

인터모달 트램 대차프레임의 하중 시험 및 강도 평가

서승일*, 문형석, 문지호, 석명은, 김정국
한국철도기술연구원 신교통연구본부

Loading tests and strength evaluation of bogie frame for intermodal tram

Sung-il Seo*, Hyung-Suk Mun, Ji-Ho Moon, Myung-Eun Suk, Jeong-guk Kim

New Transportation Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute

요약 본 연구에서는 도로 겸용 궤도상을 운행하는 인터모달 트램에 적용하는 대차 시스템의 구조 안전성을 검증하고자 대차프레임에 대해 하중 시험과 강도 평가를 수행하였다. 기존 철도의 궤도와는 달리 급곡선과 급구배가 많은 도로상에 건설된 궤도의 특성을 고려하여 하중을 산정하였고, 기존 표준 규격의 기존 하중과 비교하였다. 비교 결과, 인터모달 트램 대차시스템에 작용하는 수직하중은 기존 표준 규격에서 제시하는 수직하중보다 작으나, 전후하중 및 좌우하중은 기존 표준 규격에 제시하는 하중 이상이 되었다. 표준 규격의 수직하중은 다양한 종류의 열차를 포괄하기 때문에 보수적인 값을 제안하고 있으나, 전후하중과 좌우하중은 급구배 급곡선을 고려하지 않기 때문에 대차 프레임에 작용하는 실제 하중과 차이가 있게 된다. 새로운 철도시스템의 개발 시에는 표준 규격 하중보다도 실제 작용 하중을 산정하여 적용하는 것이 합리적임을 알 수 있었다. 산정된 하중을 기초로 제작된 대차 프레임에 스트레인게이지를 부착하고 대형 하중 프레임에 세팅한 후, 유압 액츄에이터를 이용하여 하중을 가하고 응력을 계측하였다. 응력 계측 결과 대차 프레임에 발생하는 최대 응력은 프레임 단면이 변화되는 곡선부나 브라켓이 취부되는 취약부에서 발생하였으나 허용응력 이하가 되어 구조적 안전성이 확보된 것으로 평가되었다.

Abstract In this study, loading tests and a strength evaluation of the bogie frame were conducted to verify the structural safety of the bogie system in an intermodal tram, which runs with cars on a road track. The loads were calculated taking into account the features of the road track with many sharp curves and steep gradients, which are different from the track of conventional railway. They were compared with the loads specified in the previous standard specifications. After the comparison, it was confirmed that the loads acting on the bogie system operating on a road track are slightly different from the specified loads. The specified vertical load of the standard specification for all kinds of trains is conservative, but the specified lateral and longitudinal loads are less than the calculated loads. The application of the actual loads was proven to be reasonable in the development of a new railway system. Based on the defined loads, the bogie frame was fabricated on which strain gauges were attached. It was set on the large loading frame so that the stresses could be measured when loads were applied by hydraulic actuators. After measuring the stresses, it was shown that they were below the allowable stress, which verified the structural safety of the bogie frame.

Keywords : Bogie frame, loading test, intermodal tram, rack and pinion, sharp curve, steep gradient, strength evaluation, stress measurement

1. 서론

국내 대도시의 교통문제는 나날이 심각해져 가고 있

다. 교통 체증으로 인한 시간 지체와 사고 위험 등의 불편은 물론이고 배기가스에 의한 오염물질과 미세먼지 배출로 인해 환경적인 재앙이 되고 있다. 따라서, 교통문제

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Sung-il Seo(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5623 email: siseo@krii.re.kr

Received July 12, 2016

Revised (1st September 8, 2016, 2nd September 19, 2016)

Accepted October 7, 2016

Published October 31, 2016

를 해결하기 위한 효과적인 대안은 친환경적인 대중 교통 수단을 늘리는 것이라 할 수 있다. 대표적인 친환경 대중교통 수단은 철도이고, 그 중에서 경전철이 효율적인 교통수단이 된다. 그런데, 경전철도 다양한 시스템이 있으므로 지역 특성과 교통수요, 건설비용에 따라 다양하게 적용되어야 한다.

