

LNG 화물창 비계 시스템의 구조해석 및 진동 특성

Structural and Vibrational Characteristics for the Scaffolding System of LNG Cargo Containment

류봉조† · 신광복 · 남윤의* · 오부진** · 백수곤 · 김후식***

B. J. Ryu, G. B. Shin, Y. E. Nahm, B. J. Oh, S. G. Baek and H. S. Kim

Key Words : Structural analysis(구조해석), Vibrational characteristics(진동 특성), LNG cargo containment(LNG 화물창), Scaffolding system(비계 시스템)

ABSTRACT

The paper deals with the structural analysis and vibration test for the scaffolding system of LNG cargo containment. The eight-stories scaffolding system has telescopic area, working area, coner area and storage area in real system. In the structural analysis, the maximum displacement and stress of the each floor for the scaffolding system are investigated by finite element method. In the vibrational analysis, the natural frequencies and mode shapes for 8-stories scaffolding system of the LNG cargo containment are investigated. In order to compare theoretical natural frequencies with experimental ones, small size of 2-step scaffolding structure is used, and the theoretical results for natural frequency have a good agreement with experimental ones.

1. 서 론

LNG 운반선의 화물창(Cargo containment) 비계시스템은 LNG운반선 건조과정의 핵심공정인 화물창 공사 작업을 위한 자재, 장비 등의 수송을 안전하고 원활하게 하기위해 작업장에 설치되는 고소 높이를 가진 트러스 구조의 비계시스템이다.

현재 비계시스템은 다양한 용도로 사용되고 있다. 예를 들어, 송전탑의 보수, 발전설비 정비, 고층건물 건축시공 시, 화물선 및 운반선의 건조작업 등에 다양한 용도로 사용되고 있고, 이러한 비계시스템은 현재는 물론이고 향후 높이가 더 높은 고소작업용으로 사용될 추세에 있다. LNG운반선 건조의 핵심공정인 화물창 공사를 위한 작업 중의 하나인 LNG 화물창 비계시스템은 공사의 안전성과 신속성을 위해 구조적으로 안정하면서도 작업 시의 여러 가지 환경조건에 견딜 수 있어야 한다. 또한, 설치와 해체작업이 편리하도록 경량이면서도 튼튼한 구조를 지녀할 뿐만 아니라 부품의 수도 적어져야 한다. 선박 내부에 작업대를 설치하고 진행 하는 LNG운

반선 화물창 비계시스템은 일반 상선의 비계시스템이나 건축물 건립에 사용되는 비계시스템과는 개념이 완전히 다른 제품이다. 까다로운 공정을 작업자가 편안하게 수행할 수 있는 공간을 제공하는 한편, 이층의 단열재 설치와 인바용접을 위한 각종 기계장비를 원활하게 설치하고 운용할 수 있도록 인체공학적인 관점에서 설계가 되어야 한다.

이러한 화물창 비계시스템은 LNG 운반선 화물창이 점차 대형화되는 추세에 있으므로 화물창 자체의 높이가 높아 고소 작업용의 비계시스템이 절실히 필요로 해지는 실정이며, 경량화와 함께 설치 해체의 신속성도 요구되므로 비계시스템의 강도측면과 구조측면에서 안전성이 무엇보다도 우선적이다. 또한, LNG운반선 화물창 고소작업을 위한 비계시스템의 조립 시, 저층으로부터 고층으로의 비계블록의 동하중 이동에 따른 부수적인 진동문제 등은 비계시스템의 안정성뿐만 아니라 작업자의 안전을 위해서도 기술적 노후가 절대적으로 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 정하중 및 동하중 부하에 따른 구조해석과 동특성 해석 및 모달 시험을 통해 비계 시스템의 안전성을 검토하는데 있다.

