

곡선구간을 포함한 고가철도의 레일 구조물 상호작용 해석

Rail Structure Interaction Analysis for the Curved-Elevated Viaducts

조의경* 박성룡**
Cho, Eu-Kyeong Park, Sung-Ryung

ABSTRACT

This paper presents the rail structure interaction analysis of the elevated viaducts which contains the curved alignments with smallest radius of 300 metre. The aim of this study is to check the compatibility between the track and the curved structure in order to verify the safety of the continuous welded rail track under service conditions. To perform the rail structure interaction analysis, nonlinear static rail structure interaction calculation is implemented. The bridge structures, the rails and the track behaviour are modelled according to the UIC774-3 and the Eurocode prEN1991-2 recommendations. Criteria in Eurocode prEN1991-2 are investigated to check the compatibility between the track and the structure for the rail structure interaction effects.

1. 서론

열차 운행중 진동과 소음에 의한 사용성 저하와 민원발생을 방지하기 위하여 레일 신축이음매가 없는 장대레일을 적용하는 것이 최근 철도설계의 일반화된 추세이다. 신축이음 등 개구부에 의하여 불연속점을 갖는 교량위에 장대레일이 부설된 경우, 열차의 시·제동에 의한 종방향 하중은 교량과 궤도구조가 함께 저항하게 되며 이 하중의 일부는 교대 배면의 토공부로, 나머지는 교량받침과 하부구조를 통해 교량기초지반으로 전달된다. 이 때 연속되어 있는 레일이 온도, 활하중, 크리프, 건조수축 등에 의한 교량상판의 변위와 이동을 제한하므로 레일과 교량의 고정단 받침에 종방향력이 생기게 되는데 이러한 현상을 레일 구조물 상호작용이라고 한다. 이 힘은 교량의 상부구조, 고정단 받침, 하부구조의 설계와 레일의 하중효과 검토에 반드시 고려되어야 한다. 특히 최근에는 철도의 대형화, 고속화와 교량구조물의 연속화, 장대화, 슬림화 추세로 레일 구조물 상호작용 효과에 의한 하중이 매우 커져서 설계의 중요한 지배인자가 될 수 있으며 철도의 안전성, 사용성을 저해하는 요인으로 대두되고 있는 실정이다. 그러나 국내의 철도설계기준에는 장대레일의 종하중을 궤도당 10kN/m로 정하고 시·제동하중을 별도의 하중으로 규정해 놓았을 뿐 상호작용에 대한 구체적인 해석방법은 규정되어 있지 않아 설계의 신뢰도를 저하시킬 우려가 있다.

* 책임저자 : 현대건설 기술개발원 설계실 부장, 공학박사

** 현대건설 기술개발원 설계실 부장, 시공기술사, 정회원

본 연구에서는 레일 구조물 상호작용에 대하여 비교적 체계적으로 해석적 설계법을 제시한 UIC774-3^[1]과 Eurocode prEN1991-2^[2]에 따라 곡선구간(R=300m)을 포함한 연장 5.6km의 도심지 고가철도에 대하여 해석 및 설계를 수행하였다. 특히 R=1,500m미만의 곡선부에서는 Prud'homme and Janin Formula^[3]를 이용하여 최대 허용압축응력을 계산, 적용하였다.

2. 해석방법 및 설계검토기준

2.1 해석의 개요

UIC774-3과 Eurocode prEN1991-2에는 다음 4가지 하중효과를 고려하여 레일 구조물 상호작용해석을 수행하도록 정의되어 있다.

(1) 교량상판의 온도변화(uniform expansion and gradient)

교량의 온도변화는 선형적 증감과 온도경사로 구분, 해석하여 가장 불리한 경우를 조합한다.

(2) 레일의 온도변화

장대레일은 그 길이의 무한성 때문에 온도변화에 의한 상대변위가 없으므로 레일 구조물 상호작용에 의한 힘은 발생하지 않는다. 그러나 레일신축이음매나 분기기가 있는 경우에는 온도변화에 의하여 변위가 발생하므로 해석에 반영하여야 한다.

(3) 열차의 시·제동하중

시·제동하중효과는 교량상에 열차가 놓이는 위치와 주행방향에 따라 달라지므로 주행방향별로 각 교량의 이음부와 중앙부에 열차의 nose가 위치하는 경우에 대하여 해석하여 가장 불리한 경우를 구한다.

(4) 열차의 수직하중

열차가 재하되면 활하중에 의한 교량의 휨변위로 인해 교량 신축이음부에 각변위가 발생하므로 이를 해석에 고려하여야 한다.

본 연구에서는 온도변화와 시·제동 및 열차수직하중의 효과를 각각 계산하여 그 결과를 위치별로 선형조합한 후 기준에 제시된 허용한계와 비교하였다.

