

분기기-교량 종방향 상호작용 해석기법

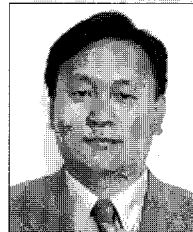
Longitudinal Interaction Analysis Between Turnout and Bridge



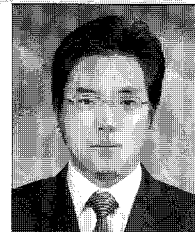
최진유*



김인재**



양신추***



조현철****

* 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 선임연구원
 ** 한국철도시설공단 궤도기술처 팀장
 *** 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실 수석연구원
 **** 한국철도기술연구원 차륜궤도연구실

1. 개요

철도의 고속화에 따른 선형의 직선화로 선하역사의 증가되고 있는 추세이고, 이에 따라 고속철도뿐만 아니라 일반철도 구간에서도 교량상에 장대화된 분기기가 부설되는 경우가 증가하고 있다. 선하역사를 건설하기 위해서는 역사 전·후에 본선과 부분선 또는 측선 등으로 진입하기 위한 분기기가 부설되며, 특히 고속선 등에서는 역사뿐만 아니라 선형의 직선화로 인한 교량의 건설이 많아지게 되고, 선로 계획상 교량상에 도중 건널선 등을 부설하는 경우가 많이 발생하게 된다. 교량상에 분기기가 부설되는 경우에는 분기기의 부설위치에 따라 특히, 장대화된 분기기의 경우 장대레일에 발생하는 축력의 분포 및 크기가 일반 장대레일의 경우와는 달리 나타난다. 장대화된 분기기가 교량상에 설치되는 경우에는 일반 장대레일과 달리 교량과의 상호작용에 의한 부가축력뿐만 아니라 분기기 리드레일의 온도신축에 의한 부가축력을 추가적으로 검토하여 그 안전성을 평가하여야 한다. 따라서 본 원고에서는 분기기와 교량의 종방향 상호작용을 고려한 장대레일의 안전성을 검토하기 위한 해석기법을 소개하기 위하여

분기기의 기본적인 축력 분포 특성과, 교량상 분기기의 축력 영향인자, 모델링 기법, 검토기준 그리고 해석 예를 설명하고자 한다.

2. 분기기 구간 장대레일의 축력 분포 특성

2.1 분기기의 구조

열차 또는 차량을 한 궤도에서 타 궤도로 전환시키기 위하여 궤도상에 설치한 설비를 분기기라 하며, 분기기는 포인트(Point)부, 리드(Lead)부, 크로싱(Crossing)부의 3부분으로 구성된다. 그림 1은 편개 분기기의 각 부분의 명칭을 나타내고 있다. 분기기의 주요 부재는 텅레일(tongue rail), 크로싱(crossing), 가드레일(guard rail)이 있다.

2.2 분기기 구간 장대레일의 축력 분포 특성

일반적으로 분기기를 포함하여 장대레일화 할 경우 레일에 발생하는 축력은 리드레일의 온도신축에 의한 영향으로 일반 장대레일과는 다른 축력 분포특성을 보이며, 텅레일

