

사이드 빔 강성에 따른 복합소재 대차의 주행성능 평가

김정석

한국철도기술연구원 첨단소재연구팀

Evaluation of Running Performance of the Composite Bogie under Different Side Beam Stiffness

Jung-Seok Kim

Advanced Materials Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 본 연구에서는 사이드 빔이 1차 현가장치 역할을 수행하도록 설계된 복합소재 대차프레임의 적용성 검토를 위해 동특성 해석과 성능평가를 수행하였다. 대차프레임에 적용된 소재는 GEP224 유리섬유/에폭시 프리프레그이다. 성능검증을 위해 복합소재 대차프레임의 사이드 빔의 두께를 50mm, 80mm, 150mm로 변화시키면서 강성을 조절한 모델에 대해서 주행 성능을 해석적으로 평가하였다. 주행성능평가에서 사이드 빔의 두께가 80mm인 모델은 모든 성능조건을 만족하였고, 사이드 빔 두께가 50mm인 경우 역시 모든 성능조건을 만족하지만 임계속도가 요구조건에 2%정도의 여유 밖에 없어 적합하지 않았다. 사이드 빔 두께가 150mm인 모델의 경우 공차시 수직방향 승차감 지수가 기준을 만족하지 못해 부적합한 것을 확인하였다. 또한, 사이드 빔의 두께가 80mm인 모델을 제작하여 대차에 설치하고, 주행시험대 시험을 통해 임계속도를 시험적으로 평가하였다. 주행시험대 시험에서는 휠세트에 횡방향 가진을 부과하고, 목표속도까지 증속과정에서 횡방향 가진에 의한 휠세트 횡변위의 발산현상은 발생하지 않았다. 또한, 횡방향 가진이 제거된 이후 휠세트의 횡변위 역시 수렴하여 최대 임계속도는 차량 동역학 해석에서 예측된 최대 임계속도와 유사함을 확인 할 수 있었다.

Abstract In this study, a running performance evaluation and roller rig test was conducted to evaluate the applicability of a composite bogie frame, which has the role of the primary suspension. The composite bogie frame was made of a GEP224 glass/epoxy prepreg. Vehicle dynamic analysis was carried out on the composite bogie with three different kinds of side beam thicknesses (50 mm, 80 mm, and 150 mm). From the results, the composite bogie with a side beam thickness of 80 mm satisfied all the dynamic design requirements. Although the composite bogie with the side beam thickness of 50mm also met the design requirements, its critical speed was just a 2% margin to the requirement. In contrast, the model of the side beam thickness of 150mm did not meet the ride comfort. In addition, a composite bogie frame with the side beam thickness of 80 mm was fabricated and installed on a complete bogie. Moreover, the roller rig test using the fully equipped bogie was performed to evaluate the critical speed. During the test, the lateral excitation was imposed on the wheelsets to realize the rail irregularity. There was no divergence of the lateral displacement of the wheelsets while increasing the speed. The measured critical speed was similar to the predicted result.

Keywords : Composite Bogie Frame, Running Performance, Roller Rig Test, Side Beam, Stiffness

1. 서론

최근 철도차량용 대차는 경량화 및 소형화 추세이다.

특히, 철도차량용 대차의 중량은 전체 차량중량의 약 35% - 40%를 차지하기 때문에 철도차량 경량화를 위해서는 대차 경량화가 필수적이다 [1]. 유럽의 경우 대차

본 논문은 한국철도기술연구원 주요연구사업의 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jung-Seok Kim(Korea Railroad Research Institute, KRRI)

