

유연다물체동적해석을 이용한 무도상교량 침목패드의 최적 강성 산정

채 수 호¹·김 민 수²·백 인 철³·최 상 현^{4†}

¹한국교통대학교 철도융합기술연구소 연구원, ²한국교통대학교 철도공학부 박사과정,
³한국철도공사 기술연구처 선임연구원, ⁴한국교통대학교 철도공학부 교수

Optimum Stiffness of the Sleeper Pad on an Open-Deck Steel Railway Bridge using Flexible Multibody Dynamic Analysis

Sooho Chae¹, Minsu Kim², In-Chul Back³ and Sanghyun Choi^{4†}

¹Researcher, Research Institute for Railway Convergence Technology, Korea National University of Transportation, Uiwang, 16106, Korea

²Graduate Student, School of Railroad Engineering, Korea National University of Transportation, Uiwang, 16106, Korea

³Senior Researcher, Korea Railroad Co., Daejeon, 34618, Korea

⁴Professor, School of Railroad Engineering, Korea National University of Transportation, Uiwang, 16106, Korea

Abstract

Installing Continuous Welded Rail (CWR) is one of the economical ways to resolve the challenges of noise, vibration, and the open-deck steel railway bridge impact, and the SSF method using the interlocking sleeper fastener has recently been developed. In this study, the method employed for determining the optimum vertical stiffness of the sleeper pad installed under the bridge sleeper, which is utilized to adjust the rail height and absorb shock when the train passes when the interlocking sleeper fastener is applied, is presented. To determine the optimal vertical stiffness of the sleeper pad, related existing design codes are reviewed, and, running safety, ride comfort, track safety, and bridge vibration according to the change in the vertical stiffness of the sleeper pad are estimated via flexible multi-body dynamic analysis. The flexible multi-body dynamic analysis is performed using commercial programs ABAQUS and VI-Rail. The numerical analysis is conducted using the bridge model for a 30m-long plate girder bridge, and the response is calculated when passing ITX Saemaueul and KTX vehicles and freight wagon when the vertical stiffness of the sleeper pad is altered from 7.5 kN/mm to 240 kN/mm. The optimum stiffness of the sleeper pad is calculated as 200 kN/mm under the conditions of the track components applied to the numerical analysis.

Keywords : open-deck railway bridge, bridge sleeper, sleeper pad, running safety, multi flexible body dynamics

1. 서론

무도상교량은 레일과 침목만으로 궤도가 구성되며, 교량의 주부재인 거더 또는 세로보 위에 궤도가 직접 설치되어 열차 통과 시 발생하는 충격과 진동이 직접 전달되므로 강제로 건설되어 왔다. 무도상교량은 철도만의 교량 형식으로 건설비가 비교적 저렴하여 국내에서도 철도 건설 초기 많은 수가 건설되었으나, 근래에는 열차 통과 시의 발생하는 과도한 소음진동과 충격으로 인한 유지보수비용이 높아 건설이 기피되고 있다(Chae *et al.*, 2018; Janas, 2019). 현재 국내에서 공용 중인 약 440여개의 무도상교량의 대부분인 판형교는 유도상화사업을

통하여 신규 교량으로 교체되고 있으나, 높은 건설 비용으로 인하여 신속한 사업 진행이 어려우며, 도심지 판형교나 트리스코 등 다른 형식의 교량에 대해서는 적절한 교체 공법이 없는 상황이다(Chae *et al.*, 2019).

레일장대화공법은 과도한 소음, 진동 등 무도상교량의 문제를 경감할 수 있는 가장 경제적인 방법 중 하나이며, 최근 연동식 침목고정장치를 이용한 SSF(Stronger Sleeper Fastener) 공법이 제안된 바 있다(Choi *et al.*, 2020b). SSF 공법은 Fig. 1과 같은 연동식 침목고정장치를 이용하여 궤광의 좌굴을 방지하고 레일체결장치의 종저항력을 상회하도록 교량침목을 교량 주부재에 강결하여 레일체결장치의 종저항력을 기준으로 궤

†Corresponding author:

Tel: +82-31-460-0564; E-mail: schoi@ut.ac.kr

Received February 3 2022; Revised February 8 2022;

Accepted February 9 2022

© 2022 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

도를 설계하는 개념이다. 연동식 침목고정장치는 교량침목 하부에 레일 높이 조정 및 열차 통과 시의 충격 흡수를 목적으로 침목패드를 설치하고 있으나, 침목패드의 최적 강성 결정을 위한 체계에 대한 연구는 미흡한 상황이다. 이 연구에서는 기존 기준 검토 결과 및 유연다물체동적해석(Flexible Multibody Dynamic Analysis)을 이용한 차량-궤도-교량 상호작용 검토를 위하여 무도상교량의 교량침목용 탄성패드의 최적강성을 결정하는 과정을 제시하였다.

궤도에 사용되는 탄성패드는 궤도구조에 따라 차이가 있으나, 콘크리트궤도 또는 무도상교량에서 침목 하부에 설치되는 탄성패드는 레일패드와 함께 차량의 1차-2차 서스펜션(suspension)과 마찬가지로 이중 질량-스프링 시스템을 구성하게 되므로 침목패드의 강성은 이러한 특성을 고려하여 결정되어야 한다(Esveld, 2000). 또한 과도한 궤도 변위 또는 응력이나, 주행안전성 저하 발생이 없어야 한다.

국내의 경우 침목 하부에 설치되는 탄성재료와 관련해서는 자갈궤도의 방진침목(Bae *et al.*, 2015; Han and Kim, 2017; Um

et al., 2001; Yang *et al.*, 2000)에 대한 연구가 다수이며, 콘크리트궤도의 탄성재(Kong and Kim, 2007)에 대한 연구도 수행된 바 있다. 또한 무도상교량의 궤도를 프리캐스트 콘크리트 슬래브 패널구조로 교체 시 콘크리트 슬래브 패널과 교량 거더 사이에 방진패드를 설치하는 연구도 수행된 바 있다(Lee *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2019). 해외의 경우도 최근까지 주로 자갈궤도 방진침목(Johansson *et al.*, 2008; Ngamkhanong and Kaewunruen, 2020) 또는 콘크리트궤도 탄성재(Jiang and Gao, 2020; Peng *et al.*, 2020) 등에 대하여 연구가 수행된 바 있다. 무도상교량에 대한 최근의 연구는 더 이상 무도상교량이 건설되지 않는 추세에 따라 교량 또는 궤도의 개량이나 보강 등에 초점을 맞춰 진행되고 있으며, 레일 장대화에 대한 연구도 제한적으로 수행되고 있다(Choi *et al.*, 2020a; Lee *et al.*, 2021; Miri *et al.*, 2021).

