

고속철도 차량의 시·제동 하중에 대한 교량상 장대레일의 주행안전성 평가

Stability of CWR track on the High-Speed Railway Bridges considering Braking and Accelerating Forces

진원중* 김병석** 광종원*** 강재윤*** 최은석*
Chin, Won-Jong Kim, Byung-Suk Kwark, Jong-Won Kang, Jae-Yoon Choi, Eun-Suk

ABSTRACT

In this paper, the main factors affect on the longitudinal rail force are discussed. Considering rail-bridge interaction, analytical and experimental evaluation of track behavior has been achieved. It is concluded that the horizontal ballast strength, the expansion length of the bridge span, and the stiffness of the bridge sub-structure are the significant parameters affecting the stability of the continuous welded rail (CWR) track. And, it is suggested that the ballast resistance forces should be maintained to ensure the track stability during the service.

1. 서론

고속철도 교량의 설계 단계에서 시·제동하중에 대한 주행안전성 검토를 하는 경우에는 레일을 통해 교량 바닥판으로 전달되는 하중 분배율을 가정하거나 전체 하중이 교량으로 전달된다고 가정하여, 바닥판간 상대변위를 일정치 이하로 제한함으로써 레일에 발생하는 응력이나 과도한 변형을 간접적으로 제한하고 있으나, 실제로는 교량구조물의 강성과 도상 저항력에 의한 레일-교량상호작용에 의해서 교량상 궤도구조의 거동이 달라진다. 또한, 교량상 장대레일의 주행안전성은 교각 및 지반의 강성을 포함한 교량구조물의 강성과 도상저항력의 비선형 거동 특성에 의해 결정되며, 온도하중 및 시동/제동하중에 대한 레일-교량 상대변위, 레일 응력, 교량 변위 등을 검토하여 궤도구조물의 주행안전성 여부를 판단한다. 지금까지의 연구결과에 의하면, 교량상 장대레일의 주행안전성에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 도상저항력과 교량 하부구조 강성이며, 이들의 변화에 대해서 레일-교량 상대변위가 가장 민감하게 변화하여 전체적인 주행안전성을 결정하는 가장 중요한 판단 기준이 된다.

본 연구에서는 고속철도 교량 시공시에 계측된 실제 교각강성 범위에 대해서 도상저항력 변화에 대한 매개변수 해석을 수행하고, 주행안전성 확보를 위한 도상저항력의 관리 수준을 제안하였다. 또한, 실제 고속철도 노선상에서의 차량 시·제동 실험을 수행하여, 구조해석 결과와 실제 계측결과를 비교하였다.

* 한국건설기술연구원 구조연구부, 연구원
** 한국건설기술연구원 구조연구부, 연구위원
*** 한국건설기술연구원 구조연구부, 선임연구원

2. 현장계측을 통한 고속철도교량 하부구조 강성도 평가

고속철도 교량상 장대레일의 거동을 해석적으로 보다 정확하게 평가하기 위해서, 고속철도교량 건설중에 실제 교각의 강성을 현장에서 직접 계측하였다. 교각 강성도는 바닥판이 시공되지 않은 한 쌍의 교각을 그림 1에서와 같이, wire rope로 연결하여 유압잭으로 가력하면서 교각상단에서의 변위와 상단 및 기초부에서의 회전각 등을 계측하였고, 계측결과를 등가의 스프링 계수로 환산하였다. 이때 환산된 강성치는 교각과 기초강성을 포함한 전체 하부구조의 강성이다.

경부 고속철도 노선상의 교각 단면형상 및 높이를 달리하는 4개 교량에 대한 교각강성도 계측 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 고속전철교량의 교각강성은 교각의 단면형상이나 높이와 상관없이 약 200~260 MN/m 의 범위에 분포되어 있는 것으로 나타났다.

