

고속철도교량의 온도신축길이 변화를 고려한 교량상 장대레일의 거동 해석

Analysis of CWR track on the High-Speed Railway Bridges considering the Expansion Length of Bridge Deck

강재윤* 김병석** 과중원* 최은석*** 진원중***

Kang, Jae-Yoon Kim, Byung-Suk Kwark, Jong-Won Choi, Eun-Suk Chin, Won-Jong

ABSTRACT

Currently, in the design criteria for the high speed railway bridges, the maximum distance between bridge expansion joint is limited to 80m using a continuous welded rail, in order to limit the additional stress in the rail due to the rail-bridge interaction. In the past study on the resonance effect of HSR train, it is known that the reduction of resonance and dynamic responses of bridge deck occurs at the specific expansion length of 28.05m and 46.75m. In this study, the stability of track structure on the HSR bridges with expansion length of 90m has checked by finite element method. And the track behavior including rail stresses and relative displacements are compared to the current state of track structures on the bridge system with 80m long expansion length.

1. 서론

우리나라 고속철도 설계기준에서는 교량구조물의 고정점간 거리를 80m로 제한하고 있으며, 이는 교량 바닥판의 온도신축 길이를 제한함으로써 교량의 온도거동에 의해 레일에 부가적으로 발생하는 응력을 간접적으로 제한하기 위한 규정이다. 이에 준하여, 경부고속철도 노선상의 교량은 특수한 경우를 제외하고 대부분이 25m-3경간 연속(3@25m) 또는 40m-2경간 연속(2@40m)의 두 가지 형식이 주를 이루고 있다. 한편, 한국건설기술연구원의 연구 결과에 따르면¹⁾ 연차가 임계속도로 주행할 때 지간길이가 28.05m 또는 46.75m 일 때 공진 감소현상이 나타날 뿐만 아니라, 치결, 회전각 및 진동 가속도 등의 동적응답이 80m인 경우에 비해서 감소하는 것으로 나타났으며, 지간장이 46.75m를 넘으면 다시 동적 응답이 증가하는 경향을 보이고 있다. 사용성 제한이 엄격한 고속철도교량의 구조시스템 개선을 위해서는 경간길이를 공진 감소현상이 나타나는 28.05m 또는 46.75m 부근까지 증가시키는 것이 바람직하지만, 신축길이 증가에 대한 레일응력 및 레일-교량 상대변위에 대한 검토가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 신축길이가 90m로 증가하는 경우를 가정하여 매개변수해석을 수행하고, 신축길이 80m인 경우의 해석결과와 비교하여 응력변화 및 상대변위 변화 등을 검토하였다.

* 한국건설기술연구원 구조연구부, 산업연구원

** 한국건설기술연구원 구조연구부, 연구위원

*** 한국건설기술연구원 구조연구부, 연구원

2. 바닥판 지간 길이 변화에 따른 동적 응답

고속철도 교량의 동적설계 조건은 차량의 주행속도인 220~380 km/hr 이내에서 검토하도록 시방서에서 규정하고 있다. 그러나 전체 주행속도에 대한 동적해석은 많은 시간과 비용이 필요하므로, 동적 응답이 상대적으로 클 것으로 예상되는 공진속도에서 검토하는 것이 안정성을 손쉽게 확보할 수 있다. 공진은 구조물의 고유진동수와 구조물에 가해지는 하중주기의 역수가 일치할 때 구조물의 동적 응답이 시간에 따라 증가하는 현상을 말하며, 공진을 유발하는 열차의 임계속도는 차량 속하중간의 거리(d) 및 교량의 고유진동수(ω)의 함수로서 다음 식에 의해서 얻어 진다.

$$V_{cr} = 3.6 \times d \times \omega \quad (\text{km/hr})$$

지간길이가 증가함에 따라서 최대 처짐과 단부 회전각은 증가하지만, 임계속도에서의 처짐 및 회전 변위는 공진 감소효과에 의하여 그림 1 및 그림 2와 같은 응답을 보이며, 진동가속도는 그림 3과 같다.