차량이 교량 위를 주행할 때, 차량은 교량에 진동을 포함한 동적 효과를 발생시키며, 교량의 동적 거동은 차량의 주행안전성 및 승차감에 영향을 미친다. 이러한 동적거동을 보다 정확히 이해하기 위해서는 차량-궤도-교량 상호작용을 고려한 해석이 필요하며, 이를 기반으로 차량, 궤도 및 교량의 안전성 및 사용성 등의 성능을 검토하는 것이 요구된다. 무도상교량에 대한 차량-궤도-교량 상호작용 해석은 윤축, 대차, 차체와 스프링 및 감쇠기로 구성되는 서스펜션 등 여러 구성품으로 이루어진 차량, 차륜과 레일의 비선형 접촉을 고려한 상호작용, 이산적으로 분포된 탄성을 갖는 궤도, 비선형 특성이 고려된 궤도와 교량의 상호작용, 동적 거동이 적절하게 표현될 수 있는 교량 등에 대한 해석모델을 필요로 한다. 일반적으로 차량의 해석모델은 변형이 없는 강체로 고려되지만, 궤도와 교량의 경우 유연체 모델로 나타내기 때문에 해석 모델의 전체 시스템 행렬은 매우 크고 방정식을 풀어내기에는 많은 시간이 소요되는 단점이 있어 보통 2차원 연직 방향에 대한 해석이 다수를 이루어 왔다.

그러나 차량의 주행안전성 및 승차감, 궤도와 교량의 횡적인 거동 등을 나타내기 위해서는 3차원의 모델을 필요로 하며, 이는 2000년대 중반부터 현재까지 계속해서 연구되고 있는 분야이다(Hwang, 2019; RTRI, 2006; Zhai *et al.*, 2019). 이 연구에서는 상기 언급한 3차원의 차량-궤도-교량 상호작용 해석을 위하여 철도차량 전용 다물체동적해석 프로그램인 VI-Rail과 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하였다. 이러한 해석 기법은 탄성이 고려된 유연체와 다물체간의 상호작용을 고려할 수 있는 유연다물체동적해석으로 무도상교량과 궤도의 변위, 가속도 및 응력과 주행안전성 및 승차감 등의 결정을 위한 차량, 궤도 및 교량의 3차원 응답을 동시에 산정할 수 있는 장점이 있다.

이 연구에서는 기존 관련 기준 검토를 통하여 성능 요건을

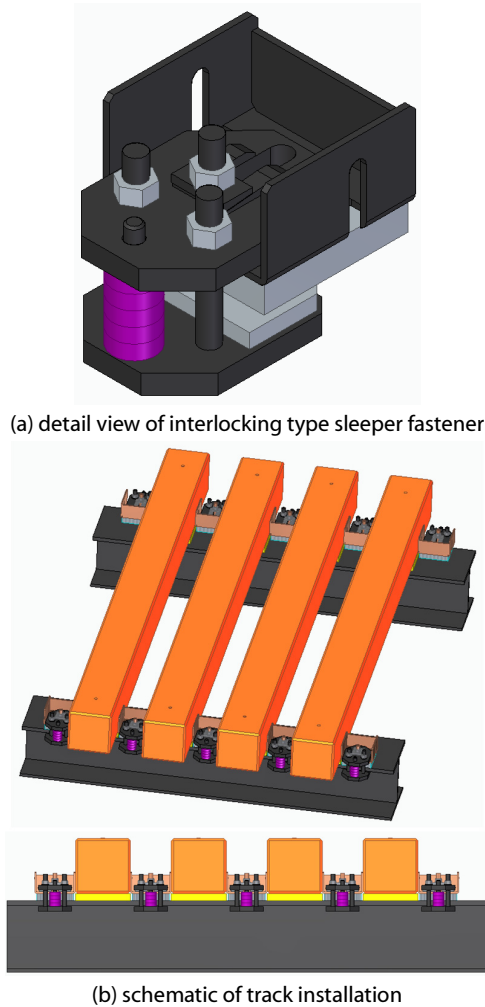


Fig. 1 Interlocking type sleeper fastener

도출하고, 상기 기술된 유연다물체동적해석을 이용하여 연동식 침목고정장치를 이용한 레일 장대화 시 교량침목용 탄성패드의 최적 강성을 결정하였다.

2. 궤도 및 교량의 성능 요건

2.1 주행 안전성

철도차량 안전기준에 관한 규칙(MOLIT, 2013)은 UIC 518 (2009), 일본 기준 등을 참고하여 주행 안전성검토 시 정적운중의 최대값, 운중감소량, 횡압, 탈선계수 등을 고려하도록 하고 있으며, 이중 일반적으로 운중감소량, 횡압 및 탈선계수로 평가한다. 철도차량 안전기준에 관한 규칙은 운중감소량의 허용값을 공차중량상태에서 동일 차축 양쪽 차륜 평균치의 최대 60%, 운행상태에서 빈도누적확률이 100%인 경우 50%까지, 0.1%인 경우에는 최대 80%로 제시하고 있다. 횡압의 허용값은 축중을 이용하여 산정하며, 차량의 종류에 따라 차별화된 값을 적용하도록 하고 있다. 탈선계수의 허용값은 1개의 차륜에서 빈도누적확률이 100%인 경우 0.8, 0.1%인 경우 1.1이며, 어떠한 경우에도 1.2 이하로 제시하고 있다.

일본 기준(RTRI, 2006)은 차량과 구조물 전체를 모델링하여 동적상호작용해석을 수행하고 구조물의 변위에 대하여 궤도 변위의 영향을 고려한 설계 응답 값을 이용하는 경우 주행 안전성 확보를 위한 허용 값은 탈선계수 0.8, 운중감소량 0.8로 제시하고 있다. 궤도 변위의 영향을 고려하지 않은 설계 응답 값을 이용하는 경우는 탈선계수 0.30, 운중감소량 0.37, 횡압 40kN으로 제시하고 있다.

2.2 승차감

차량의 승차감은 일정 시간 이상 승차 시의 승차감인 구간 승차감과 특정 지점에서의 순간적인 승차감인 지점 승차감으로 구분할 수 있으며, 대부분의 교량 구간은 지점 승차감에 해당한다. 순간 승차감의 경우 일본 기준(RTRI, 2006)과 유럽기준(CEN, 2002)을 준용할 수 있다. 일본 기준은 차량과 구조물 전체를 모델링하여 동적상호작용해석에 의하여 조사하는 경우 설계 한계값은 ‘승차감 양호’에 해당하는 승차감 계수 1.5를 사용하여 다음 식 (1)과 같이 차량 연직가속도로 제시하고 있다.

$$\begin{cases} \alpha_{N1} = 2.0 & f < 1.5 \\ \alpha_{N1} = 3.0/f & 1.5 \leq f < 6.0 \\ \alpha_{N1} = 0.5 & 6.0 \leq f \leq 20.0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서, α_{N1} 은 차량 연직방향 진동가속도의 설계 한계값(m/s^2), f 는 연직가속도의 진동수(Hz)이다. 교량을 통과하는 차량의 연직가속도는 차량의 동적특성을 포함한 다양한 요인에 의한 복합적인 파형으로 나타나지만 차량의 현가장치에 의한 1Hz 내외의 주파수가 지배하므로(Fan and Wu, 2006; Zhou *et al.*, 2009) 차량 연직방향 진동가속도의 설계한계값은 $2.0m/s^2$ 로 적용할 수 있다. 궤도틀림과의 경합 고려 시는 통상적으로 70% 수준인 $1.4m/s^2$ 를 적용할 수 있다.

