장경간 철도 교량에 적용된 슬라이딩 궤도와 레일신축이음장치의 궤도-교량 상호작용 비교

이 경 찬¹ · 장 승 업¹ · 이 정 휘^{2*} · 최 현 성²

¹한국철도기술연구원 고속철도연구본부 첨단인프라연구팀, ²단국대학교 토목환경공학과

Comparative Analysis of Track-Bridge Interaction of Sliding Slab Track and Rail Expansion Joint for Long-Span Railway Bridge

Kyoung Chan Lee¹, Seung Yup Jang¹, Jungwhee Lee^{2*} and Hyun Sung Choi²

¹High-Speed Railroad System Research Center, Korea Railroad Research Institute., Yongin, 16105, Korea

²Department of Civil and Environmental Engineering, Dankook Univ., Yongin, 16890, Korea

Abstract

Sliding slab track system, which consists of low friction sliding layer between track slab and bridge deck, is recently devised to reduce track-bridge interaction effect of continuously welded rail(CWR) without applying special devices such as rail expansion joint(REJ). In this study, a series of track-bridge interaction analyses of a long-span bridge with sliding slab track and REJ are performed respectively and the results are compared. The bridge model includes PSC box girder bridge with 9 continuous spans, and steel-concrete composite girder bridge with 2 continuous spans. The total length of the bridge model is 1,205m, and the maximum spacing between the two fixed supports is 825m. Analyses results showed that the sliding slab track system is highly effective on interaction reduction since lower rail additional axial stress is resulted than REJ application. Additionally, horizontal reaction forces in fixed supports were also reduced compared to the results of REJ application. However, higher slab axial forces were developed in the sliding slab track due to the temperature load. Therefore, track slab section of the sliding slab track system should be carefully designed against slab axial forces.

Keywords : sliding slab track, rail additional axial stress, CWR, track-bridge interaction

1. 서 론

현대의 철도는 열차의 승차감 개선과 고속 주행을 위하여 이음매 없이 연속된 장대레일(continuously welded rail, CWR)을 사용하며, 과거에 부설된 궤도도 장대화를 통하여 장대레일의 적용이 점차 확대되고 있다. 장대레일은 온도변화 시 레일의 팽창 및 수축이 구속되어 레일의 길이방향으로 과도한 축력이 발생할 수 있으며, 이로 인한 레일의 좌굴 또는 파단이 발생될 우려가 있으므로, 설계 시 레일의 축력에 주의할 필요가 있다(한국철도시설공단, 2014). 특히, 교량 구간에 장대레일이 부설된 경우에는 온도 하중, 통과 열차의

수직하중 및 시제동 하중과 같은 다양한 외부 요인에 의하여 교량에 교축방향 및 수직방향의 변위가 발생하고 이러한 교량의 변위로 인하여 레일에 부가 축력 등을 유발한다. 이와 같이 교량과 궤도는 서로 구조적인 영향을 주고 받으며 상호간에 부재력과 변위를 유발하는데, 이를 궤도-교량 상호작용이라 부른다. 이러한 상호작용 효과는 장경간 교량에서 특히 두드러지기 때문에 철도 교량은 노선 계획 단계에서부터 장경간 교량을 가능한 배제하며, 불가피하게 장경간 교량이 필요한 경우에는 궤도-교량 상호작용을 고려한 구조 해석을 통하여 궤도의 안정성을 반드시 검토하여야 한다.

궤도-교량 상호작용 해석은 체결장치를 포함한 궤도의

* Corresponding author:

Tel: +82-31-8005-3511; E-mail: jwhee2@dankook.ac.kr

Received December 22 2015; Revised January 3 2016;

Accepted January 4 2016

©2016 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.

Fig. 1 Load-displacement curve of track longitudinal resistance

중저항력을 정확히 묘사하는 것이 중요하다. 특히 장대레일에 적용되는 레일체결장치는 체결 클램프를 통하여 수직(중력) 방향으로 도입되는 일정 정도의 체결력(clamping force)으로 레일을 구속하며, 레일의 축방향으로 작용하는 힘의 크기가 체결 클램프의 마찰 저항력을 초과하게 되면 체결장치와 레일 사이에서 밀림이 발생하여 레일에 과도한 응력이 발생하는 것을 방지한다. 이러한 체결장치의 역학적 특성을 고려하여 레일과 교량 사이의 중저항 거동은 Fig. 1에 제시된 바와 같이 열차하중이 채하된 경우(loaded case)와 그렇지 않은 경우(unloaded case)를 구분하여 쌍일차 모형(bilinear model)으로 거동하는 비선형 스프링으로 모델링하여 상호작용 해석을 수행한다(한국철도시설공단, 2014).

