

위험물 수송용 탱크화차에 대한 유한요소 해석

FEM analysis of the tank car for carrying hazardous materials

임충환*
C. H, Lim

구병준**
B. C, Goo

ABSTRACT

In these days, many kinds of tank car such as Oil tank car, Asphalt tank car, Sulfuric Acid tank car and Propylene tank car are used for carrying hazardous materials. Although they have a lot of dangerous possibilities when they meet with accidents examples of collisions and derailments there are not prescribed methods or standards for structural analysis using FEM.

In this study, the structural stress analysis for an Asphalt tank car(Non-pressurized tank) and a Propylene tank car(Pressurized tank) was performed using the FEM refer to the test method in JIS E 7102(Design Methods for Tanks of Tank Cars). And then we suggested the tank car analysis procedures and considered the results.

1. 서 론

현재 철도를 통하여 유류, 화공약품 및 액화연료 등의 다양한 위험물 수송이 행해지고 있으며 이에 사용되는 화차로는 일반 유조화차(Oil Tank Car), 아스팔트 탱크화차(Asphalt Tank Car), 황산 탱크화차(Sulfuric Acid Tank Car), 프로필렌 탱크화차(Propylene Tank Car) 등이 일반적이다. 이러한 위험물 수송용 탱크화차는 차량의 사고 시에 발생하게 될 막대한 인적, 경제적 피해 가능성에도 불구하고 그에 대한 구조강도 해석 방법 및 기준이 통일되지 않아서 각 해석업무의 필요에 따라 각기 다른 방법과 기준을 고안하여 연구를 수행하고 있다.

본 논문에서는 각 탱크 용기의 특성을 고려하는데 적합하며 더욱 정확한 결과를 도출할 수 있는 구조강도 해석 방법을 제시하기 위하여 JIS E 7102에 기술되어있는 탱크화차의 강도설계를 위한 실차 시험방법 절차를 비압력 용기인 아스팔트 탱크화차와 압력 용기인 프로필렌 탱크화차에 대해 MSC.Patran/Nastran Code를 이용하여 유한요소법으로 구현하여 해석하고 그 절차 및 결과를 고찰하였다.

2. 구조 해석

2.1 모델링

* 한국철도기술연구원/UST 연구원, 정회원

E-mail : chlim@krri.re.kr

TEL : (031)460-5285 FAX : (031)460-5279

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

(1) 차량 제원

본 연구의 해석 대상인 아스팔트 탱크 화차와 프로필렌 탱크 화차의 차량 제원을 다음의 Table 1에 나타내었다.

Table 1. 차량 제원

	차체길이 (엔드실 사이거리)	대차 중심간 거리	차체폭	최대 사용압력	최대 적재하 중	자중	용적
아스팔트 탱크 화차	11,090 mm	7,800 mm	2,880 mm	*	48 ton	24.4 ton	50 m ³
프로필렌 탱크 화차	11,000 mm	7,700 mm	2,700 mm	0.216 kg/mm ²	25 ton	27.5 ton	47 m ³

(2) 해석모델 구성

아스팔트 및 프로필렌 탱크 화차에 대하여 모델링 범위를 대차를 제외한 탱크와 언더프레임의 결합체로 결정하고 대칭을 고려하여 1/2만을 모델링 하였고 언더프레임 및 탱크의 모델링에 있어서 다음의 구조적 특징들을 고려하였다.

먼저 언더프레임(Under frame)은 강관 및 압연강재와 용접 또는 리벳구조로써 센터 실(Center sill), 사이드 실(Side sill), 엔드 실(End sill) 등으로 구성되어 있으므로 이들 각각의 구성 부재의 형상 및 물성치를 충실히 반영하여 해석결과의 정확성이 확보되도록 노력하였다. 또한 탱크의 모델링에 있어서는 차체 볼스터 위치 상부의 4개의 새들(Saddle) 및 센터 실 중앙부분의 앵커 플레이트(Anchor plate) 등의 총 다섯 부분에 의하여 언더프레임과 견고하게 결합된 상태로 구성되어 있으므로 이를 충실히 반영하되 탱크 상부의 돔, 맨홀, 사다리, 보온재 및 각종 하화 설비 등과 같이 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상되는 불필요한 부재의 모델링은 생략하여 구조 형상과 해석과정을 단순화 하였다. 아스팔트 탱크 화차의 모델링에는 node 28,881개와 28,574개의 2D shell 요소를 사용하였고 프로필렌 탱크 화차에는 62,163개의 노드와 61,198개의 2D shell 요소를 사용하였다. 각 차량의 실제 모습 및 모델링 형상을 Fig. 1에 나타내었다. 모델링 및 유한요소 해석에는 MSC.Patran/Nastran code 가 사용되었다.