최근, 고가 방식의 경전철을 건설한 도시에서 과도한 건설비용에 따른 채무와 이용승객 저조로 인한 적자 운행으로 어려움을 겪고 있어서 건설비와 운영비가 비교적 저렴한 트램이 주목을 받고 있다. 인터모달 운송 수단인 트램은 Fig. 1과 같이 기본적으로 도로에서 자동차와 겸용으로 운행하는 철도차량으로서 도로상에 매립된 궤도를 철제 차륜으로 주행한다.

트램은 철제 차륜으로 레일 위를 주행하기 때문에 차륜과 레일간 마찰력이 적어 추진 에너지 절감에 유리하나 급구배를 올라가는 것이 곤란하다. 일반 도로는 고무타이어로 주행하는 자동차 기준으로 건설되고 있으므로 트램의 주행 한계인 60% 이상 되는 곳이 많아 트램이 적용되기에 제한이 있다. 급구배를 극복할 수 있는 방법 중 하나는 랙과 피니언의 톱니 접촉력으로 추진하는 것이다. 또한, 급곡선 도로를 따라 트램이 운행하기 위해서는 좌우 차륜의 회전 속도가 달라질 수 있어야 한다. 따라서, 급구배와 급곡선을 주행하는 인터모달 트램은 기존 트램과는 다르게 개발되어야 하고, 다른 환경 하에서 적합성과 성능, 안전성이 검증되어야 한다. 이를 위한 첫 번째 단계로서, 본 연구에서는 인터모달 트램에 적용되는 대차시스템을 개발하기 위해 먼저 대차프레임을 제작하고 구조적 안전성을 평가하고자 한다.



Fig. 1. Intermodal tram on road

국내에서 도시철도차량용 대차프레임의 강도시험과 평가에 대한 연구가 수행되었고[1], 경전철 대차프레임

의 강도 평가에 대한 연구[2]가 수행된 사례가 있다. 그러나, 이들 대차프레임은 전용 선로에서 주행하는 철도차량으로 수직하중이 주요한 하중이고 전후하중과 좌우하중은 큰 비중을 차지하지 않는다. 도시용 경전철인 무가선저상트램이 개발되어 시험 운영중에 있으나, 무가선 저상트램은 급곡선 주행을 위해 차축이 없는 독립 구동 방식의 대차를 적용하고 있고 경사는 일반 철도차량과 같이 60% 이내에서만 주행하기 때문에 인터모달 트램의 대차와는 구조 및 특성이 다르게 된다[3].

일반적으로 철도차량용 대차프레임의 설계 및 제작과 강도 평가를 위해서는 표준규격에 제시된 하중을 적용하고 있으나[4], 운행 선로가 다르고, 대차의 기능도 다른 경우에는 실제의 하중을 산정하여 적용하는 것이 구조적 안전성을 확인할 수 있는 합리적인 방법이다. 따라서 본 연구에서는 규격 제시 하중과 함께 인터모달 트램용 대차에 적용되는 실제 하중을 산정하여 시험 평가에 활용하고자 한다.

2. 본론

2.1 인터모달 트램의 대차의 주요사양

도로에서 주행하는 인터모달 트램은 60%의 한계를 넘어 자동차 이상의 경사 주행 능력을 갖추기 위해 180%의 구배를 운행할 수 있도록 톱니바퀴 주행 장치를 추가하였다. 일반 도로에서 주행하기 위해서 도로의 급곡선인 20m 이하의 곡선에서도 운행할 수 있도록 대차시스템을 설계한다. 본 연구에서 개발하는 대차의 주요 사양은 다음 Table 1과 같다.

대차프레임은 차륜 상부의 1차 스프링과 차체 하부의 2차 스프링에서 전달되는 하중, 센터 피봇의 진후 및 좌우 하중을 견딜 수 있도록 설계되었다. 대차프레임의 주요 재질은 고장력 강재 SMA48으로서 주요 부재의 두께는 12t를 기본으로 설계하였다. 제동기를 설치하기 위해 브라켓도 추가하였다. 설계된 대차프레임의 형상은 Fig. 2와 같다.

