무도상 장대교량 레일의 장대화 방안에 대한 소고

Installation of CWR on Long-Span Bridges of Ballastless Tracks

박종찬* · 이영섭** · 유근한*** · 임남형****

Park, Jongchan*, Lee, Yeongseob**, Ryou, Guenhan***, and Lim, Namhyoung****

Abstract

In Korea, ballastless track bridges have been built since the early 1900s and are one of the most popular railway bridges. However, because the self-weight of the upper structure is relatively lightweight compared to the train, severe noise and vibration occur, and it is difficult to increase the train speed, owing to a 20-50 m long rail being connected by the seam plate. To overcome these problems, welded rails for ballastless track bridges are urgently required. This study preliminarily investigates the installation of continuous welded rails (CWR) for ballastless tracks in order to analyze the effects of and issues due to the track-bridge interaction in this configuration and determine solutions.

Key words : Ballastless Track, Continuous Welded Rail, Additional Axial Stress

요 지

국내에서 무도상교량은 1900년대 초반부터 건설이 시작되어 현재까지 가장 많이 부설되어 온 철도교 형식 중 하나로 100년 이상 공용중인 교량도 있는 상황이다. 그러나 무도상교량은 상부구조의 자중이 열차보다 상대적으로 경량이라는 특성때문에 심각한 소음과 진동이 발생하며, 20~50 m 길이의 레일을 이음매판으로 연결하여 사용하고 있어 고속화도 어려운 실정이다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 무도상교량 레일의 장대화가 시급하다. 본 논문은 무도상교량 레일의 장대화를 위한 기초연구로서 장대화시 궤도 교량 상호작용으로 인한 영향과 문제점을 파악하고 그 해결방안에 대해 알아보고자 한다.

핵심용어 : 무도상 교량, 장대레일, 레일부가응력

1. 서 론

국내에서 무도상교량은 1900년대 초반부터 건설이 시작되어 현재까지 가장 많이 부설되어 온 철도교 형식 중 하나로 100년 이상 공용중인 교량도 있는 상황이다. 그러나 무도상교량은 상부구조의 자중이 열차보다 상대적으로 경량이라는 특성때문에 심각한 소음과 진동이 발생하며, 20~50 m 길이의 레일을 이음매판으로 연결하여 사용하고 있어 고속

화도 어려운 실정이다.

그러나 우리나라의 많은 무도상 교량은 장대레일화시 발생하는 레일부가응력으로 인해 레일 장대화를 하지 못하고 있다.

최근 열차 속도의 증가로 장대레일은 필수적인 요소가 되었지만 무도상 교량의 경우 레일 장대화를 하지 못해 열차의 감속운행 및 승차감 저하로 많은 불편함을 유발하고 있다. 교량구간에 장대레일을 부설하는 경우 궤도-교량 상호작용

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

Member, Ph. D Candidate, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

**정회원, 충남대학교 토목공학과 석사과정

Member, Master Candidate, Department of Civil Engineering, Chungnam National University

***충남대학교 철도연구소 연구교수

Research Professor, Chungnam Railway Research Institute, Chungnam National University

****교신저자, 정회원, 충남대학교 토목공학과 정교수(Tel: +82-42-821-7749, Fax: +82-42-821-8867, E-mail: nhrim@cnu.ac.kr)

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

용에 의한 장대레일의 부가응력 및 변위에 대한 안정성을 검토하여야 한다. 국외의 Eurocode 1(Part 2) (BS EN 1991-2, 2003) 및 UIC Code 774-3R (2001), 국내의 KR C-08080, KR C-08090 (2014)에서 수치해석을 통한 검토 방법 및 기준 값을 규정하고 있다.

최근 국내의 선행연구로 궤도-교량 상호작용을 고려한 장대레일 궤도의 설계방법에 대한 연구가 있었으며(Yun, 2016), Yun et al. (2016)은 다양한 교량의 궤도-교량 상호작용의 영향을 분석하였다.