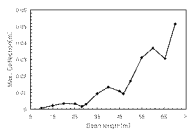


그림 1. 지간장별 최대 처짐

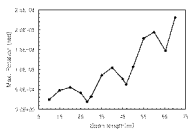


그림 2. 지간장별 최대 회전각

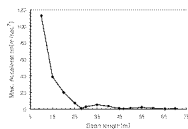


그림 3. 지간장별 진동가속도

다음의 그림 4는 지간장이 37.4m와 28.05m인 두 가지 경우에 대하여 임계속도로 열차가 주행할 때 발생하는 동적 응답을 나타낸 것이다. 여기서 L=28.05m인 경우는 동적하중 감소 효과가 나타나는 지간 길이이며, L=37.4m인 경우는 동적 하중 감소 효과가 나타나지 않는 정상적인 경우이다. 그림에서 L=37.4m인 경우 동적 처짐 응답은 전형적인 공진 양상을 보이고 있으며, 하중이 작용하는 시간이 증가함에 따라 동적 응답은 점차로 발산하고 있음을 알 수 있다. 이와는 반대로 L=28.05m인 경우 길 보기에 전혀 공진 현상을 관찰 할 수 없으며, 오히려 동적응답이 시간에 따라 감소함을 관찰할 수 있다.

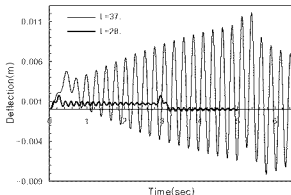


그림 4. 공진과 공진 감소 현상

결과적으로, 유효차적간격 18.7m의 열차하중에 대해서 현행의 25m 또는 40m 지간장 분할은 임계속도에 대한 동적거동 측면에서 불리한 거동을 보이고 있으며, 오히려 지간길이가 28.05m 또는 46.75m로 증가시킨 경우에 대해서 공진소멸 효과에 의해 안정적인 동적거동을 나타내는 것으로 분석되었다. 이 결과는 고속전철교량의 공간구성을 달리함으로써 사용성을 증가시킬 수 있음을 의미하지만, 공간장 증가에 따른 레일-교량상호작용 측면에서의 안전성 검토가 요구된다. 즉, 공간장이 증가함에 따라 온도변화에 따른 레일의 추가응력이 증가할 수 있으므로 도상의 비선형 거동과 레일-교량 상호작용을 고려한 응력검토가 요구된다.

3. 신축길이 증가를 고려한 레일응력 해석

3.1 해석 개요

교량신축길이를 90m(2@45m)로 증가시켰을 경우에 대해서 도상저항력 및 하부구조 강성 변화를 고려한 매개변수 해석을 수행하고, 현행의 신축길이 80m인 경우에 대한 해석결과와 비교하여 고속전철교량 구조시스템 개선을 검토하였다.

해석대상 구조물은 경부고속전철 PSC-Box 거터교로서 그림 5와 같이 해석 모형화하였으며, 재료상수는 표 1과 같다. 도상저항력은 도상의 열화를 최대한 방지하고 엄격한 레도관리를 수행한다는 전제하에 18kN/m와 20kN/m의 두가지 경우를 적용하였다. 온도하중은 교량바닥판의 온도변화를 +25℃로 하여, 바닥판의 온도신축에 의하여 레일에 발생하는 부가응력을 고려하였다. 해석에 적용된 매개변수 분류를 정리하면 표 2와 같다.

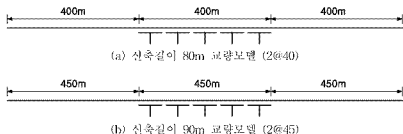


그림 5. 신축길이 변화를 고려한 해석모델

표 1. 재료상수 및 입력자료

입력항목		입력치
교량	단면적 (Ac)	13,517 m ²
	탄성계수(Ec)	3.0×10 ⁷ kN/m ²
	열팽창계수(α)	1.0×10 ⁻⁵ °C ⁻¹
레일	단면적 (Ac)	7,686×10 ⁻³ m ²
	탄성계수(Ec)	2.1×10 ⁸ kN/m ²
	열팽창계수(α)	1.0×10 ⁻⁵ °C ⁻¹