2. LNG 운반선 화물창 비계시스템 구조해석

2.1 유한요소해석

본 연구의 구조해석 대상인 LNG화물창 비계시스템은 연

† 교신저자; 한밭대학교 기계공학부
E-mail : bjryu701@hanbat.ac.kr
Tel : (042) 821-1159, Fax : (042) 821-1587
* 한밭대학교 기계공학부
** 충남대학교 대학원 기계설계공학과
*** (주)한밭

속체 구조물로 이러한 연속체 구조물의 구조해석에 있어서 유한요소법을 이용하였고, 범용 유한요소 해석 프로그램인 COSMOS를 사용하여 해석을 수행하였으며 요소는 절점 (node) 당 6개의 자유도를 고려하는 3D beam element와 shell4 element를 사용하여 3D beam element는 기둥, 거더와 빔을 shell4 element는 합판을 모델링하였다. 그리고 해석에 있어서 무시할 수 있는 부분을 생략하고 하중에 직접적으로 영향을 받는 주된 골격과 합판을 모델링하여 모델을 단순화함으로써 해석시간을 줄이고 과도한 해석수행을 피하였다.

Fig. 1은 비계시스템을 3D beam element와 shell 4 element를 사용하여 모델링한 유한요소모델을 나타내고 있으며 경계조건으로 비계시스템의 지지대 하단의 지면과 맞닿는 부분을 6자유도를 구속하였고 5층 거더부 전, 후, 좌, 우의 끝단에 6자유도를 구속하였다.

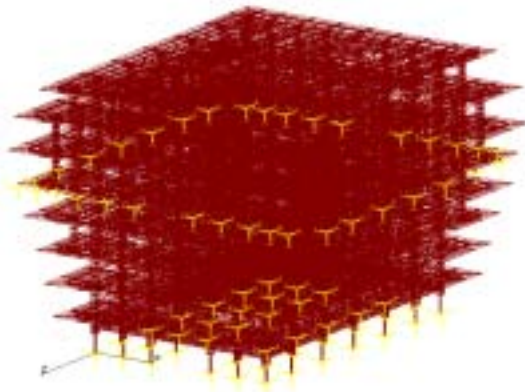


Fig. 1 FE model and boundary condition.

해석모델에서 사용한 물성치는 일반구조용 각형강관인 STKR 및 STK, SS400과 합판을 사용하였고 재료의 물성치는 Table 1과 같다. Table 2는 해석모델에 사용된 보의 종류 및 형상치수와 합판의 두께를 나타낸다.

비계시스템 해석에 있어서 하중조건은 전체 프레임의 중량을 고려하고 프레임 위에 놓일 바닥재의 중량, 즉 전체 합판의 하중과 2층에 storage area에 작용하는 압력, 2층과 8층의 작업면적(working area)에 작용하는 압력과 6층 7층의 작업면적에 작용하는 하중을 적용하였다. Table 3은 구조해석에 적용된 하중을 나타낸다.

Table 1 Material properties.

Property Material	Young's Modulus [N/m ²]	Poisson's Ratio	Density [kg/m ³]	Yield Strength [N/m ²]
SS400	205×10 ⁹	0.29	7860	250×10 ⁶
STKR490				411×10 ⁶
STK540				478×10 ⁶
Plywood	1.079×10 ⁹	0.1	665	13.7×10 ⁶

Table 2 Dimensions of beam and plywood.

Kinds of beam	Dimension (mm)	Kinds of beam	Dimension (mm)
Hollow rectangular	150×150×6t	Circular hollow	Φ60.5×2.3t
	125×75×2.3t		Φ60.5×2.4t
	125×75×3.2t		Φ48.6×2.4t
	100×50×2.3t		Φ42.7×2.4t
	100×50×3.2t		Φ42.7×3.2t
	75×75×3.2t	H-beam	125×60×6×8
	75×45×2.3t	Brace	Φ20
	75×45×2.4t	-	-
	60×60×2.3t		
	60×60×3.2t		
	50×50×2.3t		
	50×50×2.4t	Kinds of plate	Dimension (mm)
50×50×3.2t	Plywood	18	

Table 3 Load conditions.

Area	Applied value
Frame weight	665 [kg/m ³]
Floor weight (total plate)	0.25 [kN/m ²]
2nd floor storage area	2.71 [kN/m ²]
2nd, 8th floor working area	2.45 [kN/m ²]
6th, 7th floor working area	2.45 [kN/m ²]

2.2 유한요소해석 결과

비계시스템 구조해석결과 shell4 element를 사용한 합판의 최대변위는 2층의 양쪽 끝부분에서 가장 큰 변위인 381.87 [mm]의 처짐이 발생하였다. Fig. 2는 전체 비계시스템에 대한 합판의 변위를 나타내고 있다.