Table 1. Major specifications of traction bogie system

Contents	Spec.
Bogie design weight	47.5kN
Empty weight	156.8kN
Passenger weight	24.4kN
Maximum shaft load	9ton
Maximum Weight on bogie	133.7kN
Wheel	610 - 580mm
Wheel base	1,650mm
Lateral distance of primary spring	1,550mm
Secondary spring	Coil spring × 4
Lateral distance of secondary spring	1,775mm
Minimum curve radius	10m
Max. Gradient	180‰
Max. Speed	Flat 70km/h (straight), 25km/h (R20m), 10km/h (R10m)
	Uphill (120‰) 15km/h, (180‰) 5km/h
Max. Acceleration	3.5km/h/s
	Uphill (120‰) 1.0km/h/s, (180‰) 0.5km/h/s
Max. Deceleration	3.5km/h/s (service)
	4.5km/h (emergency)

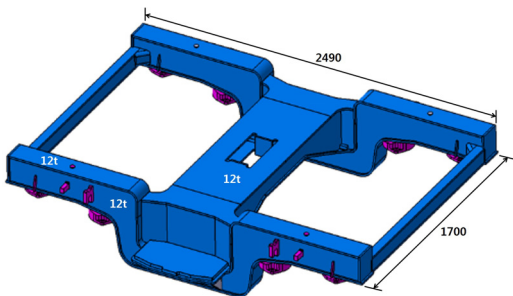


Fig. 2. Designed bogie frame

2.2 대차프레임의 하중

운행중 대차프레임에는 수직하중, 전후하중, 좌우하중 등이 작용한다. 대차프레임의 안전성 검증을 위해서 최대 하중에 대해 시험을 수행하여 강도를 평가하여야 한다. 수직 하중의 경우 대차 상부 차체의 중량에 의한 정하중 성분과 차체의 진동에 의한 동하중 성분이 합하여져 최대하중으로 대차프레임에 가해지게 된다. 전후 하중은 주행중에 차체의 저항을 이기면서 가감속 하는 과정에서 발생하는 힘이 대차프레임에 전달되면서 발생

하는 하중이다. 좌우하중은 차체의 좌우 진동에 의해 발생하는 동하중과 함께 차체가 곡선을 돌려면 발생하는 원심력이 합하여져 대차프레임에 가해지는 하중이다. 동하중 성분은 차체의 동역학 특성과 궤도의 틀림에 의해 달라지는데, 이론적으로 계산 가능하나 정확성의 편차가 많기 때문에 기존 시험 자료를 활용하는 것이 합리적이다. 인터모달 트램과 유사한 무가선 트램의 시험선로상에서 계측한 차체 가속도 결과는 다음 Table 2와 같다[5].

Table 2. Measured accelerations on Wireless Tram

No.	Max(m/s ²)		RMS(m/s ²)	
	Lateral	Vertical	Lateral	Vertical
1	0.60	1.14	0.11	0.23
2	0.35	0.86	0.08	0.22
3	0.39	1.06	0.09	0.22
4	0.30	1.18	0.07	0.26
5	0.36	1.22	0.10	0.23
Aver.	0.40 (0.04g)	1.09 (0.11g)	0.09 (0.01g)	0.23 (0.02g)

Table 2을 참고로 수직과 좌우 방향 동하중의 최대치를 추정할 수 있다. 최대 수직 하중은 차체 중량과 수직 가속도 a_v 에 의한 동하중이 조합되어 발생한다. 수직하중의 작용 방향은 다음 Fig. 3와 같다.

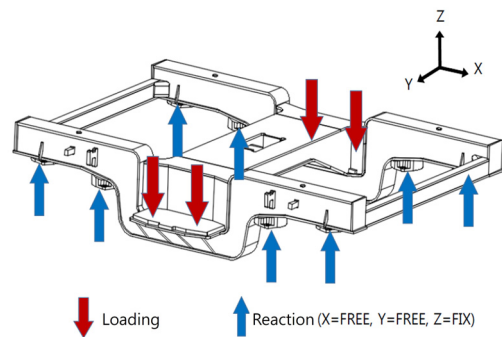


Fig. 3. Vertical loading case

전후 최대하중은 비상제동시 감속도에 의한 관성하중과 중력 성분인 구배저항이 조합되어 발생한다[6]. 전후 최대하중은 다음 식(1)과 같이 표현된다.

$$F_t = a_t M_t + G_{\max} g M_t \times 10^{-3} \quad (1)$$

$$= \left(\frac{a_t}{g} + G_{\max} \times 10^{-3} \right) W_t$$

여기서, F_t = 최대 전후하중

a_t = 최대 감속도

G_{\max} = 최대 구배(%)

M_t = 대차 상부 차체 최대 질량

W_t = 대차 상부 차체 최대 중량

전후하중의 작용 방향은 다음 Fig. 4와 같다.

