교량 상 콘크리트궤도 종방향 저항력의 확률론적 산정

Probabilistic Estimation of Longitudinal Resistance of Concrete Tracks on Bridge

이진옥* · 윤경민** · 김정중*** · 민경환**** · 임남형*****

Lee, Chinok*, Yun, Kyungmin**, Kim, Jungjoong***, Min, Kyunghwan****, and Lim, Namhyoung*****

Abstract

The continuous welded rails (CWR) installed on railway bridges should be checked for the effects of track-bridge interactions. In the case of a concrete track on a bridge, the longitudinal resistance of the track is determined by the longitudinal resistance of the rail fastening system, and the safety of track is assessed by using the longitudinal resistance given in KR C-08080 (track-bridge longitudinal interaction). However, a very conservative design is derived when using the longitudinal resistance values presented in the KR code. Therefore, a longitudinal resistance considering the type of fastening system actually installed should be proposed. In this study, the results of the laboratory tests of the rail fastening system were analyzed and the longitudinal resistance was determined to enable the economic and safe side design, reflecting the statistical characteristics of the resistance.

Key words : Track-Bridge Interaction, Longitudinal Resistance, Concrete Track, Rail Fastening System

요 지

교량상에 설치되는 장대레일은 궤도-교량 상호작용에 의한 영향을 검토해야 한다. 교량상 콘크리트궤도의 경우 레일 체결장치의 종방향 저항력에 의하여 궤도 종방향 저항력이 결정되며, KR C-08080(궤도-교량 종방향 상호작용)에 제시된 값을 이용하여 궤도의 안전성 검토를 수행한다. 그러나 KR code에서 제시된 궤도 종방향 저항력을 사용할 경우 매우 보수적인 설계가 이루어진다. 따라서 실제 부설되는 체결장치의 종류를 고려한 저항력이 제안되어야 한다. 본 연구에서는 레일 체결장치의 실내 실험을 수행하여 결과를 분석하였으며, 저항력의 통계적 특성을 반영하여 경제적이고 안전측 설계를 가능케 하는 종방향 저항력을 결정하였다.

핵심용어 : 궤도-교량 상호작용, 종방향 저항력, 콘크리트궤도, 레일 체결장치

1. 서 론

교량상에 부설된 장대레일(Continuous Welded Rail, CWR)은 궤도-교량 상호작용(track-bridge interaction) 때문에 토공 구간에서 부설된 장대레일과 달리 레일에 부가적으로 응력 및

변위가 발생한다. 따라서 교량상에 부설되는 궤도는 교량과의 상호작용의 영향을 최소화하여 궤도와 주행 열차의 안전성을 추가로 확보하여야 한다. 궤도-교량 상호작용 때문에 발생하는 문제들을 예방하기 위하여 KR C-08080 (궤도-교량 종방향 상호작용)(KR, 2017)에서는 안전성 검토를 위한 해석모델

*정회원, 충남대학교 토목공학과 교수(E-mail: colee@cnu.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

**정회원, 충남대학교 철도연구소 박사후 연구원

Member, Postdoctoral researcher, Rail Research Institute, Chungnam National University

***정회원, 경남대학교 토목공학과 교수

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Kyungnam University

****정회원, 충남대학교 철도연구소 연구교수

Member, Research professor, Rail Research Institute, Chungnam National University

*****교신저자, 정회원, 충남대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-42-821-7005, Fax: +82-42-821-8867, E-mail: nhrim@cnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

제작방법과 하중 대한 검토 방법, 설계 기준 등을 제시하여 레일의 응력과 변위를 허용치 내에 들어오도록 하고 있다. 궤도-교량 상호작용에 따른 영향을 분석하기 위해서는 다양한 영향인자를 고려해야 하는데, 이 중 궤도의 종방향 저항력(longitudinal resistance)은 궤도의 종류나 열차수직하중의 유무에 따라 검토하고 있다. 그러나 실제로 부설된 체결장치의 종류나 특성을 고려하지 않고 모든 궤도 종류에 대하여 안전측 설계를 가능하도록 하는 하나의 선도를 제시하고 있다.