2.2 레일 구조물 상호작용계의 해석모델

레일 구조물 상호작용계의 하중효과를 결정하기 위한 해석모델은 그림1과 같다.

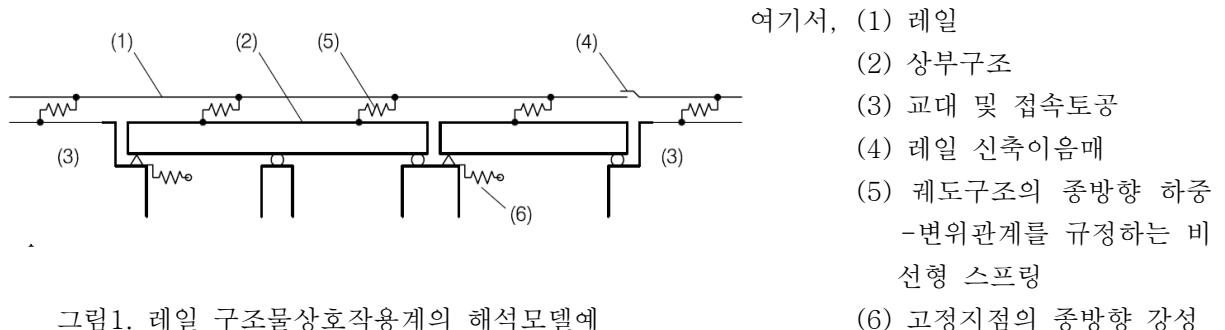


그림1. 레일 구조물상호작용계의 해석모델에

궤도구조의 종방향 비선형스프링(그림1의 (5))은 bi-linear 모델을 사용한다. 이 때 소성한계변위(u_0)와 소성한계저항력(k)은 UIC774-3^[1]에 제시된 권고 수치를 사용하였다. 고정지점의 종방향 강성(그림1의 (6))은 기초, 교각과 받침의 종방향강성을 모두 고려한 유효강성을 의미한다.

2.3 레일 구조물 상호작용에 관한 설계 검토기준

Eurocode^[2]는 30cm이상의 자갈도상을 갖고 곡선반경 1500m이상인 궤도에 대하여 표1과 같은 기준을 제시하고 있다.

표1. 레일 구조물 상호작용에 대한 설계기준(Eurocode^[2] prEN1991-2)

적용하중	레일의 최대압축응력	레일의 최대인장응력	인접한 구조물간의 최대 상대변위	레일과 구조물간의 최대 상대변위
구조물의 온도변화 시·제동하중 열차의 수직하중	72MPa	92MPa	-	-
시·제동하중	-	-	5mm	4mm

전술한 바와 같이 레일신축이음매와 분기기의 효과를 고려하기 위하여 레일의 온도변화(±50℃)를 해석에 고려할 경우에는 레일의 최대 허용응력은 다음과 같다.

레일의 최대압축응력 : 72 MPa + 50℃ x 1.2E-5 x 210000 MPa = 198 MPa

레일의 최대인장응력 : -92 MPa - 50℃ x 1.2E-5 x 210000 MPa = -218 MPa

2.4 곡선부에서의 레일의 수정압축응력

설계기준에서 곡선반경을 1500m로 제한한 이유는 곡선부에서는 원심력에 의한 횡방향변위가 레일의 축방향좌굴강도를 저하시키므로 제시된 압축응력의 제한치가 더 이상 안전한 값이 아니기 때문이다. M.A.Prud'homme^[3]등은 다음식과 같은 레일의 횡방향 휨변위에 대한 기본방정식으로부터 곡선부의 기하특성에 의한 좌굴강도의 저하를 계산하여 표1의 최대허용압축응력을 역산하는 방법을 제시하였다.

$$EI_y \left(\frac{d^4 y}{dx^4} - \frac{d^4 y_2}{dx^4} \right) + P \frac{d^2 y}{dx^2} - \frac{dC}{dx} + Q = 0 \quad (1)$$

여기서, x는 레일의 축방향 거리, y는 레일의 횡방향변위, P는 레일의 축방향력(좌굴하중), Q는 y의 함수로서 궤도 및 도상의 횡방향저항력, C는 수직축에 대한 체결구의 회전저항모멘트, y2는 모든 x에서 수직축에 대한 휨모멘트가 zero가 되는 때의 레일의 기하형상 즉, 레일의 내부응력과 부설시 결함을 포함한 자유형상을 나타낸다. 물론 Q와 C는 y에 대한 비선형 함수이나 미소변위이론을 사용하여 선형화 할 수 있다^[3]. 식(1)로부터 계산된 수정허용압축응력은 표2와 같다.

