체결장치의 종방향 저항 특성을 반영한 교량상 콘크리트궤도의 종방향 저항력 산정

Estimation of Longitudinal Resistance of Concrete Tracks on Bridge Considering Longitudinal Resistance Characteristics of Rail Fastening System

민경환* · 윤경민** · 박종찬*** · 임남형****

Min, Kyunghwan*, Yun, Kyungmin**, Park, Jongchan***, and Lim, Namhyoung****

Abstract

The longitudinal resistance of a railway track is one of the most important factors indicating the track-bridge interaction (TBI). However, it is difficult to consider the actual resistance of an installed fastening system of a rail because the longitudinal resistance of the concrete track on the bridge for analyzing TBI is presented as a single resistance-displacement curve in design standards. In this study, the resistance that can satisfy the design requirements from the point of view of safety was calculated through experiments of the fastening system of rails. For this purpose, laboratory experiments were performed, and it was confirmed that the resisting force increases linearly with the vertical load. Further, the confidence interval of the resistance was calculated by establishing a relation that accounts for the increase in resistance due to the vertical load. Moreover, the TBI analysis was performed considering the resistance within the confidence interval, and the results were analyzed. It is thus confirmed that safe design is possible when the upper limit of the resistance value used is within the confidence interval.

Key words : Track-bridge Interaction (TBI), Rail Fastening System, Longitudinal Resistance of Track, Concrete Track

요 지

궤도-교량 상호작용 검토 시 궤도의 종방향 저항력은 매우 중요한 인자이다. 하지만 다양한 설계기준에서 궤도-교량 상호작용 해석을 위한 교량상 콘크리트궤도의 종방향 저항력은 하나의 선도로 제시하고있기 때문에 실제 부설되는 체결장치의 저항력을 고려하기 어렵다. 본 연구에서는 실내 체결장치 실험을 통하여 궤도-교량 종방향 상호작용 검토시 안전측 설계가 가능한 저항력을 산정하였다. 이를 위하여 실내 저항력 실험을 수행하였으며, 실험을 통하여 수직하중 재하 시 저항력은 수직하중의 증가에 따라 선형으로 증가하는 것을 확인하였다. 그리고 수직하중에 의한 저항력 증가를 고려하기 위한 관계식을 만들어 저항력의 신뢰 범위를 산정하였다. 또한 신뢰범위내의 저항력을 고려하여 궤도-교량 상호작용 해석을 수행하고 결과를 분석하였다. 신뢰범위 내에서 상한값을 사용한 경우에 궤도-교량 종방향 상호작용 검토시 안전측 설계가 가능함을 확인하였다.

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

*정회원, 충남대학교 철도연구소 연구교수(E-mail: alskh@cnu.ac.kr)

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

**정회원, 한국타이어 연구개발본부 책임연구원

Member, Senior Manager, R&D Staff Office, Hankooktire Co.

***정회원, 충남대학교 토목공학과 박사과정

Member, Ph.D. Course, Department of Civil Engineering, 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

1. 서 론

2004년 경부고속철도 1단계 개통으로 시속 300 km/h의 상업운행을 시작함으로써 우리나라의 고속철도 시대가 개막되었고, 이후 안정적인 운영을 통하여 세계적으로도 고속철도분야의 성공적인 사례로 꼽히고 있다. 이후 2010년 11월 경부고속철도 2단계 개통과 2015년 4월 호남고속철도의 개통으로 고속철도의 양적·질적 성장이 이루어지고 있다(Kim, 2013). 철도 건설 증가에 따라 해결되어야 할 문제 또한 많이 발생하고 있다. 경부고속철도 1단계 구간의 고속본선 선로는 전체 223.6 km 연장 중 토공 170개소 57.4 km (25.7%), 교량 101개소 88.9 km (39.7%), 터널 51개소 77.3 km (34.6%)의 비율로 구성되어 있다. 대부분 토공구간인 국외의 시공사례와 달리 하천, 산악 지형이 많아 교량구간의 비중이 상당한 국내 지형을 고려할 때 궤도/교량 상호작용은 선결되어야 할 핵심 기술이다(Yun, 2016). 궤도-교량 상호작용에서 가장 중요한 문제 중 하나는 궤도의 저항력을 선정하는 방법이다.