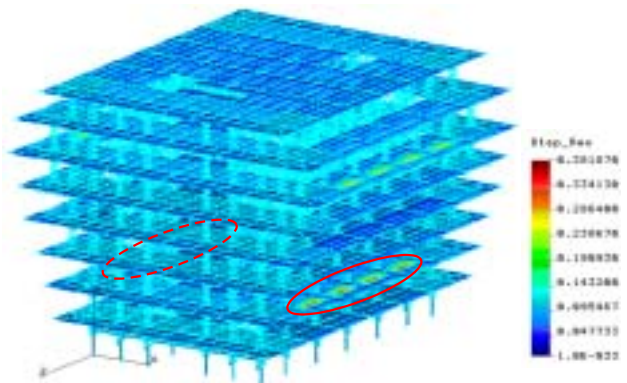


Fig. 2 Maximum displacement for the plywood.

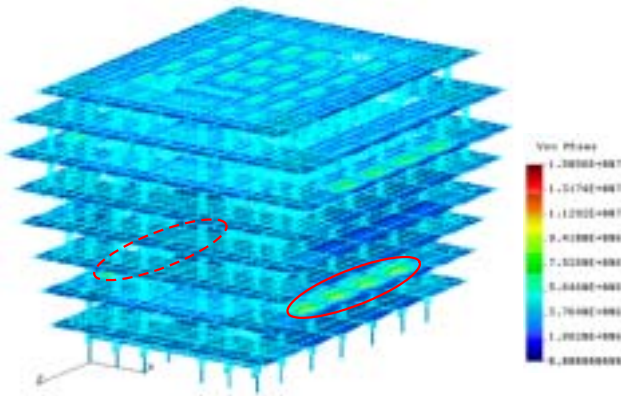


Fig. 3 Maximum stress for the plywood.

마찬가지로 합판의 최대 응력은 2층의 양쪽 끝부분에서 가장 큰 응력인 15.056 [MPa]이 발생하였다. Fig. 3은 전체 비계시스템에 대한 합판의 응력을 나타낸 그림이다. Table 4는 각 층별 합판의 최대 변위 값과 최대 응력 값을 보여주고 있다.

최대응력의 산출은 von Mises criterion을 적용하였으며, 최대응력은

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

이고, σ_1 , σ_2 및 σ_3 는 각 축에 대한 주응력(principal stress)이다.

합판에서의 처짐이나 응력은 2층에서 상당히 높은 값으로 불안정한 결과를 보이고 있으나 실제 구조물에서는 다른 부재에 위에 합판을 결합하는 방법으로 처짐과 응력을 감소시키는데 있어서 많은 보상이 될 것이다.

Table 4 Maximum stress of the plywood for each floor.

Floor	Displacement [mm]	Stress [MPa]
1	108.480	1.462
2	381.870	15.056
3	116.840	2.194
4	140.210	2.490
5	121.850	2.122
6	301.110	10.972
7	149.410	7.830
8	102.050	9.663

3D 보 요소를 사용한 보의 최대변위는 합판과 마찬가지로 2층의 양쪽 끝부분과 후부에서 가장 큰 변위인 63.162 [mm]의 처짐이 발생하였다. Fig. 4는 전체 비계시스템에 대한 보의 변위를 나타낸 그림이다.

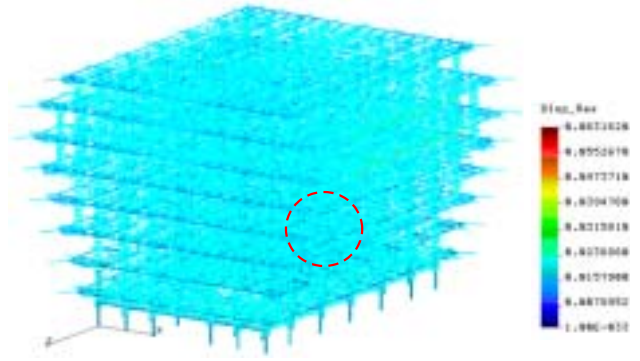


Fig. 4 Maximum displacement for the beam.

