

## 평판화차에 사용되는 3축 대차의 구조 안전성 평가

강승구<sup>a</sup>, 신광복<sup>b\*</sup>, 임재문<sup>a</sup>, 박정준<sup>c</sup>, 전승기<sup>d</sup>

## Evaluation of Structural Integrity of Three-axle Bogie Frame used in Railway Freight Cars

Seung-Gu Kang<sup>a</sup>, Kwang-Bok Shin<sup>b\*</sup>, Jae-Moon Im<sup>a</sup>, Jung-Joon Park<sup>c</sup>, Seung-Gie Jeon<sup>d</sup><sup>a</sup> Graduate school of Mechanical Engineering, Hanbat National University,  
125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Korea<sup>b</sup> Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University,  
125, Dongseo-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34158, Korea<sup>c</sup> Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do, 16105, Korea<sup>d</sup> Hwashin ELT,  
226, Songdeok-ro 212beon-gil, Daesong-myeon, Nam-gu, Pohang, Gyeongbuk-do, 37875, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	21	March	2017
Revised	27	July	2017
Accepted	3	August	2017

## Keywords:

Three-axle bogie frame  
Structure integrity evaluation  
Non-destructive evaluation  
Bogie for railway freight wagon

## ABSTRACT

This study evaluated the design and structural integrity of a three-axle bogie frame in a railway freight car through a numerical analysis and an experimental evaluation. A three-axle bogie frame, which supports the weight of the car body and load, is required to transport heavier cargo because two-axle vehicles have structural limitations. Therefore, this study performed a structural analysis and static load tests to evaluate the design and structural integrity of a three-axle bogie frame. The results obtained from the numerical analysis were compared to those of the experiments. For the bogie frame used in the experiments, a failure evaluation was performed using non-destructive methods. The numerical analysis and experimental evaluation were satisfactory for the structural integrity evaluation.

## 1. 서론

철도차량은 거점간의 승객이나 화물을 수송하는 운송수단이며, 높은 안전성과 정시성을 가져 많이 이용되고 있다<sup>[1]</sup>. 특히 안전성과 정시성을 증시하는 화물이나 중장비를 수송할 때 철도차량을 사용하게 된다. 이때, 사용되는 철도차량을 화차라고 하며, 화차의 사용목적에 따라 유조화차, 컨테이너 화차 등으로 나뉜다<sup>[2]</sup>.

철도차량의 대차프레임은 철도차량 차체의 자중과 적재중량을 지지하는 핵심 구조물로 일반 화차보다 높은 중량의 화물을 운송하기

위해서는 기존의 2축 대차로는 구조적 한계가 발생하게 된다. 이를 극복하기 위한 방법으로 하중 분담에 유리한 3축 대차의 필요성이 대두되었으며, 3축 대차는 일반적인 2축대차보다 구조가 복잡하고 곡선 선화능력이 떨어지는 단점이 있지만 높은 하중을 궤도에 분포시켜 2축 대차보다 높은 하중을 운송할 수 있는 장점을 가지고 있다<sup>[3]</sup>. 대차 프레임이 파손되면 철도차량의 탈선과 같은 대형사고로 이어지게 된다.

따라서, 철도차량 개발 시 대차 프레임의 구조안전성 확보에 대한 검증이 필요하고, 철도안전법 등을 통해 새롭게 개발되는 철도

\* Corresponding author. Tel.: +82-42-821-1156

Fax: +82-42-821-1587

E-mail address: shin955@hanbat.ac.kr (Kwang-Bok Shin).

차량에 대해 구조안전성 검토를 수행하도록 하고 있다<sup>4)</sup>.

철도안전법에 따라 대차프레임은 철도차량차체의 자중 및 화물에 따른 정적하중에 대해 구조 안전성을 확보해야하며, 대차 프레임은 지면과 접촉하여 운행되기 때문에 진동 및 반복하중에 대한 피로강도가 충분히 보장되도록 하여야한다<sup>5)</sup>.

