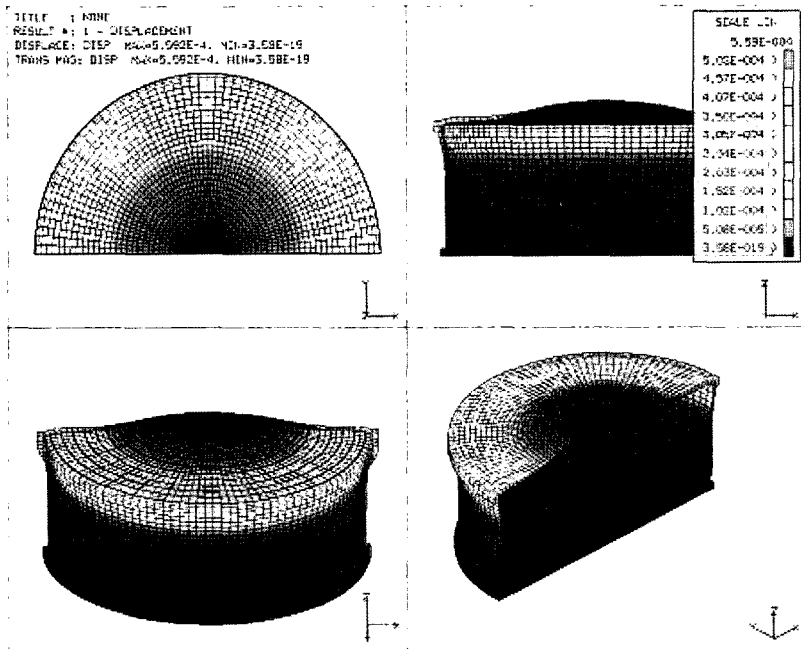


Fig. 4. Displacement distribution of LNG outer tank for the third Taguchi model, which shows the lowest displacement on the reinforced roof structure.

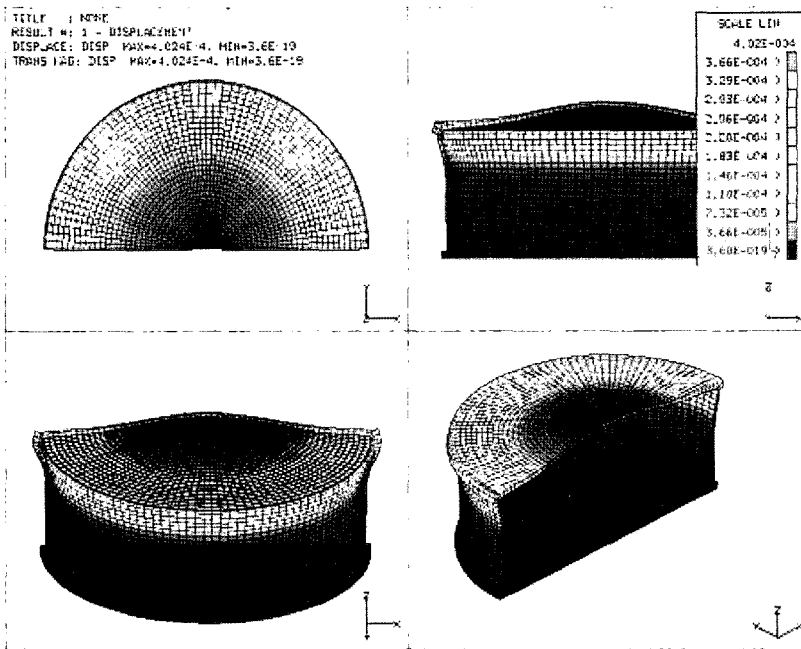


Fig. 5. Displacement distribution of LNG outer tank for the eighth Taguchi model, which shows the highest displacement on the reinforced roof structure.

을 의미한다.

Table 5의 다구찌 해석결과에 의하면 각 파라미터의

수준합은 -1352.26~1376.71로 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 계측되었고, 수준차의 합은 28.18로 계산되

Table 5. Factors affecting the maximum stress of the LNG tank roof structure.

		(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
Level difference		5.62	1.34	19.46	1.76	28.21
Affecting ratio [%]		19.92	4.83	69.01	6.24	100

었다. Table 5의 해석결과로부터 지붕 구조물에서 발생하는 최대응력에 큰 영향을 미치는 기여율을 보면, 콘크리트 구조물의 두께를 나타내는 ㉠ 파라미터가 69.01%로 가장 높고, 반경방향으로 배열되는 H빔의 수량을 나타내는 ㉡ 파라미터는 19.92%로 그 다음을 따르고, 원주방향으로 배열된 L빔의 수량을 나타내는 ㉢ 파라미터가 4.83%로 가장 낮게 나타났다.

