

고속철도차량 관절대차 갱웨이 링의 내구성 평가

강길현
(주)SR 기술본부

Durability Evaluation of Gangway Ring for the Articulated Bogie of High speed Railway Vehicle

Gil-Hyun Kang
Technical Division, SR Corp.

요 약 동력 집중식 고속 철도차량의 승차감과 주행 안정성 향상 방안으로서 채택한 관절형 대차는 차체와 결합된 기존 독립대차와 달리 객차 사이를 갱웨이 링에 의하여 연결한다. 갱웨이 링은 열차 주행 동안 객차분리를 방지하면서 객차 사이 승객 이동에 대한 절대적 안전을 확보되어야 함에도 불구하고, 아직까지 정량적인 내구성 시험기준 설정이 미비하다. 따라서 동력 집중식 고속 철도차량의 승차감과 승객 안전성을 향상을 위해서는 관절형 대차 갱웨이 링에 대한 내구성 평가의 시험기준에 대한 체계적인 연구가 중요하다. 본 연구에서는 고속 철도차량 관절형 대차의 갱웨이 링에 대한 안전성을 검토하기 위하여, 열차 운행조건에 준한 전후, 좌우 및 수직의 3축 모드로부터 7가지 혼합모드 하중조건을 도출하였다. 이 하중조건하에 유한요소해석결과로부터 각 부품들의 안전율은 최소 2.4 이상이다. 또한 변형률-피로수명설계 관점에서 내구성 해석을 통하여 피로안전성을 평가하였다. 본 갱웨이 링에 대한 내구성 시험은 혼합모드 하중조건하에 총 4단계의 1,000만 사이클을 수행하였다. 내구성 시험 후에 침투 탐상 검사기법을 이용하여 각 부품의 결함유무를 검토하였다.

Abstract To improve ride quality and running stability of high speed train(HST), it is important that connection between coaches adopts the articulated bogies by using a gangway ring, unlike the conventional independent bogies assembled with car bodies. Although the gangway ring should be ensured absolute safety against passenger movement between coaches during train operation, there is still a lack of quantitative durability criteria of that. Therefore, in order to improve the passenger safety of HST, it is important to study the test requirements on durability evaluation for the ring. In this study, seven mixed loading cases were derived from the triaxial loading(vertical/lateral/longitudinal) modes. The safety factor of each component is at least 2.4 or more from the results of the finite element analysis. In addition, fatigue safety was evaluated through durability analysis from the viewpoint of strain-life design. Durability tests for the gangway ring carried out a total of 10 million cycles in 4 phases load conditions. After the durability test, the defect of each component was investigated using nondestructive testing techniques.

Keywords : Articulated Bogie, Durability, Gangway Ring, Running Stability, Safety Factor

*Corresponding Author : Gil-Hyun Kang(SR Corp.)