따라서, 본 논문에서는 평판 화차용 3축 대차 프레임의 수치 해석적방법과 시험적 방법을 통해 구조 안전성 평가를 수행하였다. 이때, 대차 프레임에 대한 구조 안전성 평가 기준에는 일반 철도차량 기술기준과 EN 13749<sup>6)</sup>에 따라 수행하였다. 수치 해석적 방법은 상용유한요소 해석 프로그램인 ANSYS V13.0을 이용하여 구조해석을 수행하였고, Goodman 선도를 이용하여 UIC 615-4<sup>7)</sup> 기준에 의한 조합 하중조건에 대해 피로 강도 평가를 수행하였다. 시험적 방법은 수치 해석적 방법의 하중조건과 동일하게 부과하여 시험을 수행하였으며, 시험 후 비파괴 검사를 통해 대차 프레임의 파손 여부를 판단하여 구조 안전성을 평가하였다.

## 2. 대차 프레임의 설계

대차는 축의 수에 따라 단축, 2축 및 3축 대차로 나뉘며, 보통 철도차량에는 2축 대차가 주로 사용된다. 하지만 본 논문에서 다룬 대차는 높은 하중을 운송하기 위한 평판화차에 사용할 대차로 높은 하중에 유리한 3축 대차를 설계하게 되었다. 3축 대차는 일반적으로 사용되는 2축 대차의 축 사이에 1개의 축이 추가적으로 삽입되는 구조로 하중 분산에 좀 더 효과적인 구조이다.

본 연구의 대차에 적용된 소재는 저온 환경에서도 높은 강성 및 강도가 확보되는 SC480이 사용되었다. 대차는 화차 한량당 총 하중이 70 Ton을 수송할 수 있도록 설계되었고, 대차의 폭과 길이는 각각 1,956 mm, 4,264 mm로 설계 되었다. Fig. 1은 대차 프레임

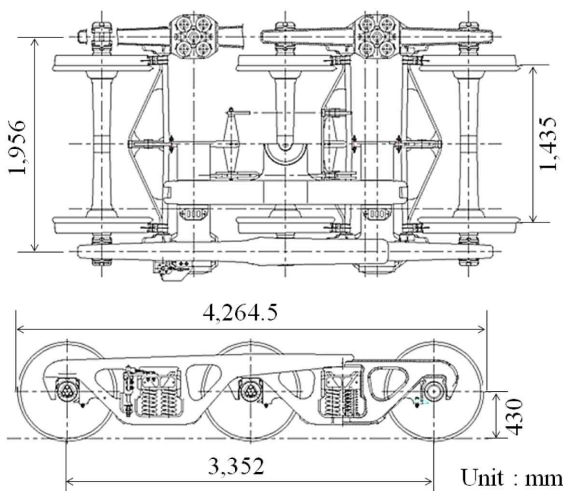


Fig. 1 Schematics diagram of the three-axle bogie frame

의 개략도를 나타낸다.

## 3. 평가기준 및 하중조건

새롭게 개발되는 철도차량용 대차는 국내의 경우 국토교통부에서 지정하는 시험규정에 따라 평가를 수행하여야하며, 평가 결과에서 만족함을 보여야한다. 또한, 수치해석적 기법을 통한 해석 결과자료를 제출하여야 한다. 일반적인 대차 프레임에 대한 구조 안전성평가 기준에는 KS R9210, JIS E4207/4208, UIC 515/615-4 등이 있다.

설계된 3축 대차 프레임의 설계(안)에 대한 구조 안전성 평가를 위해 수치 해석적 방법과 시험적 방법을 활용하였다. 이때, 대차 프레임에 대한 구조 안전성 평가는 일반 철도차량 기술기준과 EN 13749에 따라 수행하였다. 구조안전성 평가는 극한 하중조건인 수직하중, 전후하중, 좌우하중, 비틀림 하중과 정상 하중에서의 전후하중, 좌우하중, 비틀림 하중에 대해 수행하였고 피로 강도 평가를 위해 UIC 615-4 기준에 의한 조합하중조건을 도출하여 구조해석을 수행하여, 구조해석 결과를 Goodman 선도를 이용하여 피로강도를 평가하였다.

