도로 주행 노면전차 대차프레임의 하중 시험 및 강도 평가

서승일^{*}, 김정국 한국철도기술연구원 차세대철도차량본부

Loading Tests and Strength Evaluation of Tram Bogie Frames Running along Roads

Sungil Seo, Jeongguk Kim Division of Advanced Railroad Vehicle

요 약 노면전차는 철도차량으로 정의되지만 경사와 곡선이 심한 도로에서 주행한다. 본 연구에서는 노면전차 주행장치 의 주요 구성품인 대차프레임에 대해, 도로에서 주행하는 경우의 운행 조건에 대해 검토하고, 철도에서의 운행 조건과 비교하였다. 대차프레임이 철도와 도로에서 모두 활용 가능하도록, 각 운행 조건에 따른 하중 조건을 선정한 결과, 수직 하중 및 좌우 하중은 철도의 하중 조건으로 결정되었고, 전후 하중과 비틀림 하중은 도로의 하중 조건으로 결정되었다. 시험 대상 노면전차의 대차프레임을 설계하여 제작한 후, 주요 부위에 스트레인게이지를 붙이고 각 하중 기준에 따라 시험 설비에서 하중 시험을 실시하였다. 응력 계측 결과 모든 응력이 허용 응력 이하가 되어 대차프레임이 도로와 철도 운행 조건에서 강도적으로 안전함을 확인하였다. 각 하중 기준에서 최고 응력이 발생하는 부위는 대차프레임의 측면 보 를 연결하는 트랜섬의 단차 부분이었는데, 이는 구조적 불연속 부분이고 차량 중량에 의한 수직 하중이 응력 발생에 상당 부분 기여하였기 때문으로 추정된다. 비틀림 하중에서 최고 응력이 발생하고 있어서 도로 선형 조건에 따른 비틀림 하중이 대차프레임 강도 평가 시에 중요한 변수임을 확인하였다.

Abstract A tram is defined as a railway vehicle running along roads with severe inclines and curves. This study compared the operating conditions on roads for the bogie frame, a major part of a tram bogie, with those on railways. After examining the loading cases under each condition so that they can be used on railways and roads, the vertical and lateral loads were determined as the loading cases for railways, and the longitudinal and torsional loads as those for roads. A prototype frame was designed and manufactured, on whose critical points gauges were attached. The load tests were conducted in the test facility following the load cases. The stress measurement results showed that all the stresses were below the allowable stress, confirming that it was structurally safe under road and railway operating conditions. The location where the highest stress occurred in each case was the step portion of the transom connecting side beams. Structural discontinuity and the vertical vehicle weight caused significant stresses. The highest stress occurring under the torsional load confirmed that the torsional load caused by the road geometry was an important factor in evaluating the strength of the bogie frame.

Keywords : Bogie Frame, Curves, Inclines, Load Test, Road, Strength Evaluation, Stress Measurement, Torsional Load, Tram

본 논문은 국토교통부 국가R&D 연구과제("산악용 친환경 운송시스템 기술 실용화")로 수행되었습니다. 본 연구는 ㈜우진산전 이영호 이사와 인피닉스 박영대 대표의 도움을 받아 수행되었으며, 하중 시험은 ㈜토탈이엔씨에서 수행되었습니다. *Corresponding Author : Sungil Seo(Korea Railroad Research Institute) email: siseo@krri.re.kr Received June 21, 2024 Revised July 31, 2024 Accepted August 2, 2024 Published August 31, 2024

1. 서론

지구 온난화와 기후 변화가 심각해짐에 따라, 교통 분 야의 탄소중립 요구가 거세지고 있다. 이에 따라 온실가 스 배출이 적은 친환경 대중교통수단의 수요가 늘어가고 있으며, 철도는 친환경 대중교통수단으로서 그 적용 범 위가 확대되고 있다. 특히, 도시 권역에서 지하철은 물론 이고 노면전차와 같은 경전철이 친환경 대중교통수단으 로서 주목을 받고 있다. 노면전차는 건설비가 저렴하고, 대량 수송이 가능하며, 승하차가 편리하다는 장점 때문 에 해외에서 Fig. 1과 같이 널리 운행되고 있고[1], 국내 에서도 여러 대·중도시에서 활용이 검토되었으며, 대전 을 비롯하여 위례, 판교, 동탄, 부산 등에서 건설이 진행 되고 있다.



