

궤도-교량 상호작용 저감을 위한 슬라이드 층이 고려된 궤도-교량 구조시스템의 개발 방향

윤경민¹, 최신희¹, 송대석², 이경찬³, 임남형^{*}
¹충남대학교 토목공학과, ²한국철도시설공단, ³철도기술연구원

A Guideline for Development of Track-Bridge Structural System with Sliding Layer to Reduce the Track-Bridge Interaction

Kyung-Min Yun¹, Shin-Hyung Choi¹, Dae-Seok Song², Kyung-Chan Lee³,
Nam-Hyung Lim^{*}

¹Department of Civil Engineering, Chungnam National University

²Construction management division, Korea Rail Network Authority

³High-Speed Railroad Systems Research Center, Korea Railroad Research Institute

요약 산지가 전국토의 70%를 차지하는 국내 지형의 특성으로 인하여, 철도선로 전체 노선의 상당부분을 교량구간이 차지한다. 이에 따라 교량 설계 시 경제성 증가를 위하여 경간장을 늘리는 것이 유리하지만 궤도-교량 상호작용에 의한 레일의 부가축응력, 변위 등의 문제로 인한 제약이 발생한다. 본 연구에서는 궤도와 교량 상판 사이에 설치되는 슬라이딩 층을 고려한 궤도-교량 상호작용 해석을 수행하였다. 수치해석 결과를 통해 슬라이딩층 설치 방법에 따른 상호작용 거동을 분석하였으며, 궤도-교량 상호작용이 저감된 새로운 궤도-교량 구조시스템의 개발방향을 제안하였다.

Abstract The bridges take a significant part of entire route in Korea railway, because 70% of Korean territory is covered with mountains. For this reason, span enlargement of railway bridges is more advantageous to increase economic efficiency on the bridge design. However there are many limitations such as additional axial force of the rail, excessive displacement due to track-bridge interaction. In this study, track-bridge interaction analysis was conducted considering the sliding layer which was installed between the track and girder. From the numerical analysis results, the behavior of track-bridge interaction was investigated according to the installation method of sliding layer. Finally, a guideline for development of track-bridge structure system to reduce the track-bridge interaction was proposed.

Key Words : Track-bridge interaction, CWR(Continuous Welded Rail), Sliding layer, Track-bridge system

1. 서론

교량구간이 전체 노선의 상당부분을 차지하는 국내 지형 조건에서는 짧은 경간의 교량을 다수건설하는 것보다 짧은 경간부터 긴 경간까지 제반 상황에 맞추어 경간장을 보다 폭넓게 활용하는 것이 경제적으로 매우 효

율적인 경우가 많다. 그러나 경간장 증가 시 과대하게 발생하는 궤도와 교량간의 상호작용 효과에 의해 교량의 장경간화 등의 설계자유도가 많이 감소되고 있다.

국내 철도교량은 비교적 짧은 경간(30~45 m)의 단순교 또는 2경간 연속교로 이루어진 것이 대부분이다. 국내의 경우, 설계 시 교량과 궤도의 상호작용에 의한 부가응

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(14RTRP-B06791-02)에 의해 수행되었습니다.

*Corresponding Author : Nam-Hyung Lim (Chungnam National Univ)

Tel: +82-41-821-7005 email: nhrim@cnu.ac.kr

Received December 30, 2014

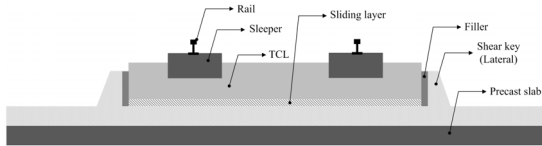
Revised January 15, 2015

Accepted February 12, 2015

력과 변위가 설계기준치를 초과할 경우에는 교량의 지간장을 줄이거나 활동케이블과 같은 특수케이블장치를 사용하거나 또는 레일신축이음매 등을 부설하여 해결하려는 경향이 있다.

