

FEM을 이용한 유조화차의 구조강도 해석

*임충환¹, 구병춘¹, 박준서¹

¹ 한국철도기술연구원

Structural Analysis of the Tank Car using the FEM

*C. H. Lim¹, B. C. Goo, J. S. Park¹

¹ Korea Railroad Research Institute (KRRI)

Key words : Tank car, Structural analysis, FEM(Finite Element Method)

1. 서론

현재 우리나라에는 철도를 이용한 유류 및 화학약품 등 위험물 수송에 대한 수요가 이루어지고 있으며 이러한 철도를 이용한 위험물 수송에는 일반 유조화차(Oil Tank Car), 아스팔트 탱크 화차(Asphalt Tank Car), 황산 탱크 화차(Sulfuric Acid Tank Car) 등이 사용되고 있다. 하지만 장기간 사용되어 온 이러한 Tank car의 노후화 문제, 그리고 물류시간 단축을 위한 유조화차 고속화의 필요 등을 고려하였을 때 유조화차에 대한 구조적 해석을 통한 안전성 검토가 반드시 필요한 시점이라 할 수 있지만 현재 이에 대한 해석 사례는 그리 많지 않다.

본 연구에서는 이들 중 Fig. 1에서 보이고 있는 아스팔트 탱크 화차(Asphalt Tank Car)에 대한 구조강도 해석을 실시하였고 그 첫 단계로써 정지 상태에서의 화차 차체 강도 및 강성을 상용 유한요소 코드인 MSC.Patran/Nastran을 사용하여 해석하였다. 해석 방법으로는 먼저 아스팔트 유조화차의 설계사양 및 제원을 이용하여 모델을 구성하고 JIS E7105 ‘철도차량 차체의 하중 시험방법’의 수직 및 압축하중 시의 시험방법을 적용하여 아스팔트 탱크가 상화된 상태인 만차 시 수직하중 시험과 이에 압축하중이 동시에 가해지는 압축 시험을 구현하였다. 또한 마지막으로 해석 결과로써 얻어진 각 부재의 최대 응력 및 처짐량 등의 결과를 관련 규격의 판정기준과 비교함으로써 아스팔트 탱크 화차의 구조적 건전성을 평가하였다. Table 1, 2는 각각 본 아스팔트 탱크 화차의 차체를 구성하는 주요 부재 재료의 기계적 특성 및 판정기준 등의 평가 조건을 보이고 있다.



Fig. 1 Asphalt tank car

Table 1 Mechanical properties of the components materials

재료	인장강도	항복강도	해당 부재
SS400	41.0 이상	25.0 이상	Side frame End frame
SWS490A	50.0 이상	33.0 이상	Center sill Cross beam Body bolster End sill Side sill

2. 유한요소 해석 모델 구성

본 연구에서는 구조강도 해석의 대상을 아스팔트 탱크 화차의 전체 구조에서 대차를 제외한 탱크와 언더프레임의 결합체로 정하고 이에 대한 모델링을 수행하였다.

언더프레임 및 탱크의 모델링에 있어서 다음의 구조적 특징들을 고려하였다. 먼저 언더프레임(Under frame)은 강판 및 압연강재와 용접 또는 리벳구조로써 센타실(Center sill), 사이드 실(Side sill), 엔드실(End sill), 차체 볼스타(Body bolster) 등으로 구성되어 있으므로 이들 각각의 구성 부재를 충실히 반영하여 해석 결과의 정확성이 확보되도록 노력하였다. 또한 탱크의 모델링에 있어서는 차체 볼스타 위의 새들(Saddle) 4개 및 센타실 중앙부분의 앵커 플레이트(Anchor plate) 등의 총 다섯 부분에 의하여 언더프레임과 견고하게 결합된 상태로 구성되어 있으므로 이를 반영하여 탱크 상부의 돔, 맨홀, 사다리 및 각종 하화 설비 등과 같이 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상되는 불필요한 부재의 모델링은 생략하여 구조를 단순화 하였고 대칭을 고려하여 전체 형상의 1/2만을 제작하였다. node 수 38110개, 2D shell element 수 32671개를 이용하여 제작된 언더프레임 및 탱크 모델의 mesh 형상은 Fig. 2와 같다.

Table 2 A criterion of the stress and displacement

항목	평가기준	비고
응력값	재료의 허용응력 이하	SS400 : 25kgf/mm ² SWS490A : 33kgf/mm ²
처짐량	대차간 거리의 1/1000 이하	$\frac{9750mm}{1000} = 9.75mm$

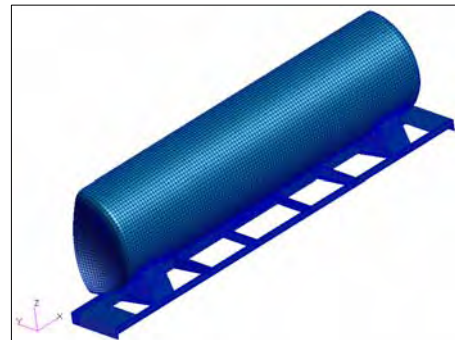


Fig. 2 Mesh configuration of Finite element analysis model of tank car

3. 하중 및 구속조건

해석에 적용한 하중은 아스팔트 탱크 화차의 제원 및 각 시험 방법에 근거하여 공차 시 하중 및 대차, 화물 하중 등을 이용하여 계산되었다. 수직하중 시험에 사용된 하중은 대차하중을 제외하고 최대 화물하중을 더하여 사용하였고 압축하중 시험에는 591