상호작용 해석 결과 레일의 부가 축력이 일부 구간에서 기준값을 다소 초과한 경우 저체결력 체결장치(reduced longitudinal restraint, RLR)나 종방향 활동체결장치(zero

longitudinal restraint, ZLR)를 적용하여 이를 완화할 수 있으나, 기준값을 크게 초과한 경우에는 레일신축이음장치(rail expansion joint, REJ)를 반드시 설치하여야 한다. 일반적으로 교량의 경간장 또는 최대 고정지점간 거리(expansion length)가 60m 이상인 경우 레일부가응력이 기준값(콘크리트 궤도의 경우 인장 압축 각각 92MPa)을 초과할 수 있으며, 고정지점간 거리가 200m 이상인 경우에는 레일신축이음장치의 설치를 고려해야 하는 것으로 알려져 있다. 하지만 이는 교량의 강성 및 궤도의 형식에 따라서 큰 차이를 보이므로, 정확한 결과는 반드시 정밀한 궤도-교량 상호작용 해석을 통하여 검토하여야 한다.

기존의 상호작용 저감 방안 중 특수 체결장치를 사용하는 방법은 저감 정도가 크지 않아 교량의 경간이 길거나 고정지점간 거리가 긴 경우에는 충분한 효과를 기대하기 어려우며, 레일신축이음장치는 지속적인 유지보수가 요구되고 열차의 주행안정성을 저해하는 원인이 되기도 한다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 최근에는 별도의 특수 장치를 사용하지 않고, 궤도 시스템으로 상호작용 효과를 저감시킬 수 있는 슬라이딩 궤도가 개발되고 있다.

슬라이딩 궤도는 교량 상면과 궤도 슬래브 하면 사이에 저마찰 슬라이드 층을 두어 궤도와 교량의 축방향 거동을 물리적으로 분리시킴으로써 궤도-교량 상호작용 문제를 근본적으로 해결할 수 있는 것으로 알려져 있다(Lee *et al.*, 2015). Fig. 2에 3경간 연속교에 기존 콘크리트 궤도를 적용한 경우(Fig. 2(a))와 슬라이딩 궤도를 적용한 경우(Fig. 2(b))에

Fig. 2 Typical longitudinal arrangement of railway bridge and slab track

대한 중방향 구성의 예를 도시하여 비교하였다. 중국 고속철도에서도 유사한 개념의 궤도(CRTS-II 판식)가 시공되었으며, 그에 대한 상호작용 해석 결과를 제시한 바 있다(Ren *et al.*, 2010).

본 연구에서는 경간장과 고정지점간 거리가 길어 레일신축이음장치가 반드시 필요한 교량을 선정하고, 레일신축이음장치를 적용한 경우와 슬라이딩 궤도를 적용한 경우에 대하여 각각 궤도-교량 상호작용 해석을 수행하였다. 이 해석 결과를 바탕으로 장경간 철도 교량에 적용할 수 있는 각각의 서로 다른 상호작용 저감 방안에 대하여 비교·평가하고자 한다.

2. 대상 교량 구조물 개요

궤도-교량 상호작용의 수치해석을 위한 대상 교량은 호남 고속철도에 건설된 미호천교 하선 교량 중 일부를 참고하였다. 대상 교량은 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 9경간 연속 PSC교(S12)와 2경간 연속 강합성교(S13)를 포함하고 있다. 연속교의 최대 경간장은 85m이며, 양단에 경간장 45m와 40m인 PSC 단순교를 각각 배치하였다. 열차 하중 배치를 고려하고, 교량 구간에 장대레일의 부동구간이 형성되도록 교량 구간의 양쪽 끝으로는 토공구간을 각각 400m 씩 연장하여 배치하였다. 교량의 총 연장은 1,205m이며, 상호작용 효과의 척도가 되는 최대 고정지점간 거리는, 인접한 연속교의 고정지점간의 거리로서, Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 P13~P23 사이의 거리인 825m이다. 대상 교량은 단선 고속철도 전용 교량으로 P11에서 P27 방향으로 열차가 주행하는 것으로 가정하였다.

