

아스팔트 수송용 철도차량 탱크의 구조강도 평가

Structural Strength Evaluation for Tank of Tank Car used for Carrying Asphalt

임충환* 구병춘**
C. H. Lim B. C. Goo

ABSTRACT

We studied on the characteristics of many kinds of tank cars carrying hazard materials and performed structural strength evaluation for tank of asphalt tank car using finite element analysis. We analyzed the tank strength according to JIS E 7102(Design Method for Tanks of Tank Cars). It was found that the maximum stress obtained at the area supported by the saddle is much lower than the yield stress and the criteria of JIS E 7102.

Key Words: Tank, Tank car, Structural strength, FEM(Finite Element Method)

1. 서론

현재 철도를 통하여 유류, 화공약품 및 액화연료 등의 다양한 위험물 수송이 행해지고 있으며 이에 사용되는 화차로는 일반 유조차(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 연구에서는 국내에서 운행중인 위험물 수송용 탱크차의 종류와 구조적 특성을 조사하고 그 중 아스팔트 탱크화차의 비압력식 탱크 구조물에 대하여 유한요소법을 이용한 구조적 강도평가를 실시하였다. 특히 탱크 용기의 특성을 고려하여 보다 정확한 결과의 도출이 가능한 유한요소 해석방법을 제시하기 위해 JIS E 7102에 기술되어있는 탱크화차의 강도설계를 위한 실차 시험방법 절차를 유한요소법으로 구현하여 해석하였고 그 결과를 고찰하였다.

* 한국철도기술연구원/UST, 정회원

E-mail : chlim@krri.re.kr

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

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

2. 위험물 수송 철도차량 조사

2.1 유류 탱크 화차(Oil Tank Car)

유류 탱크 화차는 경유, 등유(석유), 항공유, 휘발유 등을 수송하는 차량으로 사용되고 있다. 일반적으로 오일탱크화차는 같은 종류의 원유를 수송하는 목적으로 사용된다.

차량의 구조는 오일 탱크 화차에 상부 돔(Dome)에는 하화밸브(Discharge Valve), 벤트밸브(Vent Valve), 돔커버(Dome Cover) 및 안전 발판(Safety Step) 등으로 이루어져 있다. 한편 하부에는 측면으로 하화하기 위한 토출변(Outlet Valve) 및 캡(Cap)이 설치되어 있으며, 토출변(Outlet Valve)은 기존에는 핸들(Handle)을 돌려 여는 밸브로 되어 있었으나, 최근에는 컷아웃 밸브(Cut Out Valve)로 교체되어 있다.

2.2 아스팔트 탱크 화차(Asphalt Tank Car)

아스팔트 탱크화차는 아스팔트 원유 전용 수송용 화차로서 (주)S-oil 온산공장에서 약 150~180℃의 아스팔트를 적차>Loading) 하여 의왕기지로 수송하고 있다. 약 150~180℃의 뜨거운 아스팔트가 운송 중(소요시간 24~30시간)에 온도가 떨어지는 것을 막기 위하여 탱크 외측은 보온재로 보호되어 있다.

아스팔트 탱크화차는 탱크화차의 상부 돔(Dome)에는 하화밸브(Discharge Valve), 벤트밸브(Vent Valve), 돔커버(Dome Cover) 및 안전 발판(Safety Step)이 설치되어 있어 유류 탱크 화차와 유사한 구조를 갖고 있으나 탱크가 보온재로 덮여있고 내부에 아스팔트 상/하화를 돕기 위한 증기관이 설치되어 있다는 차이가 있다.

2.3 황산 탱크 화차(Sulfuric Acid Tank Car)

진한 황산 수송 탱크화차에는 황산을 수송하기 위한 탱크가 설치되어 있다. 탱크 몸체의 용적은 약 28,000m³으로서 비중 1.83의 진한 황산을 약 50톤 정도 적재가 가능한 구조로 되어 있다.