Tel: +82-31-460-5663 email: jskim@krri.re.kr

Received March 9, 2017

Revised April 4, 2017

Accepted April 7, 2017

Published April 30, 2017

경량화를 위해 인보드형 대차프레임을 적용하여 대차의 중량을 기존 대비 25% - 30% 경량화 하였다. 이러한, 인보드형 대차는 설계변경을 통해 대차를 소형화 함으로써 경량화를 달성한 사례이다. 이러한, 설계 변경을 통한 경량화 이외에 대차부품의 소재를 변경하여 경량화가 가능하다. 최근 일본의 가와사키 중공업의 경우 탄소섬유 복합소재를 대차프레임에 적용하여 기존 대비 약 40% 경량화를 달성하여 대차당 약 900kg의 중량을 감소시켰다 (Fig. 1). 또한, 탄소섬유 복합소재 대차 프레임을 적용하여 승차감 향상 및 탈선안전성도 향상되었다고 보고되고 있다[2]. 이 대차는 현재 구마모토 전기 철도 주식회사에서 채용하여 상용화 되었다. 과거 독일과 프랑스에서도 철도차량용 대차프레임에 복합소재를 적용하여 경량화를 실현한 사례가 있는데, 독일의 경우 ICE열차용 복합소재 대차를 개발하여 기존 대비 25% 경량화를 달성하고 우수한 비틀림 유연성(torsional compliance)의해 추가적인 유압댐퍼(hydraulic damper)없이도 330km/h의 고속주행에서 탈선방지효과를 입증하였다 [3-5].



Fig. 1. Composite bogie developed by Kawasaki heavy industry [2].

프랑스는 알스톰 주관으로 유리섬유 복합소재를 대차에 적용하여 기존 대비 30% 경량화를 달성하고 SNCF 시험소에서 복합소재 사이드 프레임에 대해 16×10^6 회 피로시험수행하여 구조안전성을 확인하였다[6]. Jinping 등은 1차와 2차 현가장치기능을 부여한 대차모델에 대한 개념을 제안하였다 [7-8]. 이러한 대차의 경량화는 철도차량의 에너지 비용 및 선로유지보수비용 절감에 기여하는 기술(rail-friendly technology)이다.

위에서 언급한 복합소재 적용 대차프레임의 경우 프레임 자체가 현가장치 역할을 동시에 수행하도록 설계되었다. 이를 통해 대차 구조의 단순화 및 추가적인 경량화 효과를 기대할 수 있다. 이렇게 대차프레임에 현가장치 기능을 부여하기 위해서는 프레임을 유연하면서 구조강

도를 만족하도록 설계 및 제작해야 한다.

본 연구에서는 도시철도차량용 무연가 유리섬유 복합소재 대차 구현을 위해 대차프레임이 현가장치 기능을 수행하도록 설계하고자 한다. 이를 위해 강성이 서로 다른 3가지의 대차프레임 구조에 대한 차량 동역학 해석과 시험을 통해 가장 적합한 대차프레임 구조를 도출하고자 한다.

2. 복합소재 대차프레임

2.1 복합소재 대차프레임의 구조

Fig. 2는 복합소재 대차프레임의 형상을 나타낸 것이다. 복합소재 대차프레임은 기존 대차프레임과 유사한 H자 형상을 갖고 2개의 사이드 빔과 크로스 빔으로 구성된다. 그러나, 금속재와 달리 구조강성조건을 만족시키기 위해 리브(rib)구조가 내부를 채우고 있고 이를 스킨(skin)부가 감싸고 있다. 스킨부와 리브부는 직조된 유리섬유/에폭시 복합재 (GEP224, SK Chem.)로 제작되며 물성치는 Table 1과 같다. 복합소재 대차프레임의 강성은 주로 사이드 빔이 담당하게 되는데, 본 연구에서는 1차 현가장치 역할을 수행하게 될 사이드 빔의 두께(h)를 50mm, 80mm, 150mm로 변화시키면서 강성 변화에 따른 주행 거동을 고찰하였다.

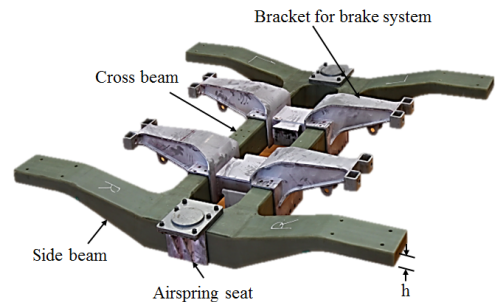


Fig. 2. Composite bogie frame.

Table 1. Material properties of GEP224 prepreg.