유럽, 중국 등 국외에서는 수백미터에 이르는 장경간 교량 건설시 새로운 궤도구조를 도입하여 궤도-교량 상호작용 효과를 저감시키는 노력을 하고 있다. Fig. 1과 같이 중국에서는 최대경간 168 m의 교량(베이징-텐진간 Beibei Jialing교)에 궤도-교량 상호작용 완화를 위한 Geotextile Sliding Layer를 이용한 프리캐스트 콘크리트 궤도구조를 개발 및 적용함으로써 교량의 장대화 및 연속화를 실현한 바 있다.[2] 국내에서도 이와 같은 상호작용 저감을 위한 새로운 구조의 개발이 요구된다.

본 논문에서는 궤도와 교량 상판 사이에 슬라이딩 층이 존재하는 형태의 궤도구조를 적용하기 위한 기초연구로써, 슬라이딩 층을 고려한 궤도-교량 상호작용의 특성을 해석적으로 분석하여 궤도와 교량간의 상호작용효과를 저감시킬 수 있는 궤도-교량 시스템의 개발 방향을 제시하였다.



[Fig. 1] Schematic diagram of the track with sliding layer on the bridge[1]

2. 슬라이딩 층을 고려한 유한요소 해석 모델

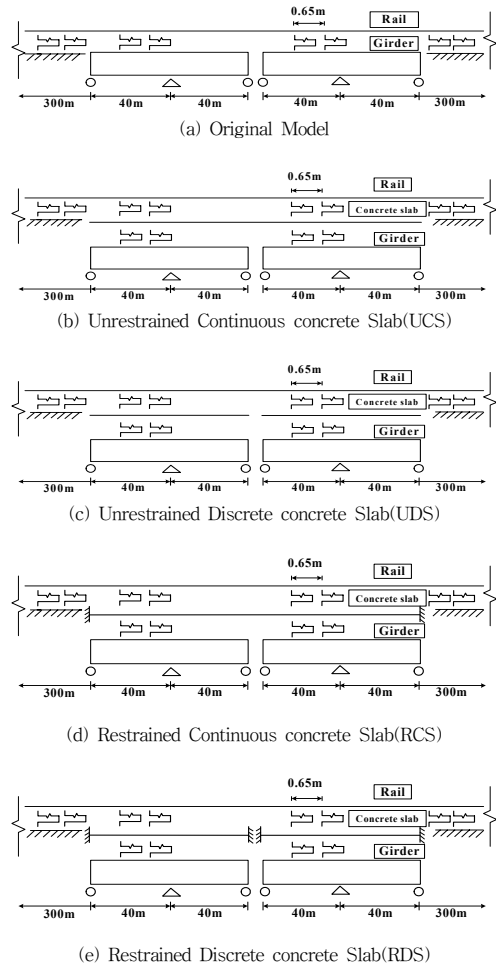
2.1 구조형식 및 해석모델

해석 대상교량은 Fig. 2와 같이 교량길이는 160 m이며, 2경간 연속 PSC Box 거더교 2개를 구성하였다. 교량 받침의 배치는 가동-고정-가동(Move-Fix-Move, MFM) 방식을 적용하였다.

콘크리트 궤도와 교량상판 사이에 교량 종방향슬라이딩 층이 존재하는 구조를 Fig. 2, (b)~(e)와 같이 슬라이딩 층이 놓이게 되는 콘크리트 슬래브의 연속여부와 구속 정도에 따라 4가지 모델을 적용하였다.