평가기준은 극한하중일 때 재료의 소성변형이 일어나지 않아야 하며, 정상하중일 때에 재료의 피로한도를 넘지 않아야한다. Table 1은 EN 13749 규정에 따라 도출된 하중조건을 나타낸다.

## 4. 수치해석적 기법을 사용한 대차 프레임의 구조 안전성 평가

### 4.1 유한요소 모델링 및 구속조건

구조 안전성 평가는 설계된 대차 프레임 형상과 동일한 형상을

Table 1 Load case under EN13749

Load case	Exceptional load case	Normal service load case
Vertical load	$F_{z1max} = 269.64$ kN $F_{zpmax} = 404.46$ kN	$F_{z1} = 179.760$ kN $F_{zp} = 269.640$ kN
Transverse load	$F_{xmax} = 52.16$ kN	$F_x = 26.07$ kN
Longitudinal load	$F_{ymax} = 258.42$ kN	$F_y = 138.19$ kN
Twist load	$F_{z1max} = 269.64$ kN $F_{zpmax} = 404.46$ kN $F_{ymax} = 258.42$ kN The loads resulting from a track twist of 1% (15.86 kN)	The loads resulting from a track twist of 0.5% (7.93 kN)
	$F_{z1max} = 269.64$ kN $F_{zpmax} = 404.46$ kN	

갖는 유한요소 모델을 이용하였으며, 각각의 프레임은 4절점 쉘 요소(4-node structural shell)를 사용하여 모사하였다. 이때, 해석에 사용된 유한요소 수는 71,408개, 절점수 71,284개 이다. Table 2 는 구조해석에 사용된 물성정보를 나타내고, Fig. 2는 3축 대차 프레임의 유한요소 모델링을 나타낸다.

본 연구의 대차 프레임은 3축 대차로 보통 사용되는 2축의 대차보다 축이 하나 더 많은 특징을 갖고 있다. 따라서, 차륜의 경우 총 6개로 기존 대차 프레임에 사용되는 구속조건과 다르게 갖도록 하여야 한다.

구속조건은 대차 양끝 축은 일반 2축 대차의 구속조건과 동일하게 단순지지로 부여하였으며, 대차 중간의 차륜은 높이 방향과 폭 방향의 병진운동을 구속하므로 롤러지지 형태의 구속조건을 부여하여 3축 대차의 구속조건을 부여하였다. Fig. 3은 수직하중에서의 3축 대차 프레임의 구속조건 및 하중조건을 나타낸다.

### 4.2 구조 안전성 평가 결과

보통 2축 대차 프레임의 구조해석결과는 하중부과부와 차륜부분

Table 2 Mechanical property of SC480

Density (kg/m <sup>3</sup> )	Modulus of elasticity (GPa)	Poisson's ratio	Yield strength (MPa)
7,850	200	0.3	245

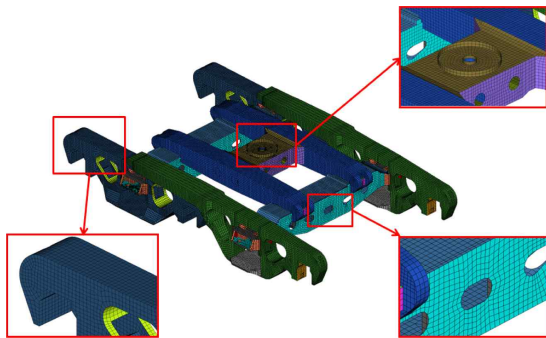


Fig. 2 Finite elements model of three-axle bogie frame

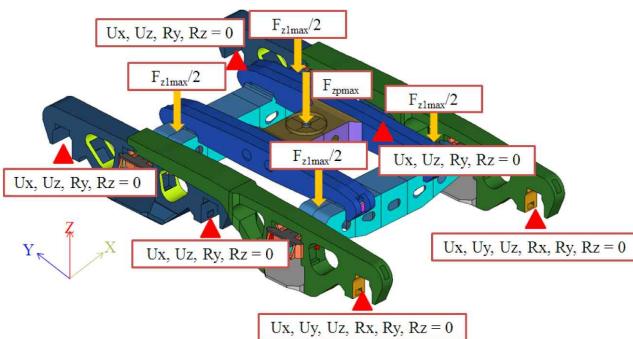


Fig. 3 Load and boundary condition for vertical load

의 구속조건 부여부에서 높은 응력을 보인다. 하지만 본 논문에서의 3축 대차 프레임의 경우 구조해석결과 비교적 차륜부분에서 낮은 응력분포를 보이는 특징을 보였다. 이는 3축 대차가 2축 대차에 비해 차륜부분의 하중분포를 효과적으로 분산시켜 2축 대차보다 높은 하중을 운송할 수 있을 것으로 판단한다.