교량상 콘크리트궤도가 부설되는 경우에 대한 다양한 연구가 진행되었다. 국외의 연구에서 Zhang et al. (2015)과 Yang and Jang (2016)은 체결장치의 종방향 저항 실험실에서 수직하중 유무에 따른 영향을 분석하였으며 Joen (2016)과 Bae et al. (2015)은 Eurocode에서 제시한 실험횟수에 따른 계수($k_{d,n}$)를 이용한 저항력 산정과 관련된 연구를 수행하였으나, 수직 하중 여부에 따른 저항력에 대한 평가가 미흡하거나 수직하중이 재하되지 않은 경우의 물성치에 대한 분석이 수행되어 한계가 있다. 본 연구에서는 하중조건에 따른 레일체결장치의 저항특성과 특성을 반영한 설계 저항력을 제시하였다. 이를 위하여 교량상 장대레일에서 발생하는 하중조건을 모사하여 체결장치 종방향 실험을 수행하였다. 또한 결과를 분석하여 저항특성을 고려한 저항력을 도출하였으며, 수직하중 비재하 조건과 재하조건에 대한 안전측 설계가 가능한 저항력을 도출하였다.

2. 레일체결장치 종방향 저항실험

2.1 실험방법

국내 고속철도 콘크리트 궤도에서 적용되고 있는 종저항력 저감형 스크류+클램프 형식의 체결장치를 대상으로 수행하였다(Fig. 1). 총 32 set의 체결장치를 이용하여 수직 하중 비재하/재하 시 종방향 마찰거동 실험을 수행하였다. 레일체결장치의 종방향 저항력(마찰거동) 실험을 위해 1,000 kN(수직방향), 250 kN(종방향) 용량의 액추에이터를 사용하여 하중을 재하하였다(Fig. 2). 종방향 하중은 레일 전면에서 재하하였으며, 수직하중은 지그를 이용하여 체결장치 중앙부에서 레일 두부면에 재하하였다.

Fig. 1. Rail Fastening System for Experiment

(a) Actuator setup

(b) Whole view

Fig. 2. Test Setup for Longitudinal Resistance Experiment

실험방법은 종방향으로의 신축거동을 모사하기 위해 레일의 한쪽 단부에 일정한 속도(1 mm/min)로 종방향력을 가력하였으며, 수직방향의 하중을 재하하여 수직하중에 의한 영향을 고려하였다. 수직하중(F_v)은 KR C-08080 (KR, 2017)에서 제시하고 있는 KRL-2012를 참고하여 60 kN을 적용하였다.

하중재하 방법은 장기하중인 온도하중과 단기하중인 차량하중의 이력조건을 고려하기 위하여 하나의 체결장치에 대하여 Fig. 3과 같이 실제 교량상 궤도에서 발생할 수 있는 4가지의 하중경우(CASE I-IV)에 대해서 수행하였다. CASE I은 차량하중이 재하되지 않은 조건의 궤도에서 레일과 거더의 상대변위가 발생하는 경우이며, CASE II는 차량의 수직하중이 재하된 상태에서 시·제동 하중에 의해 상대변위가 발생하는 경우이다. CASE III은 온도하중에 의해 레일과 거더의 상대변위가 탄성범위 내에서 발생한 상태에서 차량의 수직하중이 재하되고 시·제동하중에 의해 미끄러짐(상대변위)이 발생한 경우이며, CASE IV는 온도하중에 의해 레일과 거더의 상대변위가 소성영역에 도달 후 차량의 수직

하중이 재하되고 시·제동하중에 의해 미끄러짐(상대변위)이 발생한 경우이다. 여기서 F_{ul} , F_l 은 각각 수직하중 비재하 시 종저항력, 수직하중 재하 시 종저항력을 나타낸다.