Fig. 2의 (a)는 슬라이딩 층이 존재하지 않는 모델

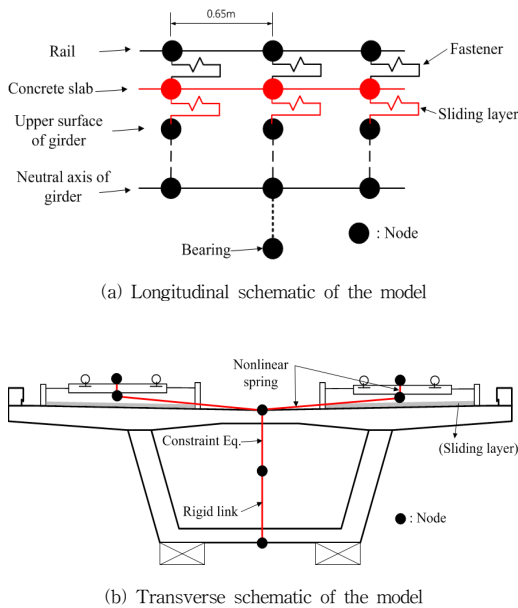
(Original 모델)이며, (b)와 (c)는 슬라이딩 층이 고려된 모델로, 콘크리트 슬래브가 연속인 일체형모델(UCS; Unrestrained Continuous concrete Slab)과 불연속인 분리형 모델(UDS; Unrestrained Discrete concrete Slab)이다. 모델 (d)와 (e)는 (b),(c) 모델에서 온도로 인한 신축이 양단에서 구속된 모델(RCS; Restrained Continuous concrete Slab, RDS; Restrained Discrete concrete Slab)이다.



[Fig. 2] Analysis models

모델에 따른 궤도-교량 종 방향 상호작용 저감 효과의 분석을 위하여 범용해석프로그램 Abaqus 6.13[3]을 이용하였다. 교량 상부구조의 실제 높이에 대한 영향을 고려할 수 있도록 레일과 교량 상부구조의 중립축, 상부구조

의 중립축과 교좌장치의 연결은 Fig. 3과 같이 Constraint 방정식과 강체 요소인 Rigid Link(CONN2D2, beam)를 사용하였다. 레일과 교량상판/레일과 콘크리트 슬래브에서 설치되는 체결장치, 그리고 콘크리트 슬래브와 교량상판 사이에 위치하는 슬라이딩 층의 거동은 비선형 스프링(SPRING2, nonlinear)을 사용하여 모사하였다. 레일과 교량 상부구조물은 2Node Beam Element(B31)를 사용하였다. 교량구간 양단에 각각 300 m의 토공구간을 가정하여 전체 해석길이를 760 m로 선정하였으며, 교각의 휨과 지반조건의 영향은 고려하지 않았다.



[Fig. 3] Model of the track-deck-bearing system

2.2 하중조건 및 물성치

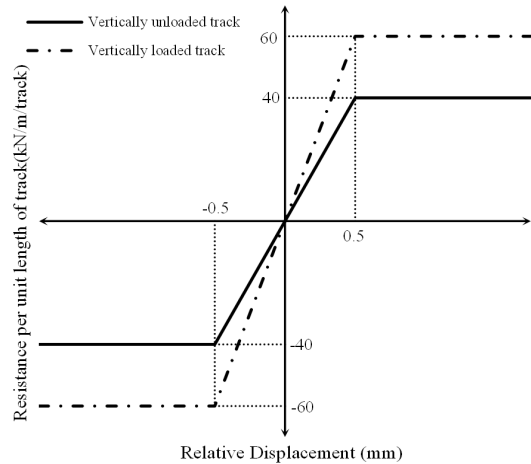
(1) 물성치

해석에 사용한 물성치는 다음 Table 1과 같으며, 체결장치의 종방향 저항력은 KR C-08080[3]을 참고하여 Fig. 4와 같이 고려하였다.

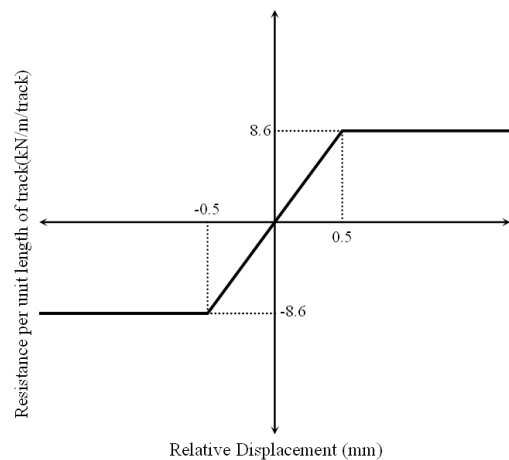
슬라이딩 층의 마찰력은 비선형 거동으로 고려하였으며, 마찰계수를 0.3[5]으로 가정하여 산정하였다. 슬라이딩 층의 저항선도는 콘크리트 슬래브와 레일 자중을 고려하여 Fig. 5와 같이 적용하였다.