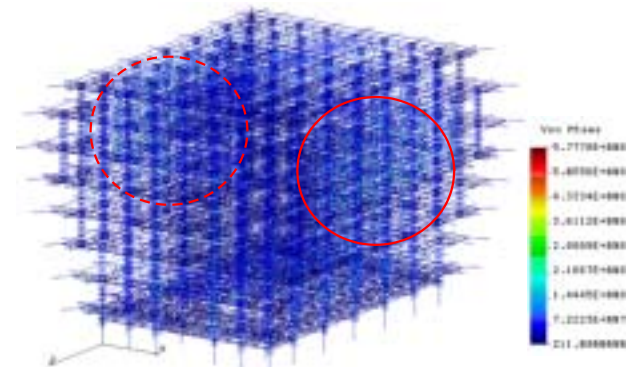


Fig. 5 Maximum stress for the beam.

보의 최대 응력은 7층의 주 기둥 부분에서 가장 큰 응력인 577.780 [MPa]이 국부적으로 발생하였으며 Fig. 5는 전체 비계시스템에 대한 보의 응력을 나타내고 있고 Fig. 6은 7층에서 보의 최대 응력에 대한 그림을 나타내고 있다. Table 5는 각 층별 보의 최대 변위 값과 최대 응력 값을 보여주고 있다.

보에서의 처짐이나 응력은 2, 6, 7층에서 상당히 높게 나타나고 있으며 해석모델에서는 주 기둥에서 y방향으로 연결되는 마디 부분의 사이에 들어가는 보를 모델링하지 않고 해석을 수행한 결과로 실제 구조물에서는 마디 부분의 부재가 응력을 감소시키는데 상당히 기여할 것이다.

Table 5 Maximum stress of the beam for each floor .

Floor	Displacement [mm]	Stress [MPa]
1	11.669	125.460
2	63.162	557.820
3	25.789	224.330
4	38.847	213.560
5	30.095	396.310
6	51.076	479.740
7	42.678	577.780
8	33.274	406.140

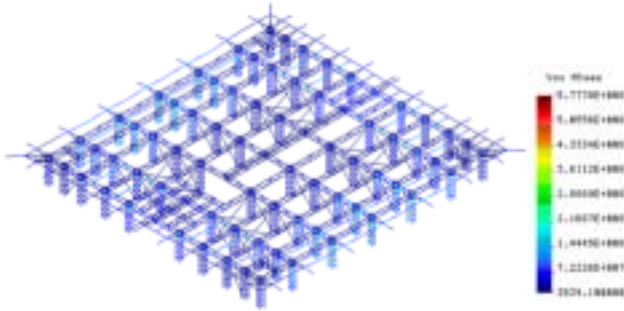


Fig. 6 Beam stress and 3D model for the 7th floor.

3. 결과 및 고찰

3.1 구조해석 결과 고찰

Plywood의 두께가 18[mm]인 경우는 항복응력(13.7 [MPa])에 대하여, 부재가 보인 경우는 거의 411, 478 [MPa]의 항복응력을 갖는 보로 이루어져 있으며 이에 대하여 최대응력과 최대변위를 계산하여 안전성을 평가하였으며 그 결과는 Table 6과 같으며, 이는 plywood와 보에 나타나는 최대응력과 최대변위 값이다.

Table 6 Maximum stress and displacement for plywood and beam.

Material	σ_{max} [MPa]	Dmax [mm]
Plywood	15.056	381.87
Beam	557.780	63.162

Plywood의 항복응력은 13.7 [MPa]이나 2층에서만 항복응력을 초과하는 15.056 [MPa]의 응력이 발생하여 불안정한 결과를 얻었으나 실제 구조물에서는 plywood와 다른 부재와 병합하여 보위에 거치되므로 치짐이나 발생하는 응력은 상당히 감소되어 안전할 것으로 사료된다. 그리고 하중의 분산과 판의 처짐을 줄이기 위하여 연결 보 사이에 수평으로 교차하는 brace를 제외하고 수직 교차 brace만을 모델링하여 해석을 수행한 결과로 실제 구조물에서는 수평 brace를 설치하므로 plywood의 처짐과 응력에 상당한 보완이 될 것으로 사료된다.

