보강판 설치에 따른 무도상 교량 미끄럼 허용 궤광 시스템의 횡저항력 증대 효과

Effect of Increasing Lateral Resistance of Ballastless Bridge Sliding Track Panel System by Installation of Reinforcement Plate

박종찬* · 임남형**

Park, Jongchan*, and Lim, Nam-Hyoung**

Abstract

Recently, train speeds have been increased in Korea owing to the expansion of Korea Train eXpress (KTX) operations and development of next-generation high-speed trains. Hence, continuous welded rails (CWRs) that affect the running stability and ride comfort of trains have become essential elements. However, it is difficult to install CWRs on most of the non-ballast bridges constructed since the 1900s owing to the rail additional stress that occurs during installation. As a solution to this problem, the sliding track panel (STP) system that allows longitudinal sliding is proposed. In the application of STP systems, securing the lateral buckling strength is an essential condition. Hence, a finite element analysis model considering the STP system is presented, and the necessity for reinforcement plates is investigated through a pure skeleton-track analysis. The minimum requirements and effects of increasing the stiffness of the reinforcement plates are derived by analyzing the lateral reinforcement plates.

Key words : Non-ballast Bridge, Continuous Welded Rail, Sliding Track Panel (STP), Reinforcing Plate

요 지

최근 국내에서는 기존 KTX의 운행확대와 차세대 고속열차의 개발로 인해 열차속도가 증가하고 있는 추세이다. 이로 인해 열차의 주행안정성과 승차감에 영향을 주는 레일장대화는 필수적인 요소로 자리잡고 있다. 그러나 1900년대부터 건설되어 현재까지 가장 많이 부설된 무도상 교량은 레일장대화시 발생하는 부가응력으로 인해 레일 장대화가 어려운 실정이다. 이에 대한 해결방안으로 종방향으로 미끄러짐을 허용하는 궤광(STP) 시스템의 개념이 제시되었다. 이러한 STP 시스템의 적용은 횡방향 좌굴 강도의 확보가 필수 요소이다. 이를 확인하기 위해 STP 시스템이 적용된 유한요소 해석 모델을 제시하였으며, 단순한 궤광 해석을 통해 보강판의 필요성에 대해 알아보았다. 또한 횡방향 보강판을 적용한 해석을 통하여 보강판의 최소 요건 및 강성 증대효과를 도출하였다.

핵심용어 : 무도상 교량, 장대레일, 미끄럼 허용 궤광, 보강판

1. 서 론

1900년대 초반부터 현재까지 공용중인 철도교량의 형식 중에는 Fig. 1과 같은 무도상 교량이 다수 존재하고 있다. 이러한 무도상 교량은 상부구조의 자중이 상대적으로 경량

이라는 특성으로 인해 심각한 소음과 진동을 발생시키며, 정적레일이 이음매판으로 연결된 형태로 고속화가 어려운 실정이다.

이러한 무도상 교량의 단점을 극복하고 열차주행성능을 향상시키기 위해 기존 유도상화 사업을 통해 상부구조를

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

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

Fig. 1. Ballastless Railway Bridge

Fig. 2. Concept of STP

바닥판이 있는 구조로 교체하는 방법대신 무도상 궤도 구조를 유지하고 레일만을 장대화하는 연구가 진행되고 있다 (MLIT, 2019).

트러스 교량과 같이 경간이 긴 교량에서 기존의 궤도구조를 유지하면서 레일장대화를 부설하기 위해서는 궤도-교량 상호작용으로 인해 발생하는 레일 부가응력의 한계를 극복해야 한다.

이와 같은 제한조건을 해결하기 위한 방안으로 Fig. 2와 같이 궤도-교량 상호작용으로 인한 영향을 원천적으로 제거하는 미끄럼 허용 궤광(STP) 시스템 연구가 진행된바 있다 (Lim et al., 2019).

기존 무도상 교량의 레일장대화에 대한 연구 결과, 1경간의 길이가 188.4 m인 장경간 교량의 궤도-교량 상호작용으로 인한 레일부가응력을 만족하기 위해선 약 60 m의 STP시스템 적용이 요구된다(Park et al., 2018). 이와 같이 긴 구간의 STP시스템 적용은 레일 부가응력 감소에는 효과적이지만, 좌굴 안정성이 감소해 횡방향 저항력 보강방안이 필수적이다(Park et al., 2020). 이를 위해 횡방향 저항력 보강방안으로 Fig. 3과 같이 횡방향 저항력을 증가시킬 수 있는 보강판 설치를 제안하였다.