Tel: +82-10-8616-2757 email: ghkang789@hanmail.net

Received March 28, 2019

Revised April 24, 2019

Accepted May 3, 2019

Published May 31, 2019

1. 서론

국내 고속철도차량의 안전성은 전체 시스템의 설계, 제작, 시운전 및 운행 과정에서 2016년 이후 새롭게 정의된 철도안전법의 철도차량 기술기준에 의해 형식승인 절차에 준하여 평가한다. 특히 차량의 구조적 안정성은 유럽기준(EN: European Norms 이하 EN)에 준하여 대부분 차체(carbody)와 대차(bogie)를 중심으로 이들의 정적강도(strength)와 피로강도를 평가한다. 차체의 강도는 철도안전법의 철도차량기술기준에서 제시한 EN 12663[1]에 준하고, 대차는 EN 13749[2]에 준하여 해석과 시험을 통하여 평가한다. 그러나 동력집중식 고속철도차량의 승차감과 속도 향상 방안으로서 채택한 관절대차(articulated bogie)방식의 차량은 기존의 차체하부에 설치된 일반 연결기와 달리 갱웨이 링(gangway ring)에 의하여 객차들을 연결한다. 본 갱웨이 링은 Fig. 1과 같이 관절대차틀(bogie frame) 위에 객차 사이를 연결하는 조립구성품이다. 이의 주요 부품은 Fig. 1(d)와 같이 각각 객차 차체(carriage car body)의 단부(end part)에 연결된 고정링(fixed ring)과 운반링(caring ring) 그리고 원추형 강재적층고무(conical rubber)와 콘(cone)에 킹핀(king pin)을 삽입한 관절부(articulation)이다. 또한 갱웨이 링은 핀구조로 결합되어 곡선부에서는 차체의 원활한 회전도 가능하게 한다. 이 조립구성품을 본 논문에서는 갱웨이 링이라 한다. 갱웨이 링은 열차주행동안 객차분리를 방지하면서 객차사이 승객이동에 대한 절대적 안전을 확보되어야 함에도 불구하고 아직까지 정량적인 내구성 시험기준 설정이 미비하며 기존 KTX 차체해석시의 기술자료를 참고하고 있다[3-5]. 또한, 국내 이에 대한 시험평가 기준은 철도차량 기술기준에 준한 차체의 구조시험 동안 갱웨이 링을 함께 부착하여 평가하는 수준이다[6]. 따라서 동력집중식 고속철도차량의 승차감과 승객안전성을 향상을 위해서는 관절대차 갱웨이 링에 대한 내구성평가의 시험기준에 대한 연구가 중요하다.

고속철도차량 대차와 차체에 관한 내구성 연구는 강도 설계관점에서 다양한 시험과 해석으로부터 안전성을 검토하였다. 김철수[7]는 열차 주행 동안 가속이력으로부터 변환된 하중이력하에 철도차량 용접대차 프레임의 피로해석을 수행하였고, 안승호[8] 등은 응력-수명관점에서 구간가변운행의 내구성 해석 및 피로수명을 평가하였다.

본 연구는 철도차량 관절대차 갱웨이 링의 안전성을 검토하는 연구의 일환으로서, 열차운행조건에 준하여 전후, 좌우 및 수직방향의 열차 주행하중조건으로부터 7가

지 혼합모드 시험조건을 제시하고자 한다. 이 조건하에 변형률-피로수명설계 관점에서 구조해석, 내구성 해석과 시험을 수행하고, 시험 후에 비파괴시험기법인 침투탐상 검사를 통하여 결함 유무를 검토하고자 한다.

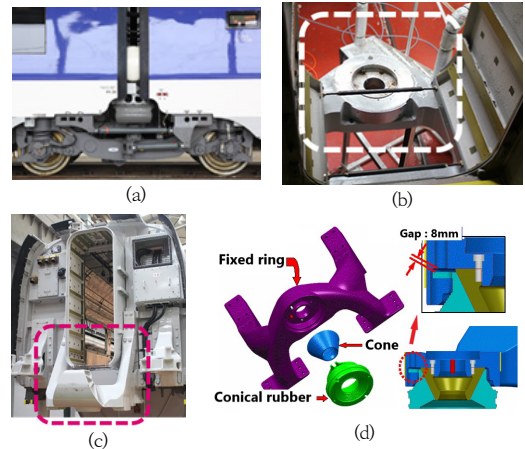


Fig. 1. Gangway ring assembly of articulated bogie type train (a) Articulated bogie (b) Fixed ring (c) Carrying ring (d) Gangway ring assembly