[Table 1] Properties of Materials

Materials	Properties	
Rail (UIC60)	Cross-sectional Area (m ²)	0.0155
	Modulus of elasticity (N/m ²)	2.1E+11
	Thermal coefficient (1/°C)	1.2E-5
	Moment of Inertia (m ⁴)	3.055E-5
Deck	Cross-sectional Area (m ²)	12.84
	Modulus of elasticity (N/m ²)	3.1E+10
	Thermal coefficient (1/°C)	1.0E-5
	Moment of Inertia (m ⁴)	20.3
	Depth (m)	1.5
Concrete Slab	Cross-sectional Area (m ²)	1.008
	Modulus of elasticity (N/m ²)	3.1E+10
	Thermal coefficient (1/°C)	1.2E-5



[Fig. 4] Longitudinal resistance of fastener[4]



[Fig. 5] Longitudinal resistance of sliding layer

(2) 적용 하중

궤도-교량 상호작용을 유발시키는 요소인 온도하중, 시·제동하중, 열차수직하중은 다음과 같이 적용하였다.

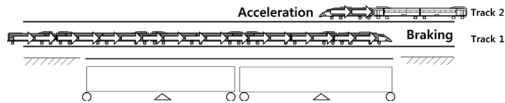
① 온도하중

- 콘크리트 교량 : +25℃
- 콘크리트 슬래브 : +25℃

② 종 방향 시·제동하중

시·제동하중은 등분포하중으로 레일 두정면에 작용하며, 열차 위치는 다양한 조건을 고려하여 가장 불리한 결과가 얻어지는 위치를 고려하였다.(Fig. 6) 제하하중 및 크기는 다음과 같다.

- 제동하중 : 20 kN/m/Track (300 m)
- 시동하중 : 33 kN/m/Track (33 m)



[Fig. 6] Vehicle loading position

③ 수직하중

열차 수직하중은 시·제동 하중과 동일한 위치에 다음과 같이 고려하였다.

- 80 kN/m/Track

3. 궤도-교량 상호작용 응답 비교

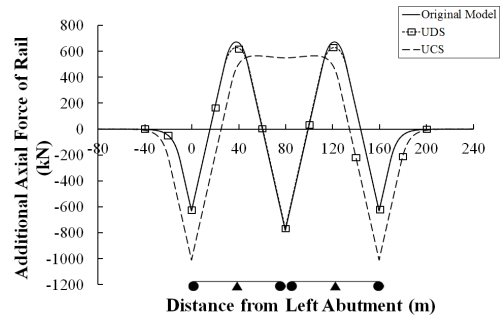
3.1 온도하중

3.1.1 종방향으로 비구속된 콘크리트 슬래브

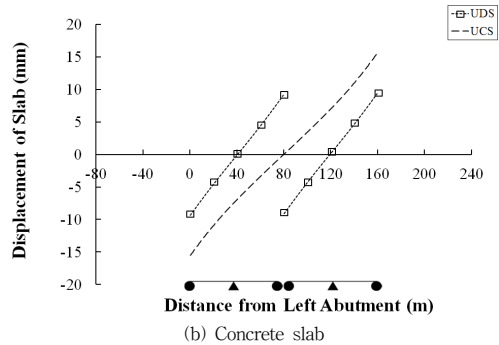
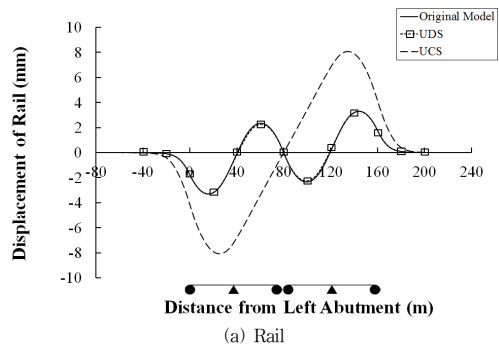
종방향으로 비구속된 콘크리트 슬래브의 연속성 여부에 따른 궤도-교량 종 방향 상호작용 거동을 분석하기 위해 기존 구조형식(Fig. 2, (a))과 콘크리트 슬래브가 일체형·분리형으로 존재하는 형식(Fig. 2, (b),(c))에 대한 레일부가축력, 레일 및 콘크리트 슬래브의 변위를 분석하였다.