Fig. 3. Resistance-displacement Curve According to Load Case

Table 1. Load Applying Method Considering the Loading Sequence

Case	Procedure of loading
I	(1) Longitudinal loading until sliding occurs
II	(1) Vertical load applying (2) Longitudinal loading until sliding occurs
III	(1) Longitudinal loading within elastic limit displacement (2) Vertical load applying (3) Longitudinal loading until sliding occurs
IV	(1) Longitudinal loading until sliding occurs (2) Vertical load applying (3) Longitudinal loading until sliding occurs

각각의 Case를 모사하기 위한 실험방법은 Table 1과 같다. Case I은 차량하중이 재하되지 않은 조건의 궤도에서 레일과 거더의 상대변위가 발생하는 경우이며, Case II는 차량의 수직하중이 재하된 상태에서 시·제동 하중에 의해 상대변위가 발생하는 경우이다. Case III은 온도하중에 의해 레일과 거더의 상대변위가 탄성범위 내에서 발생한 상태에서 차량의 수직하중이 재하되고 시·제동하중에 의해 미끄러짐(상대변위)이 발생한 경우이며, Case IV는 온도하중에 의해 레일과 거더의 상대변위가 소성영역에 도달 후 차량의 수직하중이 재하되고 시·제동하중에 의해 미끄러짐(상대변위)이 발생한 경우이다. 실험 순서는 아래와 같이 수행하였다.

㉠ 실험 1: 하중이력에 따른 영향

- 하중이력에 의한 체결장치 종방향 거동 특성 분석

- 수직하중 30 kN, 60 kN을 적용하여 Table 1의 Case I~IV를 순서대로 수행
- I → II ($F_V = 30$ kN) → III ($F_V = 30$ kN) → IV ($F_V = 30$ kN) → II ($F_V = 60$ kN) → III ($F_V = 60$ kN) → IV ($F_V = 60$ kN)

㉡ 실험 2: 수직하중에 따른 영향

- 수직하중크기에 따른 저항력 도출
- 수직하중 15, 30, 45, 60 kN을 적용하여 Table 1의 Case I~II를 순서대로 수행
- I → II ($F_V = 15$ kN) → II ($F_V = 30$ kN) → II ($F_V = 45$ kN) → II ($F_V = 60$ kN)

㉢ 실험 3: 통계작업을 위한 반복 실험

- 통계작업을 위하여 반복 실험 수행
- 수직하중 60 kN을 적용하여 Table 1의 Case I~II 수행
- I → II ($F_V = 60$ kN)

2.2 실험 결과

2.2.1 저항력 도출 방법

KRS TR 0014-13R (KRRI, 2013)에서는 장경간 교량에서와 같이 궤도구조 상호작용 계산을 위한 실험 결과가 필요할 경우에 최대하중을 기준으로 하고 있다. 따라서 실험에 의한 저항력은 Fig. 4와 같이 종방향 변위에 대하여 수렴되는 최대 저항력을 사용하였다. 탄성한계변위는 KR C-08080 (KR, 2017)에서 제시되어 있는 값을 그대로 적용하였다. 실험 결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 4. Resistance Deduction Method

Fig. 5. Resistance Deduction from Experiments

2.2.2 순차하중에 따른 영향(실험 1)

실험 1의 결과로부터 순차적으로 작용하는 하중에 의한 체결장치의 종방향 거동 특성을 분석하였다. Fig. 6은 3개의 체결장치에 대하여 Table 1의 Case II~IV의 실험 결과를 정리하였다. 수직하중 재하 시 저항력은 하중 재하 방법과 상관없이 유사하게 나타났다. 따라서 동일한 수직하중이 작용 시 순차하중 재하 방법에 따른 영향은 매우 작을 것으로 판단된다. 따라서 수직하중 비재하, 재하 시의 저항력 도출을 위하여 실험이 비교적 쉬운 Case I과 II의 실험을 수행해도 유사한 결론이 도출될 것으로 판단된다.