탱크 몸체의 재질은 기존차량에는 일반용구조강재(SS41)를 사용하였으나, 최근에는 스테인리스 강(STS 304)를 사용하고 있다. 그러나 돔 부위는 일반구조용 강재(SS41)를 그대로 사용함으로써 인해 대부분 부식이 되어 있었다.

진한 황산은 위험물로서 누수 시에는 인근에 유해한 영향을 미치게 됨으로 이를 방지하기 위하여 진한 황산의 상하차는 모두 탱크 몸체 위에 설치된 돔에서 하게 되어 있다. 돔의 설비로는 진한 황산의 상차를 위한 주입구(Inlet Port)와 탱크 내부를 점검하기 위한 맨홀(Man Hole)이 있다. 또한 하화를 위하여 약 2kg/cm² 정도 가압된 공기를 탱크 내에 투입하기 위한 압력공기 투입구(Pressured Air Inlet Port)와 황산 토출구(Outlet Port)가 설치되어 있고, 탱크내의 압력 상승을 제어하기 위해 3kg/cm²로 설정되어 있는 안전변(Safety Valve)이 설치되어 있다.

탱크 몸체는 유지보수시 쉽게 분리하기 위하여 탱크 몸체 하부에 지지용 브라켓트를 설치하여 언더프레임에 설치된 앵카와 볼팅으로 지지한다. 한편 대차 중심부에는 탱크 몸체를 받치는 새들(안장)을 언더프레임에 설치하여 탱크를 안착시켜 칠밴드로 몸체와 언더프레임을 타이트하게 묶는다. 이 때 앵카볼트 및 새들 밴드의 볼트는 적정한 볼트 토크(Torque)를 설정하여 조임력에 대한 안전에 대비한다. 그 외 제동장치, 연결장치, 대차 및 언더프레임은 일반 철도차량과 동일하다.

2.4 프로필렌 탱크 화차(Propylene Tank Car)

프로필렌 수송 탱크차량은 고압용기 탱크로서 21.6kg/cm²의 압력에 견디도록 설계 및 제작되었으며, 차량의 자중은 27.8톤이고, 비중 0.44kg/m³의 프로필렌 25톤이 적재 가능한 탱크용적 57m³ 또는 20.7톤이 적재 가능한 47m³으로서 설계되어 적차율 80~90%로 수송하고 있다.

프로필렌 탱크화차의 동체는 일반구조용강재(SS41)로 제작되었으며, 탱크 상부에는 돔(Dome)과 돔커버(Dome Cover)가 설치되어 있다. 돔에는 21.6kg/cm²의 압력을 가지는 프로필렌 상·하역을 위한 설비와 탱크내부에 일정한 압력 유지를 위한 안전변이 28.8kg/cm²에 맞춰져 있어 내부압력 상으로 폭발할

위험은 아주 적다. 돔에는 상차배관 및 차단밸브 2셋, 가스배출 배관 및 차단밸브, 상차배관 내부 유압 차단밸브 및 압력계, 안전변, 용량 측정구, 내부온도계가 설치되어 있으며 탱크는 언더프레임 양단부와 중앙에 유지보수 시 분해가 가능한 구조로 제작되어 있고, 그 외 프로필렌 탱크 돔에는 상/하차 및 유지보수를 위한 안전발판과 함께 안전 사다리가 설치되어 있다.

3. 구조해석

3.1 해석 대상(Asphalt tank car)

본 구조해석의 대상인 아스팔트 탱크화차는 크게 전, 후의 새들과 중앙의 센타앵커에 의해 언더프레임에 고정되어 지지되고 있는 탱크부와 하부 프레임 및 대차로 구분할 수 있다. 여기서 보온재로 덮여 있는 탱크는 센타앵커 부에서는 용접 및 볼트 체결에 의하여 완전 고정되어 있으나 새들 부에서는 단순히 밴드의 인장력에 의하여 고정되어 있음을 확인할 수 있다. 다시 말해 탱크는 진행방향의 변위에 대하여는 새들과 완전 고정되어 있지 않는 상태이다.