Material properties	GEP224
Longitudinal modulus, E_{11}	34.4 GPa
Transverse modulus, E_{22}	13.2 GPa
Shear modulus, G_{12}	7.05 GPa
Density, ρ	1831kg/m ³

2.2 차량 주행성능해석을 위한 모델링

Fig. 3은 본 연구에서 수행한 차량 주행성능해석 모델의 구성을 나타낸 것이다. 해석에 이용된 철도차량은 도시철도차량으로 대차 중심간 거리는 13,800mm 이고, 차체길이는 20,000mm 이다. 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 하나의 구체와 대차 2세트를 이용하여 1량의 철도차량을 모델링하였다. 차체와 대차사이의 연결은 대차의 센터피봇과 차체 사이에 고정 조인트(fixed joint)를 적용했고, 축상과 휠세트 사이에는 회전 조인트(revolute joint)를 적용하였다. 해석에 적용된 자유도는 총 284개였다. Table 2와 3은 해석에 적용된 차량의 중량 및 주요 고무류 부품 (공기스프링 및 축상고무)의 강성 값을 나타낸 것이다.

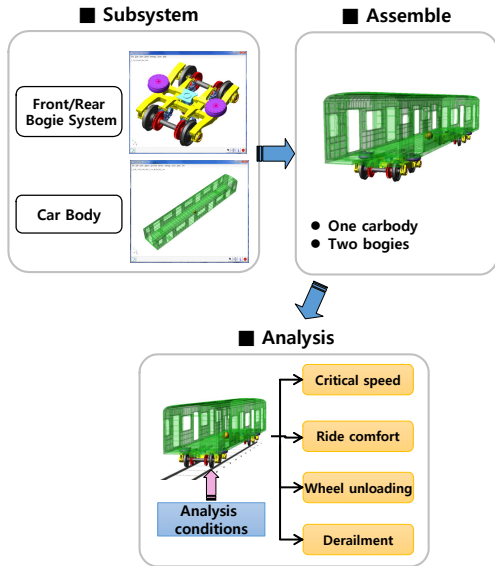


Fig. 3. Vehicle modeling for the running dynamic analysis of the railway vehicle with a composite bogie system.

Table 2. Vehicle weight information.

Types of Weight (kN)	Bogie weight	Empty weight of train	Full weight of train
		50	275.3

본 연구에서는 복합소재 대차프레임의 현가장치로서의 기능을 검증하기 위해 차량 동역학 해석시 프레임을 유연체(flexible body)로 모델링하였다.

Table 3. Stiffness values of rubber components.

Values	Direction	Empty weight condition () : Full weight condition
Air spring stiffness (kN/m)	Longitudinal	131 (183)
	Lateral	131 (183)
	Vertical	239 (481)
Rubber bushing stiffness (kN/m)	Radial	81,000
	Lateral	10,000

이를 위해 모드좌표(modal coordinate)를 이용한 부분모드 합성법(component mode synthesis)을 사용하였다. 이 방법은 몇 개의 적절히 선정된 변형모드만으로 물체의 탄성변형을 잘 나타낼 수 있기 때문에 효율적인 것으로 알려져 있다[9-12]. 부분모드 합성법은 정적모드와 정규모드 두 가지를 모두 고려하여 유연체 효과를 구현하며, 이때 사용되는 모든 모드는 서로 독립성을 갖도록 직교 정규화 되었다. 모드좌표는 복합소재 대차프레임의 고유치(eigenvalue) 해석을 통해 도출하였다.

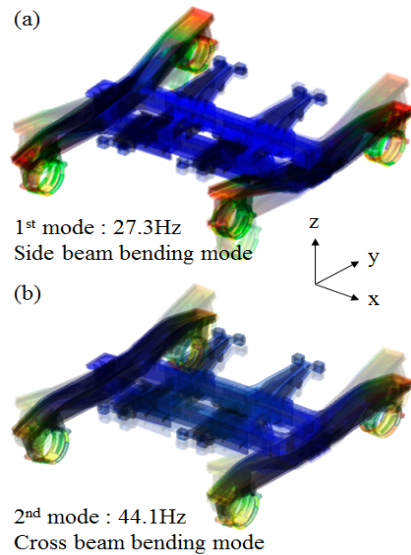


Fig. 4. Eigenvalues and mode shapes of the composite bogie frame.

Fig. 4는 복합소재 대차프레임의 1차와 2차 고유치와 모드형상을 나타낸 것이다. 1차 모드는 사이드 빔의 z방향 굽힘모드이고, 2차 모드는 크로스 빔의 x방향 굽힘모드였다.