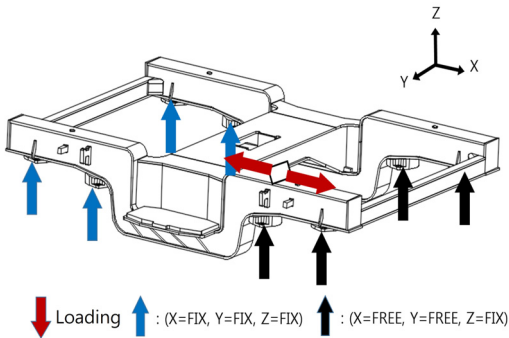


Fig. 4. Longitudinal loading case

좌우 최대하중은 최대 원심력이 작용하면서 좌우 진동에 의한 가속도 하중이 조합될 때 발생한다. 차체 원심력을 포함하여 좌우 하중은 다음 식(2)로 표현된다.

$$F_t = W \frac{v^2}{gR} + a_t M_t \quad (2)$$

여기서, F_t = 최대 좌우하중

a_t = 최대 좌우 가속도

R = 곡선 반경

v = 차량 속도

좌우하중의 작용 방향은 다음 Fig. 5와 같다.

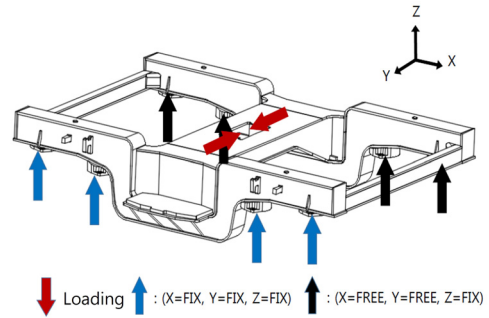


Fig. 5. Lateral loading case

Table 2에 제시된 최대 가속도에 의한 동하중과 식 (1), (2)를 이용하여 최대하중을 계산하면 다음 Table 3과 같다.

Table 3. Loading conditions for testing

Condition	Standard Spec.	Calculated Max Load	Remarks
Vertical	1.3W _t	1.11W _t	$a_v = 1.09\text{m/s}^2$
Lateral	0.3W _t	0.39W _t	$a_t = 0.4\text{m/s}^2$ $R = 20\text{m}$ $v = 8.33\text{m/s}$
Longitudinal	0.3W _t	0.31W _t	$a_t = 1.25\text{m/s}^2$ $G = 180\%$

Table 3에는 도시철도표준규격[4]에서 제시한 대차설계 하중을 함께 표시하였다. 수직하중의 경우 표준규격에서 요구하는 하중이 더 크나, 전후하중과 좌우하중은 실제 상황을 고려하여 계산된 하중이 규격에서 요구하는 하중보다 조금 더 크다. 수직하중의 경우 속도가 높은 철도차량도 함께 적용하는 기준이므로 동하중 성분을 다소 크게 잡고 있음을 알 수 있다. 전후하중은 기존 철도차량과는 달리 인터모달 트램이 급구배를 올라가기 때문에 구배저항이 커져서 표준규격의 설계 하중보다 크게 나타난 것으로 사료된다. 좌우하중의 경우에도 인터모달 트램이 일반 철도차량과 달리 급곡선을 주행하기 때문에 원심하중이 커져서 표준규격의 설계하중에 비해 계산 하중이 더 커지게 나타난다. 따라서, 급곡선과 급구배를 주행하는 인터모달 트램의 경우, 기존 표준규격만으로 하중 시험을 실시하는 것은 안전 확보 측면에서 바람직하지 않고, 실제 상황에 맞게 작용 하중을 적용해야 함을 알 수 있다.



Fig. 6. Completed bogie frame

2.3 대차 프레임 하중시험

대차프레임은 다음 Fig. 6와 같이 설계 및 제작되었다. 하중 작용 시 대차프레임의 각 부위에서의 응력을 측정하기 위하여 주요 지점에서 길이 5mm 단축 스트레인 게이지 71개와 3축 스트레인 게이지 3개를 Fig. 7과 같이 부착하였다.