UCS형식의 경우 교대부에서 최대 부가축력이 발생하였으며, 기존 형식(Original model)에 비해 최대 60.5%(Original Model; -629 kN, UCS; -1,010 kN)가 증가하였다. UDS형식의 경우 기존 형식과 유사한 부가축력선도를 보였다.(Fig. 7)

레일의 종 방향 변위의 경우 UCS형식은 기존 형식과 비교 시 변위가 최대 144%(Original Model; 3.307 mm,



[Fig. 7] Additional axial force of rail (Unrestrained condition)



[Fig. 8] Longitudinal displacement (Unrestrained condition)

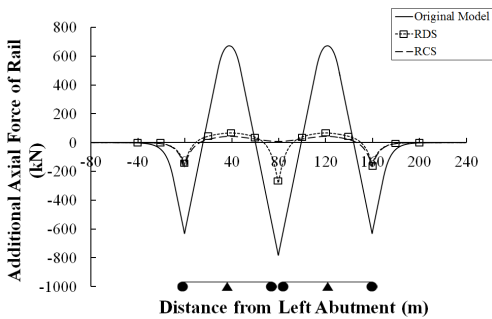
UCS; -8.077 mm) 증가하였으며, UDS형식의 경우 유사한 변위가 발생하였다.(Fig. 8,(a)) UCS형식과 UDS형식의 콘크리트 슬래브의 변위비교 시 UCS형식에서 최대 약 66%(UDS; 9.35 mm, UCS; 15.5 mm) 큰값을 나타냈다.(Fig. 8,(b)) 온도변화에 의하여 거더 뿐만 아니라 슬라이딩층이 설치되는 콘크리트 슬래브 또한 신축이 발생하며, 이로 인하여 UDS형식의 경우는 기존 형식과 동일한 거동을 보이나 UCS형식의 경우 경간장이 길어지는 효과로 인하여 오히려 기존형식 대비 불리한 형식으로 판단

된다. 그러므로 슬라이딩층이 설치되는 콘크리트 슬래브는 온도에 따른 신축이 발생하지 않도록 교량 종방향으로 구속시켜야 함을 알 수 있다.

3.1.2 종방향으로 구속된 콘크리트 슬래브

기존 구조형식(Fig. 2, (a))과 종방향으로 구속된 콘크리트 슬래브가 일체형·분리형으로 존재하는 형식(Fig. 2, (d),(e))에 대한 레일부가축력, 레일 및 콘크리트 슬래브의 변위를 분석하였다.

RDS형식의 경우 중앙교각 80 m지점에서 최대 부가축력이 발생하였으며, 기존 형식에 비해 약 64%(Original Model; -782.0 kN, RDS; -280 kN)가 저감되었다. RCS형식의 경우 좌·우측 교대부에서 최대부가축력이 발생하였으며, 기존 형식에 비해 약 73%(Original Model; -631 kN, RCS; -167 kN)저감되었다.(Fig. 9)

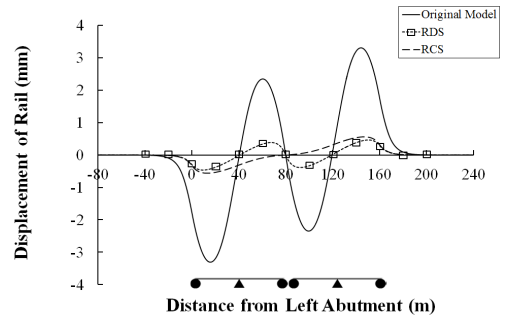


[Fig. 9] Additional axial force of rail (Restrained condition)

