2026 년도 한국철도학회 춘계학술대회 논문집 KSR2026S090

철도 진동 저감용 방진체결장치의 레일체결장치 시험 및 구조해석

Experimental Evaluation and Structural Analysis of a Vibration-Damping Rail Fastening System

김동연*†, 이남수*, 오정빈*, 김원석**, 정하영**, 양신추***

Dong Yeon. Kim*†, Nam Su. Lee*, Jeong bin. Oh*, Won Seok. Kim**, Ha Young. Jeong**, Sin Chu. Yang***

초 록 본 연구에서는 국내 환경에 적용 가능한 방진체결장치를 개발하고, 시제품 제작 후 한국철도표준규격(KRS TR 0014-20(R))에 따른 성능시험과 구조해석을 통해 적용 가능성을 검증하였다. 방진체결장치는 콘크리트도상 적용을 전제로 설계되었으며, 정적 수직강성 확보를 위해 고무판 형상 및 체적 개선을 수행하였다. 성능시험은 정적 및 동적 수직강성, 종방향 저항력, 반복하중, 전기저항, 부식저항 및 인발저항 항목에 대해 수행되었으며, 규격 기준에 따라 평가되었다. 또한 구조해석에서는 차량-궤도 상호작용을 고려하여 EMU 및 KTX 조건과 최대 250 km/h 속도 조건에서 주행안전성과 구조적 안정성을 평가하였다. 시험 및 해석 결과, 방진체결장치는 모든 요구 성능을 만족하여 실제 궤도 적용 시에도 문제없이 사용 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 방진체결장치, 콘크리트도상

1. 서 론

철도는 대량 수송이 가능한 교통수단으로서 중요한 역할을 수행하고 있으며, 최근에는 콘크리트도상의 적용 확대와 도심지 구간 운행 증가로 인해 열차 운행 시 발생하는 진동 문제가 중요한 환경적 이슈로 대두되고 있다. 열차 진동은 차량과 궤도 간 상호작용에 의해 발생하며, 레일과 도상을 통해 지반으로 전달된 후 주변 구조물로 전파되어 구조물 진동 및 2차 소음을 유발한다.

이러한 진동을 저감하기 위해 다양한 방진 기술이 적용되고 있으며, 그중 방진체결장치는 레일과 도상 사이에서 진동 전달을 감소시키는 핵심적인 역할을 수행한다. 그러나 현재 국내에서는 방진체결장치의 상당 부분을 해외 제품에 의존하고 있어 비용 증가 및 기술 종속성 문제가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 국내 환경에 적합한 방진체결장치를 개발하고, 시제품 제작과 성능시험 및 구조해석을 통해 방진체결장치의 성능과 안전성을 검증하고자 한다.

† 교신저자: ㈜세안 기업부설연구소
(cer2da@seaninc.co.kr)
* ㈜세안 기업부설연구소
** 국가철도공단 철도혁신연구원
*** 레일인프라

2. 본 론

2.1 성능시험

2.1.1 시험 개요

방진체결장치의 성능을 검증하기 위하여 한국철도표준규격(KRS TR 0014-20(R))에 따른 성능시험을 공인시험기관에서 수행하였다.

시험 항목은 정적 및 동적 수직강성, 종방향 저항력, 반복하중, 전기저항, 부식저항 및 인발저항으로 구성되었다. 각 시험은 하중 지지 능력, 변형 특성, 절연 성능 및 내구성을 평가하기 위해 수행되었다.

정적 및 동적 수직강성과 종방향 저항력은 반복하중 시험 전후의 성능 변화를 기준으로 평가되었으며, 반복하중 시험에서는 구성품

의 균열 및 파손 여부를 확인하였다. 또한 전기저항, 부식저항 및 인발저항 시험을 통해 절연 성능과 체결 안정성을 검증하였다.

Table 1 성능시험 항목 및 조건

구분	시험 항목	성능 기준
1	정적 수직강성	반복하중 시험 전 결과의 25% 이하
2	동적 수직강성	반복하중 시험 하중값 결정을 위한 시험으로 참고값으로 활용
3	종방향 저항력	반복하중시험 전 결과의 20% 이하
4	반복하중	반복하중 시험 후 체결장치 구성품의 마모 균열 및 파손이 없어야 함
5	전기저항	13kΩ 이상(의뢰자 제시 기준)
6	부식저항	체결이 용이하고, 손상이 없어야 함
7	인발저항	균열 및 파손이 없어야 함

2.1.2 시험 방법

정적 및 동적 수직강성 시험은 체결장치의 하중-변위 특성을 평가하기 위한 시험으로, 반복하중 시험 전후의 강성 변화율을 기준으로 성능을 평가하였다. 종방향 저항력 시험은 궤도 축 방향 하중에 대한 저항 성능을 평가하기 위한 것으로, 반복하중 전후의 변화율을 기준으로 평가하였다.

반복하중 시험에서는 일정 횟수의 하중 반복 후 구성품의 균열 및 파손 여부를 확인하였으며, 전기저항 시험에서는 절연 성능 확보 여부를 평가하였다. 또한 부식저항 시험과 인발저항 시험을 통해 체결장치의 내구성과 체결 안정성을 검증하였다.

Table 2 성능시험 장치 및 전경

정적, 동적 수직강성 시험	종방향 저항력 시험
반복하중 시험	전기저항 시험

부식저항 시험	인발저항 시험

2.1.3 시험 결과

성능시험 결과, 방진체결장치는 모든 시험 항목에서 규격에서 요구하는 성능 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 반복하중 시험 이후에도 구성품의 균열 및 파손은 발생하지 않았으며, 정적 및 동적 수직강성의 변화 또한 허용 범위 내에 유지되었다.