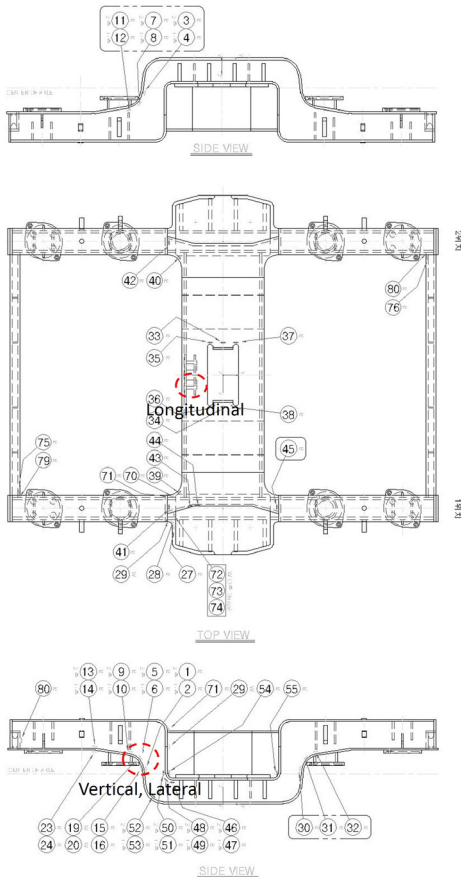


Fig. 7. Locations of strain gauges

제작된 대차프레임의 안전성을 검증하기 위해 앞절에서 계산된 하중조건에 따라 하중시험을 실시하였다. Table 3에서 제시된 식을 적용하여 대차 프레임에 작용시킬 시험하중을 구하면 Table 4와 같다.

Table 4. Testing loads

Condition	Load	Figures
Vertical	$1.3W_t$	173.8kN
Lateral	$0.39W_t$	52.1kN
Longitudinal	$0.31W_t$	41.4kN

Table 3과 4에서 볼 수 있듯이 수직하중은 규격에서 제시하는 값이 계측 값보다 더 크므로 규격에 따른 인증을 받기 위해 규격의 제시 값을 적용한다. 전후하중과 좌우하중의 경우 급구배·급곡선을 고려한 하중이 규격에서 제시한 하중보다 더 크므로 급구배·급곡선을 고려한 계산하중을 적용한다.

하중조건을 구현하기 위해 하중프레임을 Fig. 8과 같이 세팅하였다. 대차프레임은 양단에 유니버설 조인트가 부착되어 있고, 더미 차륜 지그(dummy wheel jig)상에 놓여지게 된다. 500kN 용량의 로드셀이 장착된 직경 90mm인 2개의 강봉(Tie Beam)과 500kN 액튜에이터 2대에 의해 지면 접촉이 없도록 하중 프레임상에 세팅된다. Fig. 3와 같은 수직하중을 구현하기 위해 유압 액튜에이터로 Fig. 8의 하중 A를 가하게 된다.



Fig. 8. Application of vertical loads to the bogie frame on the loading frame

수직하중 조건에 대해 각 스트레인게이지 위치에서 계측된 응력은 Fig. 9와 같다. Fig. 9에 따르면 최대 응력

이 작용하고 있는 위치는 21번 게이지로서 사이드 프레임과 중앙의 볼스터 프레임이 연결된 부분의 하부에 위치하고 있으며, 단면이 급격히 변화하여 원호를 이루는 곳이다.