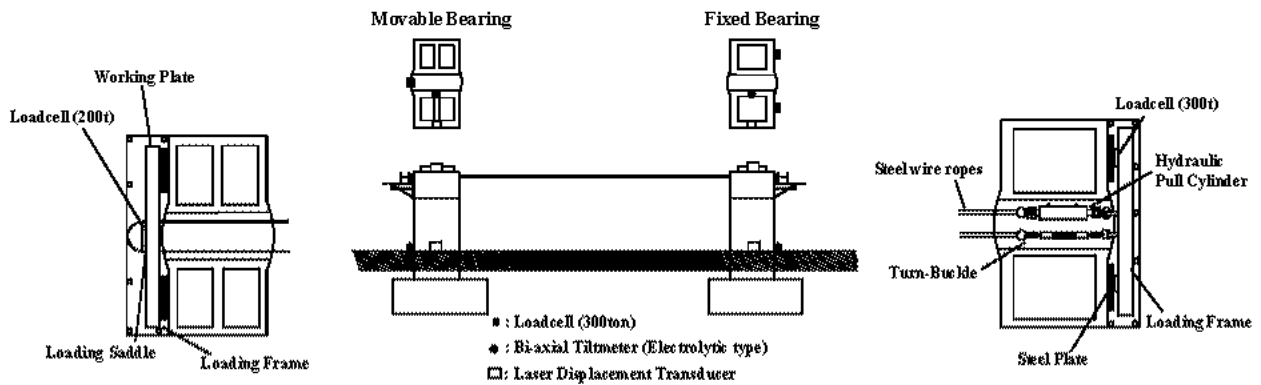


그림 1. 고속철도교량 하부구조 강성도 계측 개념도

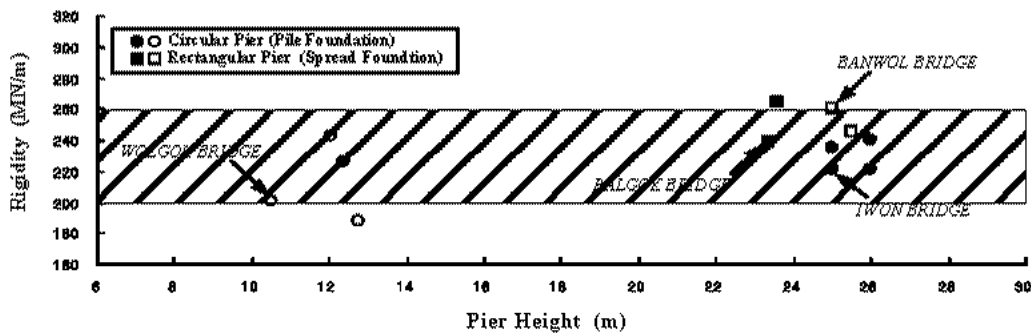


그림 2. 4개 주요 교량에 대한 하부구조 강성도 계측 결과

3. 구조해석을 통한 교량상 장대레일의 거동 평가

3.1 구조해석 개요

교량상 장대레일에서 레일 거동에 영향을 미치는 주요 영향요인은 도상저항력, 하부구조강성 및 교량의 신축길이이다. 도상저항력 및 하부구조 강성은 레일을 통하여 전달되는 종방향 하중을 하부구조로 분배시키는 데에 있어서 중요한 매개변수이며, 교량 바닥판 신축길이는 교량의 온도변화에 의한 레일의 부가응력 발생에 있어서 중요한 매개변수로 작용한다. 과거에는 교량상 장대레일의 응력 및 변위를 계산하기 위한 간편식이 제안되기도 하였으나, 최근에는 레일-교량 상호작용을 고려한 유한요소해석 프로그램이 개발되어 교량상 장대레일의 주행안전성 검토에 활용되고 있다. 본 연구에서는 고속철도기술개발사업을 통하여 개발된 레일-교량 상호작용해석 프로그램인 "BRAILINT"를 이용하여 교량상 장대레일의 주행안전성 검토를 위한 매개변수 해석을 수행하였다.

주행안전성 검토에 적용된 교량형식은 신축길이 80m의 2@40m PSC-Box 거더교이다. 레도구조의 거동에 영향을 미치는 영향변수를 교각강성과 도상저항력으로 나누고, 이들 매개변수에 대한 레일 응력, 레일-교량 상대변위 및 교량 바닥판간 상대변위 변화를 검토하였다. 레일응력은 온도하중 및 시·제동하중에 대한 해석결과를 중첩하여 검토하였고, 레일-교량 상대변위 및 바닥판간 상대변위는 시·제동하중에 대한 해석결과에 대해서 검토하였다. 해석에 적용된 입력자료 및 매개변수 조건은 도표 1과 같다.