종방향 저항력 시험 결과에서도 반복하중 전후의 변화가 기준 범위 내에 존재하는 것으로 확인되었으며, 체결장치의 축 방향 저항 성능이 확보된 것으로 판단된다.

전기저항 시험에서는 13 kΩ 이상의 절연 성능이 확보되었으며, 부식저항 시험 및 인발저항 시험에서도 체결장치의 기능적 이상이나 구조적 손상이 발생하지 않았다.

Table 3 성능시험 결과 요약

시험 항목	단위	기준		결과
정적 수직강성	kN/mm	반복시험전	제시값	7.02
		반복시험후	-	8.38
	%	변화율	≤ 25	19.36
동적 수직강성	kN/mm	제시값		9.45
종방향 저항력	kN	반복시험전	≥ 7	18.74
		반복시험후	≥ 7	16.31
	%	변화율	≤ 20	12.98
반복하중 시험	-	해체 시 구성품 파손 없을것		합격
전기저항 시험	kΩ	≥ 13		16.53
부식저항 시험	-	체결이 용이하고 손상이 없어야 함		합격
인발저항 시험	-	균열 및 파손이 없어야 함		합격

2.2 구조해석

2.2.1 구조해석 개요

방진체결장치의 구조적 안전성, 주행 안전성 및 진동 저감 성능을 평가하기 위하여 차량-궤도 상호작용을 고려한 구조해석을 수행하였다.

실제 열차 운행 조건에서 3가지 속도를 (150km/h,200km/h,250km/h) 반영하여 체결장치에 작용하는 하중 및 응력 특성을 분석하고, 차량 주행 시 안전성 확보 여부를 검토하는 것을 목적으로 하였다. 또한 방진체결장치 적용에 따른 진동 응답 특성을 비교·분석하여 방진 성능을 평가하였다.

2.2.2 구조해석 방법

구조해석에 사용한 프로그램은 국제적으로 널리 사용되고 있는 차량 동적 해석 프로그램인 VI-Rail을 사용하였다.

차량-궤도 상호작용 해석은 다물체 동역학 기반 해석 기법을 활용하여 수행되었으며, 차량은 차체, 대차 및 윤축으로 구성된 다자유도 시스템으로 모델링하였다.

차체와 대차, 윤축 간 연결부는 스프링 및 감쇠 요소로 구성하여 차량의 동적 특성을 반영하였으며, 궤도는 궤도슬래브가 터널 바닥에 강결된 것으로 가정하여 레일, 체결장치만으로 구성된 것으로 가정했다.

구조해석을 통해 궤도에 작용하는 하중밀도를 산정하고, 체결장치 및 체결볼트에 작용하는 하중과 인발력을 평가하여 구조적 안전성을 검토하였고, 체결장치의 국부 응력 평가를 위하여 유한요소해석을 수행하여 구성부재의 응력 분포를 분석하고 구조적 안전성을 확인하였다.

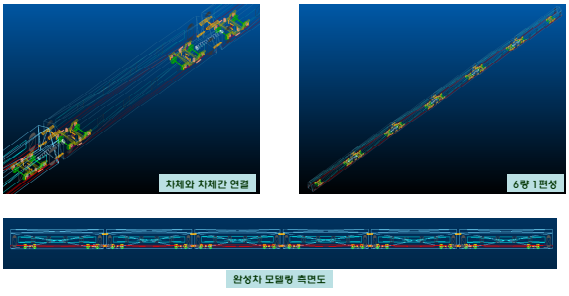

Fig 1 차량 모델링 개요도

2.2.3 구조해석 결과

(1) 차량 주행안전성 평가

차량-궤도 상호작용 해석 결과, 탈선계수 및 윤중 변화가 모든 조건에서 기준치를 만족하였다. 이는 궤도틀림 등 불리한 조건에서도 차량 거동이 안정적으로 유지됨을 의미하며, 방진체결장치 적용에 따른 주행 안전성 저하는 없는 것으로 확인되었다.

(2) 방진체결장치 구조적 안전성 검토

체결장치 및 체결볼트에 작용하는 하중과 응력은 모든 조건에서 허용 범위 내에 존재하였다. 특히 횡하중 및 인발력 평가 결과 충분한 안전성이 확보되었으며, 구성품 응력 분포에서도 구조적 이상이 발생하지 않아 구조적 안전성이 확보된 것으로 나타났다.

(3) 진동 저감 성능 검토

진동 응답 분석 결과, 방진체결장치 적용 시 일반 체결장치 대비 최소 8 dB 이상의 진동 저감 효과가 확인되었다. 또한 주파수 영역 분석에서도 특정 주파수 대역에서 유의한 진동 저감 효과가 나타났다.

3. 결 론

방진체결장치의 성능 검증을 위해 성능시험과 구조해석을 수행한 결과, 한국철도표준규격의 모든 요구 항목을 만족하여 구조적 안정성, 내구성 및 기능적 성능이 확보되었으며, 차량 주행안전성과 체결장치 및 체결볼트의 하중·응력 모두 기준치를 만족하여 구조적 안전성이 확인되었다. 또한 일반 체결장치 대비 최소 8 dB 이상의 진동 저감 효과가 나타났다. 이와 같은 결과를 종합할 때, 방진체결장치는 철도 궤도에 적용 가능한 성능을 확보한 것으로 판단되며, 실제 현장 부설을 통한 실증 검증을 수행할 계획이다.

후 기

본 연구는 중소벤처기업부 중소기업기술개발 지원사업 “철도 진동 저감용 방진체결장치 국산화 개발” 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 국토교통부(2019). “철도 소음/진동 저감기술 개발 최종보고서”