Fig. 6. Resistance According to Magnitude of Vertical Load and Loading Applying Method

2.2.3 수직하중 크기에 따른 영향(실험 2)

체결장치에 작용하는 수직하중 크기에 따른 저항력을 분석하였다. Fig. 7은 수직하중 크기에 따른 저항력을 나타낸다. 실험으로부터 수직하중 재하 시 종방향 저항력(F_l)은 수직하중 비재하 시 종방향 저항력(F_{ul})에 비하여 수직하중 크기와 비례하여 선형으로 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 실험결과에 대한 통계적 특성을 분석 시 증가량을 고려하기 위하여 Eq. (1)을 이용하여 수직하중에 따른 저항력 증가를 위한 계수 α_F 를 산정할 수 있다.

$$F_l = F_{ul} + \alpha_F F_V \quad (1)$$

여기서, F_l 는 수직하중 재하 시 단위길이 당 궤도의 종방향 저항력(kN/m/track), F_{ul} 는 수직하중 비재하시 단위길이 당 궤도의 종방향 저항력(kN/m/track), F_V 는 체결장치 1구에 재하되는 수직하중(kN)이다.

Fig. 7. Relation of Resistance and Vertical Load

2.2.4 통계작업을 위한 반복 실험

레일체결장치 타입별 수직하중 크기에 따른 종방향 마찰 거동 변수들의 분포를 확인하기 위하여 단위길이당 궤도의 종저항력의 히스토그램을 작성하였다(Fig. 8). 종방향 마찰 거동 실험을 수행한 결과 다양한 저항력이 도출되었으며, 수직하중 재하여부에 따른 종저항력의 평균과 표준편차는 Table 2와 같다.

동일한 실험조건에 대하여 저항력의 분포가 크게 발생하였으며, 설계값 산정을 위한 방안이 모색되어야 할 것이다. 본 연구에서는 다수의 실험 결과에 대하여 정규분포로 가정하여 진행하였다.

Table 2. Average and Standard Deviation of Resistance

F_V (kN)	Longitudinal resistance (kN/m/track, assumed sleeper spacing: 0.65 m)	
	Average (m)	Standard deviation (σ)
0	17.6	2.1
60	71.5	8.2

Fig. 8. Histogram of Longitudinal Resistance

3. 실험 결과를 이용한 체결장치 종방향 물성치 신뢰범위 도출

3.1 개요

실험값을 사용한 설계값 도출을 위하여 Euro code-Basis of structural design (BS EN 1990:2002, 2005)에서 제시된 방법을 사용하였다. 종저항력에 대한 설계값은 표본크기 n , 물성치의 통계적 분포, 분산을 고려하여 결정될 수 있으며, 저항력(F)의 경우 정규분포로 가정하며 Eq. (2)를 이용하여 신뢰구간을 계산하였다.

$$F = m_F \cdot (1 \pm k_{d,n} \cdot v_F) = m_F \pm k_{d,n} \cdot \sigma_F \quad (2)$$

$$\text{여기서, } m_F = \frac{1}{n} \sum (F_i)$$

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

$$v_F = \sigma_F / m_F$$

그리고, m_F 는 종저항력 평균값, v_F 는 종저항력의 변동계수, σ_F 는 종저항력의 표준편차, $k_{d,n}$ 은 표본크기(n)에 따른 계수이다. 표본크기(n)에 따른 계수는 Table 3과 같다.