2. 내구성 해석 절차와 작용하중

2.1 내구성 해석 절차

Fig. 2는 갱웨이 링의 내구성 해석에 관한 절차를 나타낸 것이다. 내구성 해석에 요구되는 입력자료는 정적 유한요소해석 결과, 하중이력, 재료물성치이다. 먼저 각 요소 및 절점에 작용하는 시간에 따른 작용 응력이력텐서(applied stress history tensor)는 정적해석의 응력 텐서값과 하중계수에 의하여 무차원화된 각각의 하중이력들을 곱하여 얻어진다. 이로부터 산출된 텐서량은 중첩법(superposition method)에 의하여 응력이력 텐서량으로 표현되고, 이 텐서량은 파손이론의 주응력값에 의하여 스칼라(scalar)성분의 등가응력이력텐서(equivalent stress history tensor)로 전환된다. 이는 실질적인 손상을 주는 응력이력만을 얻기 위하여 사이클 카운팅기법(cycle counting method)에 의하여 필터링(filtering)된다. 기계부품의 피로수명은 등가응력이력텐서의 횟수와 각각의 재료에 따른 곡선으로부터 마이너 손상법칙(Miner's Damage Rule)에 의한 누적 피로손상량(cumulative fatigue damage)을 산출하여 평가한다[9].

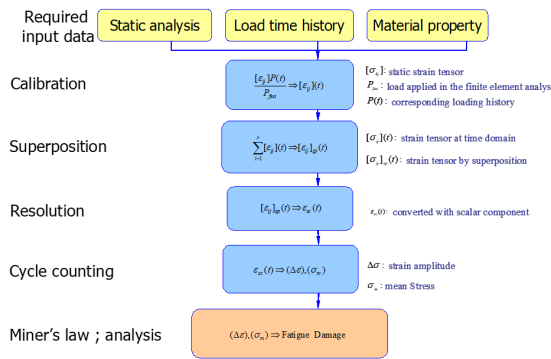


Fig. 2. Durability analysis process based on the strain-life approach

2.2 작용하중 조건

본 갱웨이 링의 작용하중은 차량운행조건에 따라 전후 하중, 수직하중 및 좌우하중으로부터 구분된다. 먼저 전후하중(longitudinal load, F_x)은 열차 진행시 최대 가속과 감속조건에서 최대하중을 발생한다. 본 열차는 10량 1편성 기준이며, 동력차량은 선두와 후미에 각각 1대가 위치한다. 선두동력차는 진행방향으로 객차 4량을 견인하고, 후미 동력차는 나머지 객차 4량을 밀어주는 방식이다. 최대가속 조건하에 전후하중은 최대 견인력으로부터 차량간 연결기에 모두 동일조건 가정하에 10량 편성차량의 설계 최대견인력(maximum tractive effort)의 1/2인 105 kN 이다[10]. 차량간 연결기에 서로 다른 전후하중이 작용할 경우, 이의 최대값은 서로 다른 각 차량의 중량으로부터 단부객차(end trailer car) 사이 관절 부위로서 45.2 kN으로서[11], 이전의 최대 견인력 조건보다 작다. 또한, 고속에서는 전기제동을 우선 적용하고 150 km/h 이하의 속도영역에서 공기제동을 주로 사용하는 상용제동시의 평균제동력은 447.5 kN이며 10량 차량이 균등 부담시는 차량당 44.75 kN 이다. 이로부터 전후하중의 시험조건은 식 (1)과 같다[10-12].

$$F_x = (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5) \times a = \pm 105 \text{ kN} \quad (1)$$

Where, F_x denotes longitudinal load, $m_1 \sim m_5$ denote full mass of each carbody, a denotes acceleration.

수직하중(vertical load, F_z)은 만차 상태의 설계하중 조건으로부터 ‘철도 안전법-철도차량 안전기준에 관한 규칙 4조’ 및 EN 12663에 준하여 수직피로하중은 식

(2)와 같다[1].

$$F_z = \text{정하중}(F_{zs}) \pm \text{동하중}(F_{zd}; 0.2F_{zs}) = 210 \pm 42 \text{ kN} \quad (2)$$

Where, F_z denotes vertical load, s and d denote static and dynamic component of the load.

좌우하중(transverse load, F_y)은 EN 13749; 2011에 준하여 F_z 으로부터 식 (3)과 같다[2].

$$F_y = \pm 0.5(F_z + 0.5m_b \cdot g) = \pm 65.45 \text{ kN} \quad (3)$$

Where, F_z denotes transverse load, m_b denotes mass of bogie, g denotes acceleration of gravity.

본 갱웨이 링에 대한 내구성 시험기준은 아직 규격화 되어 있지 않으므로, 본 연구에서는 EN 13749의 대차에 대한 내구성 시험에 준하여 Fig. 3과 같이 제안한다.