(a) 아스팔트 탱크 화차

(b) 프로필렌 탱크 화차

Fig. 1 종류별 차량 및 모델링 형상

2.2 재료별 기계적 특성

아스팔트 화차 및 프로필렌 화차에는 SS400, SWS490A 등이 사용되며 이들의 적용 부재 및 기계적 물성치를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. 구성 재료의 기계적 특성

재료	인장강도	항복강도	해당 부재	
			아스팔트 탱크 화차	프로필렌 탱크 화차
SS400	41.0 kg/mm ² 이상	25.0 kg/mm ² 이상	Side sill End sill Cross beam Center anchor Saddle	Saddle Center anchor
SWS490A	50.0 kg/mm ² 이상	33.0 kg/mm ² 이상	Center sill Tank	Center sill Side sill End sill Cross beam Tank

2.3 해석조건

(1) 해석 기준

탱크 화차에 대한 기존 구조해석에 있어서는 자중 및 하중을 부여한 상태, 혹은 이를 동하중에 준하는 하중으로 변환시킨 상태에서 발생하는 최대 응력을 해당 부재에 사용된 재료의 항복응력과 비교함으로써 구조적 건전성을 평가하는 것이 일반적이었다. 하지만 이러한 해석방법을 통해 얻어진 최대 응력은 실제 재료의 항복응력에 비해 매우 작아서 구조해석에 대한 효용성에 있어서 여러 문제점을 갖고 있었다.

본 연구에서는 JIS E 7102(탱크차용 탱크의 설계방법)에서 제시하는 탱크 강도설계를 위한 시험방법 조건을 이용하여 유한요소 해석을 수행함으로써 실제 시험에 대한 모사를 꾀하였다. JIS E 7102에 제시되어있는 탱크 강도 시험방법을 Table 3에 나타내고 있다.

Table 3. JIS E 7102의 탱크 강도설계를 위한 시험조건

	내압	수직 하중	차단 충격 가속도	판정 기준
JIS E 7102 시험조건	최고 사용압력	자중 및 적재 질량의 1.3배	29.4 m/s ² (3G)	재료 항복응력에 대해 1.5 이상의 안전율을 가질 것

(2) 하중 조건

아스팔트 탱크 화차 및 프로필렌 탱크 화차의 구조해석을 위한 내압 및 하중조건은 다음과 같다.

아스팔트 탱크 화차

내압 : 0

수직하중 : [(적재하중 + 자중) - (대차질량 × 2)] × 1.3

= [(48ton + 24.4ton) - (4.4ton × 2)] × 1.3 = 82.68ton

프로필렌 탱크 화차

내압 : 21.6 kg/cm²

수직하중 : [(25ton + 27.5ton) - (4.4ton × 2) × 1.3 = 56.81ton

기존의 해석 과정에서 적재하중은 탱크에 대하여 등분포하중으로 단순화 되어 부여되었지만 본 연구에서는 적재하중 조건의 보다 정확한 모사를 위해 다음과 같은 방법을 취하였다.

유체하중을 받는 탱크 모델 1/4의 단면형상을 10개의 섹션으로 나눈 후 화물, 즉 아스팔트 및 액화 프로필렌의 수면이 탱크의 중간높이에 위치한다고 가정하고 각 부분별로 탱크 바닥면에서 수면까지의 높이 $h_1 \sim h_{10}$ 를 구하였다. 구해진 $h_1 \sim h_{10}$ 를 유체의 압력 계산식 $P_n = \rho g h_n$ 에 대입하여 계산하고 다시 이 값을 이용하여 부여된 전체 화물하중에 대한 비례적인 각 섹션별 유체 압력을 계산함으로써 적재질량에 의해 탱크에 가해지는 압력을 부여하였다.