표 2. 매개변수 분류

매개변수	분류	
도상저항력*	항복면위 2mm에 대해서 18kN/m(36kN/m), 20kN/m(60kN/m) *관호안은 수직하중 재하시 도상저항력	
	하부구조강성	200MN/m, 300MN/m, 400MN/m, 500MN/m
하중	온도하중	교량 바닥판의 온도변화 +25℃
	시동 및 세동하중	시동하중 : 레도당 33kN/m, 30m 등분포 재하 세동하중 : 레도당 20kN/m, 300m 등분포 재하

3.2 해석결과 분석

온도하중 및 시동/제동하중의 하중조건에 대해서 신축길이 변화에 따른 최대 레일응력 해석결과를 비교하면 그림 6 및 그림 7과 같다. 그림으로부터 신축길이가 증가함에 따라 온도응력은 약 15% 증가하는 것으로 나타났고, 시제동 하중에 의한 응력은 약 20% 증가하는 것으로 나타났다. 하부구조 강성이 증가함에 따라서 레일응력도 다소 감소하는 것으로 나타났으나, 신축길이를 증가시켰을 경우에 신축길이 80m의 레일응력 수준까지 감소시키기 위해서는 현재 교각강성의 2배 이상의 큰 강성이 요구되는 것으로 평가되었다.

시동/제동하중 작용시, 레일-교량 상대변위는 도상저항력이 및 교량 바닥판간 상대변위를 신축길이 및 도상저항력별로 비교한 결과를 각각 도표로 나타내면 그림 8 및 그림 9와 같다. 그림 8에서 도상저항력이 18 kN/m 로 감소하면 신축길이 증가시에 레일-교량 상대변위가 크게 증가하여 안전성이 저하됨을 알 수 있고, 도상저항력이 20 kN/m 이상이고 하부구조 강성이 약 250 MN/m 이상이면 레일-교량 상대변위 제한규정은 만족하는 것으로 나타났다. 교량바닥판간 상대변위는 모든 경우에 제한치를 만족하는 것으로 나타났다.

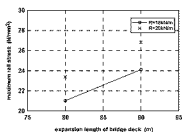
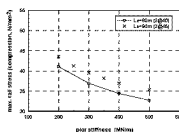
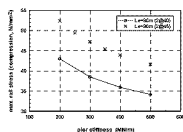


그림 6. 최대 레일 압축응력 (온도하중)

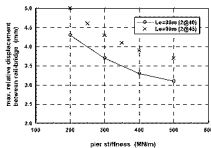


(a) R=18kN/m

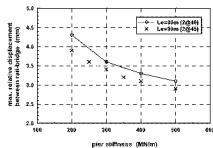


(b) R=20kN/m

그림 7. 최대 레일 압축응력 비교 (시동/제동하중)

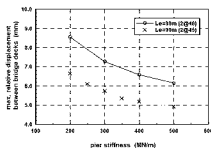


(a) R=18kN/m

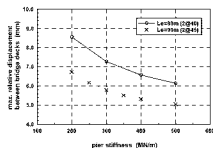


(b) R=20kN/m

그림 8. 시동/제동하중시 최대 레일-교량 상대변위



(a) R=18kN/m



(b) R=20kN/m

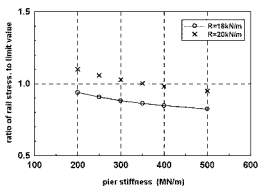
그림 9. 시동/제동하중시 최대 교량 바닥판간 상대변위

4. 교량 신축길이 증가시 주행안전성 확보 조건

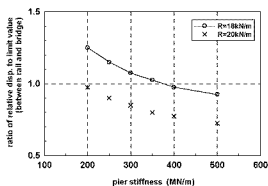
교량 바닥판 신축길이를 90m로 하는 경우에 대해서, 도상저항력 변화 및 하부구조 강성도 변화에 따른 주행안전성을 평가하기 위하여, 각 해석 조건에서의 응력 및 변위 최대치를 각각의 세한치로 나온 값을 비교하여 그림 10에 나타내었다.