KR C-14050 (장대레일)(KR, 2016)에서는 교량 구간의 경우 거더 신축에 따른 장대레일 축력을 관리하기 위하여 다소 하향 조정된 체결구를 사용하도록 하고 있다. 또한, 철도기술연구원에서 수행된 연구(KRRI, 2008)에 의하면 종방향 저항력 저감형 체결장치(reduced longitudinal resistance fastener)가 설치된 경우에는 일반체결장치보다 25% 감소한 저항력을 고려하도록 제안하고 있다. 따라서 실제 발생하는 부가축응력은 설계 시에 도출된 결과에 비교하여 작을 수 있으며 이러한 결과를 설계에 반영할 경우 기존보다 경제적인 설계가 가능하다.

레일 체결장치의 종방향 저항 물성 값에 대한 다양한 연구가 최근 국내·외에서 연구가 진행되고 있다. Zhang et al. (2015)은 체결장치의 종방향 저항 실험에서 수직하중의 유무에 따른 영향을 분석하였으며, Kim (2012)과 Yang and Jang (2016)은 하중 조합에 의한 체결장치의 종방향 저항력 변화를 분석하였다. Jeon (2016)은 체결장치의 종방향 저항 실험을 수행하고 실험 결과에 대한 통계처리 및 분석을 통해 설계기준화를 위한 기초연구를 진행하였다. Yun (2016)과 Bae et al. (2015)는 레일체결장치의 종방향 마찰거동 실험을 수행하였으며, 체결장치의 마찰 물성값에 대한 통계적 특성을 분석하여 저항력을 제안하였다. Yun (2016)과 Bae et al. (2015)의 연구는 Eurocode (CEN, 2005)에서 제시하고 있는 실험 횟수에 따른 신뢰성 지수를 고려하였고, 장대레일과 같이 궤도 길이 방향으로 다양한 크기의 저항력이 연속적으로 지지가 되어있는 구조에서는 과도한 설계가 발생할 수 있는 것으로 보고되었다. 따라서 이러한 장대레일의 구조적 특징을 고려한 물성 값이 제시되어야 한다.

본 연구에서는 레일체결장치의 실내 종방향 저항력 실험 결과를 반영하여 궤도-교량 종방향 상호작용 해석 시 적용할 수 있는 종방향 저항력을 도출하였다. 이를 위하여 국내의 교량상 콘크리트 궤도에 사용되고 있는 레일 체결장치를 대상으로 실내 종방향 저항실험을 수행하였으며 실험결과를 통하여 교량상 궤도의 안전한 설계가 가능하도록 합리적인 저항력을 도출하였다.

2. 레일체결장치 종방향 저항시험

2.1 실험 대상 및 방법

교량상 콘크리트궤도에 부설된 장대레일은 레일 체결장

치에 의해 열차 주행의 상하 하중과 차륜 횡압, 레일 온도변화로 인한 신축 등에 저항한다. 따라서 교량상 콘크리트궤도의 종방향 저항력을 예측하기 위하여 레일 체결장치의 종방향 저항력 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 레일 체결장치는 Fig. 1과 같이 국내 고속철도 콘크리트 궤도용 레일체결장치 중 종저항력 저감형 스크루+클램프 형식의 레일 체결장치를 대상으로 하였다.

Fig. 1. Rail Fastening System

KRS TR 0014-15 (KRS, 2015)에서 제시된 레일체결장치의 종방향 저항력 시험을 참고하여 실험하였고, 250 kN 용량의 액추에이터를 사용하여 하중을 재하하였다. 실험체는 Fig. 2와 같이 체결장치 1조와 레일, 침목을 포함하는 레일 지지체로 구성된다. 총 32조 체결장치에 대한 반복 실험을 수행하였으며, 하중은 예비 실험을 통하여 미끄러짐이 발생하는 변위를 확인한 후 Fig. 3과 같이 변위 제어로 재하하였다. KRS TR 0014-15 (KRS, 2015)에서는 장경간 교량에서와 같이 궤도-구조 상호작용 계산을 위한 시험 결과가 필요할 경우, 최대하중(F_{max})을 기준으로 저항력을 설정하도록 제시되어있다. 따라서 실험에 의한 저항력은 Fig. 4와 같이 종방향 저항력이 수렴되는 최대 저항력을 사용하였다.