또한 아스팔트 탱크화차용 탱크는 증기 흡기변을 통해 공급된 고온의 증기가 증기관을 통해 탱크 내부의 아스팔트를 가열하고 증기 배기변으로 배출됨으로써 아스팔트의 하화를 돕는 구조를 갖고 있으며 이러한 과정을 통해 가열된 내부의 공기는 에어벤트에 의해 바깥으로 배출되는 구조의, 일반적으로 내/외부의 공기가 순환 가능한 비 압력식 탱크구조를 갖고 있음에 주목해야한다.

3.2 모델링

3.2.1 차량 제원

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

3.2.2 해석모델 구성

비압력식 아스팔트 탱크 화차에 대하여 구조해석이 가장 필요한 부재로서 탱크를 선정하였고 또한 JIS E 7102의 시험 기준 또한 탱크화차용 탱크를 대상으로 서술한 것이기 때문에 구조해석 모델링 범위를 대차 및 기타 프레임 하부 부품들을 제외한 탱크와 새들 및 센타앵커의 결합체로 결정하고 대차를 고려하여 1/2만을 모델링 하였다. 이때 새들, 센타앵커 및 탱크의 모델링에 있어서 다음의 구조적 특징들을 고려하였다.

먼저 대부분의 부재는 강판 및 압연강재를 이용한 용접 또는 볼트 결합 구조로 이루어져 있으며 따라서 이들 각기 구성 부재의 형상 및 물성치를 충실히 반영하여 해석결과의 정확성이 확보되도록 고려하였다. 또한 탱크의 모델링에 있어서는 탱크가 각 차체 볼스터 취부 위치 상부에 결합되어 있는 4개의 새들(Saddle) 및 센터 실 중앙부분의 앵커 플레이트(Anchor plate) 등의 총 다섯 부분에 의해서 언더프레임과 결합되어 있고 특히 각 부재에서 탱크와의 결합 특성이 서로 상이하므로 이를 충실히 반영하였다. 다시 말해 새들에서는 밴드를 이용한 단순 인장 결합을, 센타앵커에서는 용접 및 볼트 결합을 모사하였다. 가능한 한 아스팔트 탱크화차 대부분의 부재를 실제에 가깝게 모델링 하였으나 탱크 상부의 돔, 맨홀, 사다리, 보온재, 증기 흡/배기변, 에어벤트 및 각종 하화 설비 등과 같이 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상되는 불필요한 부재에 대한 모델링은 생략하여서 전체적인 형상과 해석과정을 단순화 하였다. 기준 좌표로 탱크화차의 전후 진행방향을 x로, 측방향 및 높이방향은 각각 y 및 z로 결정하였다.

아스팔트 탱크 화차의 모델링에는 28,881개의 절점과 28,574개의 2D shell 요소를 사용하였다. 이에 사용된 차량의 모델링 형상을 Figure 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of Asphalt Tank Car

구분	차체길이 (엔드실 사이거리)	대차 중심간 거리	차체폭	최대 사용압력	최대 적재하중	자중	용적
아스팔트 탱크화차	11,090 mm	7,800 mm	2,880 mm	*	48 ton	24.4 ton	50 m ³

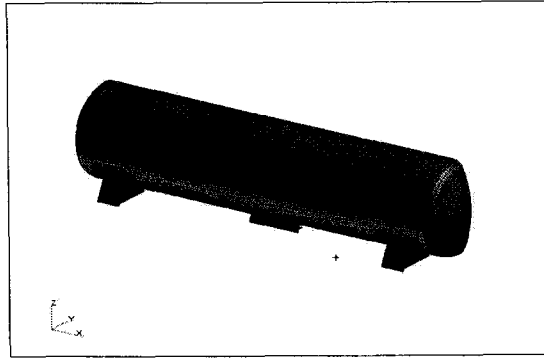


Figure 1 Mesh model of Asphalt Tank Car

3.3 재료별 기계적 특성

아스팔트 화차의 구성에 있어서 주로 탱크 및 센터 실에는 SWS490A가 적용되며 센터 실을 제외한 대부분의 언더프레임 부재에는 SS400이 사용된다. 이 중 모델링의 범위에 포함된 센터앵커 및 새들에는 SS400이 사용되었으며 탱크에는 SWS490A가 사용되었다. 이들의 적용 부재 및 해당 재질에 대한 인장강도, 항복강도 등의 기계적 물성치를 Table 2에 나타내었고 이 수치는 구조해석 결과에 따라 구조적 건전성을 평가하는 기준으로 사용된다.