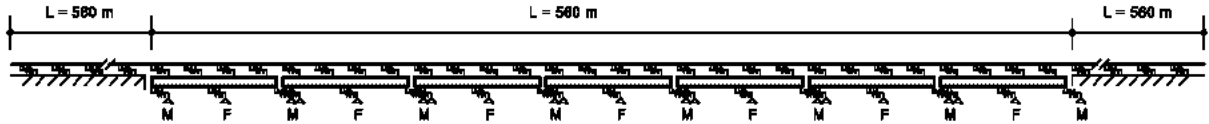


그림 3. 해석 모델

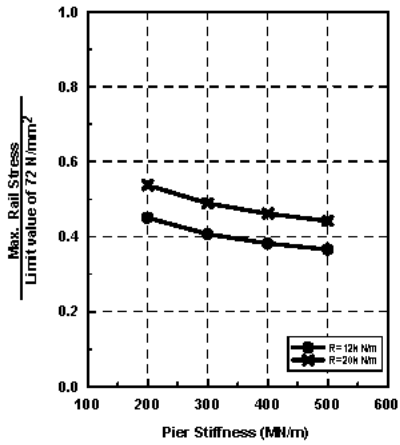
도표 1. 입력자료 및 해석 매개변수 조건

Property of Structural Members	- Bridge Deck : Section area, $A_c = 13.517 \text{ m}^2$ Young's modulus, $E_s = 3.0 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ Coeff. of thermal expansion, $\alpha = 1.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ - Rail : Section area, $A_c = 7.686 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ Young's modulus, $E_s = 2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ Coeff. of thermal expansion, $\alpha = 1.0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Pier Stiffness	Varies from 200 MN/m to 500 MN/m
Ballast Resistance	- Case #1 : Normal ballast layer max. resistance, $r = 20 \text{ kN/m}$ (60 kN/m at loaded zone) displacement at yield, $u = 2 \text{ mm}$ - Case #2 : Deterioration of ballast layer max. resistance, $r = 12 \text{ kN/m}$ (24 kN/m at loaded zone) displacement at yield, $u = 2 \text{ mm}$
Applied Loads	- Thermal variation in bridge deck : $+25 \text{ } ^\circ\text{C}$ - Accelerating forces : 33 kN/m per track of 30 m - Braking forces : 20 kN/m per track of 300 m
SAFETY CHECK POINTS :	
- Rail stress : limited to 72 N/mm^2 for compression, 92 N/mm^2 for tension - Relative displacement between rail and bridge : limited to 4 mm - Relative displacement in adjacent bridge decks : limited to 10 mm	

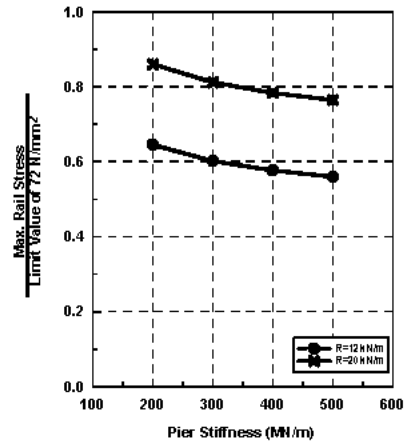
3.2 구조해석 결과

시동/제동하중에 대한 해석결과를 그림 4 및 5에 나타내었다. 하부구조 강성이 증가함에 따라 레일 응력이 감소하며, 도상저항력이 증가함에 따라 레일응력이 증가함을 알 수 있다. 교량 하부구조 강성의 변화에 비해서 도상저항력의 변화에 대한 레일응력의 변화가 더 민감한 것으로 분석되었으며, 교각강성이 200 MN/m 이상이면 응력제한치는 만족됨을 알 수 있다. 상대변위는 교량하부구조 강성의 변화에 따라 민감한 변화를 보였으나, 바닥판간 상대변위는 도상저항력 변화의 영향을 거의 받지 않는 반면, 레일-교량간 상대변위는 도상 저항력이 크게 감소하면 제한치를 넘는 결과를 보였다.