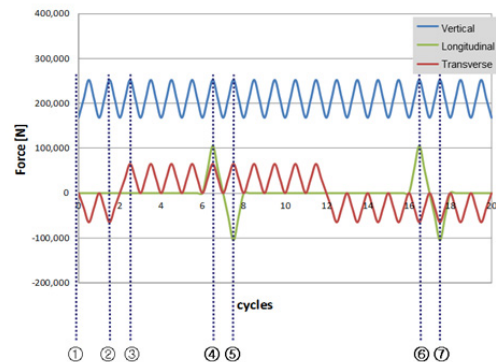


Fig. 3. Combined loadings of fatigue Test for Gangway: vertical, longitudinal and transverse loads

혼합모드 하중조건은 그림에서 열차운행조건에 준한 전후, 좌우 및 수직의 열차 주행하중조건으로부터 총 7가지(①~⑦)이다.

Table 1. Load cases based on fatigue test conditions

	Vertical load(F_z)	Longitudinal load(F_x)	Transverse load(F_y)
Load case①	+168	0	0
Load case②	+252	0	-65.45
Load case③	+252	0	+65.45
Load case④	+252	+105	+65.45
Load case⑤	+252	-105	+65.45
Load case⑥	+252	+105	-65.45
Load case⑦	+252	-105	-65.45

3. 해석 및 시험 결과

3.1 구조해석

Fig. 4는 본 갱웨이 링의 구조해석을 위한 유한요소 모델과 경계조건을 나타낸 것이다. 해석모델에서 총 절점수와 요소수는 각각 307,132개와 1,523,240개이다. 각 구성품 간의 접촉조건은 일반접촉이며, 경계조건은 고정 링의 차체와의 결합을 고려하여 병진/회전운동을 모두 구속하고, 전후/수직/좌우하중은 식 (1)~(3)에 준하여 부여하였다.

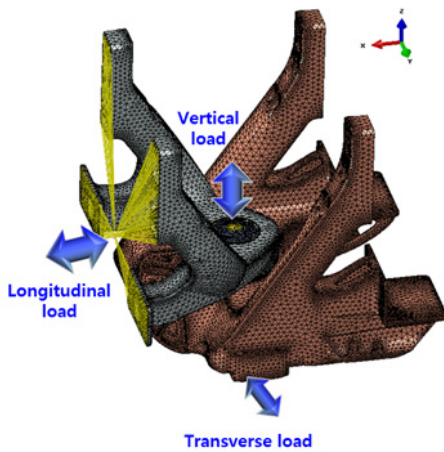


Fig. 4. Finite element model of gangway ring assembly

참고로 각 구성품 재료의 항복강도는 Table 2와 같다.

Table 2. Yield strength of gangway ring components

Components	Material	Yield strength[MPa]
Ring body	AC42200	240
King Pin	42CD4	930
Bushing	SM45C	490
Articulation	AF50S	385

Fig. 5는 하중조건 ④하에 유한요소해석으로부터 얻어진 최대 주응력 분포(maximum principal stress)이다.

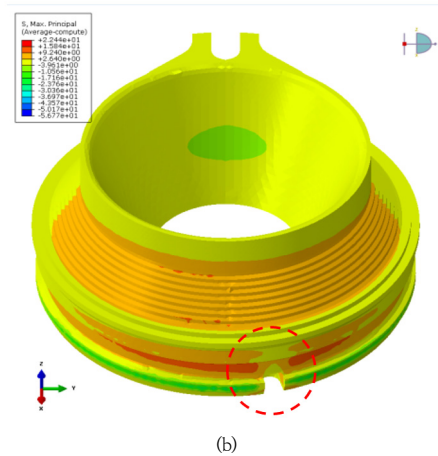
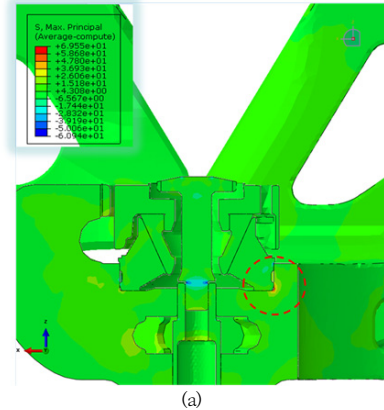