Fig. 2. Test Setup for Longitudinal Resistance

Fig. 3. Displacement-time Curve

(a) Resistance deduction

(b) Experiment result

Fig. 4. Longitudinal Resistance Deduction Method

2.2 실험 결과

실험을 통하여 도출된 저항력을 Fig. 5와 같이 저항력 크기에 따른 발생 횟수를 도시하였다. 저항력은 체결장치 2조에 해당하는 침목 당(per sleeper)으로 표현하였고, 표준 정규분포(평균 11.43 kN, 표준편차 1.37 kN)로 가정하여 확률밀도함수를 같이 도시하였다. Fig. 5를 통해 확인할 수 있듯이 실험에 따른 종방향 저항력은 분산이 크게 나타난다. 이는 레일 체결장치의 체결력 크기, 레일 표면상태 등의 불확실성을 내포하고 있기 때문에 종방향 마찰 거동을 특정한 한 개의 저항력-변위 선도로 대표하기가 힘들다. 즉 실내 실험을 통해 종방향 저항 거동을 도출하는 것은 실험 조건별로 매우 많은 실험 횟수를 수행해야 한다. 또한 실내 실험을 통해 종방향 저항 거동을 도출했다고 하여도, 다양한 크기의 저항력이 연속적으로 지지가 되어있는 장대레일 구조에

일괄적으로 대표 값으로 사용하는 것은 많은 검토가 수반되어야 한다. 따라서 설계 시 적용하기 위한 저항력을 도출하기 위하여 해석적인 연구를 추가로 수행하였다.

Fig. 5. Histogram of Longitudinal Resistance

3. 궤도 종방향 저항력 분포에 따른 부가축응력 변화

3.1 대상 교량 모델링

설계값 도출에 앞서 체결장치 종방향 저항력 분포에 따른 응답을 정량적으로 분석하였다. 분석을 위한 교량 단면은 콘크리트궤도로 설계된 표준 교량의 단면으로 하였다. Fig. 6과 Table 1은 각각 교량 상부구조물의 단면형상과 해석에서 사용된 물성값이다. 궤도-교량 종방향 상호작용 해석을 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS (2016)를 사용하였다. 교량 상부구조의 실제 높이에 대한 영향을 고려할 수 있도록 레일과 교량 상부구조의 중립축, 상부구조의 중립축과 교좌장치의 연결은 Fig. 7과 같이 강체 요소인 Rigid Link (CONN2D2, beam)를 사용하였다. 레일과 교량상판/레일과 콘크리트 슬래브에서 설치되는 체결장치의 거동은 비선형 스프링(SPRING2, nonlinear)을 사용하여 모사하였으며, 스프링 간격은 체결장치 간격은 0.615 m로 하였다. 레일과 교량 상부구조물은 2Node Beam Element (B31)를 사용하였다.

Fig. 6. Cross Section View of Super Structure

Table 1. Material and Geometric Properties of the Model

Member	Rail (UIC60)	Deck
Cross-sectional area [m ²]	0.015372	8.67
Young's modulus [N/m ²]	2.1×10^{11}	3.1×10^{10}
Thermal coefficient [1/°C]	1.2×10^{-5}	1.0×10^{-5}
Moment of Inertia [m ⁴]	3.055×10^{-5}	15.3
Depth [m]	-	3.5
Distance from the center of gravity to the top [m]	-	1.27

Fig. 7. Transverse Schematic of the Model

일반적으로 궤도-교량 종방향 상호작용에 가장 큰 영향을 미치는 하중은 온도 하중이다. 본 해석에서는 온도 하중으로 콘크리트 거더에 +25°C를 재하하였다. 궤도의 종방향 저항력은 KR C-08080 (KR, 2017)에서 제시하고 있는 콘크리트궤도의 종방향 저항력을 교량구간 양단에 각각 300 m의 토공구간에 가정하였다. 선행 해석에서 1경간에서 10경간까지 경간수를 늘려가며 온도 하중에 대한 부가축응력(additional axial stress)을 구하였고, Fig. 8과 같이 4경간 이상에서는 부가축응력이 수렴하는 것을 확인하였다. 따라서 Fig. 9와 같이 4경간으로 모델링하였고, 교각의 휨과 지반조건의 영향은 고려하지 않았다.