해석에 적용된 대상 교량의 거더, 교각 그리고 레일 및 궤도 슬래브의 탄성계수 및 단면 상수는 Table 1에 제시된 바와

Table 1 Sectional properties of bridge and track

Part	Section Property
PSC Box Girder (S11, S12, S14, S15)	$A = 8.58E+6 \text{ mm}^2$ $E = 3.10E+4 \text{ MPa}$ $I = 1.88E+13 \text{ mm}^4$
Steel Composite Girder (S13)	$A = 9.34E+5 \text{ mm}^2$ $E = 2.10E+5 \text{ MPa}$ $I = 2.89E+12 \text{ mm}^4$
Pier	$A = 1.31E+7 \text{ mm}^2$ $E = 2.78E+4 \text{ MPa}$ $I = 4.52E+13 \text{ mm}^4$
Rail	$A = 1.53E+4 \text{ mm}^2$ $E = 2.10E+5 \text{ MPa}$ $I = 6.07E+7 \text{ mm}^4$
Track Slab	$A = 1.50E+6 \text{ mm}^2$ $E = 2.88E+4 \text{ MPa}$ $I = 3.13E+10 \text{ mm}^4$

같다. 레일은 UIC-60 레일을 적용하였으며, 궤도 슬래브의 단면은 폭 3000mm, 두께 500mm로 가정하였다. PSC구간 교량 거더의 단면은 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같으며, 모델링의 단순화를 위해 각 경간은 동일한 단면을 갖는 것으로 적용하였다.

대상 교량에 대하여 각 궤도 형식별로 궤도와 교량 거더 사이의 연결조건을 달리하는 세 가지 모델을 구성하였다. 세 가지 모델의 연결조건은 1) 궤도 슬래브와 교량 거더가 직결된 경우(FIX), 2) P21 위치에 레일신축이음장치가 설치된 경우(REJ), 3) 슬라이딩 궤도가 적용된 경우(SLD)이다.

세 가지 경우 모두 콘크리트 슬래브 궤도가 적용된 경우를 대상으로 하였으며, 자갈 궤도는 고려하지 않았다. 궤도와 교량 거더가 직결된 형식은 일반적인 교량구간의 콘크리트 궤도에서 사용되는 방식이다. 다만 대상 교량과 같이 경간장 및 고정지점간 거리가 긴 경우에는 레일신축이음장치가 반드시 고려되어야 하지만, 본 연구에서의 FIX 해석 케이스는 레일

Fig. 3 Overview of the objective bridge model

신축이음장치와 슬라이딩 궤도의 상호작용 저감 효과를 비교하기 위하여 어떤 저감 대책도 적용되지 않은 경우에 대하여 해석하였다. REJ 해석 케이스는 FIX와 동일한 교량과 궤도를 갖지만, 상호작용 효과를 저감시키기 위하여 P21에 레일신축이음장치가 적용된 경우이다. FIX와 REJ 케이스는 교량이 불연속되는 단부에서 궤도 슬래브도 불연속되며(Fig. 2(a) 참고), 레일은 장대레일로 전체가 연속된다. 다만 REJ 케이스는 레일신축이음장치가 설치된 P21에서 레일이 불연속된다.

슬라이딩 궤도가 적용된 SLD 케이스는 전 구간에 걸쳐서 레일과 궤도 슬래브가 모두 연속된다. 이때 교량 전 구간에 걸쳐 궤도 슬래브와 교량 사이에 저마찰 슬라이드층이 존재하며, 궤도 슬래브는 교량의 고정지점부 및 교대부에서 앵커로 고정된다(Fig. 2(b) 참고).

3. 궤도-교량 상호작용해석

궤도-교량 상호작용 해석은 범용 구조해석 프로그램인 Midas Civil LSD Plus(v2.5)를 사용하였으며, KR C 08080 “궤도-교량 종방향 상호작용 해석”의 절차에 따라 온도하중, 시·제동하중 및 열차의 수직하중에 대한 상호작용 해석을 각각 수행한 뒤 이들을 조합하는 개별해석(separate analysis) 방법을 사용하였다. 온도하중을 먼저 재하하고 그 부재력과 변위를 유지한 상태에서 열차하중을 다시 재하하는 연성해석(sequential analysis) 방법을 적용할 수도 있으나, 개별해석이 하중 평가의 측면에서는 안전측의 결과를 보이는 것(Sanguino *et al.*, 2009)으로 알려져 있어, 본 연구에서는 개별해석을 수행하였다.

