

분기기와 교량의 상호작용 특성에 관한 연구

A study on the axial force and displacement characteristics of turnout on a bridge

양신추* 김인재** 김 은***

Yang, Shin Chu Kim, In Jae Kim, Eun

ABSTRACT

Most of design parameters of Railway Structures are determined by the serviceability requirements, rather than the structural safety requirements. The serviceability requirements come from Ensuring of Running Safety and Ride Comfort of Train, Reduction of Track Maintenance Work Track-Bridge Interaction should be considered in the design of railway structures.

In this study, a numerical method which precisely evaluate an axial force in rail and a rail expansion and contraction when turnout exist in succession on a CWR on a ballasted or on a ballastless track of bridge is developed. From the parameter studies using the developed method, additional stress of stock rail almost 25% is generated due to stock and lead rail interaction, even embankment not bridge. In case of ballasted track, additional stress of stock rail on bridge is very greater than on embankment, and therefore require detailed review in bridge design with turnout. Stresses of turnout rails on bridge are very sensitive according to the installed positions. In case of ballastless track, Stresses of turnout rails are similar as those of normal track

1. 서론

최근 열차의 고속화 추세에 따라 선로선형이 매우 제한되게 되었고 따라서 많은 구간을 교량으로 설계할 밖에 없는 실정에 있다. 교량상의 분기기를 장대화할 경우 궤도의 유지관리 측면에서 매우 유리하고 또한 환경소음 및 진동이 저감되어 가급적 장대화 부설이 요구되고 있다. 심지어 부동구간으로 구성되는 토공구간에서도 분기부를 장대화할 경우에는 장대레일 축력이 35%이상 증가하여 주의를 기울여 왔다. 더구나 교량상에 분기기를 부설할 경우에는 교량 상판의 온도신축과 단부격임각이 발생함에 따라 매우 큰 레일응력이 발생하여 장출 및 파단사고가 발생할 수 있고, 또한 침단부 탄성포인트와 기본레일사이의 상대변위 발생에 따라서 열차주행안정이 크게 저하될 수 있다. 따라서 교량상의 분기기를 장대화할 경우 교량과 분기기의 상호작용 특성을 정확하게 분석하여 축력에 대한 안정성을 확보하는 것은 중요한 과제라고 할 수 있다.

본 연구에서는 교량과 분기기의 상호작용을 특성을 분석할 수 있는 해석기법을 제시한 후, 매개변수 연구를 통하여 분기기 크기 및 부설위치와 교량상판 및 교각의 구조적특성, 교좌장치 배열이 장대레일 축력에 미치는 영향을 분석하였다.

* 정회원, 한국철도기술연구원, 궤도구조연구팀

E-mail : scyang@krrri.re.kr

TEL : (031)460-5301 FAX : (031)460-5814

* 한국철도시설공단

* 한국철도기술연구원

2. 교량/궤도 상호작용 기본이론

2.1 도상저항력의 모델링

유도상궤도 또는 콘크리트궤도와 교량과의 종방향 상호작용은 레일 및 교량상판 사이의 체결구, 침목, 침목패드 등의 연결체를 통하여 이루어진다. 이들은 침목간격으로 이산되어 작용하나 해석을 용이하게 수행하기 위하여 등분포되어 있는 스프링으로 모형화할 수 있다(실제 침목간격이 작기 때문에 계산상의 차이는 거의 없음). 기존의 연구에서는 스프링의 물성을 주로 탄성 또는 소성으로 이상화하여 해석하였으나 실제 측정에 의하면 그림 1의 점선과 같이 비선형 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 계산상의 정확성과 계산시간의 저감을 위하여 스프링이 일정변위(한계탄성변위)내에서는 탄성적으로 거동하다가 그 이상의 변위가 발생하면 소성적으로 거동하는 쌍일차(Bilinear) 거동특성을 갖는 것으로 가정하였다. 이러한 가정을 바탕으로 한 해석방법은 쌍일차 모형이 실제의 비선형 거동특성을 잘 반영할 수 있어 해석결과의 정확성을 높일 수 있을 뿐만 아니라, 완전 비선형모형을 사용할 경우 비하여 계산시간이 비교할 수 없을 정도로 적게 소요되기 때문에 수 km 이상의 장대교량의 해석도 가능하다는 장점이 있다.