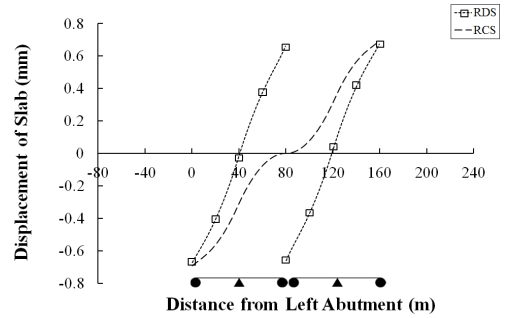
레일의 종 방향 변위의 경우 RCS형식은 기존의 모델과 비교 시 최대 약 83%(Original Model; -3.307 mm, RCS; 0.561 mm) 저감되었으며, RDS형식의 경우 약 86%(Original Model; -3.307 mm, RDS; 0.464 mm) 저감되었다.(Fig. 10,(a)) RCS형식과 RDS형식의 콘크리트 슬래브의 최대 변위는 각각 0.69 mm, 0.67 mm로 유사하게 나타났다.(Fig. 10,(b))

이상의 해석을 통하여 온도변화에 의한 거동을 살펴본 결과, Fig. 2에서 제시된 5가지 구조형식 중 구속된 콘크리트 슬래브가 일체형(RCS모델, Fig. 2, (e))으로 설치된 모델이 상호작용 저감에 가장 효과적인 것으로 판단된다.

RCS 모델의 상호작용 저감 원인을 분석하기 위하여 체결장치에 발생하는 종방향력 및 레일과 콘크리트 슬래브의 종 방향 상대변위를 분석하였다.(Fig. 11)

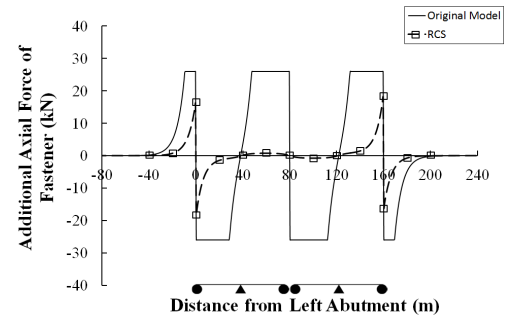


(a) Longitudinal displacement of rail

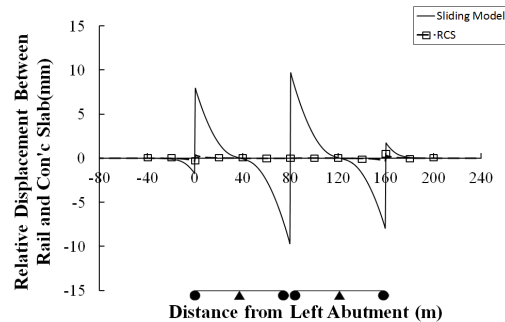


(b) Longitudinal displacement of concrete slab

[Fig. 10] Longitudinal displacement (Restrained condition)



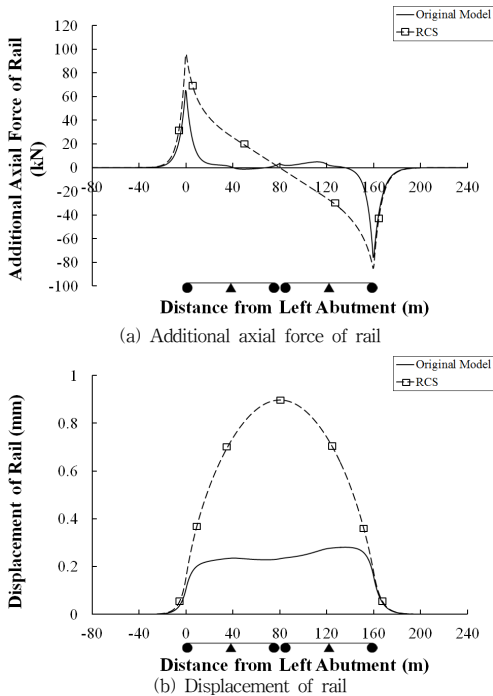
(a) Axial force



(b) Relative displacement between rail and concrete slab

[Fig. 11] Behavior of fastener

기존 형식의 경우 Fig. 11,(a)와 같이 교량의 가동단 (Roller) 근처에서 체결장치는 소성거동을 보이나, 슬라이딩 층을 도입한 RCS모델의 체결장치는 전 구간에서 탄성거동을 보이고 있다. 또한, 레일과 콘크리트 슬래브의 최대 상대변위는 RCS모델에서 거의 발생되지 않음을 알 수 있다.