Fig. 8. Additional Axial Stress of Rail According to Number of Span

3.2 궤도 종방향 저항력 산정

실제 현장에서는 레일체결장치의 체결 정도, 레일 표면상태, 반복되는 차량 및 온도 하중에 의한 영향 등에 의해 종방향 저항력이 큰 편차가 발생한다. 따라서 교량상 장대레일 궤도의 종방향 저항력은 몬테카를로 시뮬레이션(Monte-Carlo simulation)을 통하여 궤도 길이 방향으로 변화되는 저항력을 고려하였다. 몬테카를로 시뮬레이션은 우선 정의된 한계상태함수에 포함된 확률변수의 통계특성치를 입력하고 0에서 1 사이의 균등하게 분포하는 난수를 원하는 시뮬레이션의 횟수만큼 생성한 후 0과 1 사이의 균일한 난수를 적절한 통계적 특성 즉, 분포형태의 변량으로 변환한다. 본 연구에서는 실내 실험결과(평균 11.42 kN, 표준편차 1.38 kN, per sleeper)를 이용하여 Fig. 10(a)과 같이 종방향 저항력이 표준 정규분포를 갖는 경우를 가정하였다. 난수 추출을 위하여 Excel 2016을 사용하였으며, Fig. 10(b)는 각 레일 지지점(체결장치 위치)에 궤도 종방향 저항력을 분포시킨 것(R.V.)이다.

궤도-교량 상호작용에 의한 부가축응력은 궤도와 교량의 종방향 상대변위가 크게 발생하는 곳에서 크게 나타나며, 동일한 상대변위가 발생한 경우에 저항력이 클수록 더 큰 레일의 부가축응력이 발생한다. 일반적으로 상대변위는 교량 신축이음매에서 크게 발생하기 때문에 앞서 추출한 종방향 저항력을 최대부가축응력을 유발하도록 Fig. 11과 같이 추가로 고려하였다. Fig. 11(a)는 좌측교대로 갈수록 저항력

Fig. 9. Schematic Diagram of Longitudinal Track-bridge Interaction Model

Fig. 10. Longitudinal Resistance Distribution on the Railway Bridge

Fig. 11. Resistance Expected to Cause the Maximum Additional Axial Stress

이 증가하는 경우(R.V.(H→L arrayed per 4 span))와 우측교대로 갈수록 저항력이 증가하는 경우(R.V.(L→H arrayed per 4 span))이고, Fig. 11(b)는 각 경간에서 좌측 교량 신축이음매로 갈수록 저항력이 커지는 경우(R.V.(H→L arrayed per 1 span))와 우측 교량 신축이음매로 갈수록 저항력이 커지는 경우(R.V.(L→H arrayed per 1 span))이다.

3.3 궤도 종방향 저항력 분포에 따른 부가축응력 변화

Table 2와 Fig. 12는 저항력분포와 온도 하중에 의해 발생한 저항력의 해석결과이다. Fig. 12(a)에서 볼 수 있듯이 최대 부가축응력은 우측교대에서 발생(압축)하였으며, 저항력의 평균을 사용한 경우(Average (Experiment))와 정렬 없이 난수 추출 결과를 바로 적용한 경우(R.V.)는 유사하게 나타났다. 최대부가압축응력이 발생한 경우의 저항력 분포는 가동단으로 갈수록 크게 발생한 경우(R.V.(L→H arrayed per 4 span, 1 span))이다.

또한, Fig. 12(b)와 같이 평균을 사용한 경우(Average (Experiment))와 정렬 없이 난수 추출 결과를 바로 적용한 경우(R.V.)는 온도하중에 의한 저항력이 유사하게 나타났으며 이는 평균에서 저항력의 증감이 반복적으로 발생하며 평균과 같은 저항력으로 산정되기 때문이다. 가동단 방향으

로 저항력이 크게 정렬된 경우(R.V.(L→H arrayed per 4 span, 1 span))는 연속적으로 저항력이 증가하여 부가축응력이 크게 발생한다. 이와 같은 영향으로 궤도 종방향 저항력이 평균값을 사용하는 경우와 비교하여 교량 단부(가동단)에서 다양한 요인에 의하여 체결력이 강해진 경우는 약 9% 정도 더 큰 부가축응력이 발생할 수 있음을 보여준다.

Table 2. Maximum Additional Axial Stress of Rail According to Longitudinal Resistance Distribution

Considered distribution	Maximum additional compressive stress (MPa)	Ratio (/Aver.(Exp))
Aver.(Exp)	-30.19	1.00
R.V.	-29.77	0.99
CASE1(H→L) per 4span	-27.59	0.91
CASE1(L→H) per 4span	-32.80	1.09
CASE1(H→L) per 1span	-27.59	0.91
CASE1(L→H) per 1span	-32.83	1.09

(a) Additional axial stress of rail

(b) Resisting force (120~160 m)

Fig. 12. Analysis Results According to Longitudinal Resistance Distribution on the Bridge