Table 3. Coefficient $k_{d,n}$ Depending on the Number of Tests n

n	1	3	10	20	30	∞
$V_{X, \text{known}}$	4.36	3.56	3.23	3.16	3.13	3.04
$V_{X, \text{unknown}}$	-	-	4.51	3.64	3.44	3.04

Fig. 9는 실험횟수가 30회 이상 진행된 경우에 표준정규분포에서 신뢰범위, 상한신뢰한계, 하한신뢰한계를 신뢰도 지수와 함께 도시한 것이다. 실험 및 현장의 저항력이 설계값을 초과할 확률이 분포의 상한신뢰한계(upper confidence limit)에 해당하는 0.03% 이하가 되도록 설계값을 결정 시 ‘상한값(upper limit value)’으로 정의하며, 반대로 설계값 미만이 될 확률이 하한신뢰한계(lower confidence limit)에 해당하는 0.03% 이하가 되도록 설계값 결정 시 ‘하한값(lower limit value)’으로 정의한다.

Fig. 9. Confidence Interval and Reliability Index (more than 30 experiments)

3.2 통계적 특성을 반영한 종방향 저항 물성치 신뢰범위 도출

실험으로부터 수직하중 재하 시 종방향 저항력(F)은 수직하중 비재하 시 종방향 저항력(F_{ul})에 대하여 수직하중에 비례하여 증가되는 것을 확인하였다. 따라서 실험결과에 대한 통계적 특성을 분석 시 증가량을 고려하기 위하여 Eq. (1)을 이용하여 Eq. (3)과 같이 계수 α_F 를 산정하였다. 수직하중 재하 시 저항력 산정은 편의를 위하여 수직하중 60kN에 대한 경우만을 고려하였다.

$$\alpha_F = (F_l - F_{ul}) / F_V \quad (3)$$

체결장치 실험 결과에 대한 통계적 특성을 고려하는 방법으로 수직하중 재하여부에 따른 확률변수는 아래와 같이 설정하였다.

- 수직하중 비재하 시: 궤도 종저항력(F_{ul})
- 수직하중 재하 시: 궤도 종저항력(F_{ul}), 수직하중재하에 따른 저항력 증가를 나타낼 수 있는 영향계수(α_F)

Eq. (1)은 고려되는 변수와 함께 Eq. (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$F_l = F_{ul} + \alpha_F F_{Vert} = g(F_{ul}, \alpha_F) \quad (4)$$

Y 를 다중확률변수 $X_1, X_1, \dots, X_a$ 에 대한 선형함수로 가정 시 Eq. (5)와 같이 이상화 할 수 있다. 여기서 $a_i(i=0,1, \dots, n)$ 은 상수이다.

$$Y = a_{F,0} + a_{F,1}X_1 + a_{F,2}X_2 + \dots + a_{F,n}X_n \quad (5)$$

$$= a_{F,n} + \sum_{i=1}^n a_{F,i}X_i$$

함수의 기댓값 개념을 적용하여 Y 의 평균(기댓값, m)은 Eq. (6), 분산(σ)은 Eqs. (7), (8)과 같다. 이때, 상수 a_0 는 분산 계산 시 고려되지 않으나 평균값 계산 시 사용된다. 만약 X_i 와 X_j 가 모든 i 와 j 에 대해 통계적으로 독립이면, Eq. (7)은 간단히 Eq. (8)과 같이 수정될 수 있다

$$m_Y = a_{F,0} + a_{F,1}m_{x_1} + a_{F,2}m_{x_2} + \dots + a_{F,n}m_{x_n} \quad (6)$$

$$= a_{F,0} + \sum_{i=1}^n a_{F,i}m_{x_i}$$

$$\sigma_Y^2 = E[(Y - m_Y)^2] \quad (7)$$

$$= E[Y^2] - m_Y^2$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{F,i}a_{F,j}Cov(X_i, X_j)$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{F,i}a_{F,j}\rho_{x_i x_j}\sigma_{x_i}\sigma_{x_j}$$

$$\sigma_Y^2 = \sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_i^2 \quad (8)$$

Eq. (1)의 F_l 의 함수는 선형함수로 Eqs. (6), (8)을 이용하여 평균과 분산을 계산할 수 있다. 확률변수 F_l 의 평균은 Eq. (9)와 같이 산정되며, 분산은 Eq. (10)과 같이 산정된다.