Fig. 1. A tram on Stuttgart[1]

노면전차는 탄소 배출이 작은 전기 또는 수소를 동력 원으로 이용하면서, 무가선으로 도로를 운행해야 하므로 다양한 기술을 요구하고 있다. 특히, 노면전차는 철도차 량이지만 기존의 철도가 아니라 도로 위를 주행하게 되 므로 도로의 선형을 따라 주행할 수 있는 기술을 요구하 고 있다[2]. 도로 선형에서 주행 기술을 확보하기 위해서 먼저 주행장치에 대한 검토와 분석 및 대응 방안이 수반 되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 주행장치의 골격 을 이루는 대차프레임에 대해 도로 환경에서 적합한지 여부를 검토하고 안전성을 검증하고자 한다.

대차프레임은 철도차량의 안전과 직결된 핵심부품으 로서 규격과 기준에 따라 안전성이 검증되어야 한다. 대 차프레임의 안전성은 시제 대차프레임에 대해 하중 시험 을 실시함으로써 검증된다. 그런데, KS규격에 따른 대차 프레임의 하중 범위 및 기준은 기존의 철도를 주행하는 철도차량에 적용되는 것이므로[3], 경사와 곡선이 심한 도로를 주행해야 하는 노면전차와 같은 철도차량에 대해 서 일반화시켜 적용하기는 곤란하다. 따라서, 도로의 특 성을 검토하여 도로 주행 중에 발생할 수 있는 하중을 분 석하고, 이를 기준으로 하중시험을 실시하여 안전성을 검증하는 것이 필요하다.

고속열차와 전동차, 경전철 등 다양한 철도차량의 대 차프레임에 대해 하중시험과 강도 평가를 수행하여 안전 성을 검증한 사례는 기존에 많이 있었다. 김원경 등은 신 형 전동차와 신형 경전철의 대차프레임에 대해 JIS 규격 [4]에 따라 하중시험을 실시하고 결과를 분석하여 안전성 을 평가하였다[5,6]. 노규석 등은 고속열차 차체에 대해 구조해석을 수행하고 강도를 평가하였다[7]. 기존의 연구 는 일반 철도차량의 대차프레임을 대상으로 하였기 때문 에 곡선과 경사각이 철도와는 완전히 다른 도로를 주행 해야 하는 노면전차의 대차프레임에 그대로 적용하기에 는 무리가 따른다.

서승일 등이 도로와 철도 모두 주행할 수 있는 인터모 달 트램의 대차프레임 하중 시험 및 강도 평가를 수행한 사례가 있었으나[8], 곡선과 경사가 동시에 존재하는 구 간에서 비틀림 하중에 대한 고려가 미흡하였다. 또한, 노 면전차의 대차는 인터모달 트램의 대차에 비해 추진력 및 제동력이 더 요구되어서, 내부의 추진장치 및 제동장 치의 배치가 달라질 수밖에 없다. 이에 따라 대차프레임 의 구조 및 형상이 변경되어 새로운 대차프레임의 설계 및 강도 평가가 필요하게 되었다.

본 연구에서는 도로 선형을 따라 주행하는 노면전차의 대차프레임에 대해 도로의 경사와 곡선을 고려하여 하중 을 산정하고 이를 기초로 하중시험 및 강도 검토를 실시 하여 신규 대차프레임의 안전성을 평가하였다.

2. 하중 시험의 준비

2.1 노면전차 대차프레임의 설계 및 제작

도로설계기준[9]에 따른 도로의 선형 조건은 다음의 Table 1과 같다.

Table 1. Major requirements in road design standards

Description	Criteria	
Minimum Radius	15m	
Maximum Gradient	170‰	
Minimum Speed	20km/h (=5.56m/s)	

도로에서 주행하는 노면전차는 기본적으로 도로의 선 형 조건에서 안전하게 운행할 수 있어야 한다. 도로 선형 조건을 만족시키면서 도로 위에서 운행할 수 있는 시제 노면전차를 Table 2의 기본 사양에 따라 설계하였다.