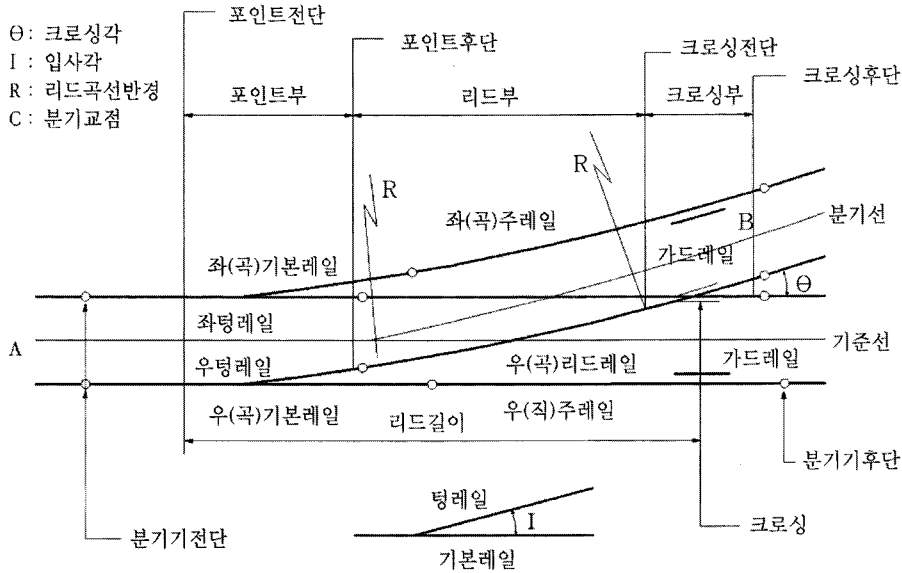


그림 1 분기기 각부의 명칭

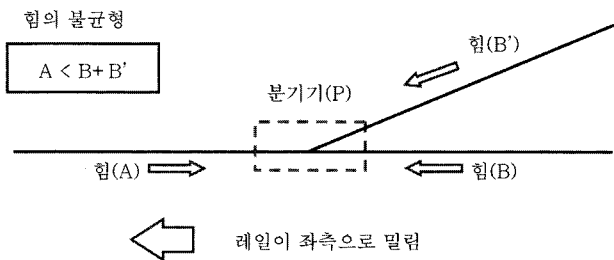


그림 2 분기기 구간 장대레일의 축력 작용도

에서 직각틀림이 발생하게 된다. 그림 2는 분기기가 포함된 장대레일을 약도로 표시한 것으로 P가 분기부에 해당되며 분기기 전후가 장대레일이라면, P로부터 충분히 떨어진 점 A, B, B'에서의 축력은 통상적으로 일반구간의 장대레일 부동구간과 같게 된다. 만약 P점을 완전히 고정하였다 가정하면, P점으로 향하는 힘은 좌측 1의 힘에 대하여 우측 2의 힘으로 되기 때문에 힘의 불균형이 초래된다. 분기기는 완전하게 고정이 불가능하기 때문에 P점은 A측으로 힘이 밀리게 되며, A로부터 P에 향하는 힘이 B, B'에서 P로 향

하는 힘의 합계와 같게 되어 균형상태로 된다. 이 결과 레일축력은 P에서 A측 방향으로 상승하게 되고, B 및 B'측에서는 저하하게 되며, 이때의 기본레일은 분기전후의 일반 장대레일과 접속하고 있는 반면 크로싱에 접속하는 레일은 그 선단이 텅레일로 되어있기 때문에 이동량이 크게 되며 상대적인 직각틀림이 생기게 된다.

일반적으로 토공구간에서 완전 장대화된 분기기 구간 장대레일에 발생하는 최대축력은 일반구간에 비해 약 35% 정도 증가하는 것으로 알려져 있다.

3. 교량상 분기기 장대레일의 거동 영향 인자

교량상 장대레일 또는 분기기 장대레일에 발생하는 축력 및 변위에 영향을 미치는 요인은 여러 가지가 있지만 크게 궤도의 특성과 교량의 특성, 그리고 작용하중의 특성에 따라 달라지며 각각의 영향인자들의 특징은 다음과 같다.

3.1 궤도

3.1.1 궤도 종저항력

레일 종방향 변위에 대한 궤도의 단위길이 당 저항하는 힘으로 정의되는 궤도 종저항력은 궤도/교량 상호작용에 영향을 주는 중요한 요소이다. 궤도변위에 따른 궤도 종저항력은 궤도구조, 열차하중의 재하(Loading) 또는 비재하(Unloading), 자갈도상 또는 무도상, 궤도의 유지관리 정도, 궤도부설방법, 하중작용빈도 등에 따라 그 크기가 달라진다. EN기준³⁾과 국내 기준⁴⁾에서는 표 1과 그림 4와 같은 궤도 종저항력을 기준으로 채택하고 있다.

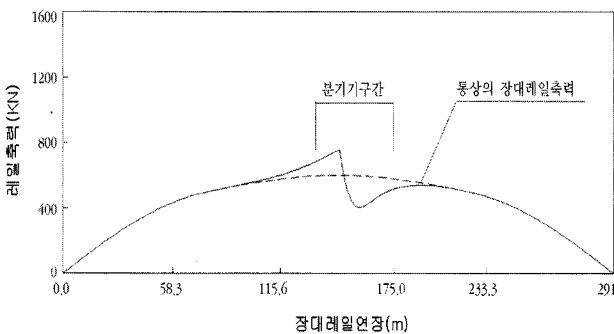


그림 3 분기기가 포함된 장대레일 부동구간의 축력 분포도

표 1 궤도유형 및 하중 재하상태별 궤도 종저항력

궤도유형		한계변위 u_0 (mm)	종저항력(궤도당) q (kN/m)
자갈궤도	하중비재하 시 (Unloaded case)	2.0	12.0~20.0
	하중재하 시 (Loaded case)	2.0	60.0
콘크리트궤도 또는 유도상 빙결 궤도	하중비재하 시 (Unloaded case)	0.5	40.0
	하중재하 시 (Loaded case)	0.5	60.0

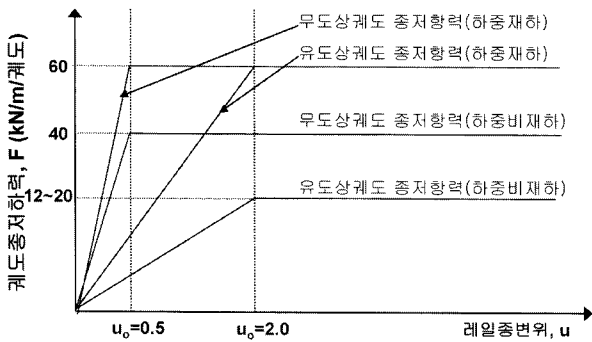


그림 4 궤도유형 및 열차하중 재하상태별 하중-변위선도

3.1.2 레일제원 및 물성

부설하고자 하는 레일 종별에 맞는 단면을 적용하되 탄성계수는 $2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$, 열팽창계수는 1.2×10^{-5} , 포아송비는 0.3를 기본적으로 적용하되, 레일물성이 UIC 및 KS에서 정한 규격과 다른 경우에는 별도의 값을 적용할 수 있다.