본 논문에서는 무도상 교량 상에 장대레일 목침목 궤도를 부설하는 경우에 대한 궤도-교량 상호작용 효과를 분석하고 상호작용 효과를 저감시킬 수 있는 방안에 대해 논하고자 한다.

2. 대상교량 및 궤도

2.1 교량

대상 교량은 3경간 연속 플레이트 거더교 6개소와 3경간 연속 트러스 교량 3개소로 총지간 1038.6 m의 연장을 가지고 있다. Fig. 1(a)의 플레이트거더 교폭은 9.0 m이고, Fig. 1(b)의 트러스교량 교폭은 9.3 m이다. 교량 받침은 MFMM의 형식으로 이루어져 있다.

Fig. 1. Target Bridge

대상교량의 트러스 구간 단면도는 Fig. 2, 부재의 대표단면은 Fig. 3과 같으며, 사용강재는 SS400(허용응력 140MPa) 강종이다(KR, 2013).

Fig. 2. Cross Section of the Truss Bridge

Fig. 3. Representative Section of Truss Member

2.2 궤도

대상교량에서 사용된 궤도는 Fig. 4와 같은 무도상 목침목 궤도이다.

Fig. 4. Ballastless Track

레일은 KR60을 사용하였으며, 목침목은 교량용 침목(230 mm × 230 mm × 3000 mm)이다. 물성치는 Table 1과 같다. (Lim, 2001)

Table 1. Material Property of Rail and Sleeper

Materials	Properties	
Rail (60KR)	Cross-sectional Area (mm ²)	7.75E+3
	Modulus of elasticity (N/mm ²)	2.1E+5
	Thermal coefficient (/°C)	1.2E-5
	2 nd Moment of Inertia (mm ⁴)	6.04E+7
Wooden Sleeper	Cross-sectional Area (mm ²)	5.29E+4
	Modulus of elasticity (N/mm ²)	1.23E+4
	2 nd Moment of Inertia (mm ⁴)	2.33E+8

체결장치의 강성은 Table 2와 같으며(Han et al., 2006), 침목 고정장치의 강성은 변수로 설정해 해석을 진행하였다.

Table 2. Stiffness of Fastener

Type	Resistance
Longitudinal	8000 N, 0.5 mm
Lateral	2.6E+4 N/mm
Vertical	3.5E+4 N/mm
X-axis Rotation	6.0E+4 N/rad
Y-axis Rotation	
Z-axis Rotation	

2.3 F. E. 모델

궤도-교량 상호작용(Track Bridge Interaction, TBI)의 수치해석은 Abaqus 6.13 (ABAQUS, 2013)을 사용하여 수행하였다.

레일-침목간의 레일 체결장치와 침목-중형간의 저항력을 모사하기 위해 2개의 비선형 스프링(Spring2, nonlinear)을 사용하였으며, 교량의 휨거동에 의한 궤도-교량 상호작용 영향을 고려하기 위해 하현재와 중형의 상면과 중립축의 높이를 고려하여 모델링을 수행하였다.

또한 장대레일의 특성인 부동구간을 모사하기 위해 교량 양끝에서 토공부 300 m를 적용하였다. Fig. 5는 유한요소 해석모델을 나타낸다.

Fig. 5. F. E Model

2.4 작용 하중

궤도-교량 상호작용 해석을 위한 하중은 철도설계지침 및 편람 KR C-08080의 기준을 적용하였다.

온도하중의 경우 거더에 +35℃를 재하 하였으며, 차량하중의 경우 여러 CASE를 분석해 다음과 같이 최악 조건으로 재하하였다(Fig. 6).

Fig. 6. Location of Vehicle Load

3. 궤도-교량 상호작용

기존 무도상 교량상 레일의 장대화 기능 여부를 판단하기 위해 침목-중형간의 체결을 강결이라 가정하여 TBI 해석을 수행하였다.

3.1 레일부가응력

0 m를 기점으로 1번 트러스 교량 시점부터의 거리에 따른 레일 부가응력의 선도를 Fig. 7에 도시하였다.