2.3 차량 주행성능 해석 결과

2.3.1 임계속도 (critical speed)

철도차량에서 임계속도는 직선부에서 철도차량이 불안정성 없이 주행 가능한 최고속도를 의미한다. 일반적으로 도시철도차량의 경우 임계속도는 110km/h 이상을 요구조건 하고 있다. Fig. 5는 사이드 빔 끝단 두께변화에 따른 공차 및 만차 중량조건에서의 임계속도를 나타낸 것이다. 해석결과 강성이 가장 낮은 사이드 빔 두께 50mm의 공차 조건에서 가장 낮은 112.2km/h의 임계속도 값을 보였고 두께가 150mm일 때 259.5km/h로 가장 높은 값을 보였다. 해석결과 대차프레임의 강성이 높을수록 차량 중량이 무거울수록 임계속도는 증가하였다. 이것은 사이드 빔의 강성이 증가하면 직선부 주행시 휠세트를 강건하게 구속하여 주행안정성을 향상시키기 때문이다. 그러나, 사이드 빔의 강성이 과다할 경우 곡선부 주행시 횡압을 증가시켜 마모와 소음 문제점을 유발할 수 있다.

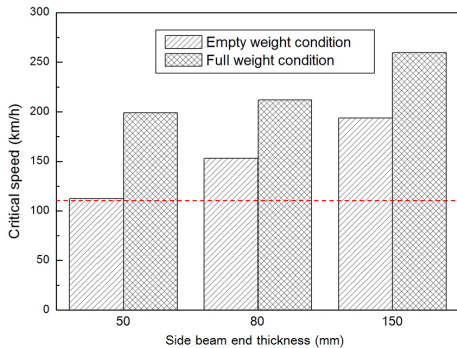


Fig. 5. Critical speeds according to side beam end thickness.

사이드 빔 두께가 80mm일 경우에는 공차시 153.2km/h였고 만차시 211.9km/h였다. 해석결과 모든 조건에서 기준치인 110km/h 이상조건을 만족하였다. 그러나, 사이드 빔 두께 50mm일 경우에는 공차조건에서 요구조건 대비 약 2%정도의 여유만 보였다.

2.3.2 승차감 (ride comfort)

승차감의 경우 ISO/Sperling's Ride Index(Wz)를 적용하여 평가하였다[13]. 차량의 승차감을 평가하기 위해서는 차체의 가속도 응답이 필요하다. 해석에서 승차감

평가를 위한 차량의 가속도는 대차의 견인장치가 설치되는 차체 바닥부 값을 이용하였다. Table. 4는 승차감 지수에 따른 승객이 느끼는 안락감을 의미한다. 승차감 지수가 증가할수록 승객에게 주는 불편함은 높아진다. ISO 기준에서 정한 합격 기준은 2.5 이하 이다.

Table 4. Ride evaluation scales [13].

Ride Index(Wz)	Comfort (Vibration sensitivity)
1	Just noticeable
2	Clearly noticeable
2.5	More pronounced but not unpleasant
3	Strong, irregular, but still tolerable
3.25	Very irregular
3.5	Extremely irregular, unpleasant, annoying; prolonged exposure intolerable
4	Extremely unpleasant; prolonged exposure harmful

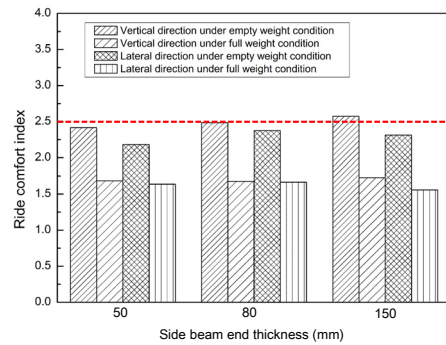


Fig. 6. Ride comfort index according to side beam end thickness.

Fig. 6은 사이드 빔의 두께에 따른 공차와 만차 상태에서의 수직 및 횡방향 승차감 지수를 나타낸 것이다. 사이드 빔 두께가 150mm인 조건에서 공차시 수직방향 승차감 지수가 약 2.574로 기준을 초과하였고 나머지 경우는 모두 승차감 요구조건을 만족하였다.

2.3.3 동적탈선계수 (dynamic derailment index)

동적탈선계수는 UIC 518기준 [14]에 근거하여 평가하였다. 이를 위해 Fig. 7과 같은 곡선선로 조건하에서 해석을 수행하였다. 이 곡선부 모델에서 곡선 반경과 곡선부 길이는 각각 250m와 150m이고, 캔트는 125mm였다. 총 선로 길이는 500m이고 해석시 차량의 속도는 55km/h이다.