Specification		Dimension	Remarks	
Tram Formation		Mc+T+Mc	Mc:Motor Car T:Trailer	
Maximum Gradient		170‰	Requirements for	
Minimum Curve Radius		15m	running on the roads	
Track gauge		1000mm	Narrow gauge	
	Length	20.6m	Overall carbody	
Carbody Dimension	Breadth	2.4m	Maximum distance at the section	
	Height	3.9m	From rail top	
Mass	Full Load	37ton	Total weight of 200m	
	Empty Load	34ton	Total weight of 3cars	
	Unsprung	2.8ton	Usprung mass per bogie	
	Bogie	4.1ton	Mass of a bogie	
	Carbody & Bogie	15.7ton	Mass above a bogie	
Bogie	Wheel Diameter	610mm	Diameter at a contact point on the rail	
	Wheel Base	1650mm	Length between axles	
Speed		40km/h	On plain roads	
		20km/h	On curve of radius 15m	
Acceleration		3.6km/h/s (=1.0m/s ²)	Maximum acceleration	
		4.5km/h/s (=1.25m/s ²)	Deceleration at emergency	

Table 2. Major specifications of a prototype tram

노면전차를 설계한 결과는 Fig. 2와 같고, 하부 주행 추진장치인 대차의 프레임 설계 결과는 Fig. 3과 같다.



Fig. 2. General arrangement of the prototype tram



Fig. 3. Design of a prototype bogie frame

설계 결과에 따라 제작 완료한 대차프레임 시작품은 Fig. 4와 같다. 대차프레임의 주요 재질은 연강(mile steel) 계열의 SM355A이며[10], 브래킷은 SS275이 사용되었다.



Fig. 4. Prototype bogie frame under construction

2.2 노면전차의 대차프레임 하중 기준

노면전차는 도로를 주행하지만 철도차량으로 분류되 기 때문에 철도차량의 기술기준을 만족하여야 한다. 철 도차량의 기술기준[11]에 따르면 대차프레임에 대해 차 체로부터 기인하는 다음 Table 3의 가속도를 기준으로 극한하중을 계산한 후, 이 극한하중을 대차프레임에 작 용시켜 하중시험을 수행하여야 한다.

Table 3. Maximum acceleration in each direction presented in Railway Vehicle Technical Standards[11]

Direction	Vertical	Lateral	Longitudinal
	a_{zc}	a_{yc}	a_{xc}
Acceleration	3.2m/s ²	3.3m/s ²	1.25m/s ²
Remarks	Acceleration on switches	Acceleration on curves	Emergency Braking Deceleration

각 방향의 가속도에 의한 동하중을 Table 3과 다음의 Eq. (1)~(3)을 이용하여 구한 후, 차체 및 대차 자체 중량 에 의한 수직하중과 조합하여 시험 하중으로 결정한다.

$$F_z = m_c \, a_{zc} \tag{1}$$

$$F_y = m_c \, a_{yc} \tag{2}$$

$$F_x = m_c a_{xc} \tag{3}$$

where, F_z denotes the vertical dynamic load, m_c denotes the mass above the bogie frame, a_{zc} denote the maximum vertical acceleration, F_y denotes the lateral dynamic load, a_{yc} denote the maximum lateral acceleration, F_x denotes the longitudinal dynamic load, and a_{xc} denote the maximum longitudinal acceleration.

노면전차가 곡선을 주행할 시에 차체의 원심 가속도에 의한 원심력에 의해 대차프레임에는 횡방향의 하중이 가 해지고, 경사를 주행할 시에는 중력 가속도에 의한 종방 향 하중이 가해지게 된다. Table 1에 제시된 도로 설계 기준에 따라 발생하는 횡방향 가속도를 계산해 보면 다 음 Eq. (4)와 같다.

$$a_y = \frac{v^2}{R} = \frac{5.56^2}{15} = 2.06 \text{ m/s}^2 \tag{4}$$

where, a_y denotes the lateral acceleration in m/s², R denotes the curve radius in m, and v denotes the vehicle velocity in m/s.

Eq. (4)의 횡가속도를 Table 3의 철도의 횡가속도 기 준(3.3m/s²)과 비교하면, 철도의 횡가속도 기준이 도로 의 횡가속도 기준보다 더 크다. 따라서, 철도의 횡가속도 기준을 근거로 대차프레임의 횡하중을 결정한다.