3축 대차의 구조해석 결과 극한하중 조건의 수직 하중에서 최대 Von-Mises 응력이 180 MPa 나타났다. 이는 SC480의 항복강도인 245 MPa보다 낮은 응력으로 안전함을 확인하였다. 따라서, 본 3축 대차의 평가기준인 극한하중일 때 재료의 소성변형이 발생하지 않아야함을 만족하였다. Fig. 4는 전후 하중에 대한 Von-Mises 응력 결과를 보여주며, Table 3은 예외하중조건의 해석결과를 나타낸다.

### 4.3 피로 강도 평가

구조 안전성 평가를 통해 도출한 설계(안)의 피로강도 평가를 수행하기 위해 UIC 615-4 규정에 의해 주운용하중조건을 적용하여 구조해석을 수행하였고, 구조해석 결과를 조합하여 피로강도를 평가하였다. 이때, 주운용하중조건에 대한 피로강도 평가는 Goodman 선도상에 표현하여 평가하였다.

Goodman 선도의 평균응력과 응력진폭은 각 하중조건들에 대한 해석결과를 식 (1)과 식 (2)를 통해 도출하였다. 식 (1)과 (2)는 각각 평균응력과 응력진폭을 구하는 식을 나타낸다.

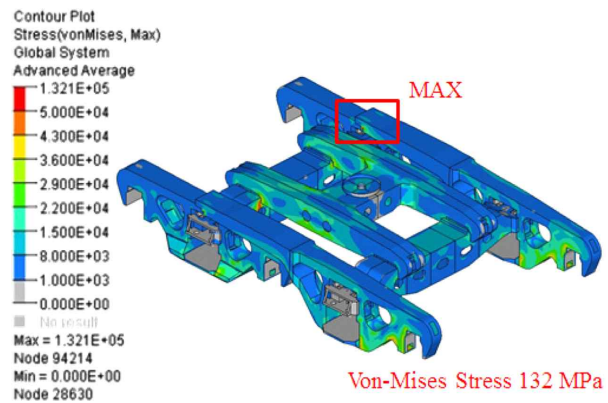


Fig. 4 Contour of Von-Mises stress for three-axle bogie frame under longitudinal load

Table 3 Analysis results of the exceptional load

Load case	Von-Mises stress (MPa)
Vertical load	180
Transverse load	160
Longitudinal load	132
Twist load	173
	175

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1)$$

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$

Fig. 5는 Goodman 선도에 평균응력과 응력진폭을 나타낸 것이다. 이때, 그래프상의 실선은 SC480의 피로한도를 나타내고, 그래프 내의 점은 3축 대차의 평균응력과 응력진폭을 각각 도출하여 나타낸 것이다. Fig. 5 그래프 실선 안에 평균응력과 응력진폭의 분포는 피로강도 평가 결과 각각의 하중은 피로한도 기준인 107 사이클 이상의 수명을 갖는 것으로 확인할 수 있다. 따라서, 평가기준인 정상하중일 때의 재료의 피로한도를 넘지 않아야함을 만족한 것을 확인할 수 있었다.

### 5. 시험적 방법을 사용한 대차 프레임의 구조 안전성 평가

#### 5.1 대차 프레임의 정하중 시험치구

앞절의 구조안전성 평가를 통해 안전함을 확인한 대차 프레임에 대해 시험평가를 수행하였다. 시험은 단축 스트레인 게이지 44개와 3축 스트레인 게이지 4개를 부착하였고, 13개의 로드셀을 통해 하중 및 반력을 측정하였다. 스트레인 게이지의 위치의 경우 구조 해석결과를 통해 높은 응력이 발생하는 부분과 구조적 취약부에 부착하였다. Fig. 6은 3축 대차 프레임의 시험 모습을 나타낸다.