표2. 곡선반경에 따른 수정최대허용압축응력

곡선반경(m)	1500이상	700	600	300
레일의 최대압축응력	72 MPa	58 MPa	54 MPa	27 MPa

3. 해석의 조건 및 제원

3.1 Layout

그림2와 같이 5km965~11km565(연장5.6km)구간내 4개의 정거장을 잇는 5개의 고가구조물에

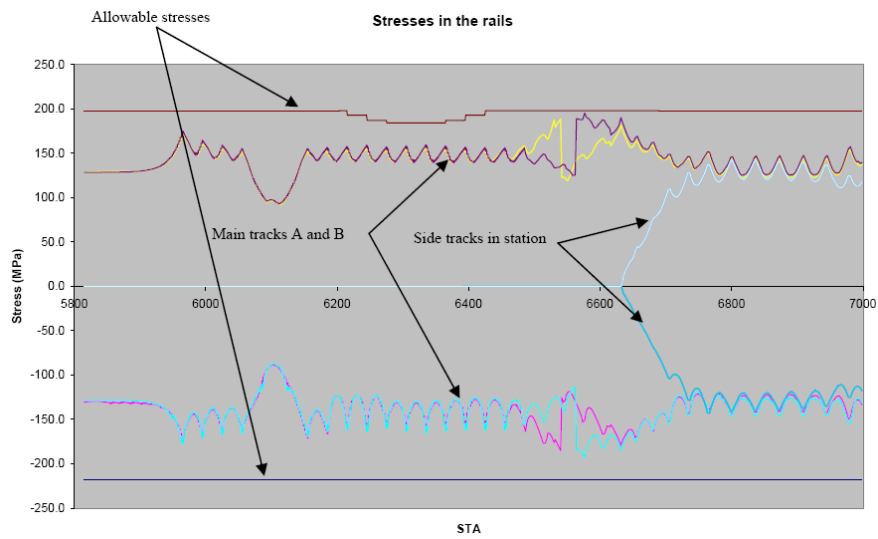


그림5. 장대레일을 적용한 곡선구간(R=300m)의 레일응력 포락곡선(9km000~10km000)

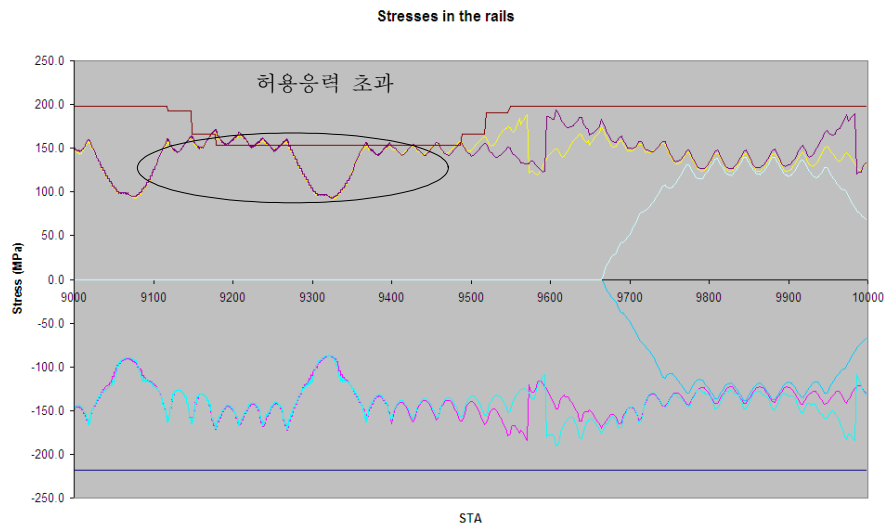


그림4. 레일응력의 포락곡선(5km965~7km000)

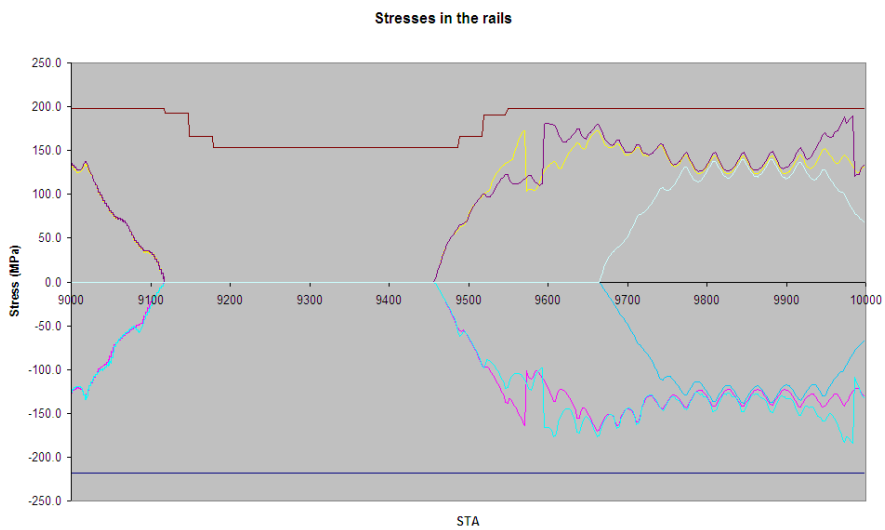


그림6. 정척레일을 적용한 곡선구간(R=300m)의 레일응력 포락곡선(9km000~10km000)