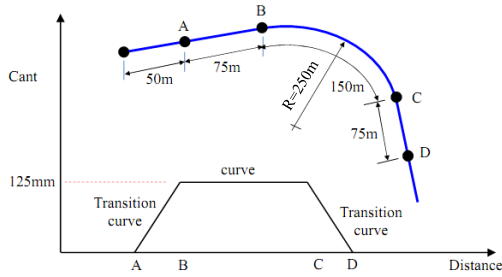


Fig. 7. Track modeling for evaluation of the dynamic derailment index and dynamic wheel unloading rate.

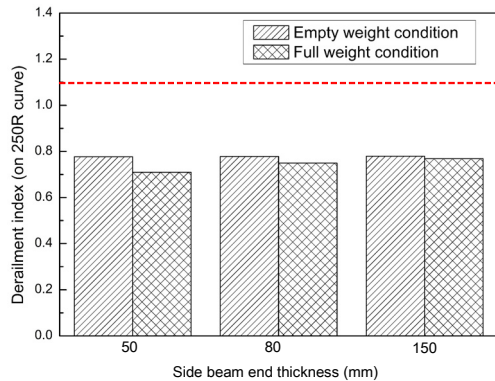


Fig. 8. Dynamic derailment index according to side beam end thickness.

탈선 계수는 차륜과 레일의 횡 방향 작용력 (Y)과 수직방향 하중 (Q)의 비(Y/Q)로 나타낸다. 곡선반경 250m 조건에서 동적 탈선 계수는 1.1이하여야 한다. Fig. 8은 동적 탈선계수를 나타낸 것이다. 동적 탈선계수는 모든 사이드 빔 두께 조건에서 기준치인 1.1 이하였다.

2.3.4 윤중 감소율(wheel unloading rate)

열차의 주행 중 윤중 감소가 클 때에 탈선될 수 있는데 이렇게 감소된 윤중과 정적 윤중의 비를 윤중 감소율로 정의한다. Fig. 9는 해석을 통해 얻어진 동적 윤중 감소율로 모든 모델에서 기준이 0.8이하였다.

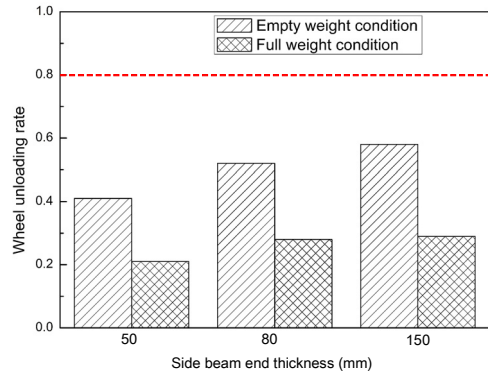


Fig. 9. Wheel unloading rate according to side beam end thickness.

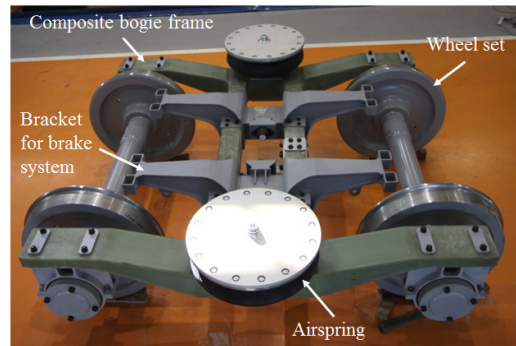


Fig. 10. Fully equipped bogie with the composite bogie frame.

3. 복합소재 대차 임계속도 측정시험

3.1 복합소재 대차프레임 제작

이상의 현가장치 기능이 포함된 복합소재 대차프레임을 장착한 도시철도차량에 대한 주행성능 분석을 통해 동적인 측면에서 사이드 빔의 두께 변화에 따른 성능을 평가하였다. 이를 통해 사이드 빔의 두께가 50mm인 경우 모든 성능요구조건을 만족하지만 강성이 상대적으로 낮아서 임계속도가 요구조건에 너무 근접하여 적합하지 않고, 사이드 빔의 두께가 150mm인 경우에는 강성이 너무 높아서 공차상태에서 수직방향 승차감으로 만족하지 못했다. 그러나, 사이드 빔의 두께가 80mm인 경우에는 모든 요구조건을 만족하였다. 따라서, 본 연구에서는 사이드 빔의 두께가 80mm인 모델을 제작하였다. 또한, 제작된 복합소재 대차프레임을 이용하여 도시철도차량용

대차 1세트를 제작하였다. Fig. 10은 제작된 도시철도차량용 복합소재 완성대차의 모습을 나타낸 것이다.