3. 결과

3.1 아스팔트 탱크 화차 해석결과

아스팔트 탱크 화차에 대한 유한요소 해석을 통해 얻어진 Von-Mises 등가응력 분포를 Fig. 2에 보이고 있다. 해석 결과 아스팔트 수송 탱크의 하중을 지지하는 Saddle과 탱크와의 결합부 부근에서 탱크 부재에 20.88 kg/mm²의 집중응력이 발생하였다. 이는 JIS E 7102에서 제시하는 바에 따라 안전율 1.5를 고려하였을 때 탱크의 재질인 SWS490A의 최소 항복강도 33.0 kg/mm²의 94.9%에 달하는 수치이다.

3.2 프로필렌 탱크 화차 해석결과

프로필렌 탱크 화차의 경우에는 유체 하중은 응력집중에 큰 영향을 미치지 않았지만 작용된 내압에 의해 Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 탱크 측면의 접시형 경판, 그 중에서도 특히 경판의 반경이 변화되는 변곡부 주변[Fig. 3(b)]에서 23.09 kg/mm²의 응력이 발생되었고 이는 1.5의 안전율 고려 시 재질 항복강도의 104.9%에 달하는 값으로써 규격에서 제시된 기준을 약 4.9% 초과하는 결과를 나타내었다.

두 차량에 대한 유한요소 해석 결과는 JIS E 7102에서 제시하는 기준과 5% 안팎의 오차를 나타내었고 이를 Table 4에서 자세히 정리하였다.

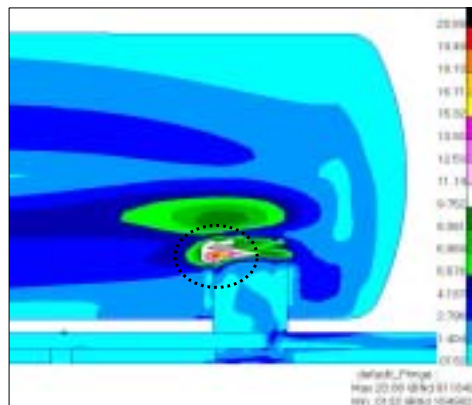


Fig. 2 아스팔트 탱크 화차 해석결과

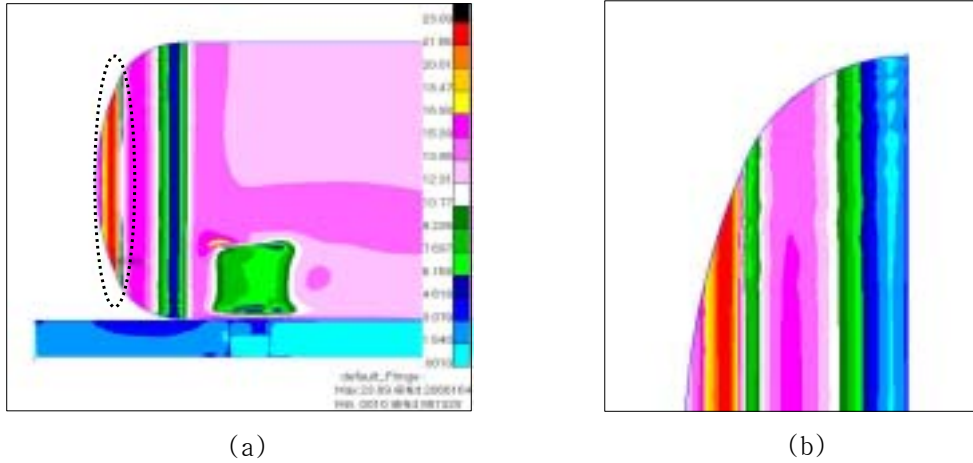


Fig. 3 프로필렌 탱크 화차 해석결과

Table 4. 아스팔트/프로필렌 탱크 화차 해석결과 및 판정

	최대응력 (kg/mm ²)	최대응력 작용부위	부재의 재질 및 항복응력	안전율(1.5) 고려 판정(kg/mm ²)
Asphalt tank car	20.88	Tank-Saddle 결합부위의 tank 부재	SWS490A $\sigma_{ys} = 33.0 \text{ kg/mm}^2$	31.3 (94.9%)
Propylene tank car	23.09	Tank 경판 변곡부 부근	SWS490A $\sigma_{vs} = 33.0 \text{ kg/mm}^2$	34.6 (104.9%)