3.2 교량

3.2.1 교량의 정적 배열 (Static Arrangement of Bridge)

- ① 교량의 정적 배열은 교량을 구성하는 상판의 개수, 교좌장치의 위치 및 배열, 상판길이, 고정지점간 거리, 레일신축이음매 위치 등으로 구성되며, 상기 각 요소는 궤도/교량 상호작용에 중요한 영향을 미친다.
- ② 고정지점간 거리(Expansion length)는 구조물의 열팽창 중심점(열팽창 시 움직이지 않은 지점)간 거리로서 그림 5와 같은 교량에서 고정지점간 거리는 각각 L 로 나타내진다.

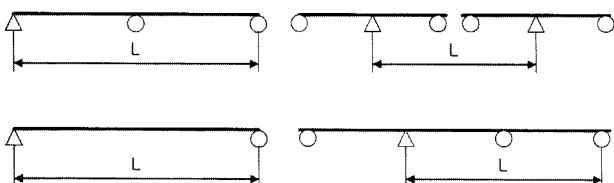


그림 5 교좌장치 배치별 고정지점간 거리

3.2.2 수평지지 스프링 계수(하부구조 강성)

수평지지 스프링 계수는 교량상판의 종방향 이동을 저지하는 반작용력과 관련된 계수인데, 교좌장치 상부에서 단위 종방향 변위에 대한 반작용력을 수평지지계수라 정의할 때 교좌장치 종방향 스프링계수, 교각의 휨강성, 기초의 수평 및 회전강성 등이 수평지지계수 주요한 기여 요소이다.

3.2.3 상판의 휨거동

교량상판에 열차수직하중이 작용할 경우 휨에 의하여 상판의 상부표면에 수평변위가 발생하고(그림 6), 따라서 궤도의 변형에 따른 레일의 변위 및 응력이 발생한다. 열차수직하중에 의한 궤도/교량 상호작용은 주로 상판의 휨강성과 중립축의 위치, 그리고 고정단의 수평지지 스프링강성 및 상판의 높이에 영향을 받으므로 궤도/교량 상호작용 해석시 이들의 영향을 고려할 수 있어야 한다.

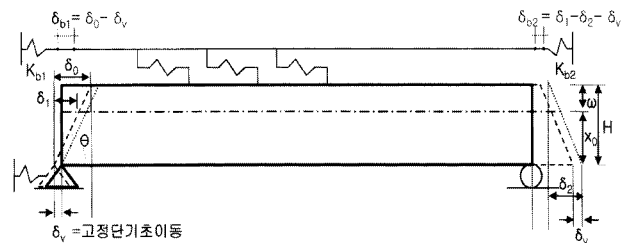


그림 6 열차수직하중에 의한 상판 휨 발생 및 그에 따른 수평변위 발생

3.3 작용하중

궤도와 교량사이에 상대변위를 유발하는 하중은 여러 가지가 있지만 온도하중, 시제동하중, 열차수직하중이 거의 지배적이기 때문에 일반적으로 이들 하중만을 고려하여 해석을 수행한다.

3.3.1 온도하중

- ① 레일은 부설시의 온도 또는 재설정온도를 기준으로 온도변화는 $+40^\circ\text{C}$, -50°C 를 기준으로 한다.
- ② 콘크리트구조물은 $\pm 25^\circ\text{C}$ 를 기준으로 한다.
- ③ 강구조물의 온도변화는 기후가 보통인 지방에서는 $\pm 35^\circ\text{C}$ 를, 기후가 한랭한 지방에서는 $\pm 45^\circ\text{C}$ 기준으로 한다.

3.3.2 시/제동하중

시/제동하중은 등분포하중으로 레일 두정면에 작용하는 것으로 하고, 그 크기 및 재하길이는 다음과 같으며, 검토하고자하는 대상(레일응력 응력 또는 교량변위)에 대하여 가장 불리한 위치에 작용하는 것으로 한다.

- ① 시동하중 :
 - 고속철도의 경우 :
 - $q_a=33\text{kN/m}$ /궤도, 재하길이는 33m이하
 - 일반철도의 경우 :
 - $q_a=24\text{kN/m}$ /궤도, 재하길이는 33m이하
- ② 제동하중 :
 - 고속철도의 경우 :
 - $q_b=20\text{kN/m}$ /궤도, 재하길이는 400m이하
 - 일반철도의 경우 :
 - $q_b=12\text{kN/m}$ /궤도, 재하길이는 300m이하

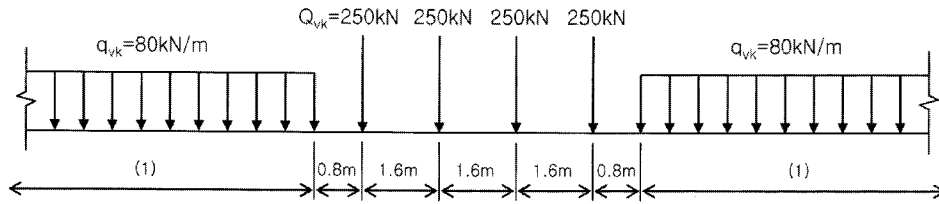
3.3.3 열차수직하중

고속철도의 경우 열차수직하중은 그림 7(a)의 HL 하중모델 또는 그림 7(b), 일반철도의 경우는 그림 8(a)의 HL 하중모델 또는 그림 8(b)와 같은 등가하중이 교량상판에 작용하