Table 3에 따르면 철도에서 종방향 가속도는 비상제 동 시의 감속도를 근거로 기준을 제시하고 있다. 그런데, 경사를 주행할 시에는 중력 가속도에 의한 종방향 하중 이 가해지게 된다. Table 2에 따르면 도로에서는 종방향 으로 최대 경사가 170‰에 달하고 있다. 철도는 설계 규 정에 따라 경사가 30‰ 이하이므로[12] 경사에 의한 중 력 가속도 성분이 미미한 수준이지만, 도로에서는 경사 에 따른 가속도를 무시할 수 없다. 최대 경사에서 중력 가속도의 종방향 성분을 계산해 보면 다음의 Eq. (5)와 같다.

$$a_x = g \sin \theta = 9.8 \times 0.17 = 1.67 \text{ (m/s}^2)$$
 (5)

where, a_x denotes the longitudinal acceleration in m/s², θ denotes the road gradient in rad, and *g* the gravity acceleration in m/s². Eq. (5)를 Table 3의 종방향 가속도 기준과 비교해보 면, Eq. (5)의 종방향 가속도가 철도의 종방향 가속도 기 준보다 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 종방향 하중은 Eq. (5)와 같이 도로의 급경사에 의한 종방향 가속도에 의해 결정된다.

도로에서는 곡선과 경사가 병합하는 구간이 존재하게 된다. 이 구간에서는 궤도의 비틀림이 발생한다. Fig. 5 와 같이 경사가 α이고 반경이 R인 곡선과 경사가 병합 하는 선로에서 선로면의 비틀림각 φ는 다음 Eq. (6)과 같이 계산될 수 있다[13].

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{h}{R} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{L_a \sin \alpha}{R} \right) \tag{6}$$

where, ϕ denotes the twisting angular displacement of the track, L_a denotes the length of the track, and α denotes the slope of the track, h denotes the height of the track from the base.



Fig. 5. Spiral track of constant radius

좌우 차륜간 거리가 *s*일 때 비틀림각에 의한 좌우 차 륜의 높이 차이 *d*는 다음 식과 같이 계산된다.

$$d = \phi s \tag{8}$$

where, d denotes the maximum height difference between wheels, and s denotes the distance between right and left wheels

Table 1의 도로 선형 조건에서 차축간 거리가 1800mm일 때, 좌우 차륜(접촉점 기준 차륜 거리 1050mm)의 최대 높이 차이 *d*는 다음 Eq. (9)와 같이 계산된다.

$$d = \tan^{-1} \left(\frac{1800 \times \sin 0.17}{15000} \right) \times 1050 = 21 \,\mathrm{mm} \,\,(9)$$

철도 건설 규칙에 기초한 선형 조건에 따르면[11] 최 소 곡선 반경은 200m, 최대 경사는 30‰이고, 좌우 차 륜 거리는 1480mm 정도가 되므로 Eq. (8)에 의한 최대 높이 차이는 0.4mm가 된다. 철도 선형 조건에서 비틀림 변위는 Eq. (9)에 따른 도로 선형 조건의 비틀림에 비하 여 미소하므로, 하중 시험 시에는 도로 선형 조건의 비틀 림 변위를 고려하여야 한다.

노면전차의 하중 조건을 요약하면, 수직방향과 횡방향 하중에 대해서는 철도차량 기술 기준에 따른 가속도 기 준이 도로 설계 기준보다 가혹하여 철도 기준을 따르고, 종방향과 비틀림 하중에 대해서는 도로 설계 기준이 철 도차량 기술 기준보다 가혹하여 도로 설계 기준을 따른 다. 따라서, 도로 선형 조건과 철도차량 기술 기준을 모 두 고려한 노면전차 대차프레임의 동적 하중 기준을 정 리하면 다음의 Table 4와 같다. 대차프레임의 설계 기준 에 따르면[10], 시험 하중 부과 시의 대차프레임은 응력 은 허용 기준인 항복응력 이하가 되어야 한다.