[Fig. 12] Behavior of rail according to accel/braking load

3.2 열차하중

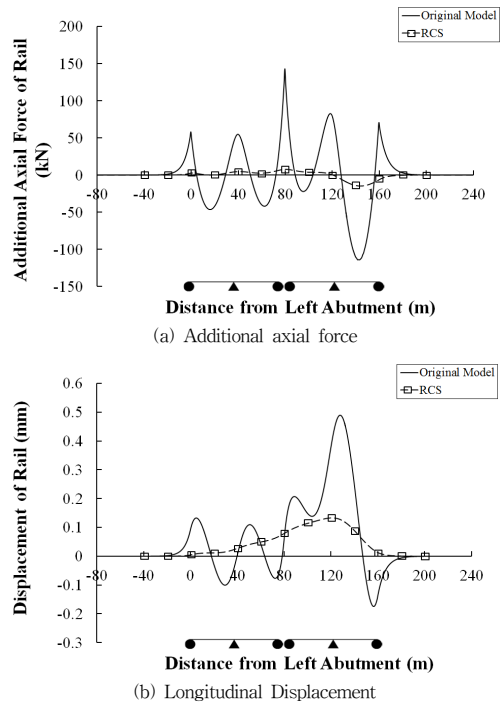
본 절에서는 궤도-교량 상호작용 저감 효과가 가장 크게 발생한 RCS형식에 열차하중을 재하하여 상호작용효과를 분석하였다.

열차의 시·제동하중 재하 시 레일의 부가축력과 변위는 Fig. 12와 같다.

열차의 시·제동하중 작용에 의해 레일에 발생하는 축력은 슬라이딩 층을 고려한 형식인 RCS모델이 기존형식에 비해 최대 약 47.3%(Original Model; 65.1 kN, RCS; 95.9 kN)가 증가하였으며, 변위는 최대 약 220%(Original Model; 0.280 mm, RCS; 0.897 mm) 증가하였다. 기존형식에서는 레일상에 작용하는 열차의 시·제동하중에 의한 응답에 교량구조물의 강성과 기하조건이 영

향을 미치게 된다. 그러나 궤도와 교량이 종방향으로 분리된 RCS모델에서는 교량구조물의 기하조건과 강성이 시·제동하중에 의한 궤도의 응답에 영향을 미치지 않게 되어 기존 형식보다 레일의 부가축력과 변위가 크게 발생하게 되는 것이다. 그러므로 RCS모델을 적용한 궤도-교량 시스템에서는 시·제동하중에 의한 축력과 변위를 궤도 구조에서 제어 될 수 있도록 하는 대책이 필요하다.

열차의 수직 하중 재하 시 레일에 발생하는 축력과 변위는 Fig. 13과 같다.



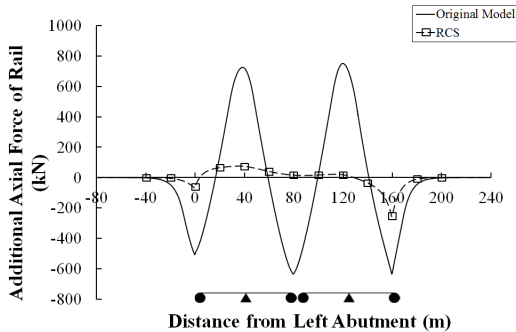
[Fig. 13] Behavior of rail according to vertical load

열차 수직하중을 고려했을 때 RCS모델에 발생하는 최대 부가축응력 발생위치는 기존형식과 동일하게 나타났으며, 약 94%(Original Model; 143 kN, RCS; 7.72 kN)가 감소하는 효과가 나타났다. 변위 또한 최대 변위발생 위치는 기존 형식과 동일하게 나타났으며, 크기는 기존 모델보다 약 73%(Original Model; 0.489 mm, RCS; 0.132 mm) 작게 나타났다.