또한, Table 6의 다구찌 해석결과로부터 지붕 구조물에서 발생하는 최대변위에 큰 영향을 미치는 기여율을 보면, 콘크리트 구조물의 두께를 나타내는 ㉠ 파라미터가 94.5%로 가장 높고, 원주방향으로 배열된 L빔의 수량을 나타내는 ㉢ 파라미터가 3.23%로 그 다음을 따르고, 반경방향으로 배열되는 H빔의 수량을 나타내는 ㉡ 파라미터는 1.22%로 가장 낮게 나타났다. 최대응력 측면에서 보면 H빔 구조물이 L빔 구조물보다는 지붕 구조물의 강도 안전성을 확보하는데 상대적으로 더 중요한 영향을 미치는 설계인자라는 것을 의미한다.

상기의 Table 5와 6의 해석결과에 의하면, 결국 지붕의 구조물을 형성하는 빔과 콘크리트 구조물의 상대적 중요도를 설계측면에서 관찰할 수 있는 데이터를 제공한다. 즉, LNG 저장탱크의 지붕에는 철근 콘크리트 구조물의 두께가 절대적인 영향을 미치고, H빔이나 L빔은 상대적으로 대단히 낮은 영향을 미치기 때문에 LNG 저장탱크의 지붕설계는 빔 구조물보다는 콘크리트 두께에 큰 비중을 두고 설계하는 것이 바람직하다는 결론이다. 철근 콘크리트 구조물에 비하여 상대적으로 작은 영향을 미치는 것으로 관찰된 빔 구조물의 특

성을 보면, 최대응력은 H빔 구조물이 L빔 구조물보다는 지붕 구조물의 강도 안전성을 확보하는데 4.1배나 더 중요한 역할을 하고, L빔 구조물은 최대변위 측면에서 2.6배 정도 우수한 것으로 예측되었다.

V. 결 론

LNG를 안전하게 저장하기 위한 외부탱크의 지붕 구조물에 대한 강도설계 안전성을 위하여 다구찌 설계방법을 이용한 최적설계를 수행하였다. 지붕 구조물의 강도와 변형에 관련된 철골 구조물 2가지와 지붕 가운데 부분의 두께를 고려한 안전성 평가를 다구찌 설계방법의 망소특성을 적용하여 최적설계 데이터를 확보하였다.

FEM 및 다구찌 해석결과에 의하면, 지붕 구조물의 강도에 가장 큰 영향을 미치는 설계인자는 지붕 구조물의 철근 콘크리트 두께이다. 즉, 지붕 구조물의 안전성은 지붕의 두께설계에 의해 강도와 변형 거동성이 절대적인 영향을 받으며, H빔과 L빔 구조물이 미치는 영향은 상대적으로 미비한 것으로 나타났다. 또한 H빔은 지붕 구조물의 강도에 큰 영향을 미치고, L은 변형거동에 보다 큰 설계인자 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 따라서 LNG 저장탱크의 지붕 구조물 설계를 최적의 조건으로 수행하기 위해 필요한 강도설계는 철근 콘크리트 구조물의 두께를 크게 잡아 안전성을 확보하고, 지붕 구조물의 초기강도 안전성을 위한 H빔과 L빔 구조물은 가능한 작게 배열하여 지붕 구조물의 자중을 줄

Table 6. Factors affecting the maximum displacement of the LNG tank roof structure.

		(A)	(B)	(C)	(e)	Sum
Levels	1	199.78	199.61	195.30	199.76	194.44
	2	199.69	199.65	200.32	199.71	799.38
	3	199.67	199.89	203.53	199.67	802.76
Level difference		0.11	0.28	8.23	0.09	8.711
Affecting ratio [%]		1.22	3.23	94.53	1.01	100

이는 최적설계가 바람직한 것으로 밝혀졌다.

참고문헌

- [1] "MSC/NASTRAN User's Manual, Basic Dynamic Analysis", The MacNeal-Swendler Co. (1993)
- [2] "Flat-bottomed Vertical Cylindrical Storage Tanks for Low Temperature Service - BS 7777", (1993)
- [3] "구조해석을 통한 KOGAS 멤브레인 LNG 저장탱크 및 완전방호식 LNG 저장탱크의 안전성 평가", 한국가스학회 (May 2004)
- [4] 송서일, "실험계획법", 한경사, (June 2001)
- [5] 김석우, "다구찌 방법을 이용한 효율적인 사시 시스템 설계방법에 관한 연구", 국민대학교 자동차공학과 석사논문, (1999)
- [6] 박경진, "자동차 분야에서의 최적설계기술의 응용", 월간기계설계, pp. 82-89, (Sep., 2002)