4. 안전측 설계를 위한 종방향 저항력 산정

4.1 개요

상기와 같이 실험을 통하여 저항력 분포를 도출하고 가혹한 조건으로 정렬된 저항력을 적용하여 궤도-교량 종방향 상호작용 해석을 수행하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서 안전측 설계가 가능한 하나의 저항력을 교량길이 방향으로 동일하게 적용하여 설계를 진행해야 한다. 실험을 통한 저항력의 설계값 도출을 위하여 Eurocode (CEN, 2005)에서 제시된 식을 이용하였고, 이는 표본크기와 물성값의 통계적 분포를 고려하여 결정될 수 있다. 즉, 저항력(F)은 정규분포로 가정하여 Eq. (1)을 이용하여 설계 값으로 산정한다.

$$F = m_F \cdot (1 + k_{d,n} \cdot v_F) \quad (1)$$

$$= m_F + k_{d,n} \cdot \sigma_F$$

$$m_F = \frac{1}{n} \sum (F_i) \quad (2)$$

$$\sigma_F = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (F_i - m_F)^2} \quad (3)$$

$$v_F = \sigma_F / m_F \quad (4)$$

여기서, m_F 는 종저항력 평균값, v_F 는 종저항력의 변동계수, σ_F 는 종저항력의 표준편차, $k_{d,n}$ 은 실험횟수(n)에 따른 계수이다. 실험횟수에 따른 계수는 Table 3과 같고, $v_{F,known}$ 는 변동계수를 아는 경우, $v_{F,unknown}$ 는 변동계수를 모르는 경우이다. Eurocode (CEN, 2005)에서 제안하는 방법으로 실험값을 적용할 경우, 다양한 크기의 종방향 저항력이 연속적으로 발생하는 장대레일의 구조에 대해서는 과도하게 설계할 수 있다. 따라서 장대레일의 구조적 특징을 고려하여 궤도-교량 상호작용 검토 시 안전측 이내에서 경제적인 설계가 가능한 $k_{d,n}$ 을 새롭게 제안하였다.

Table 3. $k_{d,n}$ According to Experimental Number (n)

n	5	6	8	10	20	30	∞
$v_{F,known}$	3.37	3.33	3.27	3.23	3.16	3.13	3.04
$v_{F,unknown}$	7.85	6.36	5.07	4.51	3.64	3.44	3.04

4.2 적정 저항력 추출 횟수 도출

3.2절에서와 같이 1회의 난수 추출로 특정 결과를 도출하는 것은 신뢰성에 의문이 있으므로 다수의 난수 추출을 통해서 종방향 저항력을 도출하는 것이 타당하다. 따라서 실험결과의 평균과 표준편차를 이용하여 난수 추출을 반복적으로 수행하였으며, Fig. 13과 같이 평균 및 표준편차의 평균이 수렴하는 횟수를 도출하였다. 평균 및 표준편차의 경우 모두 약 50회의 반복적인 난수 추출에서 수렴하였고, 본 연구에서는 50회에 대한 도출을 수행하여 결과를 분석하였다.

4.3 안전측 설계를 고려한 저항력 도출

적정 $k_{d,n}$ 을 제안하기 위하여 50회 반복 추출한 저항력을 정렬 없이 난수 추출 결과를 바로 적용한 경우(R.V.)와 분산 내에서 가동단에서 저항력이 크게 발생하도록 정렬한 경우(R.V.(L→H arrayed per 4 span))에 대하여 부가축응력을 도출하였다. 또한, 균일한 저항력으로 적용된 해석결과와 비교·분석하였다. Fig. 14(a)는 실험결과로부터 $k_{d,n} = 0$ (평균), 1, 2, 3에 해당하는 값이며, Fig. 14(b)는 난수 추출 및 실험결과를 고려한 해석결과(최대 부가압축응력)를 나타낸 것이다. 난수 추출을 통하여 발생한 최대 부가축응력은 $k_{d,n} = 2$ 를 적용한 경우보다 모든 경우에 대하여 작게 발생하였다. 저항력 분포를 가동단에서 저항력이 크게 발생하도록 정렬한 경우(R.V.(L→H arrayed per 4 span))가 가장 가혹한 조건이라고 보면, $k_{d,n} = 2$ (설계값보다 실제 종저항력이 높을 확률이 2.28%)를 적용할 때 50회의 반복 해석에 의한 결과를 모두 고려할 수 있는 안전측 설계가 가능함을 알 수 있다. 기존 Eurocode에서 실험을 통한 설계 값은 30회 이상 실험에서 $k_{d,n} = 3.04$ 를 사용하도록 하고 있고, 이때는 설계값보다 실제