그림 10의 (a)는 레일응력 세한치 72 N/mm^2 에 대한 최대치 비율로서, 도상저항력이 20 kN/m 일 때 교각강성이 350 MN/m 이상이 되어야 세한치를 만족함을 알 수 있다. 이 때, 레일응력 측면에서는 도상저항력이 작은 측이 유리하지만, 그림 10의 (b)에서 보는 바와 같이, 레일-교량 상대변위는 도상저항력이 감소할수록 안전율을 크게 벗어나게 되는 것으로 나타났다. 즉, 레일응력은 하부구조 강성에 의해서 제한을 받게 되고, 레일-교량 상대변위는 도상저항력에 의해서 제한을 받게 되므로, 주행안전성 확보가 가능한 조건은 도상저항력 20 kN/m 이상일 것과 하부구조 강성이 350 MN/m 이상이어야 할 것으로 판단된다.

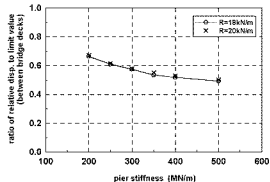
도상저항력이 20 kN/m 이어야 할 것은, UIC기준에 준해서 레도부설을 할 경우에는 확보될 수 있는 조건이나, 하부구조 강성이 350 MN/m 이상이어야 하는 조건은 교각단면이나 높이를 고려한 설계를 통해서 만족될 수 있으며, 현재 경부고속철도교량 하부구조의 설계 강성이 약 $250\text{--}300 \text{ MN/m}$ 인 점을 감안하면 약 15%에서 최대 40%까지 강성이 증가되어야 한다.



(a) 레일 압축응력



(b) 레일-교량 상대변위



(c) 교량 바닥판간 상대변위

그림 10. 검토항목별 제한치에 대한 최대응답 비율 (신축길이 90m)

5. 결론

공간 및 공간소멸의 개념으로부터, 일정한 크기 및 간격의 하중, 즉 유효타격간격이 18.7m인 고속철도 열차하중에 대해서는 시간장 28.05m와 46.75m인 교량에서는 공진이 발생하지 않고 안정적으로

기동함을 동특성 해석으로부터 도출하였다. 이는 고속철도 교량 구조물의 동특성 개선을 위한 교량 시스템 길정에 고려될 수 있는 사항이나, 신축길이가 변화됨에 따라서 레일-교량상호작용을 고려한 주행안전성 검토가 병행되어야 할 것이다.

이에 본 연구에서는 신축길이가 90m가 되는 2@45m 교량을 가정하고, 교량상 궤도구조의 용력 및 변위를 해석적으로 검토하였다. 검토 결과, 레일용력과 레일-교량 상대변위가 주행안전성 결정의 기준이 되며, 모든 세한 조건을 만족하기 위해서 도상저항력 20 kN/m 이상, 하부구조 강성 350 MN/m 이 요구되는 것으로 나타났다. 요구되는 하부구조 강성을 확보하기 위해서는 현재 경부고속철도 교각강성에 비해 약 15% ~ 40%의 강성이 증가되어야 하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 단순히 지간장 증가에 따른 주행안전성만을 평가하였으나, 교량시스템 개선과 관련하여 지간장 분할을 결정하기 위해서는 레일의 온도 증가에 따른 레일-교량 상호작용 영향, 처짐량 증가에 따른 궤도용력 변화, 동특성 및 궤도 상호작용을 모두 개선할 수 있는 최적 교량단면의 결정 등의 검토가 병행되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 고속철도기술개발사업인 “고속철도 선로구축물시스템 안정화 기술개발” 과제를 통하여 수행되었으며, 본 과제수행에 도움을 주신 관계자 분들께 깊은 감사말 드립니다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원(2002), 고속전철 구조물 안전성 기술개발, 최종보고서
2. 한국건설기술연구원(2003), 고속철도 선로구축물 시스템 안정화 기술개발, 1차년도 보고서
3. KHRC(1995) Bridge Design Manual (BRDM) - Final Report, Systra.
4. UIC(1965) 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.
5. Deutsche Bundesbahn(1993) DS804 - Vorschrift für Eisenbahnbrücken und Sonstige Ingenieurbauwerke.