Table 4. Dynamic load for the bogie frame of tram in each direction

Direction	Acceleration	Dynamic Load	Remarks	
Vertical	3.2m/s ²	50.3kN	Acceleration on switches	
Lateral	3.3m/s ²	51.8kN	Acceleration on curves	
Longitudinal	2.92m/s ²	45.9kN	Acceleration on steep gradients	
Twisting		21mm	Maximum height difference between wheels on curved slope	

3. 하중 시험

Table 4의 동적 하중을 기준으로 Fig. 4의 대차프레 임에 대해 하중 시험을 실시하고, 응력을 계측한다. 시험 하중으로, 대차 상부의 자중 및 차체 자중에 추가하여 동 적 하중을 부과한다. Table 2에 제시된 차체와 대차의 질량 15.7ton에 의한 대차 상부의 하중(15.7ton×9.8m /s²÷2 =77.4kN)은 대차 좌우의 2차 스프링을 통해 분 산되어 대차프레임에 작용하게 된다. 수직 동적 하중도 추가하여 2차 스프링 위치에서 나누어서 부과한다. 수직 하중 조건은 다음 Fig. 6과 같다.



Fig. 6. Vertical test loads

차체의 횡가속도에 의한 횡하중(lateral load)은 차체 가 대차프레임과 접촉하는 대차프레임 측면의 브래킷에 작용시킨다. 횡하중 조건은 다음 Fig. 7과 같다.



Fig. 7. Lateral test loads

종 방향(longitudinal) 하중은 차체와 대차프레임을 연결하는 센터피봇을 통해 전달된다. 따라서 센터피봇을 연결하는 브래킷에 전 • 후 종방향 가속도에 의한 하중을 작용시킨다. 종하중 조건은 다음의 Fig. 8과 같다.



Fig. 8. Longitudinal test loads

궤도 비틀림에 의한 대차의 비틀림(twisting) 하중은 변위로 주어진다. Table 4에 주어진 최대 비틀림 변위 21mm가 대차프레임에서 구현될 수 있도록 대각선의 차 륜 위치에서 각각 10.5mm의 간극(gap)을 둔 상태에서 수직 하중을 가한다. 비틀림 하중 조건은 다음 Fig. 9와 같다.



Fig. 9. Twisting test loads

하중 부과를 위해 유압 서보 엑튜에이터(hydraulic servo actuator)를 사용하였다. Fig. 10은 하중 프레임 에서 대차프레임에 유압 엑튜에이터를 이용하여 시험 하 중을 가하는 실제 시험 장면이다.



Fig. 10. Hydraulic actuators under test on the loading frame

응력 계측을 위해 고응력 예상 부위를 중심으로 3축 스트레인 게이지 10개, 1축 스트레인 게이지 40개를 부 착하였다. Fig. 11은 스트레인 게이지를 부착한 위치도 이고, Fig. 12은 실제 스트레인 게이지를 대차프레임에 부착한 결과이다.



Fig. 11. Locations of strain gauges for stress measurement



Fig. 12. Strain gauges attached on the frame

대차프레임에 부착된 스트레인 게이지에서 전달하는 신호를 데이터 로거(data logger)를 이용하여 처리하였 는데, 계측시스템을 통해 응력 계측 결과를 Fig. 13과 같 이 실시간으로 확인할 수 있다.



Fig. 13. Real time display of the measured stresses on the load test and data acquisition system

4. 하중 시험 결과 및 평가

각 하중 조건별로 스트레인게이지 위치에서 응력을 계 측한 결과를 정리하였다. 수직 하중 시험의 응력 계측 결 과는 Fig. 14와 같다. 응력 계측 결과를 보면, Fig. 15에 표시된 바와 같이, 대차프레임의 양측 보(beam)를 연결 하는 트랜섬(transom)의 모서리 부분에서 단차가 있는 곡선 끝부분(게이지 5번)에서 최대 응력이 발생하였고 크 기는 204.5MPa이었다. 대칭 위치에 있는 모서리 부분 (게이지 6번, 7번, 8번)에서도 전반적으로 고응력이 발생 하였다. 이는 하중점(2차 스프링 위치)에 인접하면서 구 조의 형상이 급변하는 모서리 부분이므로 응력이 집중되 고 있기 때문으로 추정된다.



Fig. 14. Stresses on the strain gauge locations due to vertical test loads



Fig. 15. Maximum stress points in the vertical load case

횡(좌우)하중 시험, 종(전후) 하중 시험, 비틀림 하중 시험에 따른 응력 계측 결과는 각각 Fig. 16, Fig. 17및 Fig. 18과 같다.