그리하여 본 논문에서는 STP 시스템적용을 위하여 횡방향 보강판의 강성 증대효과를 유한요소 해석을 통해 알아보고, 소요 횡방향 좌굴응력을 만족하기 위한 보강판의 최소 사양을 도출하였다.

Fig. 3. Installation of Reinforcing Plate

Fig. 4. F.E Model (Longitudinal Section)

(a) General Section

(b) STP Section

Fig. 5. F.E Model (Cross Section)

2. F.E. Model

유한요소 해석 모델은 다음 Fig. 4와 같이 STP 시스템 적용구간 60 m와 부동구간을 고려한 양쪽 100 m의 일반구간을 포함한 총연장 260 m이다.

레일은 KR60, 체결장치는 목침목용 E-clip, 침목은 교량용 목침목(Bridge Sleeper), 침목 고정장치는 개량형 고정장치이며 궤간은 표준궤간 그리고 침목 간격은 0.4 m이다.

Fig. 5는 해석모델의 단면이며, 일반구간의 경우 Table 1과

Table 1. Stiffness of General Section

Type	Resistance
Longitudinal	6000 N, 2 mm
Lateral	560 N, 0.8 mm
Vertical	3.5E+4 N/mm

Table 2. 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 ($1/^\circ C$)	1.2E-5
	2nd Moment of Inertia (mm^4)	6.04E+7
Bridge Sleeper	Cross-sectional Area (mm^2)	5.29E+4
	Modulus of elasticity (N/mm^2)	1.23E+4
	2nd Moment of Inertia (mm^4)	2.33E+8

Table 3. 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	4.0E+5 N/rad

같이 무도상 교량의 침목고정장치의 저항력에 해당하는 3축에 대한 CONN3D2요소를 적용하였으며, STP 구간은 횡방향 좌굴해석을 위해 무한강성의 수직방향 스프링 요소만 적용하였다.

궤도의 구성요소의 물성치는 Han et al. (2006)과 Park et al. (2018)의 논문을 참고하였다(Table 2).

레일 체결장치의 모델링은 CONN3D2요소를 사용하였으며, 목침목 체결장치의 Z축 회전강성은 Association of American Railroads (1979)에서 수행한 실험값(AAR, 1979)을 사용하였으며, 그 외 강성은 Han et al. (2006)의 논문을 참고하였다(Table 3).

횡방향 보강판의 설치는 Fig. 6과 같이 보강효과를 최대화하기 위해 목침목 양쪽 끝에 설치하였으며, 보강판의 폭은 500 mm, 두께는 변수로 설정하였다.

분석을 위하여 사용한 유한요소 해석 프로그램은 Abaqus 2018ver이며, 해석기법으로는 Risk Method를 활용하였다.

3. 해석결과

본 연구에서는 STP 시스템에서 부족한 좌굴 안정성을

Fig. 6. Reinforcing Plate

Fig. 7. Analysis of Track Skeleton

확보하기 위한 보강판에 대하여 그 효과와 두께에 따른 영향을 분석하였다.

그에 앞서 보강판이 설치되지 않은 순수한 궤광의 좌굴강도를 평가해보고자 한다.

3.1 순수한 궤광의 좌굴강도 검토

Fig. 7과 같이 STP 시스템에서 순수한 궤광의 좌굴 강도를 평가하기 위해 해석을 진행하였다.

STP 시스템에서 요구되는 소요 횡강성은 레일의 최대 온도변화와 궤도교량 상호작용에 의해 발생하는 레일 부가 응력의 최대치를 합산한 값으로 설정하여야 한다.

현재 국내의 온도환경에서 장대레일에 발생할 수 있는 온도의 범위는 약 $-20^\circ C$ 에서 $60^\circ C$ 로 평가되고 있으며, 장대레일의 설정온도(중립온도)는 $25 \pm 3^\circ C$ 이다(Kang et al., 1999). 그러므로 압축력을 유발하는 레일의 최대 온도변화(ΔT_{max})

는 약 38 °C (92 MPa)로 평가된다. 또한 궤도-교량 상호작용에 의해 발생하는 압축응력의 최대 허용치 72 MPa이며(KR, 2017), 이를 합산한 164 MPa를 온도로 환산한 값 68 °C를 소요 횡강성으로 산정하였다.

해석 결과 탄성 좌굴로 발견되었으며, 이를 분석하기 위해 기하학적 초기결함의 영향을 도출할 수 있는 Southwell Plot Method를 활용하여 좌굴 하중을 산정하였다. 그 결과 약 45.56 °C로 도출되었으며, 이는 소요 횡강성 68 °C를 만족하지 못해 좌굴에 취약한 상태인 것을 알 수 있다.