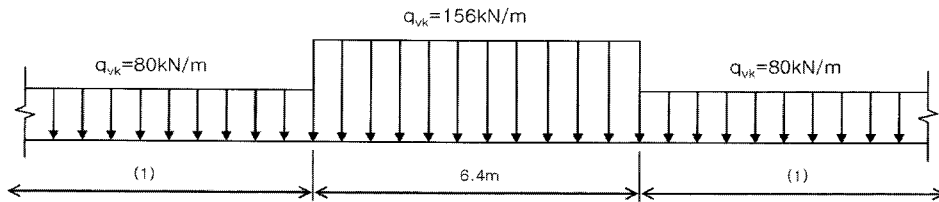
는 것으로 하며, 충격계수는 고려하지 않는다. 여객전용 고속철도의 경우 HL 하중선도의 등분포하중을 60kN/m 로 적용할 수 있다. 하중의 재하 위치는 검토하고자 하는 대상(레일응력 응력 또는 교량변위)에 대하여 가장 불리한 위치에 작용하는 것으로 한다.

4. 분기기와 교량의 종방향 상호작용 해석 방법

분기기와 교량의 종방향 상호작용의 해석을 위해서는 도상 또는 체결구의 종방향 비선형 또는 쌍일차(Bi-linear) 하중-변위 특성을 모사할 수 있는 요소를 가지고 있는 일반 범용프로그램 또는 전용프로그램을 사용하여 해석할 수 있다.

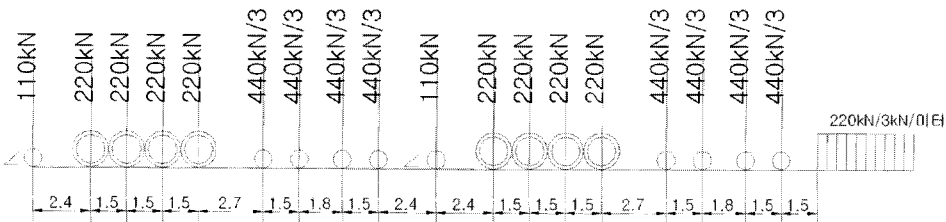


(a) HL 하중선도

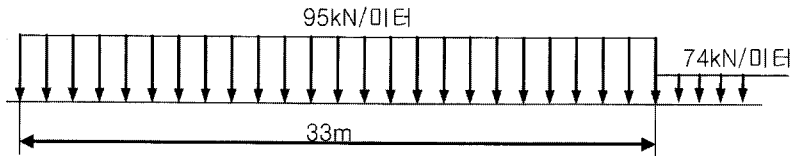


(b) HL 등가하중선도

그림 7 고속철도 수직하중



(a) LS 하중선도 (L-하중)



(b) LS 등가하중선도

그림 8 일반철도 수직하중

4.1 교량상 분기기 모델링

분기기는 장대레일로 되어 있는 기본레일(Stock rail)과 힐(Heel)부에서 끝나는 리드레일(Lead rail)로 구성되어 있다. 분기기 구조는 포인트부, 리드부, 크로싱부로 나누어지며, 해석을 위한 모델링은 기본레일과 리드레일이 만나는 힐부를 시점하여 포인트부 리드부 크로싱부, 크로싱부 후단의 리드레일과 기본레일이 침목을 공유하는 구간까지를 분기기부로 모델링하며, 침목을 공유하지 않는 구간에 대해서는 일반 교량상 장대레일 구간으로 보고 모델링을 한다. 분기기 구간의 유한요소모델은 그림 9와 같다. 분기기 구간의 모델링은 레일길이 방향에 대해서 침목자체를 절점으로 하여 상부의 레일과 하부의 교량을 비선형 스프링으로 직렬 연결시켰다. 이는 일반구간과 다르게 분기침목이 복선에 걸쳐 1개의 침목으로 연결하는 경우가 있으며, 1개의 침목에 6개의 레일이 올라가게 되므로 도상중저항력이 증가하여 교량신축에 의해 궤도에 전달되는 하중이 도상중저항력보다는 레일체결장치의 체결력에 의해 결정될 수 있으므로 일반구간과 달리 레일체결장치의 중저항력을 표현하는 스프링을 추가하였다. 따라서 레일 증방향력은 체결

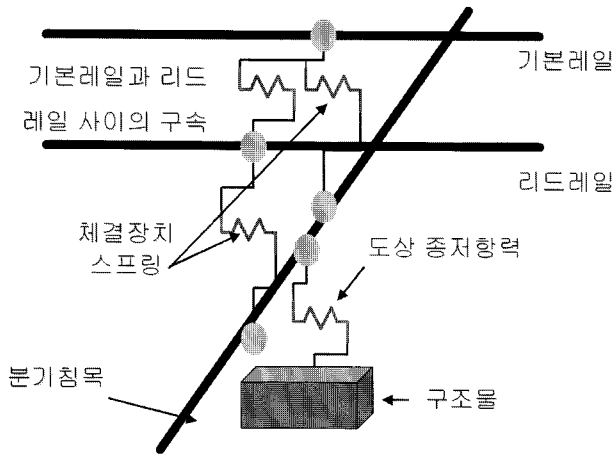


그림 9 교량상 분기기의 유한요소모델

장치의 중저항력에 상당하는 비선형 스프링과 도상 중저항력에 상당하는 비선형 스프링을 침목절점 요소에서 연결시켜 상호 작용력을 전달하도록 하였다.