이러한 현상 때문에 장대레일의 적용기준^{[1],[2]}에 최소곡선반경의 제한을 두고 있다고 볼 수 있다. 그림6에는 곡선구간 양단에 레일신축이음매를 두고 그 사이는 50m길이의 정척레일을 적용한 경우의 레일응력을 나타낸다. 예견되는 바와 같이 신축이음매의 사잇구간에서는 응력이 거의 발생하지 않는다. 곡선구간의 장대레일 적용을 가능케 하는 또다른 방법으로는 궤도의 횡방향 저항능력을 늘려주는 것이 있다. 예를 들면 침목 및 체결구의 간격을 줄인다거나 콘크리트도상을 쓴다거나 또는 자갈도상의 이완을 방지하기 위하여 급결제를 적용하는 등의 방법을 들 수 있다. 이들은 모두 궤도의 횡방향 강성저하를 방지하여 그림5의 응력초과구간의 허용응력을 키워주는 방법이다.

4.2 상대변위

그림7에는 2.3절의 설계기준에서 제시된 인접한 구조물간의 최대 상대변위와 레일 구조물간의 최대 상대변위를 나타내었다. 전구간에서 각각 설계기준한계인 5mm와 4mm를 초과하지 않음을 확인할 수 있다.

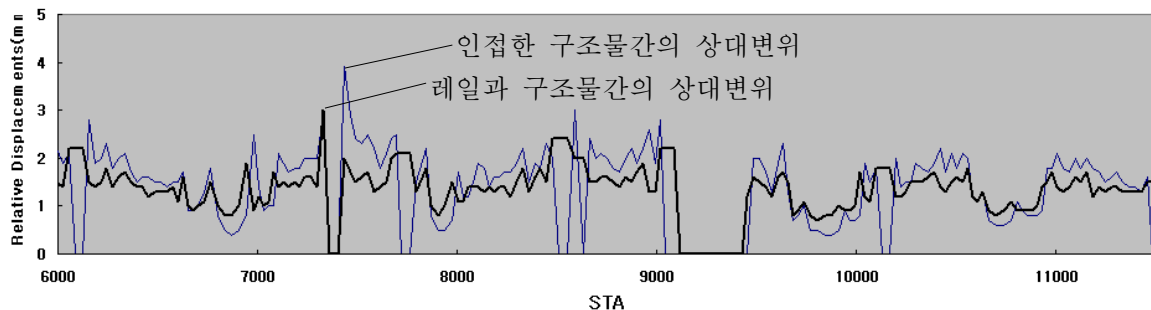


그림7. 인접구조물간 및 레일-구조물간의 상대변위 포락곡선

5. 결론

곡선구간(R=300m)을 포함하는 고가철도교의 장대레일 적용을 위하여 레일 구조물 상호작용해석을 수행하고 설계기준과의 적합성을 검토하였다. 곡선구간에서의 횡방향 좌굴강성의 저하를 고려한 수정 허용응력의 사용법을 제시하였고 그 방법으로 해석한 결과 최소곡선구간의 응력이 설계기준을 초과하는 것을 확인하여 이에 대한 해결방안으로 최소곡선구간의 양단에 레일신축이음매를 두는 방안을 제시하였다.

그러나 초과응력의 양이 많지 않으므로 궤도자체의 횡방향 저항능력을 향상시킨다면 R=300m 정도의 작은 곡선구간에서도 장대레일의 적용이 가능함을 정량적으로 확인할 수 있었다. 다만 4.1절에서 언급한 궤도구조의 횡방향 저항능력 향상방안에 대하여는 각 방안별로 저항능력에 대한 실험적 또는 문헌적 증거가 별도로 이루어져야 함을 첨언하는 바이다.

참고문헌

1. International Union of Railways(UIC) (2001년), "Track/bridge Interaction Recommendations for calculations", UIC Code 774-3, 2nd edition, Translation.
2. European Standard Technical Committee CEN/TC250 (2002년), "European Standard", prEN1991-2.
3. M.A.Prud'homme and M.G.Janin (1969년), "La Stabilité des voies en longs rails soudés (Stability of long welded rail tracks)", Revue Generale des Chemins de Fer, February.
4. 건설교통부 제정(2004년), "철도설계기준(철도교편)", 사단법인 대한토목학회.