3.2 임계속도 측정

제작된 복합소재 완성대차와 더미 차체 (dummy carbody)를 이용하여 주행시험기(roller rig machine)를 통해 임계속도를 평가하였다. Fig. 11은 복합소재 완성대차가 더미 차체와 체결되어 주행동특성 시험기에 설치된 모습을 나타낸 것이다. 주행시험방법은 선로불규칙에 해당하는 횡방향 가진을 휠세트에 부과하면서 속도를 증가시킨다. 그 후 목표속도에 도달한 후 일정시간 유지하고 횡방향 가진을 제거한 후 대차 횡변위의 수렴여부를 통해 임계속도를 평가하였다. 본 시험에서는 사이드 빔 두께 80mm에 대한 주행성능해석에서 예측된 임계속도 153.2km/h에 근거하여 목표속도를 150km/h로 설정하였다.

Fig. 12는 시험기를 통해 측정된 주행속도이력과 휠세트의 횡변위 이력을 나타낸 것이다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 횡방향 가진을 부과하면서 주행속도를 150km/h까지 선형적으로 증가시켰다. 가진이 부과됨에도 증속과정에서 휠세트 횡변위의 발산현상은 발생하지 않았다. 주행속도가 목표속도에 도달한 약 388초에서 약 500초까지 150km/h의 속도를 유지했다. 그 후 횡방향 가진을 제거하고 휠세트의 횡변위의 수렴여부를 고찰하였다.

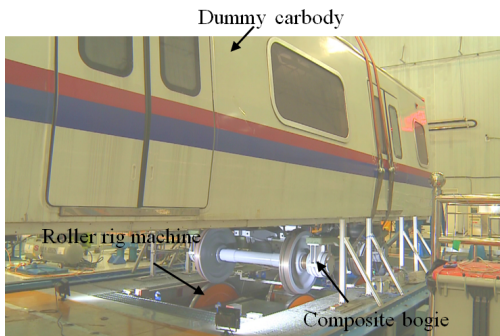


Fig. 11. Composite bogie installed on the roller rig testing machine.

Fig. 12 (b)에서 알 수 있듯이 횡방향 가진이 제거된 후 휠세트의 횡변위 역시 zero에 수렴하여 주행이 안정화됨을 확인하였다. 이러한 경향은 해석결과와 유사한 경향을 보임을 확인하였다.

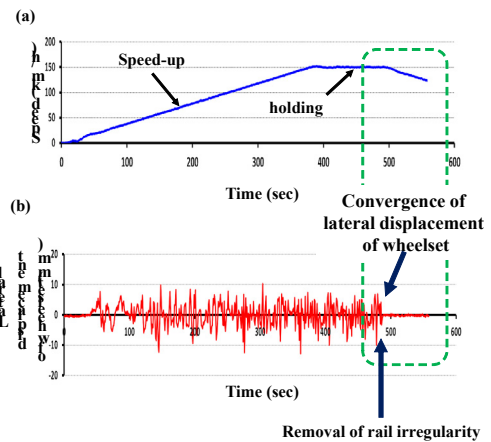


Fig. 12. (a) running speed history and (b) lateral displacement history of wheelset.

4. 결론

본 연구에서는 현가장치 기능을 갖는 유리섬유 복합 소재를 적용한 복합소재 대차프레임을 개발하기 위해 3 가지 서로 다른 강성을 갖는 대차 프레임에 대한 주행 동역학 해석을 통해 주행성능을 평가하였다. 이를 통해 모든 성능 조건을 만족하는 사이드 빔 두께가 80mm인 모델을 제작하여 이를 적용한 도시철도차량용 완성대차를 완성하였다. 또한, 이 대차를 이용하여 임계속도 측정 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 주행성능평가에서 사이드 빔의 두께가 80mm인 모델은 모든 성능조건을 만족하였고, 사이드 빔 두께가 50mm인 경우 역시 모든 성능조건을 만족하지만 임계속도가 요구조건에 너무 근접하여 적합하지 않았다.
- (2) 사이드 빔 두께가 150mm인 모델의 경우 공차시 수직방향 승차감 지수가 기준을 만족하지 못해 부적합한 것을 확인하였다.
- (3) 사이드 빔 두께가 80mm인 모델의 제작을 통한 주행시험대 시험에서 외부가진을 부과하면서 진행된 목표속도까지 증속과정에서 휠세트 횡변위의 발산현상은 발생하지 않았다.
- (4) 또한, 외부가진이 제거된 이후 휠세트의 횡변위 역시 수렴하여 최대 임계속도는 차량 동역학 해