3.1 유한요소 모델링

구조해석 모델은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 레일, 궤도 슬래브 및 교량 거더에 해당되는 3열의 보 요소로 구성하였다. FIX 및 REJ 모델은 Fig. 4(a)와 같이 교량 단부에서 궤도 슬래브를 불연속으로 모델링하였으며, SLD 모델은 Fig. 4(b)와 같이 레일과 함께 궤도가 전 구간에서 연속되도록 모델링하였다. 교량의 양측 단부에는 각각 400m의 노반구간을 두고 궤도 슬래브와 레일을 연장하였다.

레일과 궤도 슬래브 사이에 Fig. 1에 도시된 물성치를 갖는 비선형 스프링을 연결하여 레일체결장치의 종저항 거동을 모사하였다. 종방향을 제외한 횡방향 및 수직 방향은 서로 강결된 것으로 고려하였다.

직결 궤도가 적용된 경우(FIX, REJ)는 궤도 슬래브를 모델링할 필요없이 바로 교량과 연결하여 모델링할 수 있으나,

Fig. 4 Numerical model

본 연구에서는 슬라이딩 궤도와 동일한 모델을 활용하기 위하여 궤도 슬래브도 함께 고려하였고, 이때 궤도 슬래브는 교량과 강결요소(rigid link)로 연결하였다.

슬라이딩 궤도가 적용된 경우(SLD)의 궤도 슬래브와 교량은 슬라이드층의 거동을 모사할 수 있는 비선형 스프링으로 연결하였다. 기존 적용 사례에서 Wang 등(2012)은 슬라이드층의 마찰계수를 0.2 내지 0.3인 것으로 확인하였으므로, 본 연구에서는 마찰계수 0.3을 적용하여 Table 2에 제시된 바와 같이 슬라이드층을 쌍일차(bi-linear) 비선형 스프링으로 모델링하였다. 이때 체결장치를 모사하는 비선형 스프링과 마찬가지로 열차하중이 재하된 경우와 그렇지 않은 경우를 각각 구분하였으며, 비선형 스프링의 항복하중은 궤도 슬래브, 레일 및 열차의 자중과 마찰계수 0.3으로부터 산출하였다.

Table 2 Bi-linear spring properties of sliding layer

Case	F_y (kN/m)	u_0 (mm)
Loaded	5.31	0.1
Unloaded	23.31	0.1

3.2 하중 조건

궤도-교량 상호작용 해석에서 고려한 하중은 온도하중과 열차의 시제동하중 및 수직하중이다. 레일신축이음장치가 없는 경우의 레일 부가 축력을 산정하기 위한 상호작용 해석 시에는 교량에만 온도하중을 재하하여 레일에 발생한 응력을 상호작용에 의한 레일 부가응력으로 간주할 수 있다. 하지만 레일신축이음장치가 있는 경우에는 레일신축이음장치가 설치된 곳에서 레일의 절대 응력이 영(zero)이 되기 때문에, 반드시 교량과 레일에 모두 온도 하중을 재하하여야 한다. 이때 교량 구간이 아닌 부동구간의 레일 응력과 교량 구간에서의 레일

Table 3 Loading condition

Category		Loading condition
temp.	rail	summer +40℃, winter -50℃
	bridge(PSC)	summer +25℃, winter -25℃
	bridge(Steel)	summer +35℃, winter -35℃
braking load		15kN/m, 400m region
train load		KRL-2012 standard train load (passenger train)

응력의 차이를 상호작용 효과에 의한 레일 부가 축응력으로 평가한다. 이 연구에서는 레일신축이음장치가 포함된 경우(REJ)를 함께 비교하기 위해서 Table 3에 제시된 바와 같이 교량과 레일 모두에 온도하중을 재하하였다.

열차하중은 복선 철도교량인 경우에는 한쪽 노선에는 제동하중을 나머지 한쪽 노선에는 시동하중을 재하하는 것이 일반적이나, 이 연구에서는 단선 교량을 가정하였기 때문에 시동하중과 제동하중 중 하중 효과가 큰 제동하중만을 고려하여 열차의 수직하중 재하위치와 동일한 위치에 제동하중을 재하하였다.

열차 수직 하중은 한국철도시설공단 KR C-08080 궤도-교량 종방향 상호작용 해석(2014)에 제시된 표준열차하중 KRL-2012의 여객전용선 하중인 0.75 KRL-2012를 재하하였다. 열차의 수직 하중은 집중하중 효과를 고려하여 3m 재하 길이에 대하여 170kN/m를 재하하고 나머지 구간은 60kN/m를 재하하는데, 이 연구에서는 가장 자중이 큰 동력차가 재하되는 열차 주행 방향의 선두에 집중하중 효과를 고려한 170kN/m 하중을 Fig. 5에 도시된 바와 같이 재하하였다.