3.3 하중 조합

온도 하중, 열차의 시·제동 하중 및 수직 하중에 대한

상호작용 효과를 조합하여 기존형식과 RCS모델의 부가 축력을 비교하였다.(Fig. 14)



[Fig. 14] Additional axial force(Combination load)

슬라이딩층이 고려된 RCS모델에 발생하는 레일의 최대 부가축력 비교 시 기존형식보다 약 59.3 % (Original Model; 636 MPa, RCS; 259 MPa)저감된 것임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 궤도와 교량 상판 사이에 슬라이딩 층이 존재하는 새로운 형식을 적용하여 궤도-교량 종방향 상호작용 해석을 수행하였으며, 분석을 통하여 다음과 같이 궤도-교량 상호작용 저감형 궤도-교량 구조시스템 개발의 방향을 제안하였다.

- 궤도-교량 종방향 상호작용 저감을 위해서는 궤도와 교량을 종방향으로 분리시키는 슬라이딩 층이 존재하는 콘크리트 슬래브를 교량길이 전체에 걸쳐 연속적으로 시공되어야 한다.
- 연속적으로 시공된 콘크리트 슬래브는 온도 변화에 의한 신축거동이 방지될 수 있도록 종방향으로 구속되어야 한다.
- 열차의 시·제동하중에 의한 궤도의 응답(축력, 변위)을 궤도구조에서 제어할 수 있는 대책의 수립이 필요하다.
- 슬라이딩 층에 적용할 패드의 소재는 최소의 마찰력을 장기간 유지할 수 있어야 하며 상호작용 거동에 의한 파손에 충분한 저항성을 가져야 한다.

References

- [1] N.H. Lim, K.C. Lee and Y.Lee, Reduction technology of track-bridge interaction to enhancing the application of railway bridges with longer continuous span, Ministry of Land, Infrastructure and Transport R&D Report, 2014.
- [2] S. Shuli, Z. Wenjian, W. Zhaohu, S. Wei,, “Design of unballasted track bridges on Beijing- Tianjin intercity railway”, *Engineering Sciences*, 9(4),2011
- [3] ABAQUS/Standard User’s Manual - Version 6.13, Dassault Systemes, 2013
- [4] KR(KOREA RAIL NETWORK AUTHORITY), “KRC-08080 : Track-bridge longitudinal interaction analysis”, January, 2014
- [5] K.C. Lee, “Feasibility Analysis of Sliding Slab Track for Reducing Track-Bridge Interaction”, *Conference of the Korean society for railway*, May, 2014

윤 경 민(Kyung-Min Yun)

[정회원]



- 2009년 2월 : 충남대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>
구조공학, 강구조, 궤도공학

최 신 형(Shin-Hyung Choi)

[정회원]



- 2013년 2월 : 건양대학교 건설시스템공학과 (공학사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 석사과정

<관심분야>
구조공학, 궤도공학

송 대 석(Dae-Seok Song)

[정회원]



- 2014년 8월 : 충남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1999년 2월 ~ 현재 : 철도청, 한국철도시설공단 근무

<관심분야>

구조공학, 궤도공학

이 경 찬(Kyoung-Chan Lee)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학사)
- 2007년 2월 : 서울대학교 지구환경시스템공학부 (공학박사)
- 2008년 8월 ~ 20011년 5월 : Auburn University 연구원
- 20011년 6월 ~ 2013년 3월 : 특허청 심사관

- 2013년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

구조공학, 교량공학, 궤도공학

임 남 형(Nam-Hyoung Lim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2001년 8월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학박사)
- 2003년 7월 ~ 2005년 3월 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2005년 4월 ~ 현재 : 충남대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 강구조, 궤도공학