유럽 기준(CEN, 2002)은 철도차량이 교량 위를 주행할 때 차량의 연직방향 진동가속도를 이용한 승차감 판단 기준을 다음과 같이 제시하고 있다: ① 차량의 연직방향 가속도가 $1m/s^2$ 이하일 때, “매우 좋음(Very Good)”; ② 차량의 연직방향 가속도가 $1m/s^2$ 보다 크고 $1.3m/s^2$ 이하일 때, “좋음(Good)”; ③ 차량의 연직방향 가속도가 $1.3m/s^2$ 보다 크고 $2.0m/s^2$ 이하일 때, “허용가능(Acceptable)”.

2.3 궤도

KR C-14060(KR, 2019)은 궤도구조 일반에 대하여 현차주행 성능시험 시 정적으로는 레일 및 침목의 처짐, 동적으로는 운중 및 횡압과 레일, 레일체결장치 등 구성요소 응력, 레일의 처짐 및 좌우 변위, 슬래브 처짐 등을 검토하도록 하고 있다. 참고로 궤도 틀림과의 경합과 안전율을 고려하여 아래 제시된 한계값의 70% 수준을 취하기도 한다.

2.3.1 레일응력

KR C-14060은 피로를 고려한 장대레일의 허용응력으로 130MPa, KR C-08080(KR, 2017)은 곡선반경 1,500m 이상 교량구간에서의 허용부가응력으로 압축 72MPa, 인장 92MPa를 제시하고 있다. 일본 기준(RTRI, 2006)은 무보수로 사용 가능한 상태에서의 레일응력 한계값을 100MPa로 제시하고 있다.

2.3.2 레일처짐

일본 기준(RTRI, 2006)은 차량과 구조물 전체를 모델링하여 동적상호작용해석을 수행하는 경우 일반철도 교량구간 레일의 처짐 한계값을 3.0mm으로 제시하고 있다.

2.3.3 레일 상향력

레일 상향력에 대한 제한은 레일패드 또는 침목패드의 이탈이나 이탈을 방지하기 위하여 필요하며, 각각 레일체결장치 및 침목고정장치의 초기 체결력 이하로 유지되어야 한다. KR C-14060(KR, 2019)은 레일체결장치의 최소 체결력으로 16kN을 제시하고 있다. 연동식 침목고정장치의 초기 체결력은 40kN이다.

2.4 교량

침목패드의 주요 역할 중 하나인 충격 흡수 능력을 확인하기 위하여 교량의 연직가속도에 대한 검토를 포함하였다. 주행안전성과 관련한 교량의 가속도와 관련해서는 KR C-08070의 검토기준이 있으며, 교량 상판의 연직가속도를 자갈궤도의 경우 0.35g, 콘크리트궤도의 경우 0.50g로 제한하고 있다. 교량 상판의 연직가속도 제한은 궤도 외에도 교좌장치와 교량 하부구조 등 교량에 미치는 부정적인 효과를 저감하기 위한 목적이 있으며, 이 연구에서는 콘크리트궤도의 경우인 0.50g를 기준으로 검토를 수행하였다.

3. 수치해석

2장에 제시된 교량침목패드에 대한 성능요건의 적절성을 검토하기 위하여 유한요소 상용 프로그램 ABAQUS와 철도차량전용 다물체동역학 프로그램인 VI-Rail을 이용하여 유연다물체동적해석을 수행하였다. 해석 대상 교량은 국내 공용 중인 판형교 중 최장 시간인 30.0m 상로교를 검토하였다. 교량은 ABAQUS를 이용하여 Fig. 2와 같이 모델링하였으며, 교량 전후 구간 200m는 탄성이 없는 강체궤도로 모델링하였다. 교량에 대한 고유치해석을 통하여 모달데이터를 산정하고, 요소모드합성기법 중 하나인 Craig-Bampton 기법을 이용하여 교량의 영향을 고려하였다. 참고로 유연다물체동적해석에 사용한 모드는 질량참여율을 고려하여 20개의 전체모드와 199개의 국부모드를 포함한 총 219개이다. 궤도의 구성은 KR60 레일과 최근 개발된 합성수지침목 및 연동식 침목고정장치이며, 침목의 배치정수는 400mm이다. 연동식 침목고정장치의 종방향 및 횡방향 강성은 장치에 대한 실험 결과를 이용하였다(Fig. 3). 레일, 침목 및 레일체결장치의 역학적 특성은 Table 1에 정리하였다.

교량 주거더의 지지조건은 단순지지이며, 주거더는 Plate 요소, 브레이싱과 교량침목 및 레일은 Beam 요소, 레일체결장치와 교량침목패드는 스프링 요소로 각각 모델링하였다. 교량

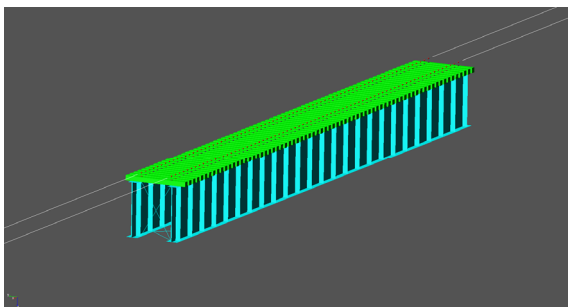


Fig. 2 Numerical analysis model for a 30m bridge

주거더의 제원은 Table 2에 제시하였다. 참고로 Table 2의 치수 명칭은 Fig. 4에 제시되어 있다. 주거더 이외 다른 교량 부재들의 제원은 철도청 표준도를 참고하였다.

차량의 모델링은 ITX 새마을, KTX 및 화차 1량씩만을 고려하였으며(Molatefi *et al.*, 2006; Park *et al.*, 1998), 차량은 강체로 모델링하였다. 차량을 구성하는 서스펜션, 탄성조인트, 범프스톱 등은 스프링과 댐퍼요소를 활용하였다. 차량과 레일의

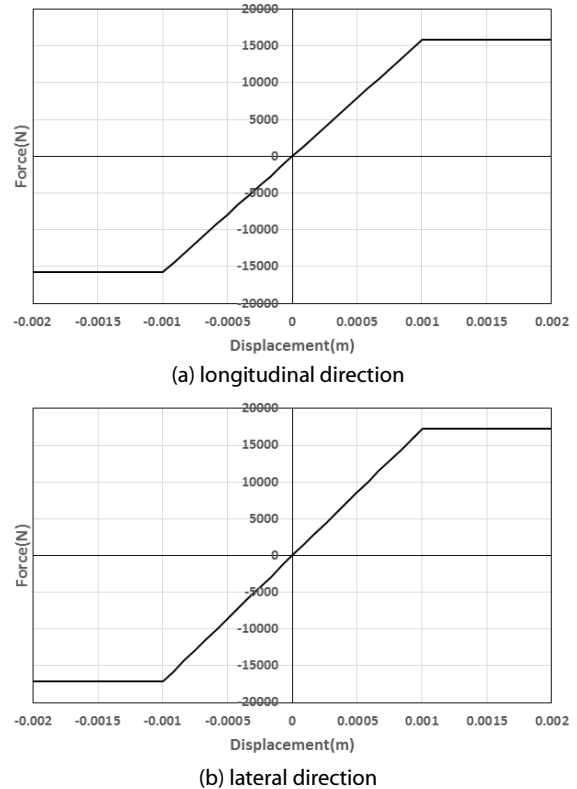


Fig. 3 Longitudinal and lateral stiffnesses of the sleeper fastener

Table 1 Properties of track elements

elements	property	unit	value
rail	area	mm ²	7.75×10 ³
	moment of inertia	mm ⁴	3.09×10 ⁷
sleeper	area	mm ²	5.29×10 ⁵
	moment of inertia	mm ⁴	2.33×10 ⁸
	elastic modulus	GPa	7.89×10 ³
rail fastener	stiffness	x	1.4×10 ⁷
		y	2.6×10 ⁷
		z	3.5×10 ⁷