그림 10은 분기기 레일의 연결을 모델링한 것으로 기본레일과 리드레일이 분기기 힐부에서 서로 연결되도록 한다. 힐부에서의 기본레일과 리드레일, 레일하면의 침목, 교량상판의 절점을 동일한 평면상에 위치하도록 한다. 이때 힐부의 모델링은 힐부의 특성에 따라 달라지는데, 그림 11(a)와 같이 기본레일과 리드레일이 힐부에서 강결되는 경우에는 기본레일과 리드레일의 절점을 공유함으로써 모델링 할 수 있으며, 그림 11(b)와 같이 안티크리퍼 형식의 경우, 안티크리퍼의 유격을 고려하여 기본레일과 리드레일이 갭요소(Gap Element)를 사용하여 연결되도록 하여 모델링 할 수 있다. 그림 11(c)와 같이 기본레일과 리드레일이 직접 연결되지 않고 침목을 통하여 연결되는 경우에는 절점 공유 없이 각각의 레일에서의 절점번호를 부여함으로써 모델링 할 수 있다. 또한 크로싱의 모델링은 서로 교차하는 리드레일의 절점을 공유함으로써 모델링 할 수 있다.

분기기와 교량 상판과의 연결을 위한 모델링이 완료되면 교량의 상판과 하부구조를 다음 그림 12와 같이 연결한다. 궤도의 중심에서부터 교량상판의 중립축, 교량상판의 중립축에서 교좌장치까지는 강제요소로 모델링하여 교량 상판의 휨거동을 궤도에 전달할 수 있도록 하였다. 최종적으로 궤도와 교량 구조시스템의 모형은 그림 13과 같이 모델링 할 수 있다. 이때 하부구조의 강성은 교좌부에서 교각과 기초의 강성을 포함한 집중질량스프링으로 모델링 할 수도 있

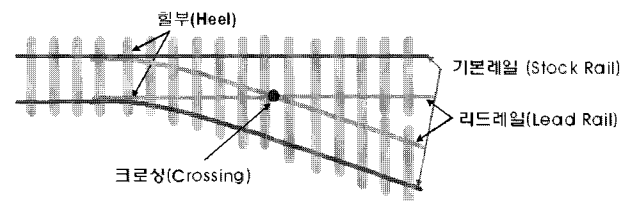
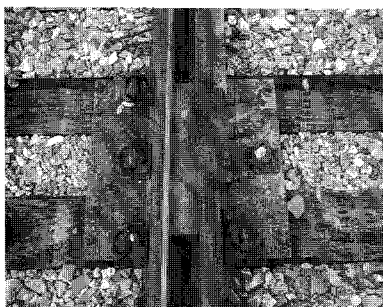