상호작용효과에 의해 교량상 레일에 최대 축력이 발생하는

Fig. 5 Train vertical load w.r.t 0.75KRL-2012

위치는 일반적으로 온도하중에 의해 교량의 변위가 크게 발생하는 이동단 받침이 있는 교량의 불연속 단부이기 때문에, 이 연구에서는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 총 6가지 열차하중의 재하 위치에 대하여 검토하였다. Fig. 6에는 이동지점을 생략하고 고정지점의 위치만을 표시하였다.

4. 해석 결과

4.1 레일 부가 축응력

온도하중을 재하하였을 때, 레일에 발생하는 축방향 응력을 하절기와 동절기에 대하여 각각 Fig. 7에 나타내었다.

궤도 슬래브가 교량 거더와 직결되어 있고 별도의 상호작용 저감 방안이 고려되지 않은 경우(FIX)에는 연속교(S12)의 우측 단부에서 하절기에 -395MPa, 동절기에 420MPa의 과도한 레일 응력이 발생된다.

레일신축이음장치가 설치된 경우(REJ)의 레일 축응력은 S15 경간의 우측 단부에서 하절기에 -170MPa, 동절기에 191MPa이 발생하며, 직결식 궤도(FIX)와 비교하여 약 55~57%의 응력 저감효과를 보인다. 이는 레일신축이음장치가

Fig. 6 Train vertical and braking load cases

(a) Summer

(b) Winter

Fig. 7 Rail axial stress(temperature load)

(a) Case 2

(b) Case 5

Fig. 8 Rail axial stress(train & braking load)

설치된 위치에서 레일의 응력이 0이 되면서 전체적으로 레일의 응력이 감소한 효과이다. 토공구간의 부동구간에 발생하는

온도응력(하절기 -100.8MPa, 동절기 126MPa)과 비교하여 발생한 레일 부가 축응력은 각각 -69MPa, 65MPa로 허용값 92MPa를 만족하는 것으로 확인되었다.

슬라이딩 궤도를 적용한 경우(SLD)에 발생하는 레일 축응력은 하절기의 경우 최대 -107MPa, 동절기의 경우 최대 133MPa로 직결식 궤도(FIX)와 비교하였을 때 68~73%의 응력 저감 효과를 보이며, 특히 부동구간과 비교하면 각각 -6MPa, 7MPa의 부가 응력만이 발생하여 상호작용으로 인한 레일 부가 축응력이 현저하게 감소된 것을 확인할 수 있다.

열차 수직하중 및 제동하중에 의해 발생하는 레일의 축응력을 Case 2와 Case 5에 대하여 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 Case 2와 5는 Fig. 10에 나타난 바와 같이 각각 동절기와 하절기에 REJ를 적용한 경우 가장 큰 부가 축응력이 발생한 하중 케이스이다. 열차 수직 및 제동하중에 의해 레일에 발생하는 최대 축응력의 경우 직결식 궤도(FIX)는 Case 2와 Case 5에서 각각 74.2MPa, 103MPa의 결과를 보인다. REJ를 적용하였을 경우 Case 2와 Case 5에서 각각 77MPa, -104MPa의 결과를 보여 열차 하중에 의하여 발생하는 응력 수준이 유사한 것으로 나타났다. 슬라이딩 궤도를 적용한 경우에는 Case 2에서 11.8MPa, Case 5에서 -14MPa의 결과를 나타내며, 직결식 궤도(FIX)와 비교하였을 때 약 86%의 응력 저감 효과를 보인다. 따라서 열차 수직하중 및 제동하중을 재하하였을 경우 역시 슬라이딩 궤도를 적용하였을 때 FIX 및 REJ 케이스에 비해 레일 축응력이 크게 감소한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9에는 동절기 온도하중에 의한 레일 축응력과 Case 2와 5에 해당하는 열차 수직 및 시제동 하중에 의한 레일 축응력을 합산한 그래프를 나타내었다. 슬라이딩 궤도는 교량 구간에서도 응력 변동이 크지 않고 전체적으로 부동구간의 응력 형태를 보이고 있으나, 나머지 경우에는 레일의 응력 변동이 매우 큰 것을 확인할 수 있다.

세 가지 모델에 온도하중과 열차 수직 및 제동 하중을 모두 고려하였을 때 얻어지는 레일의 축응력 최대값에서 부동구간 응력을 제외한 부가 축응력을 모든 하중 재하 케이스에 대하여 Fig. 10에 나타내었다.