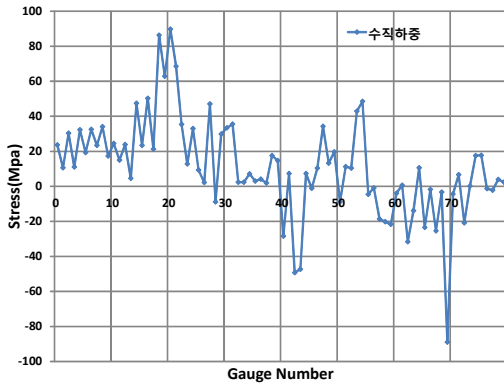


Fig. 9. Measured stresses under vertical load

Fig. 5와 같은 좌우하중 조건을 구현하기 위해 Fig. 10과 같이 하중 프레임을 세팅하였다. 액츄에이터를 이용하여 피봇 연결부에 Fig. 10의 좌우하중 B₁ B₂를 가하게 된다. 좌우하중 조건에 따른 응력 계측 결과는 Fig. 11과 같은데, 수직하중과 같은 위치에서 최대응력이 발생하였다. 전후하중 조건은 하중 프레임상에서 Fig. 12과 같이 구현하였다. 모노링크에 의한 전후하중을 유압 액츄에이터로 Fig. 12의 C₁ C₂로 가하게 된다. 응력 계측 결과는 Fig. 13과 같은데, 볼스터 프레임 중앙 하부 견인력 전달을 위한 모노링크의 브라켓 측부인 69번 게이지에서 발생하였다. 최대응력 발생지점은 Fig. 7에 함께 표시되어 있다.

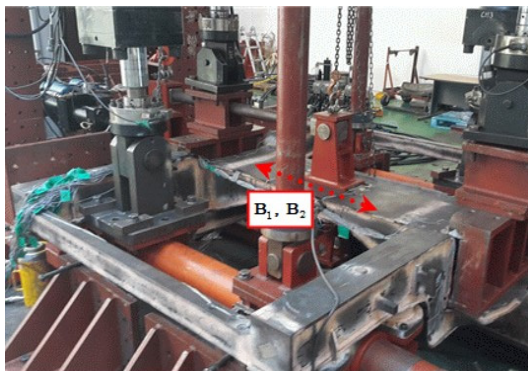


Fig. 10. Application of lateral loads to the bogie frame on the loading frame

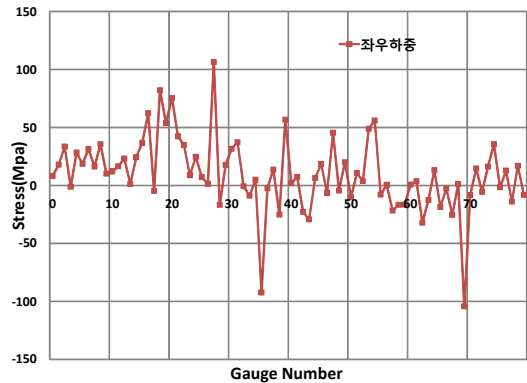


Fig. 11. Measured stresses under lateral load

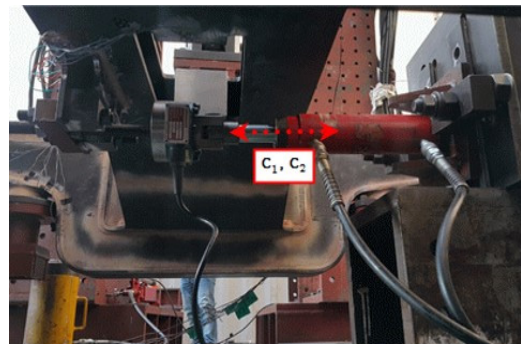


Fig. 12. Application of longitudinal loads to the bogie frame on the loading frame

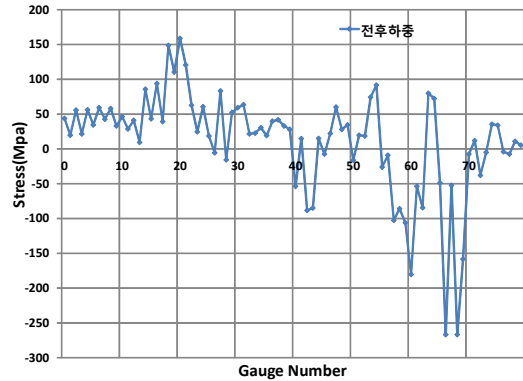


Fig. 13. Measured stresses under longitudinal load

각 하중조건에서 계측된 최대응력을 종합한 결과는 Table 5와 같다. Table 5에서 알 수 있듯이 각 하중조건에서 계측된 응력은 허용응력 기준 이하이므로 대차프레임은 구조적으로 안전하다고 평가할 수 있다.