Brace를 제외하고 대부분 STKR490과 STK540 재료를 사용한 보 구조에 있어서 두 재질에서 작은 STKR490의 항복응력인 411 [MPa]에 대하여 2층, 6층, 7층에서 각각 557.820 [MPa], 479.740 [MPa], 577.780 [MPa]의 응력이 몇몇 국부적인 보에서 발생하여 해석 결과적으로는 다소 불안전하나, 본 해석 모델에서는 주 기둥에서 사이사이 연결되는 수평 보를 제외하고 해석을 수행한 결과로 실제 구조물에서는 그 사이사이를 연결하고 있는 수평 보의 각각에 기둥에 설치되므로 안전할 것으로 판단된다.

3.2 모달 해석결과

Table 7은 호이스트가 없는 경우에 대한 비계 시스템의 고유진동수 해석 결과를 보여주고 있다. Fig. 7은 호이스트의 영향을 고려한 모드해석을 하기 위한 모델을 나타내고 있으며 호이스트가 1층~8층에 위치되어 있을 경우에 해석을 수행하였다. 구조물이 크고 작용압력이 호이스트가 위층으로 상승하면서 미치는 동하중의 영향에 비하여 상당히 크므로 호이스트의 위치에 관계없이 비계시스템의 고유진동수는 변화가 없었으며, 그 고유진동수 결과를 Table 8에서 보여주고 있다.

Table 7 Natural frequencies for the scaffolding system.

Mode	Natural frequency [Hz]
1st	1.897
2nd	2.030
3rd	2.046

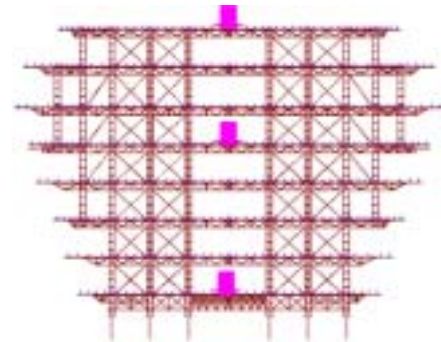


Fig. 7 Scaffolding depending on the hoist position.

Table 8 Natural frequencies due to the hoist position.

Hoist position	Modes	Natural frequency [Hz]
1st floor	1st	1.897
	2nd	2.030
	3rd	2.046
5th floor	1st	1.897
	2nd	2.030
	3rd	2.046
8th floor	1st	1.897
	2nd	2.030
	3rd	2.046

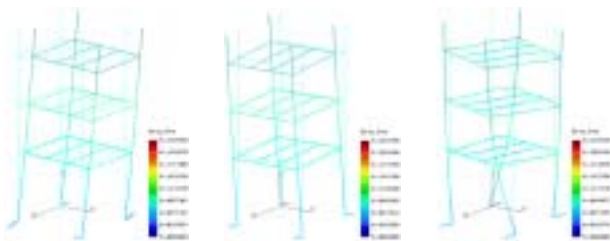
Fig. 8은 모달 해석을 하기위하여 주 기둥의 일부분을 모델링한 그림을 나타낸다. 모달 해석 결과는 주 기둥의 고유진동수는 Table 9에 나타나 있고, 모드형상은 Fig. 9에 보여진다.

Table 9 Theoretical natural frequencies of the main column for 2-step scaffolding.

Mode	Natural frequency [Hz]
1st	18.517
2nd	25.422
3rd	49.203



Fig. 8 Analysis model for natural frequencies.



(a) 1st mode (b) 2nd mode (c) 3rd mode
Fig. 9 Mode shapes.

3.3 모달 시험결과

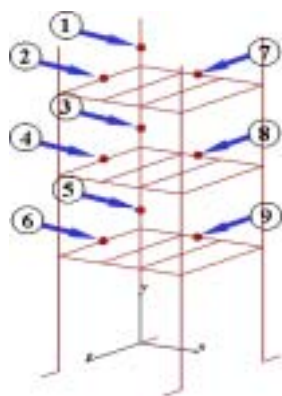


Fig. 10 Modal testing for the scaffolding.



Photo. 1 Photograph of the modal testing.