궤도 슬래브가 교량 거더와 직결되어 있는 경우(FIX)에는 모든 하중 Case에서 허용응력 기준인 $\pm 92\text{MPa}$ 를 초과하는 결과를 보이며, 레일 최대 부가 축응력은 동절기와 열차하중 Case 4를 합산한 결과에서 410MPa의 결과를 나타낸다. 본 해석대상 교량의 경우 고정지점간 거리가 825m로 특수체결 장치나 레일신축이음장치 등을 사용하지 않고 설계할 수 있는 최대 고정지점간 거리 80m(Choi *et al.*, 2009)를 크게 초과하기 때문에, FIX 케이스에서 발생하는 부가 축응력은

허용기준을 크게 초과하였다.

REJ를 설치한 모델은 하절기의 경우에 레일 부가 축응력은 case4, case5에서 각각 165.1MPa, 173.2MPa의 허용응력을 초과하는 결과를 나타내고, 동절기의 경우 case2, case3에서

Fig. 9 Rail axial stress(temperature + train vertical & braking loads)

Fig. 10 Rail additional axial stress

각각 138MPa, 121.1MPa의 허용응력을 초과하는 결과를 나타낸다. 따라서 허용응력을 초과하는 지점에 레일신축이음장치를 추가하는 등의 별도의 저감 방안을 더 고려해야 하는 상태로 나타났다.

이에 반해 슬라이딩 슬래브케도를 설치한 경우에는 레일부가 축응력은 최대 20.8MPa의 결과를 나타내며, 이 값은 허용응력의 약 23% 수준이다. 따라서 슬라이딩 케도를 적용하였을 경우 상호작용 저감 효과가 레일신축이음장치를 적용한 경우보다 월등한 것으로 나타났다.

특히 슬라이딩 케도를 적용한 경우 열차 하중에 의한 상호작용의 저감 효과가 탁월한 것으로 나타난 것에 주목할 필요가 있다. 슬라이딩 케도는 교량과 케도의 종방향 거동을 분리시킴으로서 교량의 온도신축이 케도에 미치는 영향을 저감시키는 것을 주목적으로 하는 케도 시스템이지만, 본 연구를 통하여 열차의 제동하중에 의한 상호작용 저감에도 매우 효과적인 것으로 나타났다.

4.2 고정지점 반력

교량의 고정지점(P12, P13, P23, P25 및 P26)에 작용하는 교축방향 지점반력을 케도형식별로 비교하여 Fig. 11에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이, 최대 지점반력은 FIX의 경우 P12에서 6419kN의 결과를 나타내며, REJ 및 SLD의 경우 P13에서 각각 6599kN, 2354kN의 결과를 보인다. 최대 반력값을 FIX의 최대값과 비교하면 REJ를 적용하였을 때 지점 반력이 2.8% 증가한 반면, 슬라이딩 케도를 적용시켰을 때(SLD)는 63.3% 감소하는 결과를 보였다.

해석 결과, 슬라이딩 케도 시스템은 레일 부가 축력 뿐만 아니라 지점반력의 저감에도 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 슬라이딩 케도를 적용할 경우 레일의 안정성에 기여함은 물론, 교량의 고정지점부에 설치되는 교각과 교량 받침에 재하되는 교축방향 하중이 감소되어 철도 교량의 교각과 받침을 보다 경제적으로 설계/시공할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 11 Comparison of longitudinal reaction forces at support

4.3 슬래브 부재력

궤도 슬래브에 발생하는 부재력을 검토한 결과, 온도하중과 열차 제동하중에 의하여 슬라이딩 슬래브 궤도를 적용한 경우에 특히 궤도 슬래브에 상당한 크기의 축력이 발생하는 것으로 나타났다.

Fig. 12(a)에 나타난 바와 같이 기존 직결식 궤도(FIX, REJ)는 온도하중에 의하여 각각 702kN 및 307kN의 최대 압축력이 발생하였으며, 이는 궤도 슬래브의 단면적을 고려하면 각각 0.5MPa, 0.2MPa의 압축응력에 해당되어 일반적인 콘크리트 궤도 단면이 충분히 수용할 만한 정도이다. 이와 같이 낮은 압축응력이 발생하는 이유는 궤도 슬래브가 교량과 일체로 거동하고 교량 단부에서 궤도 슬래브가 교량과 함께 단절되어 있기 때문에 교량 구간에서 부가되는 축력이 크지 않기 때문인 것으로 생각된다.