3.4 해석조건

3.4.1 해석 기준

탱크 화차에 대한 기존의 구조해석 평가에 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 구조해석의 효용성에 대한 한계를 갖고 있었다.

본 연구에서는 JIS E 7102(Design Methods for Tanks of Tank Cars)에서 제시하는 탱크 강도설계를 위한 시험방법 조건을 이용하여 유한요소 해석을 수행함으로써 탱크의 실제 구조적 건전성 평가 시험에 대한 모사를 꾀하였다. JIS E 7102에 제시되어있는 탱크 강도 시험방법을 Table 3에 나타내고 있다.

Table 2 Properties of components materials

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

Table 3 Test conditions of JIS E 7102

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

3.4.2 하중 조건

아스팔트 탱크 화차의 구조해석을 위한 내압 및 하중조건은 다음과 같다.

내압 및 하중조건

내압 : 0

수직하중 :

(적재하중 + tank, saddle, center-anchor 자중) × 1.3

= (48ton + 9.42ton) × 1.3 = 74.65ton

본 연구에서는 탱크에 부여되는 유체하중에 대한 적용 방법을 새롭게 모색하였다. 기존의 해석 과정에서 적재하중은 탱크에 대하여 단순 등분포하중으로 단순화 되어 부여되었지만 본 연구에서는 액체 상태인 적재하중 조건에 대한 보다 정확한 모사를 위해 다음과 같은 방법을 적용하였다.

먼저 유체하중을 받는 탱크 모델 1/4의 단면형상을 6개의 섹션으로 나눈 후 화물, 즉 아스팔트의 수면이 탱크의 중간높이에 위치한다고 가정하고 각 부분별로 탱크 바닥면에서 수면까지의 높이 h1 ~ h6을 구하였다. 구해진 h1 ~ h6을 이용하여 부여된 전체 화물하중 31,200kg(48,000/2 × 1.3)에 대하여 각 섹션별 유체 분포압력($P_n = \rho g h_n$)을 비례적으로 계산함으로써 적재질량에 의해 탱크에 수직으로 가해지는 분포압력을 구할 수 있었고 이를 하중조건에 적용하였다.

3.4.3 구속 조건

Figure 2에서 보이는 바와 같이 탱크의 XZ 평면 대칭면에 대하여 대칭조건 (UY=0, ROTX=0, ROTZ=0)을 적용하고 탱크가 지지되는 전위 및 후위 새들 및 센타앵커 부분에 상하 및 측방향의 변위를 구속(UY=UZ=0)하였다. 또한 센타앵커 부분에는 전후방향 변위도 구속(UX=0)하였다. 새들에서 전후방향을 구속하지 않은 것은 실제로 새들 부분에서는 탱크가 밴드의 인장력에 의하여 체결되어있고 전후방향으로는 밴드와의 마찰력 이외의 구속력은 존재하지 않음을 구현한 것이다.

3.5 해석 결과

3.5.1 Von-Mises 응력분포

아스팔트 탱크 화차에 대하여 전체 하중조건 즉, 수직하중과 차단 가속도 3g(29.4 m/s²)를 부여한 조건에서 유한요소 해석결과 얻어진 결과를 Figure 3~5에서 보이고 있다. 먼저 탱크, 새들 및 센타앵커를 포함한 전체 모델에서의 Von-Mises 응력분포와 탱크만을 나타낸 모델에서의 응력분포를 각각 Figure 4와 Figure 6에서 나타내고 있다.