3.2 보강판 두께에 따른 좌굴강도 검토

STP 시스템의 보강판의 설치에 따른 영향을 분석하기 위해 두께를 2 mm에서 20 mm까지 5가지의 CASE를 분석하였다(Table 4).

Fig. 8은 보강판 두께에 따른 해석결과이며, Southwell Plot Method를 활용한 좌굴하중의 산정결과를 Fig. 9 및 Table 5에 도시하였다.

해석 결과 STP 시스템의 보강판 설치는 횡방향 저항성능을 크게 증가시키는 것으로 나타났으며, 폭 500 mm 기준으로 두께 4 mm 이상 적용 시 소요횡강성을 확보할 수 있음을 확인할 수 있다.

여기서, 폭 500 mm 두께 4 mm일 때 횡방향 단면 2차모멘트는 $4.17E-05 \text{ m}^4$ 으로, 이를 만족할 시 형상요건에 맞는 다양한 폭과 두께를 조합하여 적용 가능함을 알 수 있다.

Table 4. Property of Reinforcing Plate

t (mm)	A (m ²)	I_{xx} (m ⁴)	I_{zz} (m ⁴)
2	0.001	3.33E-10	2.08E-05
4	0.002	2.67E-09	4.17E-05
6	0.003	9.00E-09	6.25E-05
10	0.005	4.17E-08	1.04E-04
20	0.01	3.33E-07	2.08E-04

(a) 2t

(b) 4t

(c) 6t

(d) 10t

(e) 20t

Fig. 8. Analysis of Reinforcing Plate

Fig. 9. Buckling Load by Southwell Plot

Table 5. Buckling Analysis Result

t (mm)	Buckling Load (°C)	Increment (%)
0	45.6	-
2	62.9	138
4	68.5	150
6	72.8	160
10	79.6	175
20	93.1	204

4. 결 론

본 논문에서는 미끄럼 허용 궤광 시스템(STP)의 횡방향 저항력 부재에 대한 해결방안으로 보강판 설치 시 발생하는 횡방향 항력 증대 효과와 최소 사양을 해석적으로 검토하였다. 결론은 다음과 같다.

STP 시스템을 적용한 좌굴해석 결과 탄성 좌굴이 발생하였으며, 이를 분석하기 위해 Southwell Plot 기법을 활용하여 좌굴하중을 산정하였다. 그 결과 횡방향 저항력 증대를 위한 보강판의 성능은 매우 효과적이며, 최소 4 mm 두께의 보강판 설치 시 좌굴하중이 150% 증가한 68.5 °C로 소요 횡강성 68 °C를 만족하는 것으로 나타났다. 이는 횡방향 단면 2차모멘트 기준으로 $4.17E-05 \text{ m}^4$ 으로 이를 만족할 시 다양한 현장조건에 대입해 적용 가능하다. 또한 보강판의 설치 궤도가 없는 무도상 교량에서 보도의 기능을 제공함으로써 작업자의 안전에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원

(20RTRP-B146886-04)에 의해 수행되었습니다.

References

- Association of American Railroads (AAR). (1979). Track Component Property Tests. *Report of Association of American Railroads*, Vol. 1, pp. 34-45.
- 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.
- Kang, Y.J., Lim, N.H., Shin, J.B., and Yang, J.S. (1999). Stability of Continuous Welded Rail Track under Thermal Load. *Journal of Korea Society of Steel Construction*, Vol. 11, No. 3, pp. 281-290.
- KR. (2017). *KR C-08080, Track-Bridge longitudinal interaction analysis*.
- Lim, N.H., Park, J.C., and Ryou, G.H. (2019). *Non-ballast Track Structure for Allowing Longitudinal Direction Slip of Steel Railway Bridge*. Korean Patent 10-1982567, May 21, 2019.
- Ministry of Land Infrastructure and Transport (MLIT). (2019). *Report on the Development of the Technology for the Continuous Welded Rail (CWR) on a Ballastless Track Bridge in Existing Lines*.
- Park, J.C., Lee, Y.S., Ryou, G.H., and Lim, N.H. (2018). Installation of CWR on Long Span Bridges of Ballastless Tracks. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 18, No. 7, pp. 47-52.
- Park, J.C., Lim, N.H., and Lee, C.O. (2020). Stiffness and Distance of Lateral Support Member Considering Buckling Strength of Sliding Track Panel. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 37, pp. 197-202.

Received	August 10, 2021
Revised	August 10, 2021
Accepted	August 26, 2021