온도하중에 의해 FIX와 REJ는 강합성교(S13)에 위치한 궤도에서 각각 3400kN, 4206kN의 최대 인장력이 발생하였으며, 이는 궤도 슬래브의 단면적을 고려하면 각각 2.3 MPa, 2.7MPa의 인장응력에 해당된다. 이 결과는 콘크리트 압축강도($f_{ck}=30\text{MPa}$ 기준)의 10% 이내이므로, 궤도 슬래브 단면이 수용할 수 있는 수준이다(Mirza *et al.*, 1979).

이와는 달리, 슬라이딩 궤도(SLD)는 온도 하중에 의하여 궤도 슬래브에 강한 축력이 발생하는 것으로 나타났다. 고정

지점부 앵커가 궤도 슬래브의 종방향 이동을 구속하고, 여기에 교량의 온도신축으로 인한 변위가 더해져서 하절기에는 최대 12,208kN의 압축력과, 동절기에는 최대 12,208kN의 인장력이 각각 발생되었다.

궤도 슬래브가 철근콘크리트 부재인 점을 고려하면, 동절기에 도입되는 인장력은 궤도 슬래브에 필연적으로 횡방향 균열을 유발하게 되며, 인장균열이 발생한 후에는 콘크리트 부재의 구속이 해제되므로 이 인장력은 완화될 것이다. 다만 불가피하게 발생하는 횡방향 균열의 폭을 궤도 슬래브 설계 시 적절한 수준으로 제어해야 할 것이다.

열차의 제동하중에 의해 발생하는 축력도 마찬가지로 궤도 슬래브에 전달되지만, 슬라이딩 궤도의 경우에 오히려 하중이 분산되어 인장력의 최대값은 더 작은 것으로 나타났다(Fig. 12(b) 참고).

상호작용 해석결과에 따른 궤도 슬래브의 부재력을 살펴본 바에 따르면, 슬라이딩 궤도 슬래브는 하절기에는 도입되는 높은 압축력에 저항할 수 있고, 동절기에는 인장력에 의하여 발생하는 균열의 폭을 적절히 제어할 수 있도록 설계되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 궤도-교량 상호작용 저감 방안이 반드시 필요한 장경간 철도 교량을 선정하고, 레일신축이음장치를 적용한 경우와 슬라이딩 궤도를 적용한 경우에 대한 궤도-교량 상호작용 해석을 수행하여, 두 가지 방안의 적용에 따른 상호작용 저감 효과를 비교하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 상호작용 저감 방안을 적용하지 않은 경우와 비교한 결과, 슬라이딩 궤도는 온도하중에 의한 레일 축응력을 68~73% 감소시켰으며, 레일신축이음장치는 55~57% 감소시켰다. 또한 열차 하중에 의한 레일 축응력은 슬라이딩 궤도에서 85~86% 감소하였고, 레일신축이음장치를 설치한 경우는 저감효과가 미미하였다. 따라서 슬라이딩 궤도는 온도하중 뿐만 아니라 열차하중에 의한 상호작용의 영향을 저감시키는 데에도 우수한 효과를 보이는 것으로 확인되었다.
- 2) 부가 축응력을 비교하였을때, 레일신축이음장치를 적용한 경우에는 레일 부가 축응력이 21~85% 감소한 반면, 슬라이딩 궤도는 92~98% 감소하여, 슬라이딩 슬래브 궤도의 상호작용 저감 효과가 상대적으로 우수한 것으로 나타났다.

Fig. 12 Track slab axial member forces

- 3) 고정지점에 발생하는 교축방향 반력을 검토한 결과 레일신축이음장치는 수평반력이 2.8% 증가한 반면, 슬라이딩 궤도는 63.3% 감소하였다. 따라서 슬라이딩 궤도를 적용하게 되면 레일의 안정성뿐만 아니라 철도 교량의 교각 및 받침의 경제적인 설계에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다.
- 4) 기존 직결식 콘크리트 궤도는 교량 구간에서 궤도 슬래브에 도입되는 축력이 작은 반면, 슬라이딩 궤도는 온도하중에 의해서 높은 슬래브 축력이 발생하므로, 슬라이딩 궤도 설계 시 슬래브의 축력을 고려하여 궤도 슬래브의 단면 설계에 충분한 주의를 기울여야 할 것으로 생각된다.