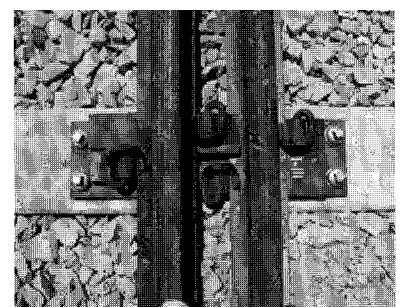
그림 10 분기기 레일의 연결



(a) 고정형



(b) 안티크리퍼형



(c) 분리형

그림 11 힐부의 형상

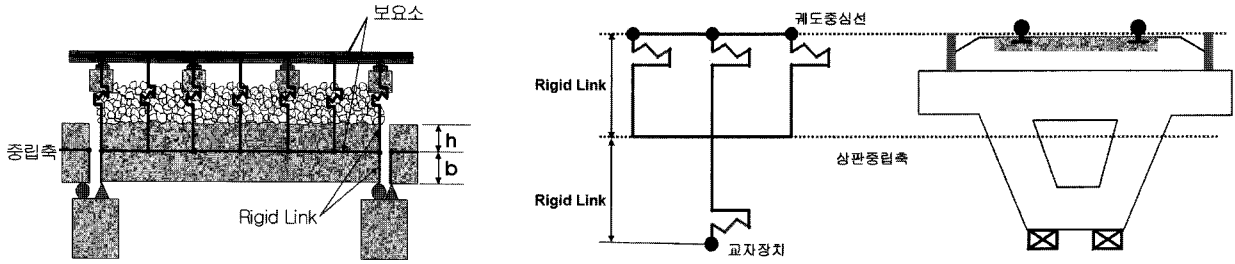


그림 12 궤도-교량 상판-교차장치 연결

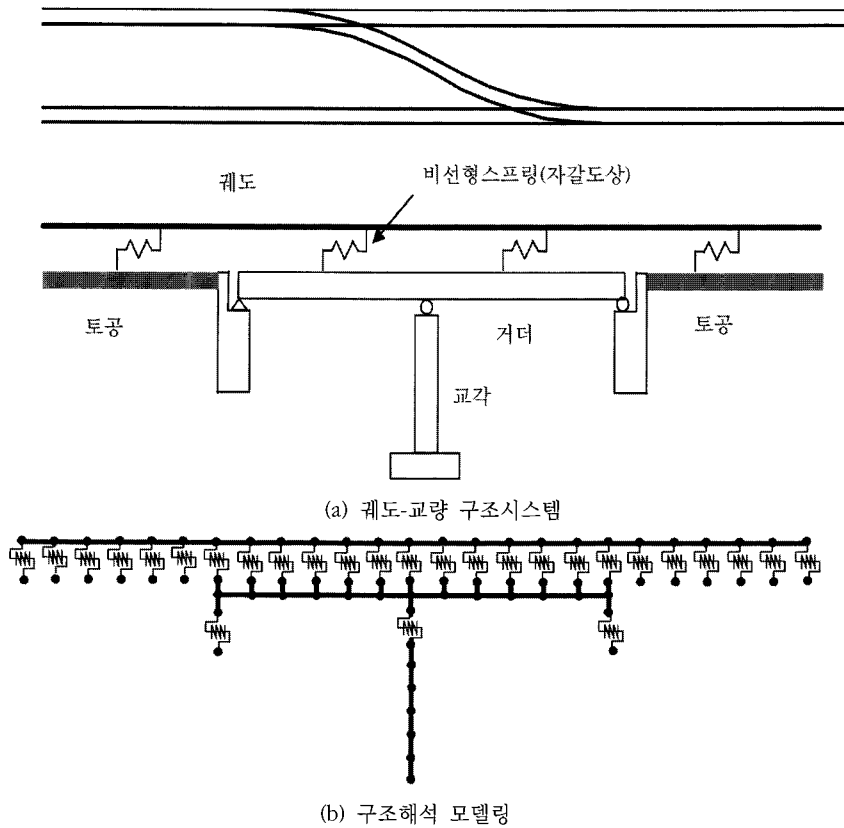


그림 13 궤도-교량 상호작용 해석을 위한 구조시스템 모형화

고, 교차장치와 교각, 기초스프링으로 각 각 분리하여 모델링할 수도 있다.

4.2 해석 절차

분기기와 교량의 종방향 상호작용 해석의 앞 절의 절차에 따라 모델링을 수행한 후에 다음과 같은 절차를 따라 해석을 수행할 수 있다. 이때 자갈도상일 경우, 안전측의 검토를 위하여 레일의 응력을 검토할 경우에는 하중 비재하시의 도상저항력을 12kN/m를, 레일의 변위를 검토할 경우에는 하중 비재하시의 도상저항력을 20kN/m를 적용한다.

- ① 분기기 레일과 교량 상판에 온도하중을 재하 하는데, 레일의 좌굴안전성 즉 압축응력을 검토할 시에는 (+),

- 레일의 파단을 검토시에는 (-) 의 온도하중을 재하한다.
- ② 온도하중에 의하여 최대의 레일응력 또는 변위가 발생되는 지점에 최대의 응력 또는 변위가 발생되도록 시/제동 하중과 수직하중을 재하한다.
- ③ 온도하중, 시/제동하중, 열차수직하중의 재하에 따른 레일의 응력과 변위를 다음의 식에 따라 조합한다. 의 영향이 다음식과 같이 조합되어야 한다.

$$\sum R = \alpha R(\text{온도하중}) + \beta R(\text{시/제동하중}) + \gamma R(\text{열차수직하중})$$

일반적으로 특별한 조건이 제시되지 않으면 연속 또는 단순지지 상판의 경우 α , β , γ 는 각각 1의 값을 갖는 것으로 한다.

4.3 검토 항목 및 기준

교량 상에 부설되는 분기기의 안정성을 확보하기 위한 분기기-교량 종방향 상호작용 해석을 통하여 검토할 항목은 크게 분기기 구간 장대레일의 축력 안전성과 분기기의 사용성(자갈도상의 경우, 궤도의 사용성 포함)을 확보하기 위한 항목으로 나눌 수 있다. 분기기 구간 장대레일의 안전성을 확보하기 위해서는 레일의 좌굴과 파단을 방지하기 위한 레일의 압축응력과 인장응력이 허용범위 내에 있도록 하여야 하며, 자갈도상의 경우, 궤도의 사용성을 확보하기 위하여 레일과 교량의 종방향 상대변위와 교량의 종방향 절대변위와 수직방향 단차가 허용범위 내에 있어야 한다. 또한 분기기의 과도한 변형에 의한 기능저하를 방지하기

위하여 포인트부와 크로싱부(가동크로싱의 경우)의 기본레일과 텡레일의 상대변위, 분기기 각 부분에서의 레일과 침목의 상대변위, 침목과 상판의 상대변위가 분기기 제작사에서 제시한 변위의 허용범위 이내에 있어야 한다. 레일의 축력과 변위에 대한 한계기준은 “궤도-교량 종방향 상호작용 해석 및 설계지침”에 제시되어 있으며 다음과 같다.