Fig. 5. Maximum principal stress distribution under load condition ④
(a) assembly (b) carrying ring

이 그림에서 보는 바와 같이 최대 주응력은 관절부(Articulation) 코너부와 접촉하는 운반링 하단부지점에서 발생하였다. 이의 위치에서 최대 주응력은 69.5 MPa로서, 운반링(carrying)의 허용 응력(168 MPa)에 준한 안전계수는 약 2.4이다. 그리고 부싱 등 다른 부품의 안전계수는 7 이상이다.

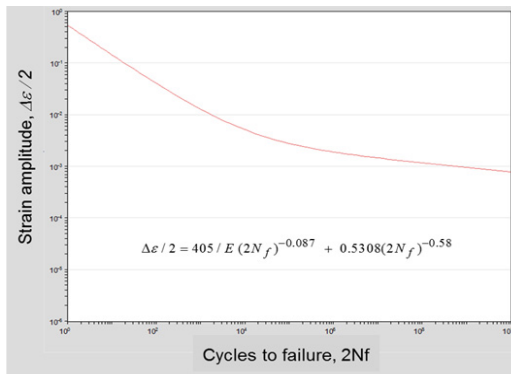
Table 3은 각 하중조건에 따른 최대 주응력, 안전계수 및 취약부를 정리한 것이다. 하중조건 ④와 ⑥은 운반링에서 취약하였으며, 나머지 하중조건들의 취약개소는 부싱이며 안전계수 6.0 이상이다.

Table 3. FEA results of the assembly under 7 load conditions

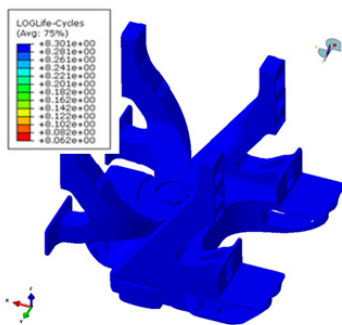
Spec.	Max. principal stress(MPa)	Weak component	Safety factor
Load case ①	42.3	Bushing	> 11
Load case ②	67.1	Bushing	> 6.8
Load case ③	69.4	Bushing	> 6.6
Load case ④	69.5	Carrying ring	> 2.4
Load case ⑤	76.3	Bushing	> 6.0
Load case ⑥	66.9	Carrying ring	> 2.5
Load case ⑦	75.1	Bushing	> 6.1

3.2 내구성 해석

Fig. 6은 Fig. 2의 내구성 해석절차에 따라 얻어진 피로수명 결과를 나타낸 것이다. 내구성 해석에 요구되는 3가지 입력자료는 Fig. 3의 작용하중이력, Fig. 5의 정적구조해석결과 그리고 고정링/운반링의 피로물성치는 Fig. 6(a)로부터 알루미늄 AC42200의 피로특성이다. 본 갱웨이 링의 피로수명은 1.2×10^8 cycles($10^{8.06}$)이며, 이는 설계 수명 10^8 사이클 이상을 가진다.



(a)



(b)

Fig. 6. Durability analysis result of the assembly
(a) Strain-life curve(AC42200) (b) Fatigue life distribution

3.3 내구성 시험

Fig. 7은 Table 1의 내구성 시험 진행 절차에 대 흐름도를 정리하여 나타낸 것이다. 정하중 및 피로하중 시험은 총 4단계로서, 100만회 / 500만회(누계 600만회) / 200만회(누계 800만회) / 200만회(누계 1,000만회)로 구분하였다. 각 단계에서 균열여부는 육안(visual inspection) 및 비파괴 검사(non-destructive tests)를 통하여 확인하였다.