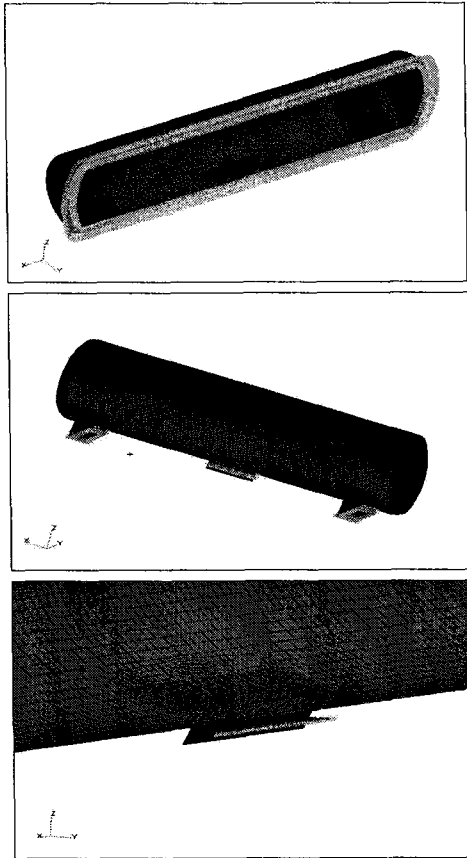


Figure 3 Boundary conditions for analysis

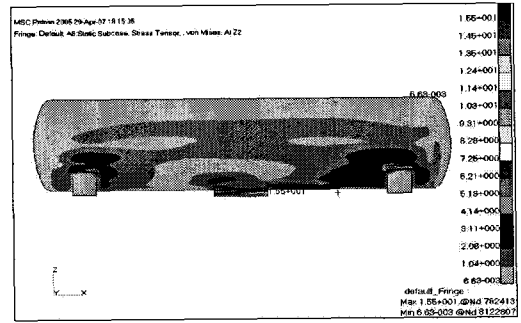


Figure 4 Von-Mises stress distribution in the entire model

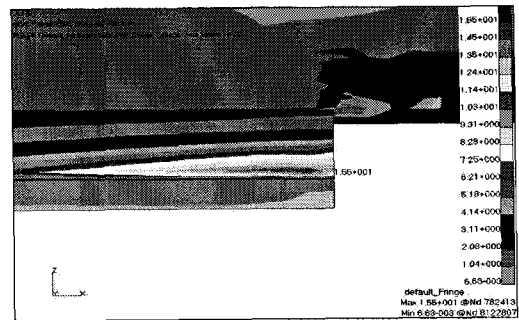


Figure 5 Concentrated maximum stress in the entire model

3.5.2 최대 집중응력

전체 모델에서는 차단에서 가해진 가속도에 의하여 Figure 5와 같이 센타앵커부분의 한쪽 끝단에 15.5 kg/mm^2 의 비교적 큰 집중응력이 발생하였다.

새들과 센타앵커를 제외한 탱크 모델에서는 차단 가속도에 의해 Figure 7에서 볼 수 있듯이 상대적으로 큰 하중이 작용되는 전위 새들의 지지부에서 집중응력이 발생하였으나 그 값은 7.81 kg/mm^2 로서 예상보다 크게 증가하지 않았다. 이 값은 JIS E 7102에서 명시한 기준인 재료 항복응력에 안전율 1.5를 고려한 값인 22 kg/mm^2 의 35.5%에 해당하므로 본 아스팔트 탱크에 대하여 기준에 부합하는 구조강도를 갖는다고 말할 수 있겠다.

아스팔트 탱크화차에 대한 유한요소 해석결과 및 판정을 Table 4에서 보이고 있다.