5. 분기기와 교량의 종방향 상호작용 해석 (예)

5.1 교량상 분기기 모델 선정

해석 대상은 그림 14와 같이 총길이 240m의 6@40m 교량위에 분기기(#15 편개 분기기)를 설치하는 조건으로 설

	항목		하중	허용기준	
				유도상궤도	무도상궤도
상판 양단	레일부가응력	압축	<ul style="list-style-type: none"> 온도하중 시/제동하중 열차수직하중 	<ul style="list-style-type: none"> R ≥ 1500: 72N/mm² R ≥ 700: 58N/mm² R ≥ 600: 54N/mm² R ≥ 300: 27N/mm² 	92N/mm ²
		인장	<ul style="list-style-type: none"> 온도하중 시/제동하중 열차수직하중 	<ul style="list-style-type: none"> 92N/mm² 	92N/mm ²
모두 장대 레일 인 경우	레일/교량 상대변위			≤ 4mm	체결구 압상 및 압축 안정성 검토
	교량 상판 종방향 상대변위		<ul style="list-style-type: none"> 시/제동하중 	≤ 5mm	
	인접상판 끝단 상부면 사이 또는 상판 끝단 상부면과 교대끝단 상부면 사이 종방향 변위		<ul style="list-style-type: none"> 열차수직하중 	<ul style="list-style-type: none"> 교량/궤도상호작용을 고려하는 경우 ≤ 8mm 교량/궤도상호작용을 고려하지 않는 경우 ≤ 10mm 	
	인접상판 끝단 상부면 사이 또는 상판 끝단 상부면과 교대끝단 상부면 사이 단차		<ul style="list-style-type: none"> 열차수직하중 	<ul style="list-style-type: none"> 열차속도 160km/h 이하인 경우 ≤ 3mm 열차속도 160km/h 이상인 경우 ≤ 3mm 	
	<ul style="list-style-type: none"> 기본레일과 텡레일의 상대변위 레일과 침목의 상대변위 침목과 상판의 상대변위 		<ul style="list-style-type: none"> 온도하중 시/제동하중 열차수직하중 	분기기 제작사에서 제시하는 허용 기준 (레일신축이음이 있는 경우 포함)	

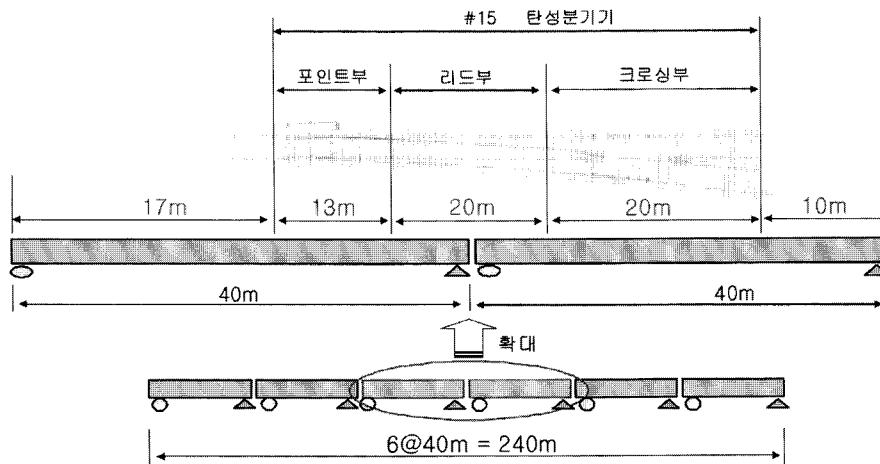


그림 14 교량상 분기기 배치도

정하였다. 레일 부등구간을 나타내는 양측 토공부 총 400m 을 합치면 전체모델 640m이다.

교량단부와 분기기의 포인트부/크로스싱부에 유지관리상의 최소간격 5m을 이격시킨 최적의 위치에 분기기를 설치하였다.

5.2 궤도/교량 물성치 및 제원

해석에 사용된 궤도/교량의 물성치 및 제원은 표 2와 같다

표 2 프로그램 해석 조건

비고	탄성계수 (kN/m ²)	단면적 (m ²)	단면2차 모멘트 (m ⁴)	열팽창 계수 (kN/m ²)	온도변화 (°C)
KS 60	2.10E+08	0.0155	6.18×10 ⁻⁵	1.14E-5	45
상판	2.85E+07	12.384	9.0	1.00E-5	25
교각	2.32E+07	8.294	10.222	.	.

5.3 전용해석 프로그램을 이용한 모델링

본 예에서 철도기술연구원에서 자체 개발한 분기기-교량 종방향 상호작용 전용해석프로그램을 사용하였으며, 4장에서 설명한 모델링방법을 적용하여 완성된 해석모델은 그림 15와 같다.