석에서 예측된 최대 임계속도와 유사함을 확인할 수 있었다.

References

- [1] I. K. Kim, J. S. Kim, W. G. Lee, 2014, "Investigation of Vehicle Dynamic Behavior of Composite Bogie Under Different Rubber Bushing Stiffness Values," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, vol. 39, no. 3, pp. 303-309, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.3.303>
- [2] Kawaski Heavy Industry, efWING_Brochure, 2015.
- [3] W. Geuenich, C. Guenther, R. Leo, "Dynamics of Fiber Composite Bogies with Creep-controlled Wheelsets," *Vehicle System Dynamics*, vol. 12, no. 1-3, pp. 134-140, 1983.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00423118308968739>
- [4] C. Guenther, R. Leo, P. Wackerle, "New Technologies for Rail Vehicle Bogies and Car Body Substructures," *Les Editions de Physique*, pp. 89-95, 1986.
- [5] R. Leo, H. P. Lang, "Fiber-composite Bogies on Test," *Railway Gazette International*, pp. 632-633, 1986.
- [6] L. Maurin, J. Boussoir, S. Rougeault, M. Bugaud, P. Ferdinand, "FBG-based Smart Composite Bogies for Railway Applications," *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 15th, IEEE*, pp. 91-94, 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ofs.2002.1000509>
- [7] H. Jining, J. George, "A Novel Bogie Design Made of Glass Fibre Reinforced Plastic," *Materials & Design*, vol. 37, pp. 1-7, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.12.026>
- [8] S. C. Zhi, Z. Youqun, W. Lu, "Tri-objective Co-evolutionary Algorithm and Application of Suspension Parameter Design Based on Lizard Behavior Bionics," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 28, no. 12, pp. 4857-4867, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-014-1106-2>
- [9] W. S. Yoo, E. J. Haug, "Dynamics of Flexible Mechanical Systems using Vibration and Static Correction Modes," *Journal of Mech. Trans. Auto. Des.*, vol. 108, no. 3, pp. 315-322, 1986.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3258733>
- [10] J. T. Spanos, W. S. Tsuha, "Selection of Component Modes for Flexible Multibody Simulation," *Journal of Guidance*, vol.14, no.2, pp. 278-286, 1991.
DOI: <https://doi.org/10.2514/3.20638>
- [11] S. S. Shin, W. S. Yoo, J. Tang, "Effect of Mode Selection, Scaling, and Orthogonalization on the Dynamic Analysis of Flexible Multibody Systems," *Mechanics of Structures and machines*, vol. 21, no. 4, pp. 507-527, 1993.
DOI: <https://doi.org/10.1080/08905459308905199>
- [12] S. S. Kim, E. J. Haug, "Selection of Deformation Modes for Flexible Multibody Dynamics," *Mechanics of Structures and machines*, vol. 18, no. 4, pp. 565-586,

1990.

DOI: <https://doi.org/10.1080/08905459008915685>

- [13] U. I. D. C. Code, "513R. Guideline for evaluation passenger comfort in relation to vibration in railway vehicles," *International Union of Railways*, 1994.
- [14] U. I. D. C. Code, "518 OR Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behavior - Safety - Track fatigue - Running behavior," *International Union of Railways*, 2009.

김 정 석(Jung-Seok Kim)

[정회원]



- 1994년 2월 : 한국과학기술원 항공 우주공학과 (항공공학석사)
- 1999년 8월 : 한국과학기술원 항공 우주공학과 (항공공학박사)
- 2000년 1월 ~ 2003년 3월 : LG전선 연구소 선임연구원
- 2003년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

신소재, 철도차량 경량화