Fig. 16. Stresses on the strain gauge locations due to the lateral test loads



Fig. 17. Stresses on the strain gauge locations due to the longitudinal test loads



Fig. 18. Stresses on the strain gauge locations due to the twisting test loads

각 하중 조건에서 최대 응력과 발생 지점을 정리하면 Table 5와 같다. 비틀림 하중 조건에서 최대 응력 209.4MPa이 작용하고 있는데, 허용응력인 재료(SM355A) 의 항복응력 305MPa이하가 되어, 항복에 의한 영구변 형 관점에서 대차프레임이 구조적으로 안전함을 확인할 수 있다.

Table 5. Maximum stress in each load case

Direction	Maximum Stress	Gauge No.	Location	Allowable Stress
Vertical	204.5MPa	5	End of stepped corner on transom surface	305MPa
Lateral	184.4MPa			
Longitudinal	162.1MPa			
Twisting	209.4MPa			

Table 5를 보면 최대 응력 발생 지점은 모든 하중 조 건에서 동일하게 5번 스트레인 게이지임을 알 수 있다. 이는 정적 수직 하중이 각 하중 조건에서 동일하게 작용 하고 있고, 정적 수직 하중에 의한 기여분이 크기 때문에 최고 응력 발생 지점도 같게 되는 것으로 판단된다. 5번 스트레인 게이지 이외에도 6번, 7번, 8번 스트레인 게이 지에서 높은 응력이 발생하고 있는데, 6번, 7번, 8번 스 트레인 게이지의 위치도 5번 스트레인 게이지와 마찬가 지로 2차 스프링에 의해 정적 수직 하중이 가해지는 지 점 근방이기 때문이다. 비틀림 하중 시에 최대 응력 209.4MPa이 발생하고 있는데, 이는 동적 하중인 비틀림 하중이 정적 수직 하중과 동시에 가해지면서 생겨난 결 과라고 판단된다. 비틀림 하중에 의한 응력이 정적 수직 하중에 의한 응력과 조합하여 최대 응력에 이르게 된 것 이다. 동적 하중에 의한 반복적인 응력 발생으로 인해 피 로균열이 발생할 수 있으므로 피로강도도 검토하였다. Fig. 19는 피로강도를 평가하기 위해 비틀림 하중 조건



Fig. 19. Goodman Diagram for evaluation of fatigue strength

에 따른 응력에 대해 Goodman선도[10]를 작성한 결과 이다. 정적 하중에 의한 평균 응력 성분과 동적 하중에 의한 변동 응력 성분을 구분하여 선도에 점으로 표기하 면 모두 실선 아래에 위치하고 있으므로 피로강도는 적 정한 것으로 판단된다.

5. 결론

기존 도로를 운행하는 노면전차의 안전한 주행을 위해 대차프레임의 하중 시험 및 강도 평가를 수행한 결과 다 음의 결론이 얻어졌다.

- (1) 경사 및 곡선 도로를 주행하는 노면전차에 대해 도 로와 철도에서 운행이 가능하도록 하중 조건을 선정 한 결과는 수직 하중 및 횡하중은 철도의 하중 조건 으로 결정되었으나, 종하중과 비틀림 하중은 도로의 주행 조건을 고려한 하중 조건으로 결정되었다.
- (2) 도로는 철도에 비해 경사(170‰)와 곡선(15m)이 급하기 때문에 경사에 의한 종방향 가속도(2.92m/s²)
 와 비틀림 변위(21mm)가 기존 철도에 비해 크게 나타났다.
- (3) 설계된 대차프레임을 제작하여 스트레인게이지를 붙이고 각 방향의 하중 조건에 따라 하중을 부과 하여 응력을 측정한 결과 모두 허용응력 이하였 고, 피로강도도 허용기준 이하가 되어 대차프레임 이 도로와 철도 운행 조건에서 강도적으로 안전함 을 확인할 수 있었다.
- (4) 최고 응력이 발생하는 부위는 각 하중 조건에서 모 두 대차프레임의 측면 보를 연결하는 트랜섬의 단 차 부분이었는데, 이는 차량 중량에 의한 수직 하 중이 모든 하중 조건에서 동일하게 작용하고 있었 고, 형상적으로도 구조적 불연속 부분에서 응력 집 중이 발생하기 때문인 것으로 사료되었다.
- (5) 하중 시험 결과 비틀림 하중 조건에서 최고 응력 204.9MPa이 발생하고 있어서 도로 선형 조건에 따른 비틀림 하중이 대차프레임 강도 평가 시에 중요한 변수임을 확인할 수 있었다.