$$m_{F_l} = m_{F_d} + m_{\alpha_F} F_{Ver t} \quad (9)$$

$$\sigma_{F_l} = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial F_{ul}}\right)^2 \sigma_{F_d}^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \alpha_F}\right)^2 \sigma_{\alpha_F}^2} \quad (10)$$

Eqs. (9), (10)과 Eq. (2)를 이용하여 Table 4와 같이 저항력에 대한 신뢰 구간을 도출하였다. Figs. 10, 11에 해석방법에 따라 수직하중 비재하 시 저항력(F_{ul})과 영향계수(α_F)에 대한 평균 및 신뢰 범위를 고려한 저항 선도를 해석방법에 따라 도시하였다. U_{limit} 은 탄성한계변위이다.

Table 4. Confidence Interval ($F_V = 60$ kN)

Variable (unit)	Standard deviation(σ)	Lower limit value	Average (m)	Upper limit value
F_{ul} (kN/m/tr.)	2.11	10.32	17.58	24.85
α_F (-)	0.13	0.45	0.90	1.35

Fig. 10. Conceptual Diagram of Resistance with Confidence Interval (separate analysis)

(a) Resistance in elastic zone after temperature load

(b) Resistance in plastic zone after temperature load

Fig. 11. Conceptual Diagram of Resistance with Confidence Interval (sequential analysis)

4. 레일체결장치 종방향 물성치 제안 방법

4.1 대상교량 및 해석모델

체결장치의 종저항력에 대한 신뢰구간을 도출하였으며, 이는 모평균의 상·하한값으로 정의된다. 하지만 실제 설계 시 평균치의 하한 또는 상한값인 편측 신뢰한계(one-side confidence interval)만이 필요하며, 이를 도출하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 궤도-교량 종방향 상호작용 해석을 수행하기 위해 개별해석과 순차해석이 가능한 유한요소

해석프로그램인 LUSAS ver.15(LUSAS, 2015)를 사용하였다. 해석을 위한 모형화는 KR C-08080 (KR, 2017)에서 제시하는 방법을 적용하였으며, 레일 및 교량상판은 3차원 티모센코 보요소(Timoshenko Beam Element)를 사용하여 모델링하였다. 도상은 탄소성 거동을 하는 비선형조인트요소(Nonlinear Joint Element:Elasto-Plastic Joint)를 사용하였다. 교량상판의 중립축으로부터 교각까지의 거리를 표현하는 강체 보요소(Rigid Beam Element)를 추가하고 구속조건(Constraint equation)을 적용함으로써, 교량상판에 휨변위가 발생할 경우 교대 또는 교각과 교량상판중심축사이의 종방향 상대변위를 정확하게 나타낼 수 있도록 하였다(Fig. 12). 대상교량은 PSC Box Girder 상판 위에 콘크리트레도가 부설된 40 m 지간, FM방식의 지지조건을 갖는 단선교량을 대상으로 토노반상 궤도는 신축이음부가 없는 장대레일 궤도를 모사하기 위해 교량 시중점 교대로부터 300 m까지 구성하였다(Fig. 13). 레일은 UIC 60레일을 대상으로 하였으며, 레일 및 교량 구조물 물성치는 Table 5와 같다.

Fig. 12. Schematic Diagram of Track-Deck(Span)-Pier

(b) Applied loads (Temperature variation: +25°C, Acceleration: 33 kN/m, 33 m (vehicle length 400 m), Vertical load: 80 kN/m, 400 m)

Fig. 13. Model for Track-bridge Interaction Analysis and Loading Method

각 하중에 대한 응답을 독립적으로 고려하는 개별해석(separate analysis)과 하중의 순차성(sequential analysis)을 고려한 순차해석(Yun, 2016)을 통하여 레일체결장치의 종저항력의 상한값과 하한값의 신뢰범위 내에서 저항물성치 변화에 따른

레일의 부가축응력을 분석하였다. 해석 시 고려된 저항력은 Table 6과 같으며, 수직하중 재하에 따른 저항력 증가는 LUSAS에서 제공하는 자동화 프로그램을 이용하였다(LUSAS, 2015). 이때 탄성한계변위(U_{limit})은 KR C-08080 (2017)에서 제시하는 0.5 mm를 적용하였다.