상기의 구조해석 결과로부터, 실측된 교각 강성도 범위에서의 레도 주행안전성을 평가한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6은 교각강성에 대해서 각각의 레도 거동응답을 제한치로 나눈 값을 표시한 것으로서, 도상저항력 변화에 대해서 응답을 비교하였다. 그림에서 빗금으로 나타낸 부분이 실제 고속철도 하부구조 강성도 범위에서 주행안전성 확보가 가능한 영역이며, 도상충이 열화하여 도상저항력이 시방서에서 제시된 저항력의 60%로 떨어지면 레일-교량 상대변위가 크게 증가하여 주행안전성을 확보하지 못함을 알 수 있다.

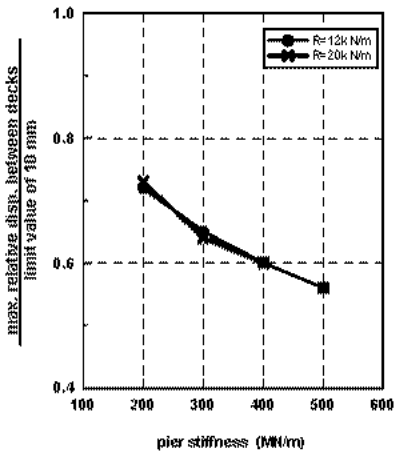


(a) 시동하중 + 제동하중

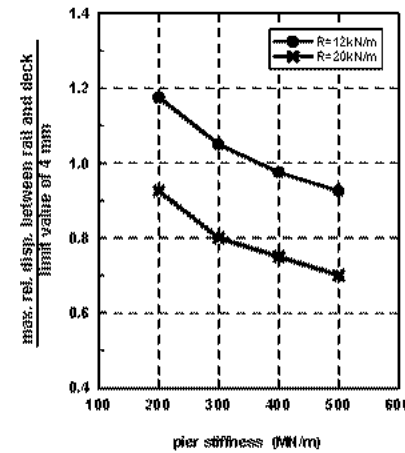


(b) 온도하중 + 시동하중 + 제동하중

그림 4. 교각강성 및 도상저항력 변화에 대한 최대레일압축응력 비교

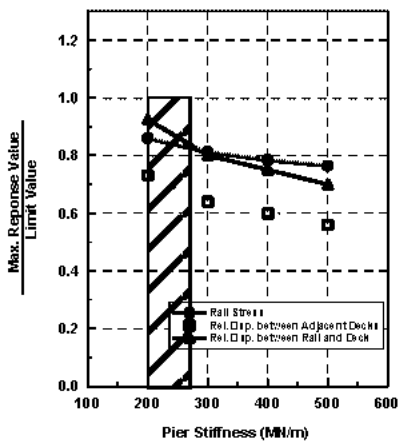


(a) 교량 마타판간 상대변위

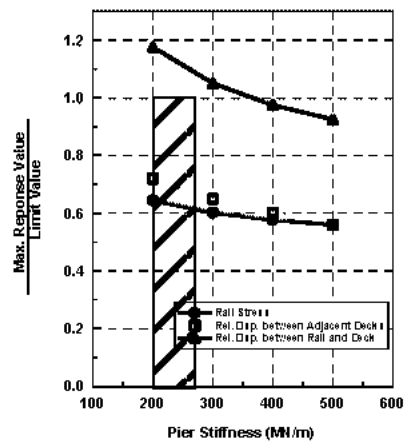


(b) 레일-교량 상대변위

그림 5. 교각강성 및 도상저항력 변화에 대한 최대 상대변위 비교



(a) 도상 저항력, R=20 kN/m



(b) 도상저항력, R=12 kN/m

그림 6. 경부고속철도교량 교각강성도 범위내에서의 주행안전성 검토

이상의 검토 결과로부터 교량상 장대레일의 주행안전성을 결정하는 가장 민감한 요소는 레일-교량 상대변위라고 할 수 있으며, 교각강성도 예측결과에서와 같이 선로구축물 구조체의 강성이 임의의 값