Table 2 Dimensions of bridge girders

span length (m)	w (m)	h _w (m)	t _w (m)	b _f (mm)		t _f (mm)	
				b _{f,u}	b _{f,b}	t _{f,u}	t _{f,b}
9.0	1.6	1,170	10	250	250	30	30
15.2	1.8	1,629	12	360	360	34	34
30.0	2.0	2,548	12	480	560	38	40

접촉 알고리즘은 Kalker 이론을 적용하였다.

궤도와 교량의 동적응답은 ABAQUS와 VI-Rail을 이용한 유연다물체동적해석을 통하여 산정하였다. 차량 특성과 무도상교량 구간임을 고려하여 통과속도는 ITX 새마을 50km/h ~

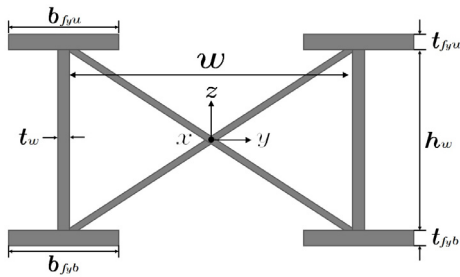
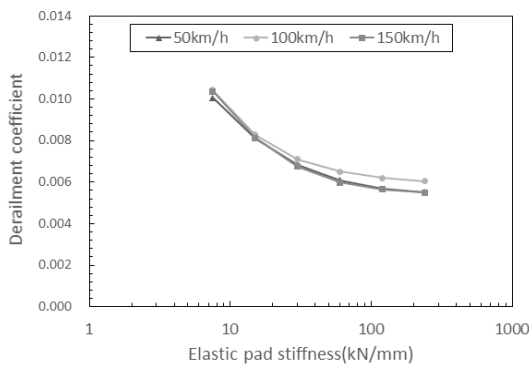
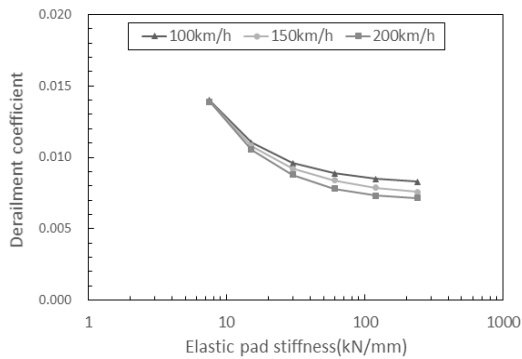


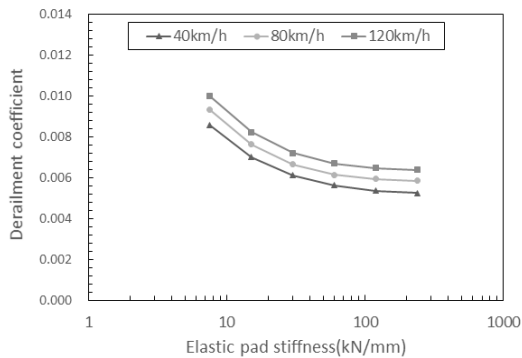
Fig. 4 Sectional dimensions of bridge models



(a) ITX Saemaeul



(b) KTX

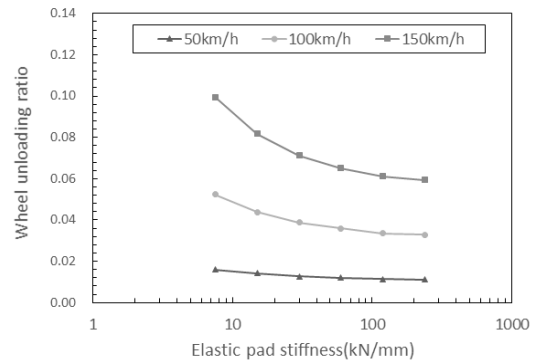


(c) freight wagon

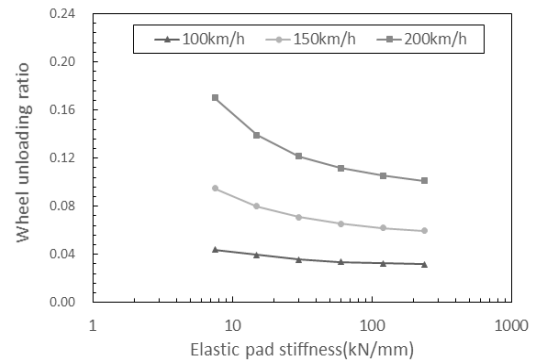
Fig. 5 Derailment coefficient

150km/h, KTX 100km/h ~ 200km/h, 화차 40km/h ~ 120km/h를 검토하였다. 침목패드의 연직강성의 검토 범위는 KR C-14030 (KR, 2016)에 제시된 일반적인 자갈도상의 스프링정수(200kN/mm), 일본 기준의 궤도 스프링정수(30kN/mm ~ 120kN/mm) 등을 고려하여 7.5kN/mm ~ 240kN/mm으로 하였다. 궤도 평면선형은 직선($R = \infty$)만을 고려하였다. 유연다물체동적해석을 통하여 산정한 결과는 Fig. 5 ~ Fig. 11에 정리하였다. 참고로 그림에 제시된 해석 결과는 열차 통과 시 교량 구간에 발생하는 최대값을 취한 값이다.