References

 Wikipedia. Stuttgart Rack Railway [internet], Available From: <u>https://en.wikipedia.org/wiki/Stuttgart Rack Railway</u> (accessed June 24, 2024)

- [2] S. W. Nam, Y. G. Oh, S. W. Park, H. C. Hwang, S. H. Lee, H, J. Kim, J. H. Kwak, Review on Main Specifications of Wireless Low-floor Tram, *Proceedings of* 2018 Annual Autumn Conference of Korean Society for Railway, KSR2018F143, Korea, pp.1-4, Nov. 2018.
- [3] Industrial Standards Council, Test methods of static load for truck frames and truck bolsters of railway rolling stock, Korean Standard, KSR 9224, Korea, pp.3-10, 2014.
- [4] Japanese Industrial Standards Council, Test methods of static load for truck frames and truck bolster of railway rolling stock, Japanese Industrial Standard, JIS 4208, Japan, pp.2-10, 2004.
- [5] W. K. Kim, S. T. Won, C. S. Jun, "A study on analysis of load test result of bogie frame for new electric multiple unit", *Proceedings of 2005 Annual Autumn Conference of Korean Society for Railway*, Korea, pp. 1056-1062, Nov. 2005.
- [6] W. K. Kim, S. T. Won, C. S. Jun, "A study on the load test method and result for bogie frame of new LRT", *Proceedings of 2008 Annual Autumn Conference of Korean Society for Railway*, Korea, pp. 1679-1688, Nov. 2008.
- [7] K. S. Roh, S. R. Lee, J. Y. Kang, "Evaluation of static strength and fatigue strength for bogie of a Korean High Speed Train including eddy current brake system", *Proceedings of 2001 Annual Autumn Conference of Korean Society for Railway*, Korea, pp. 267-272, Oct. 2001.
- [8] S. I. Seo, H. S. Mun, J. H. Moon, M. E. Suk, J. G. Kim, "Loading tests and strength evaluation of bogie frame for intermodal tram", *J. of the Korea Academia-I ndustrial Cooperation Society*, vol. 17, no. 10 pp. 554-561, Oct. 2016. DOI: <u>http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.10.554</u>
- Department of Road Construction, *Road design Standards*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, KDS440000, Korea, pp.3-17~3-20, 2016.
- [10] Industrial Standards Council, *Truck frames for railway rolling stock general rules for design*, Korean Standard, KSR 9210, Korea, pp.2-4, 2022.
- [11] Department of railway safety, Railway vehicles technical standards, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, KRTS-VE-Part52-2017(R1), Korea, pp.89-93, 2016.
- [12] Department of Railway Construction, *Railway construction rules*, Ordinance of Ministry of Land, Infrastructure and Transport, No. 1280, Korea, pp.2-3, 2023.
- [13] S. I. Seo, J. H. Yeon, "Rotational behavior of carbodies and design improvement for a mountain tram running on sharply curved roadsA study on the analysis of relative behaviors of carbodies and the design of a coupler in a mountain tram running on steep curved tracks", *J. of Mechanical Science and Technology*, vol. 37, no. 11, 2023 pp. 5751-5758, Nov. 2023. DOI: http://doi.org/10.1007/s12206-023-1014-4

서 승 일(Sungil Seo)



〈관심분야〉

• 1984년 2월 : 서울대학교 조선공

[정회원]

- 학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (공학박사)
- 1986년 2월 ~ 2002년 3월 : 한진 중공업기술연구소 수석연구원
- 2002년 4월 ~ 현재 : 한국철도기 술연구원 수석연구원

철도차량시스템, 용접구조 강도, 시스템 신뢰성 평가

김 정 국(Jeongguk Kim)

[정회원]

- 1987년 2월 : 부산대학교 무기재 료공학과 (공학사)
- 2002년 5월 : The University of Tennessee, Knoxville, 재료공학 과 (공학박사)
- 2003년 12월 ~ 현재 : 한국철도기 술연구원 책임연구원

〈관심분야〉 철도차량시스템, 비파괴평가 및 수명예측

558