Table 5. Geometry and Material Property

Member	Properties (unit)	Value
Rail (UIC60)	Cross-sectional area (m ²)	0.0155
	Modulus of elasticity (N/m ²)	2.1E+11
	Thermal coefficient (/°C)	1.2E-5
	Moment of inertia (m ⁴)	3.055E-5
Deck	Cross-sectional area (m ²)	8.668
	Modulus of elasticity (N/m ²)	3.1E+10
	Thermal coefficient (/°C)	1.0E-5
	Moment of Inertia (m ⁴)	15.3
Pier	Depth (m)	4.1
	Cross-sectional area (m ²)	10.18
	Modulus of elasticity (N/m ²)	3.1E+10
	Moment of inertia (m ⁴)	8.24

Table 6. Resistance Range For TBI Analysis ($F_V = 60$ kN)

Vertically unloaded (F_{ul})	Vertically loaded (F_l)	F_{ul} (kN)	F_l (kN)
Lower limit value (L)	Lower limit value (L)	10.32	37.03
	Average (A)	10.32	64.19
	Upper limit value (H)	10.32	91.35
Average (A)	Lower limit value (L)	17.58	44.29
	Average (A)	17.58	71.46
	Upper limit value (H)	17.58	98.62
Upper limit value (H)	Lower limit value (L)	24.84	51.56
	Average (A)	24.84	78.72
	Upper limit value (H)	24.84	105.88

4.2 개별 해석 결과

Table 6에서 제시된 신뢰범위 내에서의 종저항력을 사용하여 발생하는 교량상 레일의 최대 응력을 도출하였다. 해석 결과는 레일의 최대부가축응력-수직하중 비재하 시 궤도 종방향 저항력-수직하중 재하 시 궤도 종방향 저항력 관계를 분석하였다. Fig. 14에 개별해석에 대한 결과를 도시하였다. 그래프의 가로축은 수직하중 비재하 시 저항력-수직하중 재하 시 저항력이며, L은 하한값, A는 평균, H는 상한값을 나타낸다. 세로축은 최대 부가축응력이 발생한 위치(우측교대, -부호는 압축)의 값이다.

Figs. 14(a), (b)로부터 온도 하중, 시동하중의 경우에 신뢰

범위 내에서 수직하중 비재하 시, 수직하중 재하 시 모두 종저항력이 클수록 온도하중 및 시동에 의한 레일의 부가축응력은 크게 나타났다. Fig. 14(c)로부터 열차수직하중의 경우에 신뢰범위 내에서 수직하중 비재하 시, 수직하중 재하 시 모두 종저항력이 작을수록 레일의 부가축응력은 크게 나타났다. Fig. 14(d)로부터 하중조합의 경우에 신뢰범위 내에서 수직하중 비재하 시, 수직하중 재하 시 모두 종저항력이 클수록 하중조합 시 레일의 부가축응력은 크게 나타났다. 따라서 궤도의 종방향 저항력의 경우 상한값을 고려하여 검토 시 안전성(안정성)을 확보하는 합리적 설계가 가능할 것으로 판단된다.