3.3 응력 계산

유한요소 해석 결과 얻어진 최대응력의 타당성을 검증하기 위하여 다음과 같이 KS B 6728 ‘압력용기의 응력해석 및 피로해석’ 규격에 따라 내압에 의한 프로필렌 탱크 화차의 동판 및 경판에 발생하는 응력 계산을 실시하였다.

내압에 의한 원통 몸체의 막응력 강도 계산식은 다음과 같다.

$$S = \frac{PR}{t} + \frac{P}{2} = \frac{0.216 \times 1250}{17} + \frac{0.216}{2} = 16.0 \text{ kg/mm}^2$$

여기서, S 는 응력강도, P 는 작용 내압, R 는 안 반지름, 그리고 t 는 원통몸체 두께를 의미하며 계산된 값은 유한요소 해석 결과 나타난 동판에 작용되는 전체적인 응력의 크기에 근접한다.

또한, 내압에 의한 구모양 각의 막응력 강도는 다음과 같이 계산된다.

$$S = 0.75P \frac{(Y^3 + 1)}{(Y^3 - 1)} = 0.75 \times 0.216 \times \frac{(2518/2500)^3 + 1}{(2518/2500)^3 - 1} = 15.1 \text{ kg/mm}^2$$

위 식에서 Y 는 경판의 바깥 반지름과 안 반지름의 비율이고 이 계산값은 경판 중앙부의 응력값과는 유사하지만 변곡부에 집중된 최대응력과는 매우 큰 차이를 보인다. 이의 원인으로서는 위의 식에 구조적 모양 및 하중의 불연속성은 고려되지 않았기 때문으로 사료된다.

4. 결론

- (1) 탱크 화차에 대한 보다 적합한 구조강도 평가를 위하여 아스팔트 수송용 비압력 탱크 화차와 프로필렌 수송용 압력 탱크 화차에 대하여 JIS E 7102에서 제시하는 탱크화차의 강도설계를 위한 실차 시험방법을 유한요소법을 이용하여 모사하였다.
- (2) 해석결과 각 차량에서 발생된 최대 응력의 크기는 각각 아스팔트 탱크 화차에서 20.88 kg/mm^2 , 프로필렌 탱크 화차에서 23.09 kg/mm^2 로써 1.5의 안전율을 고려하였을 때 JIS 규격에서 명시한 기준을 초과하거나 근접하였다. 하지만 이는 JIS 규격에 기술된 강도시험의 목적이 탱크 화차 설계단계에서의 응력강도 계산을 위함이기 때문에 5% 안팎의 오차를 가지는 본 해석 결과는 모델링 및 실제 시험에 대한 모사과정에서의 오차들을 감안할 때 실제 시험의 결과와 비교적 실제에 근접했음을 추측할 수 있다.
- (3) KS B 6728에서 제시하는 압력용기의 동판부와 경판부에 대한 응력계산을 수행하였으나 이는 탱크의 구조적 불연속의 효과는 고려하지 않은 것으로서 그 결과값에는 많은 차이가 있었다. 때문에 차후의 연구과정에서 압력용기 모양의 불연속부에 대한 정확한 응력계산이 요구된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 ‘위험물 수송 화물차량 및 수송용기의 안전기준 개발’ 사업의 일부로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. JIS E 7102 “탱크차용 탱크의 설계방법”, 1989
2. KS B 6728 “압력 용기의 응력 해석 및 피로 해석”, 1995
3. 임충환, 구병춘, “FEM을 이용한 유조화차의 구조강도 해석”, 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, Vol. 6, No. 1, pp. 597-598, 2006
4. 김선용 외, “유한요소법에 의한 부식을 고려한 전동차 차체의 강도평가” 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 350-355, 2005