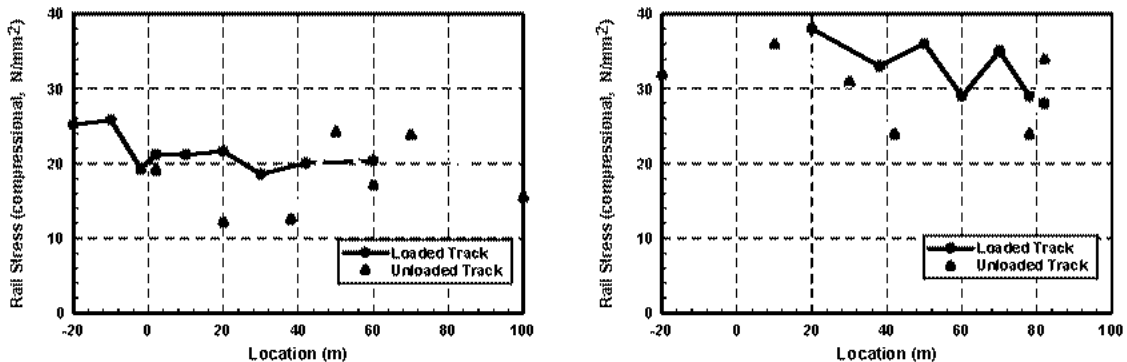
으로 일정하게 유지되는 경우에는 도상층의 열화정도에 따른 도상저항력의 크기에 따라 주행안전성 수준이 결정된다고 판단된다.

4. 현장계측을 통한 교량상 궤도구조의 거동 평가

4.1 현장계측 개요

실제 고속철도 차량의 시·제동시 레일응력 및 레일-교량상대변위 거동을 분석하고, 실제 교량상 궤도구조의 거동과 해석결과와의 차이를 파악하기 위하여 실제 차량에 대한 시·제동 계측 실험을 수행하였다. 대상 교량은 연제교 2@40m PSC-BOX거더 교량이며, 하부구조는 원형 중공단면교각이다.

먼저, 주행속도를 100 km/hr 및 300 km/hr로 달리하여 상시제동을 한 경우에 대해서 응력 및 레일-교량 상대변위를 계측하였고, 각 측정점에서 발생한 응력 및 상대변위의 최대 응답치를 그림 7 및 그림 8에 나타내었다. 계측결과, 레일응력의 최대치는 300km/hr 주행중 제동시의 경우가 해석결과(그림 4-a)와 거의 일치하였으며, 속도가 감소함에 따라서 레일응력도 감소하는 것으로 나타났다. 반면, 레일-교량 상대변위의 경우에는, 해석결과에 의한 최대치가 약 7mm 였던 것에 반해서, 계측결과는 약 0.3 mm로 매우 작은 변위를 보였다. 이는, 계측여건을 고려하여 침묵과 교량간의 상대변위를 레일-교량 상대변위로 간주함에 따라서 레일과 침묵사이에서의 미끄러짐량이 무시된 점, 해석시에는 좌송하중이 일정 위치에 고정됨에 따라 재하부와 비재하부간의 경계절점에서 매우 큰 상대변위가 발생할 수 있다는 점, 또한 실제 도상저항력이나 전체적인 선로구축물 시스템의 강성이 해석시 입력 자료 보다 다소 클 수도 있다는 점 등이 복합적으로 영향을 미친 결과라고 판단된다.