(a) Temperature load

(b) Acceleration load

(c) Vertical load

(d) Total (temperature + acceleration + vertical load)

Fig. 14. Maximum Additional Axial Stress at Rail (separate analysis)

4.3 순차 해석 결과

개별 해석과 동일하게 진행하였으며, 해석방법은 순차해석을 이용하였다. Fig. 15에 순차해석에 대한 결과를 도시하였다. 개별해석과 마찬가지로, 저항력이 상한값을 고려하여 검토 시 안전성(안정성)을 확보하는 합리적 설계가 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 15. Maximum Additional Axial Stress or Rail (sequential analysis)

5. 궤도 종방향 저항력변화에 따른 영향

앞에서 제안된 궤도 종방향 저항 물성치 산정 방법을 이용하여 궤도-교량 종방향 상호작용 해석을 수행하였다. 4.1에서 제시된 대상교량을 동일하게 이용하였으며, 하중은 Fig. 13과 동일하게 적용하였다. 궤도의 종방향 저항력은 차량 수직하중 80kN/m/track을 고려하였으며, Eq. (1)을 이용하여 Eq. (11)과 같이 산정하였다.

$$F_l = F_{ul} + \alpha_F F_V \quad (11)$$

$$60 = 24.85 + 1.35 \times 26$$

여기서 F_V 는 체결장치 간격 0.65 m를 고려하여 산정하였다. 최대 부가축응력 결과를 기존 KR C-08080에서 제시된 저항력을 적용한 경우와 비교하였다(Table 7). Code에서 제시된 저항력을 사용한 경우와 비교하여 실험 결과를 이용하여 산정된 저항력을 적용 시 동일한 조건의 교량에서 부가축응력이 약 15%의 차이가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

Table 7. Comparison of Analysis Result

Analysis method	Code (MPa)	Experiment (MPa)	Exp./Code
Separate	-59.7	-50.2	0.84
Sequential	-59.2	-51.1	0.86

6. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 궤도 체결장치의 종저항 거동특

성을 분석하고 설계값을 제안하였다. 이를 위하여 온도하중과 차량하중의 순차성을 모사한 실내실험을 수행하였으며, 실험 결과를 적용하여 궤도-교량 종방향 상호작용 해석을 수행하여 설계를 위한 저항력을 도출하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 실제 현장의 조건을 반영한 하중 조합을 적용하여 레일체결장치 종방향 저항 실험을 수행하였으며, 하중의 순차성을 고려한 해석방법보다 수직하중 크기에 대한 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 하중조합을 고려하여 하중을 재하하지 않고 수직하중 유무에 따른 종방향 저항력 실험으로 충분히 동일한 결과를 얻을 수 있다.
- (2) 실험을 통하여 실제 궤도에서 저항력 분포가 크게 발생할 수 있을 것으로 예측하였으며, Euro code에서 제안하는 식을 이용하여 저항력에 대한 신뢰구간을 산정하였다. 저항력 신뢰구간 내에서 최댓값을 사용 시 궤도-교량 상호작용 측면에서 안전측 설계가 가능하다.
- (3) 동일한 교량을 대상으로 실험을 통하여 산정된 저항력을 반영하여 해석을 수행할 경우와 기존 code에서 제시된 저항력을 적용하는 경우에 대한 최대 부가축응력을 비교하였다. 궤도-교량 종방향 상호작용 해석 수행 시 기존 code에서 제시된 저항력을 적용하는 경우가 실험 결과를 이용한 저항력을 적용하는 경우보다 약 15% 보수적으로 평가할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(17RTRP-B067919-05)에 의해 수행되었습니다.

References

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.

BS EN 1990:2002. (2005). *Eurocode: Basis of structural design*. European Committee for Standardization (CEN).

Jeon, 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.

Kim, Y.I. (2013). *Considering the high-speed rail construction costs increased speed measures analysis*. Master's thesis, Woosong University.

KR (Korea Rail Network Authority). (2017). *Analysis of track-bridge longitudinal interaction*. Railway Design Guidelines and Handbooks, KR C-08080.

KRRI (Korea Railroad Research Institute). (2013). *Rail fastening system*. KRS TR 0014-13R, Korean Railway Standards.

LUSAS. (2015). *Rail track analysis user manual*. LUSAS, UK.

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	■ June 7, 2018
Revised	■ June 11, 2018
Accepted	■ June 20, 2018