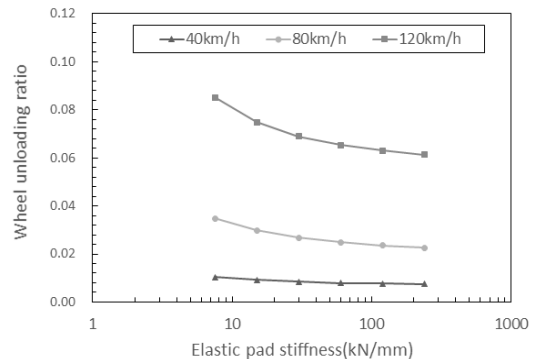
Fig. 5에서 탈선계수는 KTX가 가장 크게 나타났으며, ITX 새마을과 화차는 유사한 값을 보였다. 침목패드의 강성이 커짐에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 모든 차종 및 속도에



(a) ITX Saemaeul



(b) KTX



(c) freight wagon

Fig. 6 Wheel unloading Ratio

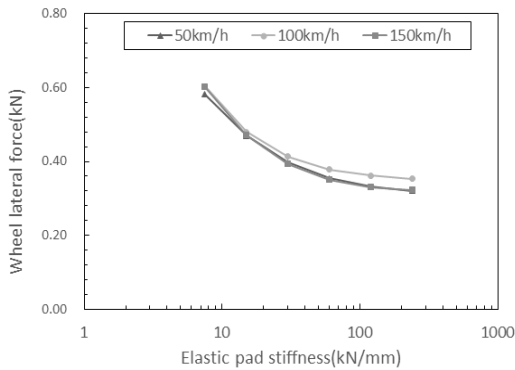
서 강성 200kN/mm 이상에서 일정한 값으로 수렴하는 양상을 보이고 있다. 증속에 따라 증가하나, 변동은 크지 않은 것으로 나타났다. 참고로 모든 경우에서 탈선계수는 궤도변위의 영향을 고려하지 않는 경우의 한계값(0.30) 보다 훨씬 작은 값이 나타났다.

Fig. 6에서 윤중감소량은 KTX가 가장 크게 나타났으며, 화차가 가장 작은 값을 보였다. 침목패드의 강성이 커짐에 따라 감소하나, 탈선계수와 마찬가지로 모든 차종 및 속도에서 강성 200kN/mm 이상에서 일정한 값으로 수렴하는 양상을 보였다. 증속에 따라 증가하며, 탈선계수에 비하여 변동폭이 큰 것으로 나타났다. 참고로 모든 경우에서 윤중감소량은 궤도변위의 영향을 고려하지 않는 경우의 한계값(0.37) 보다 훨씬 작은

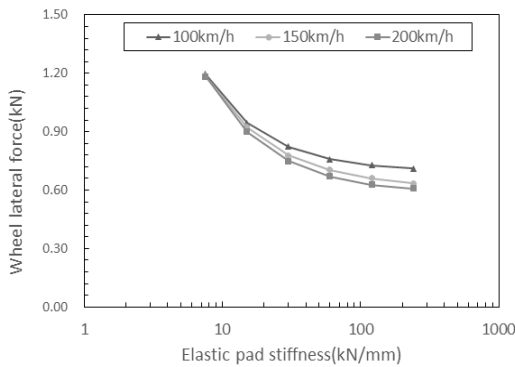
값이 나타났다.

Fig. 7에서 횡압은 KTX가 가장 크게 나타났으며, 화차가 가장 작은 값을 보였다. 침목패드의 강성이 커짐에 따라 감소하는 것으로 나타났으며, 탈선계수 및 윤중감소량과 마찬가지로 모든 차종 및 속도에서 강성 200kN/mm 이상에서 일정한 값으로 수렴하는 추세를 나타내고 있다. 증속에 따라 증가하나, 변동은 크지 않은 것으로 나타났다. 참고로 모든 경우에서 횡압은 궤도변위의 영향을 고려하지 않는 경우의 한계값(40kN) 보다 상당히 작은 값이 나타났다.

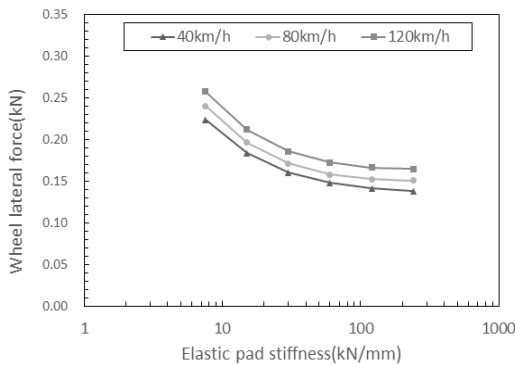
Fig. 8에서 차량의 연직가속도는 KTX가 가장 크게 나타났으며, ITX 새마을이 가장 작은 값을 보였다. 침목패드의 강성이 커짐에 따라 감소하며, 탈선계수 및 윤중감소량과 마찬가지로



(a) ITX Saemaeul

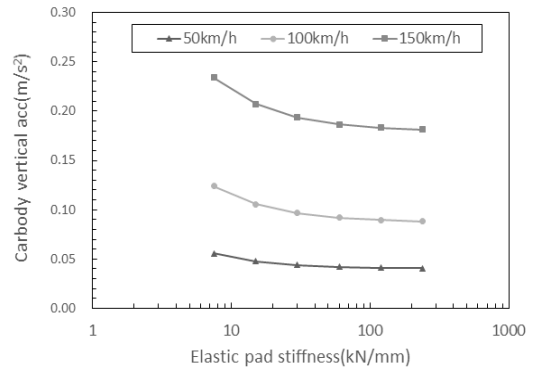


(b) KTX

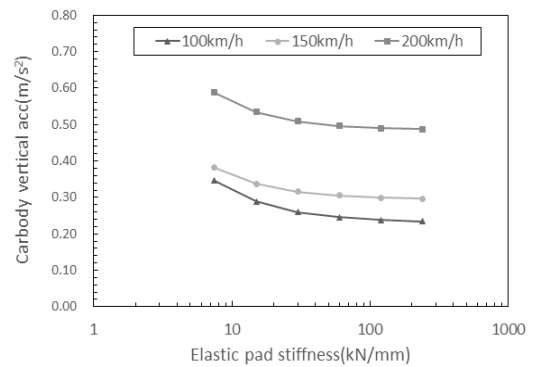


(c) freight wagon

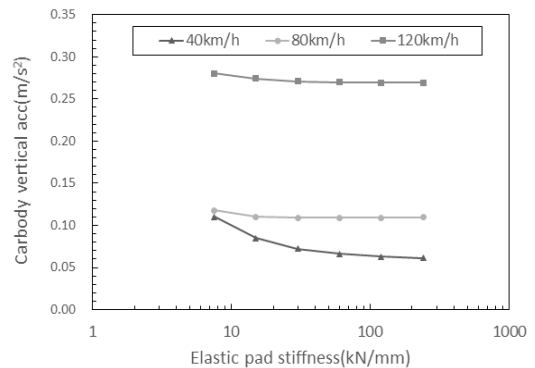
Fig. 7 Wheel lateral force



(a) ITX Saemaeul



(b) KTX



(c) freight wagon

Fig. 8 Carbody vertical acceleration

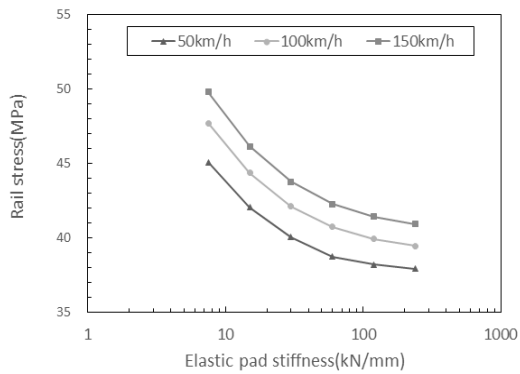
지로 모든 차종 및 속도에서 강성 200kN/mm 이상에서 일정한 값으로 수렴하는 양상을 보였다. 증속에 따라 증가하나, 속도 변화에 따른 변동폭이 큰 것으로 나타났다. 참고로 모든 경우에서 일본기준 한계값(2.0m/s²) 보다 훨씬 작은 값이 나타났으며 유럽기준으로는 모두 승차감이 “매우 좋음”에 해당한다.