Table 5. Measured stresses in loading tests

Condition	Measured Stress (MPa)	Yield Strength(MPa) SM490A
Vertical	89.8	320
Lateral	106.3	
Longitudinal	266.7	

3. 결론

도로 겸용 인터모달 트램의 추진을 위한 대차시스템의 프레임 안전성 평가를 위해 하중 산정 및 시험, 강도 평가를 실시한 결과 다음의 결론이 얻어졌다.

- (1) 급곡선 및 급구배를 주행하는 인터모달 트램의 대차프레임에 작용하는 수직하중의 경우, 기존 표준규격에서 제시하는 하중이 보수적인 값을 제시하고 있으나, 전후하중 및 좌우하중은 기존 표준규격에서 제시하는 대차프레임 하중과는 차이가 있으므로 실제 상황을 고려한 하중의 산정 및 평가가 필요하다.
- (2) 급곡선 주행에 따른 좌우하중은 곡선 반경감소에 따라 원심력이 증가하여 기존 표준규격의 하중보다 12.0kN 더 커지게 된다.
- (3) 급구배에 따른 전후하중은 구배하중이 큰 비중을 차지하여 기존 규격에서 제시한 0.3g 가속도에 기초한 전후하중에 비해 1.3kN 더 커지게 된다.
- (4) 인터모달 트램의 대차프레임에 결정된 하중조건에 따라 하중프레임에서 하중시험을 실시한 결과 최대응력은 단면이 변화되거나 브라켓이 취부되는 취약부에서 발생하였으나 허용응력 이하가 되어 대차프레임의 구조적 안전성이 확보된 것으로 평가된다.

References

[1] Hwang, D. H., Choi, J. H., Song, S. Y., Strength assessment of standardized bogie frame for urban EMU, *Proceedings of 2005 Annual Spring Conference of Korean Society for Railway*, pp. 447-452, 2005.

[2] Kim, W. K., Won, S. T., Jeon, C. S., 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*, pp. 1679-1688, 2008.

[3] Kim, H. G. et al., Current status of development and test for wireless low floor tram, *Proceedings of 2013 Annual Spring Conference of Korean Society for Railway*, pp. 1396-1402, 2013.

[4] MOLT, Technical specifications for light rail vehicle tram, Part 5, Enforcement 2012-516, *Ministry of Land and Transport*, pp. 17-19, 2012.

[5] Lee, J. R. et.al., Hybrid low-floor tram development, *Land Infrastructure and Transport R&D report*, pp. 786-789, 2013.

[6] Kim S. H., Introduction of railway system, *Jajak Academy*, pp. 100-120, 2007.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 연구 수행을 위해 협력해 주신 우진산전 김준우 과장께 감사 드립니다.

서 승 일(Sung-il Seo)

[정회원]



- 1984년 2월 : 서울대학교 조선공학과 (공학사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (공학박사)
- 1986년 2월 ~ 2002년 3월 : 한진중공업기술연구소 수석연구원
- 2002년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

<관심분야>

철도차량시스템, 용접구조 강도, 시스템 신뢰성 평가

문 형 석(Hyung-suk Mun)

[정회원]



- 1994년 2월 : 조지워싱턴 대학교 (공학석사)
- 2008년 8월 : 서울대학교 대학원 조선해양공학과 (공학박사)
- 1998년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도차량다물체 동특성 해석, 용접변형, 차량설계, 신호통 시스템 개발

문 지 호(Jiho Moon)

[정회원]



- 2004년 3월 : 고려대학교 토목환경공학과 (구조공학석사)
- 2009년 3월 : 고려대학교 토목환경공학과 (구조공학박사)
- 2009년 10월 ~ 2012년 8월 : Univ. of Washington, 박사후연구원
- 2014년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도케도시스템, 합성구조, 콘크리트구조

석 명 은(Myung Eun Suk)

[정회원]



- 2009년 12월 : University of Illinois at Urbana-Champaign 기계공학과 (공학석사)
- 20013년 8월 : University of Illinois at Urbana-Champaign 기계공학과 (공학박사)
- 2013년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

철도차량시스템, 시스템 신뢰성 평가, 첨단 융·복합 소재

김 정 국(Jeonguk Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 부산대학교 무기재료공학과 (공학사)
- 2002년 5월 : The University of Tennessee, Knoxville, 재료공학과 (공학박사)
- 2003년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

철도차량시스템, 비파괴평가 및 수명예측