#### 5.2 대차 프레임의 정하중 시험평가

정하중 시험평가의 시험 하중은 구조해석에 부과한 하중과 동일한 Table 1과 같이 부과하였으며, 하중 부과는 0%, 50%, 75%, 100%, 75%, 50%, 0%의 단계로 부과하였다.

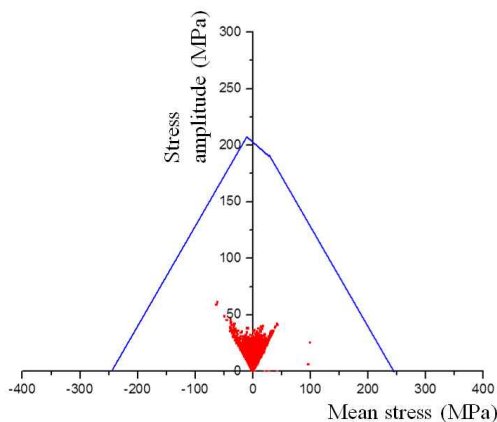


Fig. 5 Goodman diagram with endurance limit of  $10^7$  cycle under main in service load

시험결과 좌우하중에서 최대 168.1 MPa로 가장 높게 나타났으며, 이는 항복응력 이내의 하중으로 구조 안전성 기준에 만족함을 확인하였다. 수치해석적인 결과와 시험을 통한결과를 비교한 결과 같은 하중조건에서 동일한 부분에 최대응력을 보였다. 그리고 수직하중을 제외한 다른 하중조건에서는 응력이 비교적 잘 일치함을 보였으나 수직하중에서는 최대 오차가 26.7%가 발생하였다. 이는 대차 프레임간의 연결부로 실제 구조물에서는 면이 접촉하나 수치해석에서는 면간의 접촉 모사가 제한되어 응력집중이 발생한 것으로 보인다. 또한 수치해석 상에서의 응력집중으로 인한 최대 응력이 발생된 부분 이외의 부분에서는 시험과 비교적 잘 일치하는 결과를 보였다. Table 4는 예외하중 조건에서의 시험 결과를 나타낸다.

#### 5.3 비파괴 검사

본 대차 프레임의 정하중 시험 후 균열유무와 제작과정에서 생길 수 있는 불량을 검출할 목적으로 비파괴 검사인 자분탐상검사(MT)를 실시하였다. 자분탐상검사는 전자석 장비를 사용하여 검

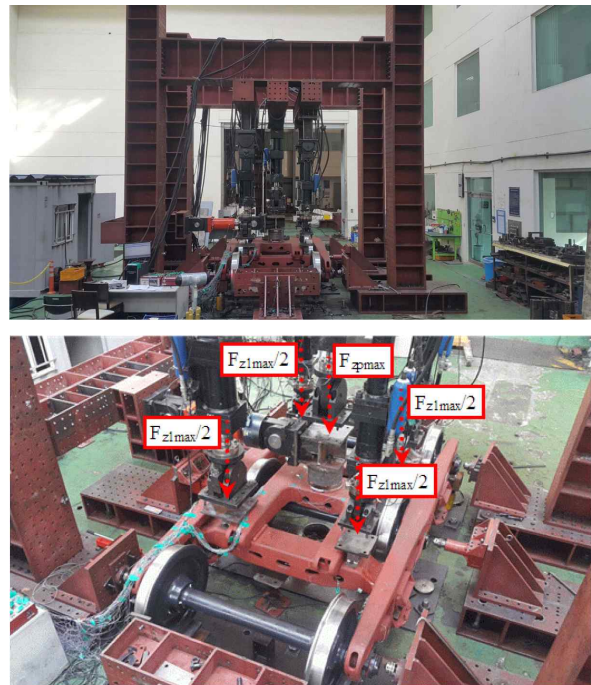


Fig. 6 Load test shape for vertical load

Table 4 Test results of the exceptional load

Load case	Stress (MPa)
Vertical load	142.1
Transverse load	168.1
Longitudinal load	132.7
Twist load	138.1
	152.2