Fig. 7. Additional Axial Stress of Rail

레일 부가응력 확인결과 Fig. 1(b)의 1-2번 트러스 사이의 가동구간에서 최대부가응력이 나타났으며(145.2MPa), KR C-08080에서 제시하는 허용레일부가응력(72MPa)을 초과 하였다. 허용레일부가응력을 초과하는 구간의 길이는 총 90.4 m (1-2번 트러스 사이: 34.4 m, 2-3번 트러스 사이: 30.4 m, 3번 트러스와 토공사: 25.6 m)이다.

3.2 교량 부가응력

트러스 구간의 중형과 하현재에 작용하는 수직응력을 Fig. 8에 도시하였다.

Fig. 8. Axial Stress of Truss Members

중형과 하현재에 작용하는 최대응력은 각각 24.2MPa, 30.7MPa로 Fig. 1(b)의 2번 트러스구간 고정지점부에 나타났다. 상호작용에 의해 교량 부재에 추가적으로 부가되는 응력은 SS400 강종의 허용응력(140MPa) 대비 약 21.9%까지 발생됨을 알 수 있다.

3.3 반력

교량 받침에 작용하는 최대수평반력의 크기와 위치는 Fig. 9와 같이 1448kN이다. 기존에 부설된 무도상 교량의 받침 성능을 고려하였을 때, 성능을 초과할 가능성에 주의를 기울여야 한다.

Fig. 9. Location of Reaction Force

4. 침목-중형 연결강성 변경을 통한 장대화

궤도-교량 상호작용에서 온도하중의 영향이 전체 상호작용 영향 중 대부분을 차지한다. 그러므로 온도하중에 의한 영향을 저감 시켜준다면 레일의 부가응력을 저감 시킬 수 있다.

4.1 STP를 적용한 궤도-교량 상호작용

침목-중형간의 연결 강성을 “0”으로 가정한 궤광(Sliding

Track Panel, STP)을 적용해 궤도-교량 상호작용 해석을 진행하였다.

4.1.1 레일부가응력

STP 적용시 와 3장과 같은 강결조건(Fix)에 대한 트러스 교량 시점부터의 거리에 따른 레일 부가응력의 선도를 Fig. 10에 도시하였다.

교량 전 구간에 STP Track적용 시 온도하중에 의한 영향이 제거될뿐만 아니라 수직하중에 의한 종방향 궤도-교량 상호작용력도 제거된다. 그러나 시제동하중에 의한 영향은 증가되는 것을 알 수 있다(47.2MPa).

하중조합에 의한 전체 레일부가응력은 Fig. 10(d)와 같이 온도하중에 의한 영향이 제거됨으로 허용부가응력을 만족한다.

교량의 부가응력 및 반력은 궤도에 의한 영향이 교량에 전달되지 않는다.

4.1.2 토공부 레일 변위

KR Code-08080에서는 자갈궤도에서 시제동 하중 작용시 레일의 수평방향 변위를 4 mm 이내로 제한하고 있다.

Fig. 11에 보인 것처럼 교량과 토공경계 부근의 자갈궤도에서 9.9 mm의 레일변위가 발생하며 이는 자갈의 교란을 일으켜 복진과 좌굴 위험에 노출될 수 있다.

Fig. 10. Additional Axial Stress (STP)

Fig. 11. Longitudinal Displacement of Rail

4.2 궤도-중형 연결부의 적정 강성

전 구간 STP의 적용이 응력해소면에서 큰 효과가 있지만 STP의 안정성과 토공부 레일허용변위 초과 등의 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 침목과 교량중형과의 적정 연결강성을 도출하고자 한다.

콘크리트궤도에서 레일부가응력의 감소를 위해 사용하는 Reduced Longitudinal Resistance (RLR) 체결장치의 개념과 같이 침목-중형 연결강성의 변화에 따른 영향을 분석하였다.

4.2.1 레일부가응력

침목-중형간 연결강성을 변수로 $1\text{E}-3 \sim 1\text{E}+11\text{N/mm}$ 의 범위로 TBI 해석을 진행하였다.

Fig. 12는 강성에 따른 레일부가응력 선도이다.