2.2 궤도/교량 인터페이스 요소

매우 긴 장대교량과 궤도와의 상호작용 해석시 자유도를 제한하여 해석시간을 단축할 수 있게 하기 위하여 궤도와 교량의 요소길이를 침목간 거리로 제한하지 않고 길이를 자유롭게 선택할 수 있게 할 경우 궤도를 종방향 거동만하는 레일을 나타내는 축요소와 도상저항스프링으로 모형화하고 교량을 종방향과 수직 및 회전변형을 하는 보요소로 모형화할 경우 인터페이스 요소는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

그림 1 도상저항력의 종저항 쌍일차모형

그림 2. 궤도/교량 인터페이스 요소

여기서 L 은 요소길이이고, h 는 교량상판의 중립축에서 상부면까지의 높이이다.

이때 인터페이스요소가 탄성 및 소성영역에 있는지에 대한 판단식은 다음 식(1)로 주어진다.

$$\left| \frac{(U_1+U_2)}{2} - \frac{(U_3+hU_5+(U_6+hU_8))}{2} \right| = \delta_u \begin{cases} > u_o \rightarrow \text{소성영역} \\ \leq u_o \rightarrow \text{탄성영역} \end{cases} \quad (1)$$

2.3. 교차장치 유형별 상판 휨거동과 수평거동과의 관계

일반적으로 차량주행시 교대부의 거동은 매우 작으므로 고정되었다고 가정할 수 있다. 따라서 고정받침인 경우는 그림에서 3-(a)나타낸 바와 같이 다음과 같은 경계조건으로 처리할 수 있다.

(i) 좌측단인 경우 : $U_1 = bU_3$, $U_2 = 0$

(ii) 우측단인 경우 : $U_4 = -bU_6$, $U_4 = 0$

이동받침인 경우는 좌, 우측 모두 수직방향 자유도만을 0으로, 즉 $U_2=0, U_5=0$ 으로 처리하면 된다. 탄성받침인 경우는 그림 3-(b)로부터 절점변위와 절점하중과의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K_H & 0 & -bK_H \\ 0 & K_V & 0 \\ -bK_H & 0 & b^2K_H+K_M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 K_H, K_V, K_M 은 각각 수평, 수직 회전 변위에 대응하는 스프링상수이며, b 는 상판하면에서부터 중립축까지의 높이이다.

(a) 고정받침 교좌장치

(b) 탄성받침 교좌장치

그림 3 교대에 안치대는 교좌장치 유형에 따른 하중 및 변위조건

교좌장치가 교각에 안치되는 경우 교좌장치유형에 따라 상판의 좌우단절점과 교각 침단에서의 각 자유의 종속성은 달라지게 된다. 그림 4와 같은 좌단 고정단으로 되어있는 교좌장치인 경우 자유도 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$U_1=U_3+b\phi_1, \quad V_1=V_2=V_3$$

교좌장치가 탄성받침으로 되어 있는 경우는 상판의 하면에 서 중립축까지의 높이를 고려하여 상판과 교각의 사이의 인터페이스요소로 모형화할 수 있다. 일반적으로 교량의 교좌장치는 고정단, 자유단, 및 탄성받침의 조합으로 그림 5와 같이 12가지의 유형이 있을 수 있다. 이들 각각의 교좌장치 유형에 대하여 휨과 수평변위와의 관계는 앞서 언급한 바와 같은 개념으로 적절한 관계식을 유도한 후 이들을 시스템 평형방정식의 부가적인 제한조건으로 적용함으로써 고려할 수 있다.

그림 4. 그림 교좌장치 유형에 따른 절점 변위 및 힘과의 관계

그림 5. 교좌장치 유형

3. 교량/분기기 상호작용해석

3.1 분기기구간 도상저항력

궤광의 횡변위와 도상횡저항력의 관계는 궤광의 횡변위에 대하여 도상횡저항력이 점증하는 부분과

더 이상 증가하지 않고 일정하게 유지되는 부분으로 나눌 수 있는데 궤도의 축력에 대한 안정은 점증하는 부분에 의하여 궤도가 안정을 잃기까지의 변형도와 일정치에 도달한 후의 최종 도상횡저항력에 크게 영향을 받는다.