Fig. 9에서 레일 응력은 KTX가 가장 크게 나타났으며, 화차가 가장 작은 값을 보였다. 또한, 침목패드의 강성이 커짐에 따라 감소하며, 모든 차종 및 속도에서 강성 200kN/mm 이상에서 변동량이 크게 감소하는 양상을 보였다. 증속에 따라 증가하며, 속도 변화에 따른 변동이 일정하게 나타났다. 모든 경우에서 검토된 속도 범위에서는 한계값(100MPa) 보다 작았으나, 침목패드의 강성이 작아짐에 따라 급속히 증가하는 추세를

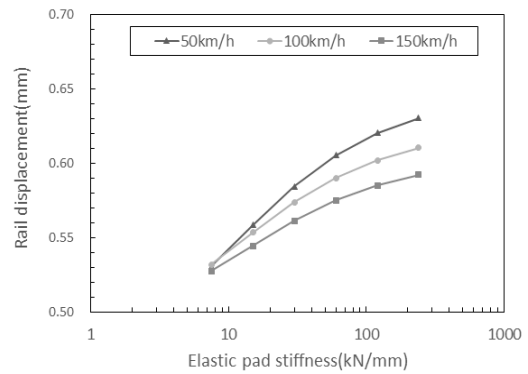
보이고 있다.

Fig. 10과 같이 레일 변위는 침목패드 강성이 커짐에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 차량 종별로는 KTX가 가장 크며, 화차가 가장 낮게 나타났다. 변동량은 침목패드 강성이 커짐에 따라 감소하며, 검토된 차량 종별 및 속도 범위에서는 침목패드의 강성 변화에 관계없이 허용값(3.0mm)을 만족할 것으로 판단된다.

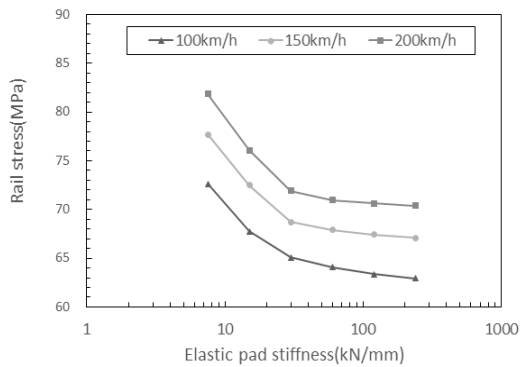
Fig. 11에서 레일 상향력은 모두 작은 값으로 산정되었으며, 검토 속도범위에서 침목패드 강성 변화를 고려해도 3kN 이하로 나타날 것으로 판단된다. ITX 새마을과 KTX는 침목패드 강성이 커짐에 따라 레일 상향력이 증가하나, 화차의 경우는 큰 변화가 나타나지 않았다.