Fig. 12. Additional Axial Stress w.r.t the Connection Stiffness

Fig. 12로부터 침목-중형 연결강성이 체결장치의 종방향 강성(Table 2의 8000N)보다 작아지는 지점에서부터 부가축 응력이 감소하는 것을 알 수 있으며, 약 3400N/mm 이하가 되면 허용부가응력을 만족하는 것으로 나타났다.

4.2.2 교량 부가응력

연결강성별 궤도-교량 상호작용으로 인한 중형과 하현재에 작용하는 응력은 Fig. 13과 같다.

(a) Axial Stress of Longitudinal Beam

(b) Axial Stress of Main Girder

Fig. 13. Axial Stress of Members w.r.t the Connection Stiffness

연결강성이 작아질수록 중형과 하현재의 응력은 작아지는 경향을 보이며 허용응력을 만족할 수 있는 적정연결강성을 산정할 필요가 있다.

4.2.3 반력

연결강성별 궤도-교량 상호작용으로 인한 교량 받침에 작용하는 반력은 Fig. 14와 같다.

Fig. 14. Reaction Force w.r.t the Connection Stiffness

연결강성이 작아질수록 받침의 수평 반력은 작아지는 경향을 보이며 받침의 성능을 만족할 수 있는 적정연결강성을 산정할 필요가 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 궤도-교량 상호작용 수치해석을 통해 무도

상 교량상 레일의 장대화 시 발생할 수 있는 문제점과 그 해결방안을 모색하였다. 결론은 다음과 같다.

- (1) 무도상 교량에서 침목-중형 간의 연결강성이 강결이라 가정했을 때 레일부가응력은 허용부가응력을 초과할 것으로 평가되고 있으며, 교량 부재에 추가되는 응력도 부재의 허용응력과 비교하여 상당 수준(약 22%) 발생되고 있으므로 교량 설계하중에 의한 응력과 조합하여 부재 건전성을 평가하여야 한다. 또한 교량받침에 작용하는 수평 반력을 고려하여 받침의 성능과 교각의 안전성을 평가하여야 한다.
- (2) 전 구간 STP시스템 적용 시 온도하중과 수직하중의 영향 제거로 인해 강결시스템에 비해 67%의 레일부가응력(145.2MPa → 47.2MPa)의 저감 효과가 있으나, 안정성과 과도한 토공부 레일변위로 인해 복진과 좌굴을 야기할 수 있다.
- (3) 침목과 중형 간 연결강성 변화에 따른 궤도-교량 상호작용 영향분석으로 레일부가응력, 교량부가응력과 반력의 허용치를 만족할 수 있는 적정 연결강성을 산정할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(18RTRP-B137866-02)에 의해 수행되었습니다.

References

- ABAQUS. (2013). *Standard user's manual*. Version 6.13, ABAQUS, Inc.
- BS EN 1991-2. (2003). *Eurocode 1: Actions on structures*

- *Part 2: Traffic loads on bridges*. British Standard.
- Han, S.Y., Park, N.H., Lim, N.H., and Kang, Y.J. (2006). Sensitivity of the continuous welded rail and the fastener on the track stability. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 4A, pp. 719-726.
- Lim, N.H. (2001). *Three dimensional nonlinear analysis of continuous welded rail tracks*. Ph.D. dissertation, Korea university.
- KR (Korea Rail Network Authority). (2013) *Railway Design Standards (Road Bed)*.
- KR C-08080. (2014). *Analysis of track-bridge longitudinal interaction*. Korea Rail Network Authority.
- UIC Code 774-3R. (2001). *Track/bridge interaction recommendations for calculations* (2nd ed.). International Union of Railways.
- 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.
- Yun, K.M., Park, B.H., and Lim, N.H. (2016). Study on response according to longitudinal track-bridge interaction analysis methods with respect to various type of bridge. *Information, International Information Institute*, Vol. 19, No. 8(B), pp. 3559-3564.

Received	November 12, 2018
Revised	November 13, 2018
Accepted	November 19, 2018