Fig. 7 Non-destructive evaluation after the static load test

출하는 방법으로 구조물에 결함이 있으면 자력선의 교란이 생겨 결함부에 자분이 일정 형상으로 형성되는 것을 이용하여 육안으로 결함을 확인하는 방법이다. 이 비파괴 검사 방법은 탄소강의 구조물 표면에 가까운 곳에 존재하는 균열을 검출할 때 사용된다<sup>[8]</sup>. 비파괴 검사 결과 대차 프레임에 균열은 발생되지 않았다. 따라서, 본 대차 프레임의 구조안전성을 시험적 방법을 활용해 안전함을 확인하였다.

Fig. 7은 정하중 시험 후 비파괴 검사 모습을 나타낸다.

## 6. 결론

본 연구에서는 남북 및 접경지역 화물철도 운영을 위한 테스트 베드 구축 기술개발의 일환으로 평판화차의 주행장치에 대해 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

중량물 운송을 위한 평판화차에 사용되는 3축 대차를 개발하고 개발된 대차 프레임의 구조 안전성 평가를 위해 수치해석적 방법과 시험적 방법을 이용하였으며, 그 결과 수직하중에서 26.7%, 최저 오차가 전후하중에서 0.5%가 발생하였다. 이는 대차 프레임간의 연결부로 실제 구조물에서는 면이 접촉하나 수치해석에서는 면간의 접촉 모사가 제한되어 응력집중이 발생한 것으로 판단하였고, 수치해석 상에서의 응력집중으로 인한 최대 응력이 발생된 부분 이외의 부분에서는 시험과 비교적 잘 일치함을 보였다.

또한 피로강도 평가를 위해 UIC 615-4 규정에 따라 하중 조건을 산출하였고 산출된 하중조건에 따라 구조해석을 수행하였다. 구조 해석결과를 바탕으로 평균응력과 응력진폭을 구하여 Goodman 선도에 표기하여 피로강도를 평가하였고, 평가결과 평가기준에 만족함을 보였다. 또한 정하중 시험 후 균열유무와 제작과정에서 생길 수 있는 불량을 검출할 목적으로 비파괴검사인 자분탐상검사를 실시하였고 실시결과 균열이 발생되지 않았음을 확인하였다. 따라서, 개발된 3축 대차 프레임은 수치해석적 방법과 시험적 방법 모두 철도안전법에 만족하는 결과를 나타내었다.

## References

- [1] Ko, H. Y., Shin, K. B., Lee, K. S., Lee, E. G., 2010, An Evaluation of Structural Integrity and Fatigue Strength for the Bogie Frame of Monorail, JKSR, 13:5 469-475.
- [2] Kim, N. P., Moon, K. H., Kim, H. S., 2016, Concept Design of Three Axle Bogie for Railway Freight Wagon, KSME Spring Conference, 62-65.
- [3] Kim, Y. G., Park, C. K., Ryu, J. H., 2013, Comparison and Analysis of Vibration and Shock Test Methods for Rolling Stock Equipment, JKSR, 16:4 246-252.
- [4] Kwon, Y. J., Kim, K. T., Lee, S., 2010, The Necessity of Multi-Purpose Freight Car in Railway Transportation, JKSR, 1533-1541.
- [5] Kim, N. P., Shin, K. B., Jung, W. M., 2003, Structural Strength Evaluation of Bogie Frame for Korean Tilting Train eXpress(TTX) with the Service Speed of 180km/h, KSME Spring Conference, 75-81.
- [6] BSI Standards Publication, 2011, Railway Applications - Methods of Specifying Structural Requirements of Bogie Frames, EN13749 UK.
- [7] International Union of Railways, 2003, Motive Power Units - B bogies and Running Gear - Bogie Frame Structure Strength Tests, UIC615-4 French.
- [8] Jeong, S. H., Yoo, S. H., Joung, D. H., Lee, H. B., 2012, Development of Vision Inspection System for Detecting Surface Defects of Shaft, KSAE Autumn Conference, 2196-2200.