Table 10 Theoretical results and experimental ones for natural frequencies.

Number	Natural frequency [Hz]	Error (%)
1st	18.5	-0.09
2nd	32.5	21.8
3rd	59.5	17.3
4th	68	-4.71
5th	117.5	2.05
6th	126	4.32

* Error (%) = $\{(\text{Experimental value} - \text{Analysis value}) / (\text{Experimental value})\} \times 100$

Fig. 10은 모달 시험을 위한 그림이며 화살표 방향은 충격해머(impact hammer)로 구조물에 충격을 주는 방향을 나타내고 있고, 적색 포인트는 가진점의 위치를 나타내며 총 9개의 위치에서 실험을 수행하였다. 또한 Photo. 1은 모달 시험의 광경을 보여주는 사진이다. Table 10은 Fig. 10의 충격해머의 각 타격 위치에 따른 모달 시험을 수행한 결과를 조합하여 나타낸 고유진동수 시험 값을 보여준다. Table 10에 나타난 바와 같이, 시험 결과와 해석결과가 두 번째와 세 번째 모드에서 큰 오차를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 8의 모델이 복잡한 형상의 구조물이라 충격해머의 타격의 위치에 따라 국부 모드 등이 다양하게 나타나기 때문으로 사료된다. 그 외의 모드에서는 비교적 시험 값과 해석 값의 결과는 일부 모드에서는 다소 오차를 보이고 있다.

4. 결론

첫째, 화물창 비계시스템의 구조해석결과 Plywood의 항복응력은 13.7 [MPa]이나 2층에서만 항복응력을 초과하는 15.056 [MPa]의 응력이 발생하여 불안정한 결과를 얻었으나, 실제 구조물에서는 plywood와 다른 부재와 병합하여 보위에 거치되므로 처짐이나 발생하는 응력은 상당히 감소되어 안전할 것으로 사료된다. 또한, 하중의 분산과 판의 처짐을 줄이기 위하여 연결 보 사이에 수평으로 교차하는 brace를 제외하고 수직 교차 brace만을 모델링하여 해석을 수행한 결과로 실제 구조물에서는 수평 brace를 설치하므로 plywood의 처짐과 응력에 상당한 보완이 될 것으로 사료된다.

둘째, Brace를 제외하고 대부분 STKR490과 STK540 재료를 사용한 보 구조에 있어서 두 재질에서 작은 STKR490의 항복응력인 411 [MPa]에 대하여 2층, 6층, 7층에서 각각 557.820 [MPa], 479.740 [MPa], 577.780 [MPa]의 응력이 몇몇 국부적인 보에서 발생하여 해석 결과적으로는 다소 불안정하나, 본 해석 모델에서는 주 기둥에서 사이사이 연결되는 수평 보를 제외하고 해석을 수행한 결과로 실제 구조물에서는 그 사이사이를 연결하고 있는 수평 보의 각각에 기둥에 설치되므로 안전할 것으로 판단된다.

셋째, 호이스트가 없는 화물창 비계 구조물이든 호이스트가 있는 이동하중의 비계구조물이든 전체 비계구조에 비해 호이스트의 질량은 대단히 경미하므로, 고유진동수의 3차까지의 변화에 변화가 없었고, 1단 주 기둥의 시험 및 해석결과 고유진동수는 2차와 3차를 제외하곤 비교적 근사한 일치를 보였다.

후 기

본 논문은 2006년도 산학연 공동기술개발 지역컨소시엄 사업 수행결과의 일부이며, 지원을 아끼지 않으신 관계기관에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Genta, G., 1993, Vibration of Structures and Machines, Springer-Verlag.
- (2) Meirovitch, L. M., 1997, Principles and Techniques of Vibrations, Prentice-Hall.
- (3) Ewins, D. J., 2000, Modal Testing : Theory, Practice and Application(2nd edition), Research Studies Press Ltd.
- (4) 한국전력공사, 2005. 12, “송전공사용 모듈형 발반침개발” 협력연구개발과제 최종보고서(KEPCO-04-C28).
- (5) 류봉조, 신광복, 이재열, 백수곤, 김후식, “호이스트에 의한 비계 이송 시 적재하중에 의한 구조물 진동특성 연구”, 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, 2006.