도상횡저항력에 대한 침목 각 면의 분담에 대하여 저면에는 궤광 중량에 의한 마찰력이, 단면에는 도상에 의한 수동토압이, 측면에는 주동토압이 작용한다고 전제하여 해석한 실험식은 다음과 같다.

$$F = a \times W + b \times \gamma \times G_e + c \times \gamma \times G_s \quad (3)$$

여기서 F : 침목 1정당 도상횡저항력(kg), W : 침목중량(궤강중량 포함, kg), γ : 도상의 단위용적중량(kg/cm³), G_e : 침목 단부면의 단면1차모멘트(cm³), G_s : 침목 측면의 단면1차모멘트(cm³), a, b, c : 계수이다.

표 1 궤도형식별 계수치

구 분	a	b	c	비 고
PC침목 + 꺾자갈	0.75	29	1.8	
목침목 + 꺾자갈	0.75	29	1.3	
목침목 + 마모된 자갈	0.6	29	1.4	

식(3)에서 우변의 제1항은 침목저면, 제2항은 침목단부면, 제3항은 침목측면의 도상횡저항력에 대한 분담을 나타낸다.

3.2 분기기구간 모델링

분기기는 그림 6과 같이 연속장대레일로 되어 있는 기본레일(Stock rail)과 힐(hill)부에서 끝나는 리드레일(Lead rail)로 구성되어 있다. 분기기 유형은 힐부에서 기본레일과 리드레일이 강결되어 있는 분기기(기존분기기)와 기본레일과 리드레일이 연결되어 있지 않은 고속분기기, 힐부에서 기본레일과 리드레일의 상대변위를 일정범위내로 제한하는 개량형 분기기가 있다. 본 연구에서는 이들 모두를 모형화할 수 있도록 기본레일/리드레일/침목/구조물의 연결시스템을 그림 7과 같이 스프링으로 모형화하였다. 여기서 분기기체결구 및 도상저항력은 그림 1에서 나타난 바와 같이 쌍일차(Bilinear) 모형으로 모형화 하였다.

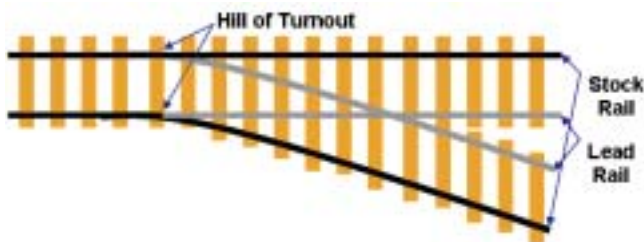


그림 6. 기본레일과 리드레일로 구성된 분기기 구조

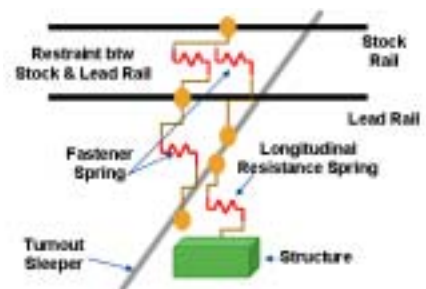


그림 7. 분기기구간 해석모델링

4. 수치해석

각각 분기기 힐부가 교량의 고정단 및 이동단에 위치한 경우에(그림 8과 그림 9) 대하여 교량/분기기 상호작용 해석을 수행하였다. 그림 10~13은 각각 분기기가 고정단에 있을 경우 기본레일 및 리드레일의 응력과 변위를 나타낸 것이다.