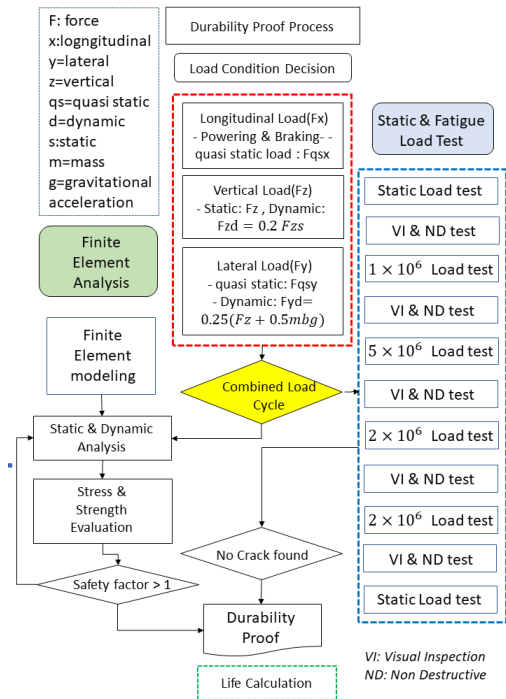


Fig. 7. Flowchart of durability evaluation process of gangway ring

Fig. 8은 3축 피로시험기에 본 갱웨이 링을 체결한 실제 내구성시험 사진이다. 본 시험에서 전후/좌우하중은 MTS회사의 유압 서보식 액추에이터(± 250 kN, ± 125 mm) 2대로 가진하였다. 그리고 수직하중은 동일 회사의 유압 서보식 액추에이터 (± 500 kN, ± 125 mm) 1대로 작용하였다. 내구성 시험 동안 데이터 로거는 32 채널의 JSM-530-32을 이용하여 실시간 취득하였다. 본 시험의 체결조건은 반력벽에 운반링을 고정하고, 반대편 고정링에 전후하중과 수직하중을 액추에이터로 가진하였다. 전후하중은 고정링과 운반링사이에 실제 차량과 동일한 관절부와 킹핀을 조립하여 부여하였다.



Fig. 8. Photo of the durability test for gangway ring

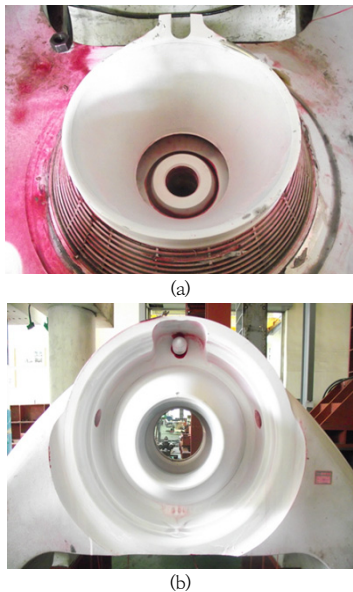


Fig. 9. Non-destructive test results after 10 million cyclic load (a) Carrying ring (b) Fixed ring

Fig. 9는 각 단계하중 사이클이 종료된 이후 육안 및 비파괴 검사를 보여준 사진들이다. 사진에서 보는 바와 같이 총 1,000만회 피로시험후 피로균열은 각 단계별로 비파괴 검사인 PT(Penetration tests)확인결과로부터 발생하지 않았다. 따라서 본 갱웨이 고정링부는 향후 보증수명내에 안전할 것이라고 판단된다.

3. 결론

본 연구는 철도차량 관절대차 갱웨이 링의 안전성을 검토하는 연구 일환으로서, 열차운행조건에 준한 전후,

좌우 및 수직의 열차 주행하중을 고려한 7가지 혼합모드 시험조건을 제시하고, 이로부터 내구성 해석과 시험을 통하여 평가하였다.