이 연구에서는 슬라이딩층의 마찰계수를 기존 연구사례를 참고하여 가정하였으나 슬라이딩층의 마찰계수의 실제값과 마찰계수 변동에 따른 영향에 대해 추가 연구가 필요하며, 슬라이딩 궤도를 실제 교량에 적용하기 위해서는 단부회전 각에 따른 교량 단부에서의 궤도 부상(uplift) 가능성에 대한 상세한 검토가 추가로 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비 지원(과제번호 15RTRP-B071566-03, 과제명: 상호작용 완화를 위한 궤도 및 교량 바닥판 구조 개발)에 의해 수행되었습니다.

References

- Choi, I.Y., Cho, H.C., Yang, S.C., Choi, J.Y., Yu, J.Y. (2009) Development of Design Chart for Investigating an Additional Rail Stress and Displacement on CWR(I) - Design Chart for High Speed Railway Bridge, *J. Korean Soc. Railway*, 12(4), pp.565~573.
- Korea Rail Network Authority (2014) *KR C-08080 Track-Bridge Longitudinal Interaction Analysis*.
- Lee, K.C., Jang, S.Y., Jung, D.K., Byun, H.K. (2015) Evaluation of Stress Reduction of Continuous Welded Rail of Sliding Slab Track from Track-Bridge Interaction Analysis, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 35(5), pp.1179~1189.
- Mirza, S.A., Hatzinikolas, M., MacGregor, J.G. (1979) Statistical Description of Strength of Concrete, *J. Struct. Div.*, 105(6), pp.1021~1037.
- Ren, J.J., Xiang, R., Liu, X. (2010) Force Characteristics of Longitudinally Coupled Slab Track Turnout on Bridges Under Temperature Action, *Transportation Research Record: J. Transport. Res.*, 2159, pp.85~90.
- Sanguino, M.C., Requejo, P.G. (2009) Numerical Methods for the Analysis of Longitudinal Interaction between Track and Structure, *Track-Bridge Interaction on High-Speed Railways*, R. Calçada, R. Delgado, A.C. Matos, J.M. Goicolea, F. Gabaldón, eds., Taylor & Francis Group, London, UK, pp.95~108.
- Wang, P., Ren, J.J., Xiang, R., Liu X.Y. (2012) Influence of Rub-plate Length on Forces and Displacements of Longitudinally Coupled Slab Track for a Bridge Turnout, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: J. Rail & Rapid Transit.*, 226(3), pp.284~293.
- Yun, K.M., Choi, S.H., Song, D.S., Lee, K.C., Lim, N.H. (2015) A Guideline for Development of Track-Bridge Structural System with Sliding Layer to Reduce the Track-Bridge Interaction, *J. Korea Acad.-Industrial Coop. Soc.*, 16(2), pp.1469~1476.
- Choi, I.Y., Cho, H.C., Yang, S.C., Choi, J.Y., Yu, J.Y. (2009) Development of Design Chart for Investigating an Additional Rail Stress and Displacement on CWR(I) - Design Chart for High Speed Railway Bridge, *J. Korean Soc. Railway*, 12(4), pp.565~573.

요 지

슬라이딩 궤도는 콘크리트 궤도와 교량 바닥판 사이에 저마찰 슬라이드층을 두어 레일신축이음장치와 같은 특수 장치를 적용하지 않고도 궤도-교량 상호작용 효과를 효과적으로 저감시킬 수 있는 새로운 궤도 시스템으로 개발되고 있다. 이 논문에서는 장경간 교량에 슬라이딩 궤도와 레일신축이음장치를 각각 적용한 경우에 대하여 궤도-교량 상호작용해석을 수행하고 그 결과를 비교 검토하였다. 대상교량은 상호작용 효과를 극대화하기 위하여 9경간 연속 PSC교와 2경간 연속 강합성교를 포함하며, 총 연장 1,205m, 최대 고정지점간 거리 825m인 장경간 교량을 선정하였다. 해석결과 슬라이딩 궤도는 레일신축이음장치를 적용한 경우보다 레일 부가 축력이 더 작은 것은 물론, 지점부에 재하되는 수평 반력 또한 작게 나타나 궤도-교량 상호작용 저감 효과가 뛰어난 것으로 확인되었다. 반면 슬라이딩 궤도는 온도하중에 의해 높은 슬래브 축력이 발생되므로, 궤도 설계 시 슬래브 축력에 대한 단면 설계에 주의를 기울일 필요가 있다.

핵심용어 : 슬라이딩 궤도, 레일 부가축력, 장대레일, 궤도-교량 상호작용