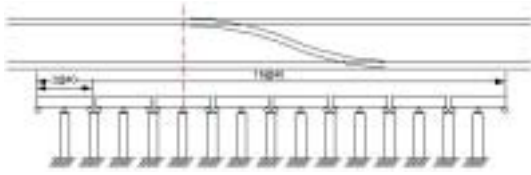


그림 8 분기기 hill부가 고정단 교좌장치 위에 위치한 경우

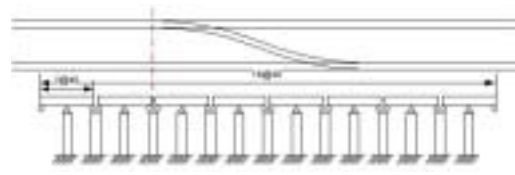


그림 9 분기기 hill부가 이동단 교좌장치 위에 위치한 경우

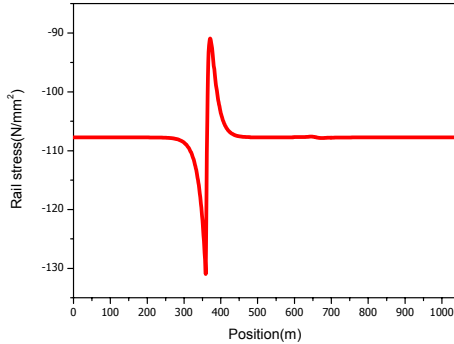


그림 10 Stock rail의 레일응력

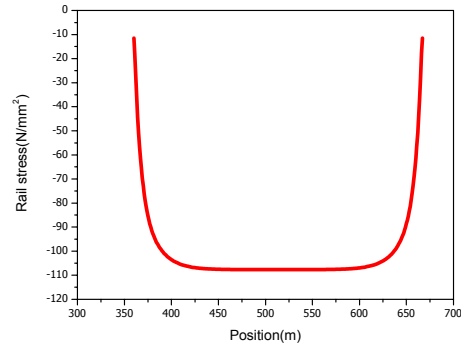


그림 11 Lead rail의 레일응력

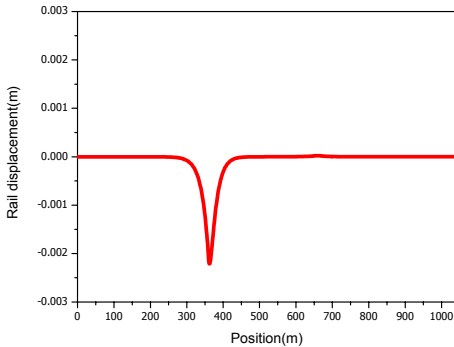


그림 12 Stock rail의 레일변위

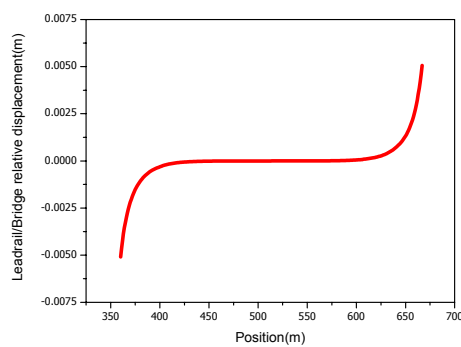


그림 13 Lead rail의 레일변위

그림 14와 15는 교량상에 분기기가 있는 경우(적색 실선)와 없는 경우(흑색 실선)의 기본레일의 응력 및 변위를 나타낸 것이다. 그림에서 나타내어진 바와 같이 분기기가 있는 경우는 기본레일과 리드레일의 상호작용에 의하여 부가응력이 크게 발생함을 알 수 있다. 따라서 교량상에 분기기를 부설할 경우는 장대레일 축력 안정성을 확보할 수 있도록 정밀한 검토가 요구됨을 알 수 있다.

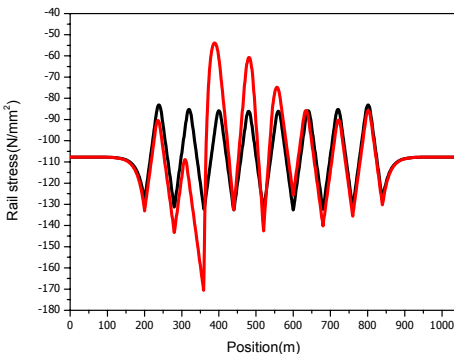


그림 14 교량상 분기기 Stock 레일응력

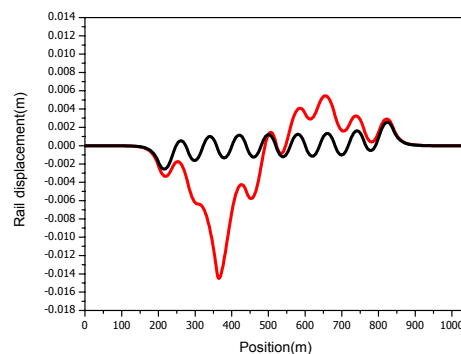


그림 15 교량상분기기 Stock 레일변위

그림 16은 분기기의 위치를 달라하여, 즉 분기기 힐부가 교량의 고정단에 있는 경우와 이동단에 있는 경우에 대한 기본레일의 응력을 나타낸 것이다. 이 결과로부터 분기기의 기본레일축력은 힐부를 고정단에 둘 경우가 축력 안정성에 매우 유리함을 알 수 있다.