Fig. 13. Average and Standard Deviation of Longitudinal Resistance on a Bridge According to Repeated Random Variable Extraction

Fig. 14. Longitudinal Resistance Range for Safe Side Design

중저항력이 높을 확률이 0.12%이다. 따라서 본 연구에서 제안하는 것과 같이 $k_{d,n} = 2$ 를 적용하여도 충분한 안전측에서 경제적인 설계를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 교량상 콘크리트궤도 장대레일의 종방향 저항력 산정을 위한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 체결장치 종방향 마찰시험을 수행하였으며, 수치해석을 통하여 표준정규분포 내 안전측 설계가 가능한 저항력 값을 도출하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 아래와 같다.

- (1) 실내 체결장치 종방향 저항력 실험을 통하여 실제 콘크리트궤도의 종방향 저항력을 산정할 경우에 분산이 크게 나타난다. 따라서 실제 교량에서도 각 체결장치마다 저항력의 차이가 발생하며 이러한 효과를 해석 과정에서 반영하여야 한다.
- (2) 궤도의 저항력은 특정 평균 및 표준편차를 갖는 정규분포이지만, 해석에서 평균값을 사용하여 설계할 경우 전체 구간에서 동일한 궤도-교량 상호작용 응답이 발생하여 안전성에서 불리할 수 있다. 즉, 해석을 통한

교량상 장대레일의 안전성을 검토할 때는 가장 가혹한 조건의 저항력 분포를 고려해야 한다.

- (3) 궤도 길이 방향으로 저항력이 증가하는 경우를 반영하기 위해 실내 실험결과로부터 설계 저항력 산정할 때 Eurocode에서 제안하는 식을 사용할 수 있다. 이때 Eurocode에서는 30회 이상의 실험 수행 시 $k_{d,n} = 3.04$ 를 사용하도록 하고 있으나, 난수 추출을 반복해서 산정한 저항력으로 설계한 결과, $k_{d,n} = 2$ 를 적용하여도 안전측 이내에서 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 수행되었습니다.

References

- ABAQUS (2016) *Standard User's Manual: Version 2016*. Dassault Systemes.
- Bae, H.U., Park, S.J., Yun, K.M., Park, B.H., and Lim, N.H. (2015) Statistical Characteristics for Longitudinal Friction Behavior of Rail Fastening System for

- Concrete Track. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 16, No. 11, pp. 7870-7877.
- CEN (European Committee for Standardization) (2005) *Eurocode: Basis of Structural Design* (BS EN 1990: 2002).
- Joen, B.H. (2016) *Longitudinal Interaction Response of the Concrete Track on Bridges Using Longitudinal Behavior Characteristics of Rail Fastening Systems*. Master's thesis, Chungnam National University. (in Korean)
- Kim, D.N. (2012) *Track-Bridge Longitudinal Interaction Considering Loading Sequence*. Master's thesis, Korea University. (in Korean)
- KR (2016) *Continuous Welded Rails* (KR C-14050). Railway Design Guidelines and Handbooks, Korea Rail Network Authority.
- KR (2017) *Analysis of Track-Bridge Longitudinal Interaction* (KR C-08080). Railway Design Guidelines and Handbooks, Korea Rail Network Authority.
- KRRI (Korea Railroad Research Institute) (2008) *Research for Enhancing the Performance of Concrete Track Interfaces*. Korea Rail Network Authority.
- KRS (2015) *Rail Fastening System* (KRS TR 0014-15R). Korean Railway Standards, Korea Railroad Research Institute.
- Yang, S.C., and Jang, S.Y. (2016) Track-bridge Interaction Analysis Using Interface Elements Adaptive to Various Loading Cases. *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 21, No. 9.
doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000916
- Yun, K.M. (2016) *Modified Design Method of CWR Tracks on Railway Bridges based on the Track-Bridge Interaction*. Ph.D. dissertation, Chungnam National University.
- Zhang, J., Wu, D.J., and Li, Q. (2015) Loading History based Track-bridge Interaction Analysis with Experimental Fastener Resistance. *Engineering Structures*, Vol. 83, pp. 62-73.

Received	December 27, 2017
Revised	January 2, 2018
Accepted	January 16, 2018