(a) 100 km/hr 주행중 제동 (b) 300 km/hr 주행중 제동

그림 7. 차량 제동에 대한 레일응력의 최대치 분포

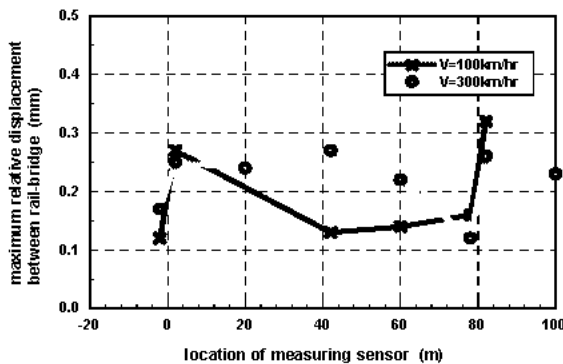


그림 8. 차량 제동시 레일-교량 상대변위의 최대치 분포

또한, 계속 교량바닥판 구간 내에서 차량이 완전히 정지한 상태로 시동하는 경우, 각 축점에서의 레일응력 최대치 분포를 나타내면 그림 9와 같다. 시동시의 레일-교량 상대변위 분포는 제동시와 마찬가지로 약 0.2mm의 매우 작은 값을 보였다.

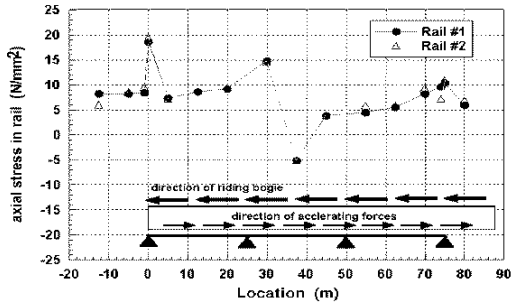


그림 9. 차량 시동시 레일응력의 최대치 분포

5. 결론

본 연구에서는 고속철도 교량상 장대레일의 시제동하중에 대한 주행안전성을 검토하기 위하여 실제 고속철도 노선상 교량의 교각강성을 현장계측하고, 그 계측 결과와 유한요소해석 결과를 토대로 실제 주행안전성을 검토하였다.

매개변수해석 결과로부터 도상저항력과 교각강성의 변화에 대해서 레일응력 및 레일-교량 상대변위가 크게 변화함을 알 수 있었고, 교각강성도가 200 MN/m 이상이고 도상저항력이 20 kN/m 인 조건에서는 충분한 주행안전성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다. 현장계측을 통하여 고속철도 노선상 교량의 교각강성도가 200~260 MN/m의 범위에 분포되어 있음을 알았고, 결과적으로 도상상태가 양호한 경우에는 주행안전성이 확보되지만 도상 저항력이 저하됨에 따라 레일-교량 상대변위가 기준치를 넘어서 안전성 검토기준을 만족하지 못할 수도 있음을 예측하였다. 따라서, 고속철도 운용중에 주행안전성을 유지하기 위해서는 도상저항력이 일정 수준 이하로 떨어지지 않도록 지속적인 관리가 필요하다고 판단된다. 해석결과와 실제 계측결과를 비교하면, 해석시에는 레일-교량 상대변위가 교량상 레도구조의 주행안전성을 결정하는 기준이 되는 것으로 나타났으나, 실제 레도거동은 레일-교량 상대변위가 1mm 이하의 매우 작은 값으로 계속되어, 레일응력이 주행안전성을 결정하는 것으로 나타났다. 구조해석으로 예측한 최대 레일응력은 실제에 근접한 결과를 얻을 수 있었지만, 레일-교량 상대변위는 실제보다 더 큰 변위가 일어나는 것으로 해석됨에 따라서 안전측의 주행안전성 평가 결과를 얻게 된다고 판단된다.

본 연구는 고속철도기술개발사업인 “고속철도 선로구축물 시스템안정화 기술개발” 과제를 통하여 수행되었으며, 본 과제수행에 도움을 주신 관계자 분들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원(2003), 고속철도 선로구축물 시스템안정화 기술개발, 1차년도 보고서
2. KHRC(1995) *Bridge Design Manual (BRDM) - Final Report*, Systra.
3. UIC(1995) *UIC CODE 774-3, General Principles of Calculating Longitudinal Forces in a Bridge, its Bearings and its Structure - Recommendations for a simple case, 1st Edition.*
4. Deutsche Bundesbahn(1993) *DS804 - Vorschrift für Eisenbahnbrücken und Sonstige Ingenieurbauwerke.*