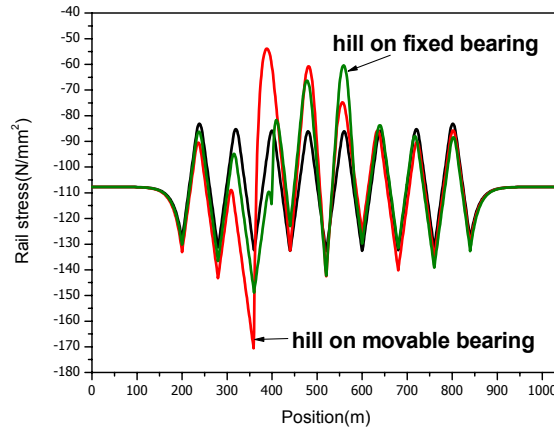


그림 16. 분기기 Hill부 위치에 따른 레일응력비교

그림 17과 18은 교량상 유도상궤도와 무도상궤도 분기기의 기본레일 응력 및 변위를 나타낸 것이다. 이들 결과로부터 무도상궤도보다 유도상궤도에서의 분기기가 축력 및 변위가 크게 발생함을 알 수 있다. 이것은 무도상궤도에서는 기본레일과 리드레일의 상호작용이 발생하지 않지만 유도상에서는 이들 상호작용이 발생하여 축력 및 변위가 부가적으로 크게 발생하기 때문이다.

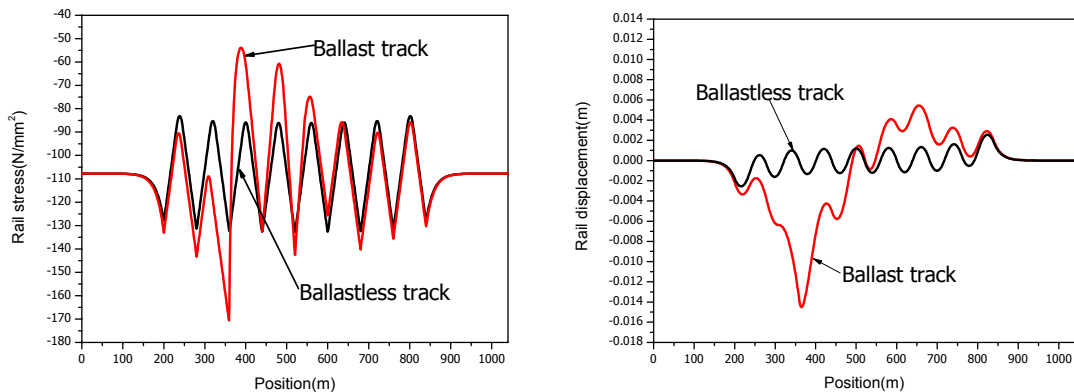


그림 17 유도상/무도상 궤도에서의 레일응력 그림 18 유도상/무도상 궤도에서의 레일변위

5. 결론

본 연구에서는 교량과 분기기의 상호작용을 특성을 분석할 수 있는 해석기법을 제시한 후, 매개변수 연구를 통하여 분기기 크기 및 부설위치와 교량상판 및 교각의 구조적특성, 교좌장치 배열이 장대레일 축력에 미치는 영향을 분석하였다.

이들 연구결과로부터 교량상에 분기기를 부설하면 일반구간보다 매우 큰 장대레일 축력이 발생하기 때문에 상세한 검토가 요구됨을 알 수 있으며, 또한 분기기의 부설위치도 축력에 크게 영향을 주므로 안전측의 설계를 위해서는 분기기 힐부를 고정단에 위치하는 것이 유리함을 알 수 있었다. 한편 유도상 궤도의 분기기가 무도상의 분기기보다 매우 큰 장대레일 축력이 발생하는 것을 알 수 있었다.