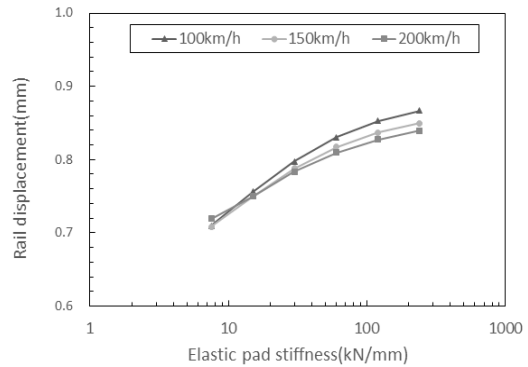
(a) ITX Saemaeul



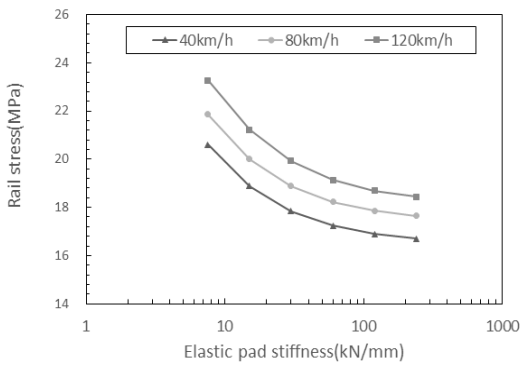
(a) ITX Saemaeul



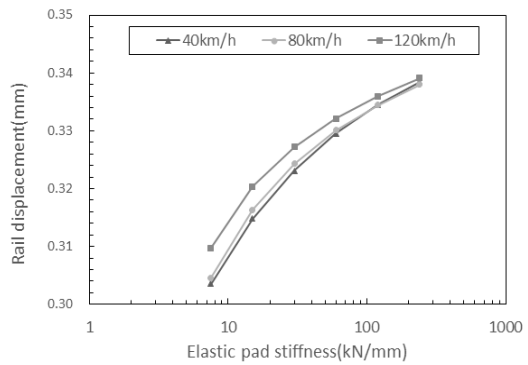
(b) KTX



(b) KTX



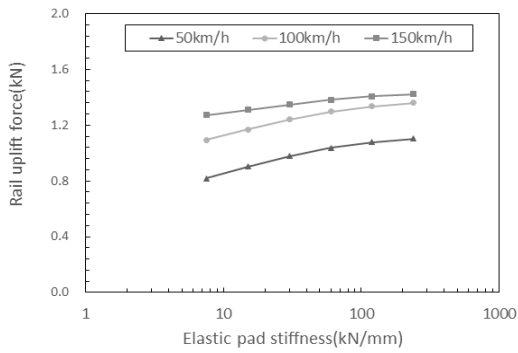
(c) freight wagon



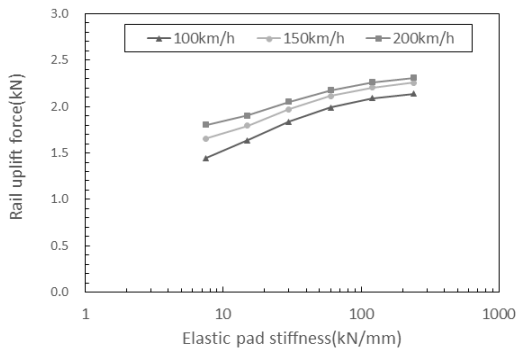
(c) freight wagon

Fig. 9 Rail stress

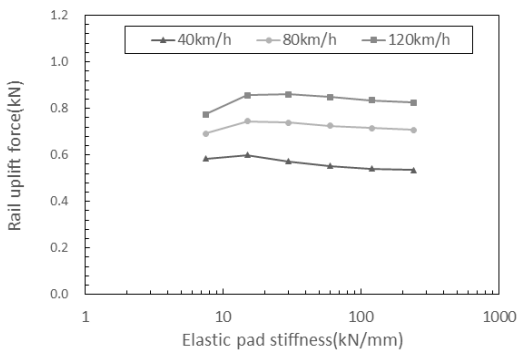
Fig. 10 Rail displacement



(a) ITX Saemaedul

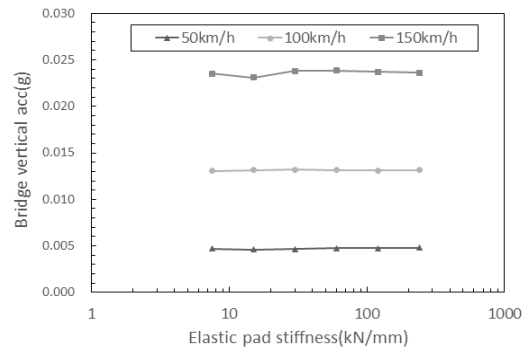


(b) KTX

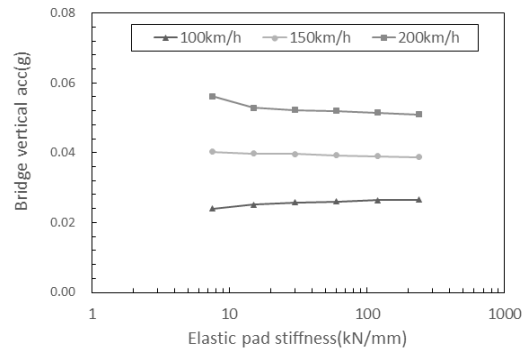


(c) freight wagon

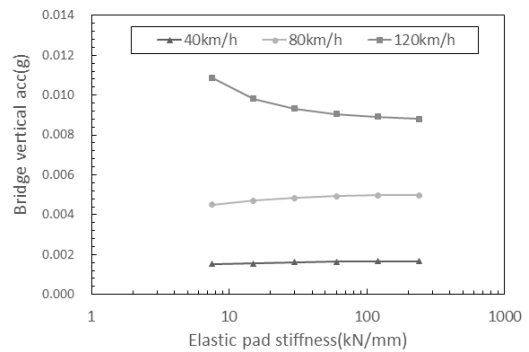
Fig. 11 Rail uplift force



(a) ITX Saemaedul



(b) KTX



(c) freight wagon

Fig. 12 Bridge girder vertical acceleration

Fig. 12에서 교량 거더의 가속도는 모든 차종에서 허용값 (0.50g) 보다 충분히 작은 값이 나타났다. ITX 새마을의 경우 모든 속도, KTX와 화차는 150km/h 및 80km/h 이하 속도에서 침목패드의 강성에 따른 변화의 영향이 나타나지 않았으나, KTX 200km/h와 화차 120km/h에서는 침목패드 강성이 커짐에 따라 감소하는 추세를 보이며, 강성 200kN/mm 이상에서는 변동이 매우 작은 것으로 나타났다.

4. 침목패드 연직강성

무도상교량 침목 하부에 설치되는 탄성패드에 대하여 2장 및 3장에 각각 제시된 성능요건과 수치해석 결과를 통하여 다음과 같이 침목패드의 연직강성에 대한 검토 결과를 도출하였다.

- 수치해석 결과 주행안전성, 승차감, 레일 응력, 변위 및 상향력, 교량 진동 등 검토된 항목들 모두에 대하여 기준 값 보다 충분히 작은 값으로 산정되었으나, 검토에 적용된 차량 종별에 따라 적지 않은 차이를 보이고 있다.
- 탈선계수와 운중감소량 변화를 통하여 주행안전성을 검토한 결과 침목패드의 강성이 증가함에 따라 높아지며, 200kN/mm 이상에서는 일정한 값으로 수렴하는 추세이다.
- 차량의 연직가속도 변화를 통하여 승차감을 검토한 결과 주행안전성과 마찬가지로 침목패드의 강성이 증가함에 따라 높아지며, 200kN/mm 이상에서는 수렴하는 추세가 나타났다.
- 레일의 경우 응력은 주행안전성 및 승차감 관련 항목들과 마찬가지로 200kN/mm 이상에서 수렴하는 양상을 나

타냈으며, 변위와 상향력은 침목패드 강성이 커짐에 따라 증가하나 변동량은 감소하는 추세를 보였다.

- 교량 거더의 가속도는 낮은 속도 대역에서는 침목패드 강성의 영향이 나타나지 않았으나, 일정 속도 이상에서는 침목패드 강성이 커짐에 따라 감소하는 양상을 나타냈으며 200kN/mm 이상에서는 변동이 매우 작은 것으로 나타났다.

5. 결론

이 연구에서는 주행안전성 및 승차감, 궤도, 교량 진동 등에 대한 기존 성능 요건을 검토하고, 유연다물체동적해석을 통하여 연동식 침목고정장치를 이용한 무도상교량 레일 장대화 시 교량침목용 탄성패드의 최적 강성 결정 과정과 검토 결과를 제시하였다. 관련 기준 검토 및 수치해석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 수치해석 결과 침목패드 강성 검토 범위인 7.5kN/mm ~ 240kN/mm에서 주행안전성, 승차감, 궤도의 안전성 및 교량 진동 모두 기준값 보다 충분히 작은 값이 산정되었다.
- 2) 침목패드 강성이 커짐에 따라 탈선계수, 운중감소량, 차량 연직가속도, 레일응력 및 교량 연직가속도는 감소, 레일 변위 및 상향력은 증가하는 추세를 나타냈다.
- 3) 주행안전성 및 승차감 관련 지표와 레일 응력 및 교량 연직가속도는 침목패드 강성이 200kN/mm 이상에서 수렴하는 양상을 나타냈으며, 레일 변위 및 상향력의 크기와 변화 추세를 고려할 때 이 연구에서 고려한 궤도재료의 구성에서 침목패드의 최적강성은 200kN/mm 정도가 적절할 것으로 판단된다.
- 4) 이 연구에 제시된 침목패드의 연직강성은 궤도재료의 구성이 변화할 경우 재산정이 필요하며, 향후 궤도틀림과의 경향 및 곡선궤도에 대한 검토 과정을 포함한 추가 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 국토교통과학기술진흥원 철도기술연구사업(20RTRP-B137951-04)과 2020년 한국교통대학교의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Bae, Y.-H., Hwang, S.-H., Kim, E. (2015) Analysis of Draft European Standard on Under Sleepers Pads (USP) in Ballast

Track, Proc. Spring Conference, The Korean Society for Railway, KSR2015S289.

CEN (European Committee for Standardization). (2002) Eurocode: Basis of Structural Design, EN 1990:2002(E), Brussels, Belgium.

Chae, S., Yoo, Y., Lim, C., Choi, S. (2019) Applicability Analysis of a Continuous Welded Rail Construction Method on an Open Deck Steel Railway Bridge Using Displacement Control, *J. Korean Soc. Railw.*, 22(2), pp.158~168.

Chae, S., Yoo, Y., Park, Y., Choi, S. (2018) Dynamic Response Analysis of a Ballastless Steel Plate, *J. Korean Soc. Railw.*, 21(11), pp.1~12.

Choi, S., Chae, S., Kim, K., Back, I.-C. (2020a) Running Safety Analysis Considering Track Irregularities on an Open-deck Steel Plate Girder Bridge Using Finite Element Multibody Dynamics, *Dyn. Civil Struct.*, 2, pp.213~216.