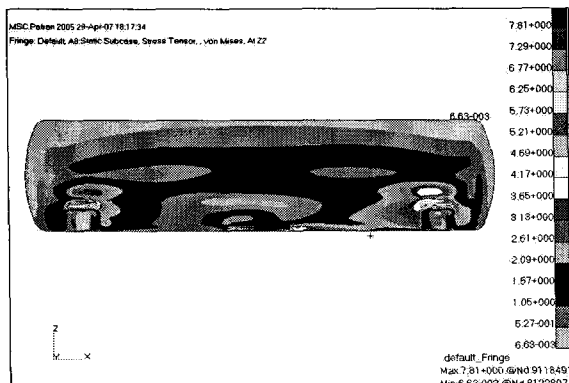


Figure 6 Von-Mises stress distribution in the tank model

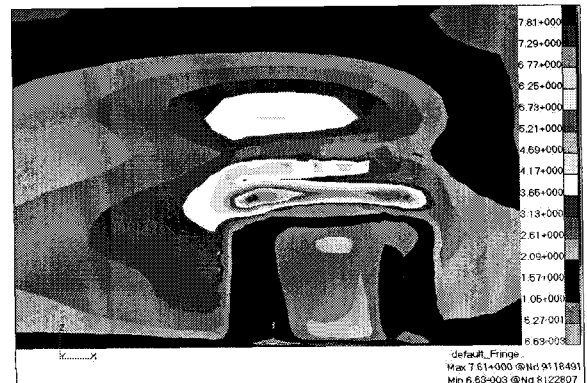


Figure 7 Concentrated maximum stress in the tank model

Table 4 Results of Structural Analysis for Asphalt Tank Car

	최대응력 (kg/mm ²)	최대응력 작용부위	부재의 재질 및 항복응력	안전율(1.5) 고려 판정(kg/mm ²)
전체 모델	15.5	Center anchor	SS400 $\sigma_{ys} = 25.0 \text{ kg/mm}^2$	해당사항 없음
탱크	7.81	Saddle에 의한 지지부	SWS490A $\sigma_{ys} = 33.0 \text{ kg/mm}^2$	35.5% (기준 이내)

4. 결론

- (1) 본 연구에서는 탱크 화차에 대한 보다 적합한 구조강도 평가를 위하여 아스팔트 수송용 비압력 탱크 화차에 대하여 JIS E 7102에서 제시하는 탱크화차의 강도설계를 위한 실차 시험방법을 유한요소법을 이용하여 모사하였다.
- (2) 해석결과 아스팔트 탱크화차의 탱크 모델에서 발생된 최대 응력의 크기는 7.81 kg/mm²로써 구성 재료인 SWS490A의 항복응력 33.0 kg/mm²에 1.5의 안전율을 고려하였을 때 JIS 규격에서 명시한 기준에 부합함으로써 본 아스팔트 탱크화차용 탱크는 적합한 구조적 안전성을 가지고 있다고 볼 수 있다.
- (3) 본 연구의 해석 대상인 아스팔트 탱크화차의 탱크는 비압력식 구조를 가지므로 JIS E 7102에서 시험 조건으로 제시한 사용 최고 내압을 적용하지 않았다. 차후의 연구 진행을 통하여 일반 유조화차 및 프로펠렌 탱크화차와 같은 압력식 탱크에 대한 구조강도 해석이 요구된다.
- (4) 위험물 수송용 탱크 화차에 대한 하나의 유한요소 해석 방법을 제시하고 그에 따라 구조강도 해석을 수행함으로써 위험물 수송용 탱크 화차의 안전기준을 개발함에 있어서 필요시 되는 기본 근거자료를 제공하였다.

후 기

본 연구는 건설교통부의 미래철도기술개발사업 중 ‘위험물 수송 화물차량 및 수송용기의 안전기준 개발’ 사업의 일부로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) JIS E 7102 “탱크차용 탱크의 설계방법” (1989)
- (2) 임충환, 구병춘, “FEM을 이용한 유조화차의 구조강도 해석”, 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, Vol. 6, No. 1, pp. 597-598 (2006)
- (3) 임충환, 구병춘, “위험물 수송용 탱크화차에 대한 유한요소 해석”, 한국철도학회 춘계학술대회논문집, pp. 281 (2007)
- (4) 김선용 외, “유한요소법에 의한 부식을 고려한 전동차 차체의 강도평가” 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp. 350-355 (2005)