1. 본 갱웨이 링의 작용된 전후, 좌우 및 수직하중 시험조건은 각각 ± 105 kN, 210 ± 42 kN, ± 65.45 kN이다. 이는 국내의 기술 규격과 기준에 준하여 최대전인력, 만차상태 피로하중, 대차 피로하중을 적용한 것이다. 이로부터 내구성 시험에 적용할 하중조건은 전후, 좌우 및 수직하중조건을 조합한 총 7가지이다.
2. 본 갱웨이 링의 최대 주응력은 관절부 코너부와 접촉하는 운반링 하단부지점에서 발생하였다. 이의 위치에서 최대 주응력은 69.5MPa로서, 운반링(carrying)의 허용 응력(168MPa)에 준한 안전계수는 약 2.4이다. 나머지 하중조건들의 취약개소는 부상이며, 안전계수 6.0 이상이다.
3. 취약품인 운반링의 재질인 알루미늄 AC42200의 피로특성을 적용한 본 갱웨이 링의 피로수명은 1.2×10^8 cycles($10^{8.06}$)이며, 이는 설계 수명 10^8 사이클 이상을 가진다.
4. 본 갱웨이 링의 내구성 시험은 총 4단계로 총 1,000만회의 7가지 혼합모드하에 수행하였다. 이의 피로균열은 각 단계별 시험 후에 침투탐상검사를 통하여 확인한 결과 발생하지 않았다.

본 고속철도차량 갱웨이 링은 반수명 정비(Half life overhaul)시에 비파괴 검사를 통하여 추가 사용 여부의 판단할 것이다.

References

- [1] EN 12663-1, Railway applications - Structural requirements of railway vehicle bodies - Part 1: Locomotives and passenger rolling stock (and alternative method for freight wagons), CEN, 2010. DOI: <https://doi.org/10.3403/BSEN12663>
- [2] EN 13749, Railway applications - Wheelsets and bogies - Method of specifying the structural requirements of bogie frames, CEN, 2011.
- [3] Korea TGV Consortium, Validation Programme Static Test - Bodysell, Internal Report IE95-00613, pp.25-30, 1995.
- [4] Korea TGV Consortium, Structural Calculations of Korean TGV Bodysell Data Input, Internal Report IE96-006201, p.8, 1996.
- [5] Korea TGV Consortium, Qualification Test Procedure

- of Bodysell of Trailers T1 and T18 Type Test TRA02, Internal Report IE96-00480, pp.7-17, 1996.
- [6] KRRI, Test Result of Bodysell Load Tests for KTX-II High Speed Train of 90 cars, Oct. 2009.
- [7] Chul-Su Kim, "Fatigue Analysis of the Welded Bogie Frame for Rolling Stock Considering Dynamic Effects", *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, Vol.19, No.1, pp.101-103, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.17958/ksmt.19.1.201702.100>
- [8] Ahn Seung-Ho, Kwang-Woo Chung, Jang Seung-Ho and Kim Chul-Soo, "Durability Evaluation of the Korean Gauge - Adjustable Wheelset System", *Journal of the Academia-Industrial Society*, Vol.13 No.12, pp.5669-5675, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.12.5669>
- [9] Miner, M. A., "Cumulative damage in fatigue", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 12, pp.A159-A164, 1945
- [10] Gil-Hyun Kang, Latest High-speed Railway Engineering reflecting TSI and EN, p.370-477, Samsung DMS & Printing, 2014.
- [11] Simon D. Iwnicki, A Handbook of Railway Vehicle Dynamics, CRC Press, p. 241-243, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1201/9781420004892.ch1>
- [12] Cantone L., Durand T., "Longitudinal Forces Evaluation of SNCF Trains", WCRR, pp.7-8, 2011.
Available from: http://www.railway-research.org/IMG/pdf/c3_durand_thierry.pdf

강 길 현(Gil-Hyun Kang)

[정회원]



- 2001년 12월 : 영국 The University of Birmingham (기계공학 박사)
- 1981년 5월 ~ 2007년 6월 : 철도청, 철도공사 근무
- 2010년 7월 ~ 2015년 12월 : (주)현대로템 연구소, 철도사업본부 근무
- 2016년 2월 ~ 2019년 1월 : (주)SR 개통운영단, 기술본부 근무

〈관심분야〉

철도차량설계, 철도차량진동소음