위의 수직하중에 관련 규격에서 제시하는 수평방향 압축하중을 동시에 부과하였다. 따라서 시험에 사용될 수직 및 압축하중은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{수직(만차)하중} &= (24,400 - 4,400 \times 2) + 50000 = 65,600 \text{ kgf} \\ \text{압축하중} &= 220,000 \text{ kgf} \end{aligned}$$

여기서, 공차하중 : 24.4 ton, 대차하중 : 4.4 ton,
 최대 화물하중 : 50 ton

수직하중 시험 시 구속조건은 모델의 대칭면에 대칭조건 (UX, ROTX., ROTZ = 0)을 적용하고 Fig. 3과 같이 차체가 지지되는 바디 볼스터의 센터 피봇부위 중 한쪽에는 상하방향의 변위만을 구속(UZ = 0)하였으며 다른 한쪽에는 상하 및 전후방향의 변위를 구속(UX, UZ = 0)하였다. 또한 압축하중 시험 시에는 역시 모델 대칭조건과 함께 양쪽 바디 볼스터의 센터 피봇부위의 상하방향을 구속(UZ = 0)하였고 후위 센터 실의 드래프트 스톱퍼 부위에 전후방향의 변위를 함께 구속(UX = 0)하였다.

4. 해석 결과

4.1 수직하중 시험

수직하중 시험에 대한 구조물 내 응력분포를 Fig. 4(a)에 나타내었으며 이때 4.44kgf/mm²의 최대 응력이 탱크를 받치는 saddle 부위에서 발생(Fig. 4(b))하였으나 이는 saddle의 재질인 SWS 490A의 항복응력 이내였으며 차체 처짐 변위는 0.65mm로써 이 역시 판정기준 이내였다.

4.2 압축하중 시험

Fig. 5에서 보이고 있듯이 수직하중과 수평압축하중을 동시에 가하는 압축하중 시험에 대한 해석 결과 최대 응력은 8.63kgf/mm²이며 역시 saddle 부위에서 발생하였다. 이때의 처짐량은 5.78mm로 압축하중 시험 결과 역시 최대 응력과 처짐량 모두 판정기준 이내임을 확인할 수 있었다.

이상의 해석 결과에 대한 판정 기준과의 비교를 table 3에서 정리하고 있다

5. 결론

- 1) JIS E 7105에 규정된 차체 수직하중 및 압축하중 시험 방법을 적용하여 상용 유한요소 코드로서 아스팔트 탱크 화차의 탱크 및 하부 프레임 구조강도를 해석하였다.
- 2) 해석결과 수직하중 및 압축하중 시험에서의 최대 응력은 두 경우 모두 탱크를 받치는 saddle 부위에서 발생하지만 saddle의 재질인 SWS 490A의 허용응력을 초과하지 않았다.
- 3) 수직하중 및 압축하중 시험에서의 차체 처짐량은 각각 0.65mm와 5.78mm로써 판정기준인 차체 길이의 1/1000, 즉 9.75mm 이내였다.

후기

본 연구는 한국철도기술연구원의 ‘철도 안전기술 개발사업’의 일부로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

참고문헌

1. JIS E 7105, 1989 “철도차량 차체의 하중시험 방법”
2. JIS E 7101, 1989, “탱크차”
3. 김선용 외, 2005, “유한요소법에 의한 부식을 고려한 전동차 차체의 강도평가”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp. 350-355

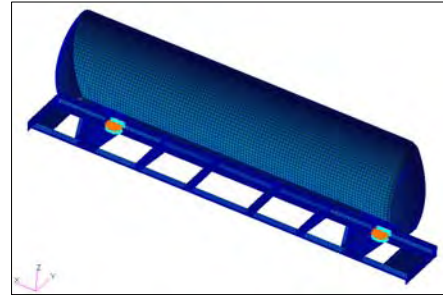
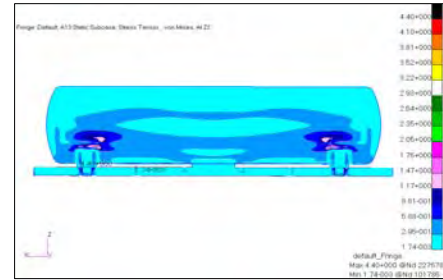
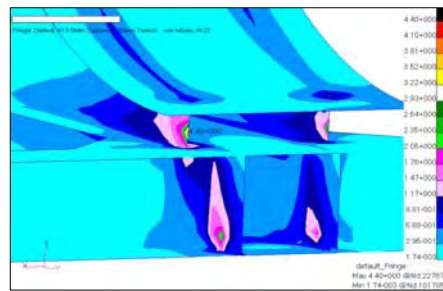


Fig. 3 The range of constraint on tank car model



(a)



(b)

Fig. 4 Stress contour under vertical load on the(a) full model and (b) saddle

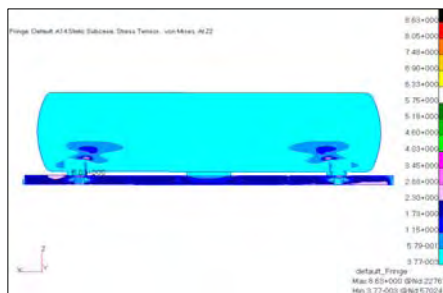


Fig. 5 Stress contour under vertical and horizontal compressive load

Table 2 Comparison of analysis results with the criterion

	하중조건	최대값	평가기준	단위	비고
최대응력	수직하중	4.44	33.0	kgf/mm ²	만족
	압축하중	8.63	33.0	kgf/mm ²	
처짐량	수직하중	0.65	9.75	mm	
	압축하중	5.78	9.75	mm	