Choi, S., Jang, S.Y., Lim, N.-H., Moon, J. (2020b) Technology for Constructing Continuous Welded Rail on an Open Deck Steel Railway Bridge, *Railw. J.*, 23(5), pp.8~12.

Esveld, C. (2000) Modern Railway Track, MRT-Productions.

Fan, Y.-T., Wu, W.-F. (2006) Dynamic Analysis and Ride Quality Evaluation of Railway Vehicles-Numerical Simulation and Field Test Verification, *J. Mech.*, 22(1), pp.1~11.

Han, W.-S., Kim, Y.-T. (2017) Evaluation of Track Support Stiffness of Ballasted Track according to Applying De-Bonded Type of Under Sleeper Pad, *J. Korean Soc. Urban Railw.*, 5(1), pp.761~770.

Hwang, S.-H. (2019) Overview of Train-Track Interaction and Some Examples of Its Analyses, *J. Comput. Struct. Eng. inst. Korea*, 32(1), pp.5~14.

Janas, L. (2019) Railway Plate Girder Bridges as a Source of Noise Examples Selected, *IOP Conf. Ser., Mater. Sci. & Eng.*, 471, 052014.

Jiang, H., Gao, L. (2020) Analysis of the Vibration Characteristics of Ballastless Track on Bridges Using an Energy Method, *Appl. Sci.*, 10, 2289.

Johansson, A., Nielsen, J.C.O., Bolmsvik, R., Karlstrom, A., Lunden, R. (2008) Under Sleeper Pads - Influence on Dynamic Train-Track Interaction, *Wear*, 265, pp.1479~1487.

Kong, S.-Y., Kim, S.-J. (2007) A Study on the Optimum Stiffness of Concrete Slab Track, Proc. Spring Conference, The Korean Society for Railway, pp.1085~1090.

KR (Korea National Railway) (2016) KR C-14030: Ballast Track Structure.

KR (Korea National Railway) (2017) KR C-18080: Track-Bridge Interaction Analysis in Longitudinal Direction.

- KR (Korea National Railway)** (2019) KR C-14060: Track Material Design.
- Lee, H.-D., Choi, S., Moon, J.** (2021) Lateral Resistance Requirement of Girder-Sleeper Fastener for CWR Track on an Open-Deck Steel Plate Girder Bridge, *Appl. Sci.*, 11(15), 6681.
- Lee, S.Y., Eom, M., Oh, S.J., Park, Y.G.** (2006) A Behavior Analysis of Railway Steel Plate Girder Bridge in the Applying Resilient Panel Track System, *Proc. Fall Conf., The Korean Society for Railway*, pp.18~27.
- Miri, A., Thambiratnam, D.P., Chan, T.** (2021) Thermal Challenges of Replacing Jointed Rails with CWR on Steel Railway Bridges, *Journal of Constructional Steel Research*, 121, 106627.
- Molatefi, H., Hecht, M., Kadivar, M.H.** (2006) Critical Speed and Limit Cycles in the Empty Y25-Freight Wagon, *J. Rail & Rapid Transit*, 220(4), pp.347~359.
- MOLIT (Ministry of Land, Infrastructure and Transport)** (2013) Regulation of Safety Standards for a Railway Vehicle.
- Ngamkhanong, C., Kaewunruen, S.** (2020) Effects of Under Sleeper Pads on Dynamic Responses of Railway Prestressed Concrete Sleepers Subjected to High Intensity Impact Loads, *Eng. Struct.*, 214, 110604.
- Park, C.-K., Kim, K.-H., Hong, J.-W., Shim, T.-W.** (1998) Analysis of the Dynamic Stability for the K-TGV Using Vampire Program, *Proc. Fall Conf., The Korean Society for Railway*, pp.510~516.
- Park, J.-G., Koh, H.-I., Kang, Y.-S., Jeong, Y.-D., Yi, S.-T.** (2019) Research on Vibration and Noise Characteristics of Steel Plate Girder Bridge with Embedded Rail Track System, *J. Korea Inst. Struct. Maint. & Insp.*, 23(1), pp.94~101.
- Peng, Y., Sheng, X., Cheng, G.** (2020) Modelling Track and Ground Vibrations for a Slab Ballastless Track as an Infinitely Long Periodic Structure Subject to a Moving Marmonic Load, *J. Sound & Vib.*, 489, 115760.
- RTRI (Railway Technical Research Institute)** (2006) Design Standard and Commentary for Railway Structures - Displacement Limits.
- UIC** (2009) *UIC Code 518 OR: Testing and Approval of Railway Vehicles from the Point of View of Their Dynamic Behaviour - Safety - Track Fatigue - Running Behavior*, 4th Ed.
- Um, J.-H., Yang, S.-C., Kang, Y.-S.** (2001) Development of Resilient Sleeper for Reduction of Sound and Vibration in High Speed Railways, *Proc. Annual Conf., Korean Society for Noise and Vibration Engineering (KSNVE)*, pp.1242~1248.
- Yang, S.-C., Noh, H.-C., Kang, Y.-S., Lee, J.-D.** (2000) Development of Sleeper for High Speed Railway, *Proc. Fall Conf., The Korean Society for Railway*, pp.311~318.
- Zhai, W., Han, Z., Chen, Z., Ling, L., Zhu, S.** (2019) Train-Track-Bridge Dynamic Interaction: a State-of-the-Art Review, *Int. J. Veh. Mech. & Mobil.*, 57(7), pp.984~1027.
- Zhou, J., Goodall, R., Ren, L., Zhang, H.** (2009) Influences of Car Body Vertical Flexibility on Ride Quality of Passenger Railway Vehicles, *J. Rail & Rapid Transit*, 223(5), pp.461~471.

요 지

레일장대화는 무도상교량의 소음, 진동, 충격 등의 문제점을 해결할 수 있는 경제적인 방안 중 하나이며, 최근 연동식 침목고정장치를 이용한 SSF 공법이 개발된 바 있다. 이 연구에서는 연동식 침목고정장치 적용 시 레일 높이 조정 및 열차 통과 시의 충격 흡수를 목적으로 교량침목 하부에 삽입되는 침목패드의 최적 연직강성을 결정하는 과정을 제시하였다. 침목패드의 최적 연직강성 결정을 위하여 관련 기존 기준을 검토하였으며, 유연다물체동적해석을 통하여 침목패드의 연직강성 변화에 따른 주행안전성, 승차감 및 궤도의 안전성에 대한 지표들과 교량 응답 변화를 검토하였다. 유연다물체동적해석은 상용프로그램인 ABAQUS와 VI-Rail을 이용하여 수행하였다. 수치해석은 30m 상로관형교에 대한 교량모델을 이용하여 수행하였으며, 침목패드의 연직강성이 7.5kN/mm ~ 240kN/mm로 변화할 때 ITX 새마을, KTX 및 화차 통과 시의 응답을 산정하였다. 수치해석에 적용된 궤도구성품 조건에서 침목패드의 최적 강성은 100kN/mm로 산정되었다.

핵심용어 : 무도상교량, 교량침목, 침목패드, 주행안전성, 유연다물체동역학