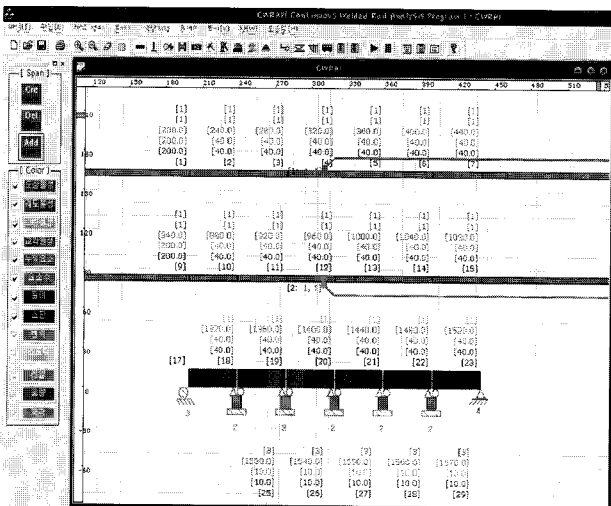


그림 15 전용해석 프로그램을 이용한 교량상 분기기 모델

5.4 해석결과

5.4.1 응력 검토

온도하중, 시/제동하중, 열차수직하중의 재하에 따른 각

단계별 레일의 응력을 조합하였다.

- 압축레일부가응력 종합검토

$$20.74 + 6.98 + 26.39 = 53.8 \text{ MPa} < 72.0 \text{ MPa}$$

→ O.K

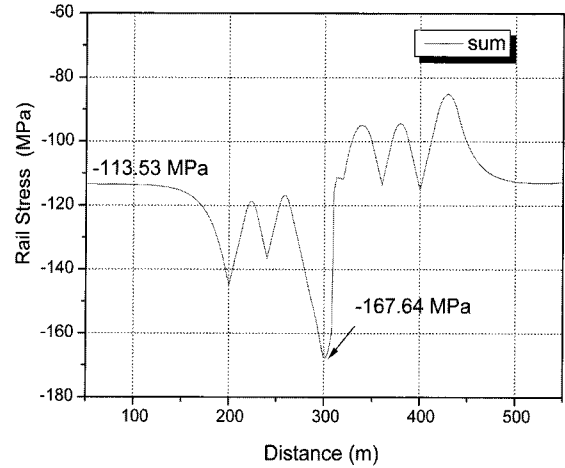


그림 16 레일응력 검토

5.4.2 변위 검토

- 위치를 변경하면서 가장 불리한 위치 선정
- 안전측 검토를 위하여 궤도종저항력 1.2ton/m 적용

- ① 온도하중 작용시 분기기 포인트부 선단에서의 기본 레일/ 텅레일 상대변위

- S사 제작 분기기의 경우 허용한도 :

$$13.92 \text{ mm} < 25 \text{ mm} \rightarrow \text{O.K}$$

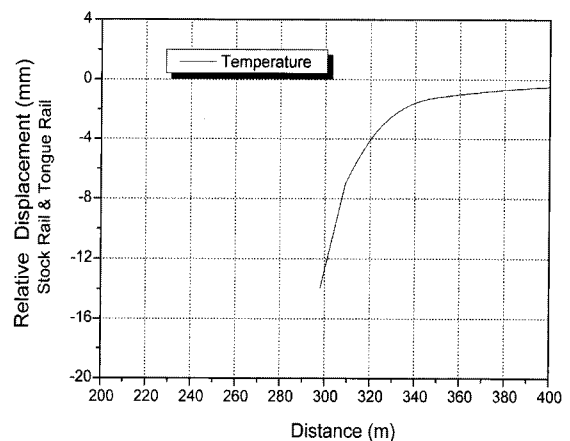


그림 17 레일간 상대변위

- ② 시동/제동하중 작용시 레일/교량 상대변위

- 레일/교량상대변위 검토: 1.40mm < 4mm → O.K

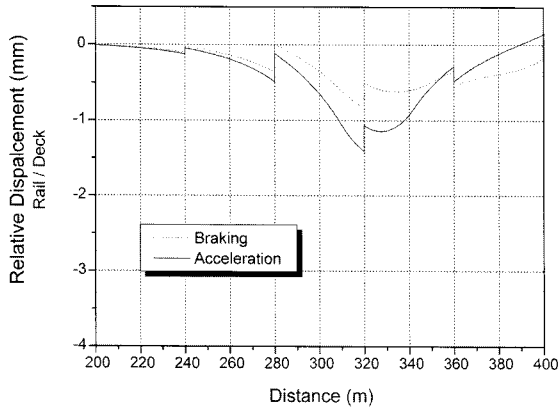


그림 18 레일/교량 상대변위

③ 시동/제동하중 작용시 교량의 상대변위

- 교량상대변위 검토: $0.81\text{mm} < 5\text{mm} \rightarrow \text{O.K}$

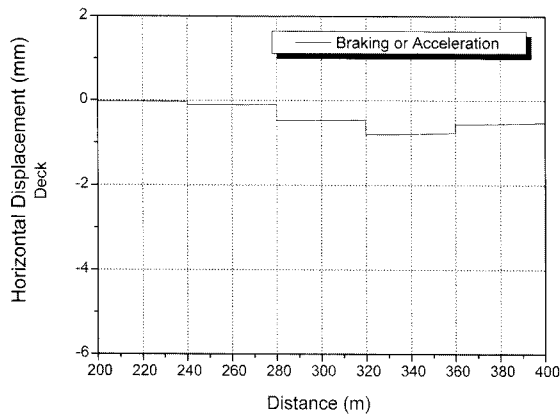


그림 19 교량상판 종방향 상대변위

④ 상판단부회전에 따른 수평변위

- 교량상판단부의 종방향 상대변위 검토 : $6.35\text{mm} < 8\text{mm} \rightarrow \text{O.K}$

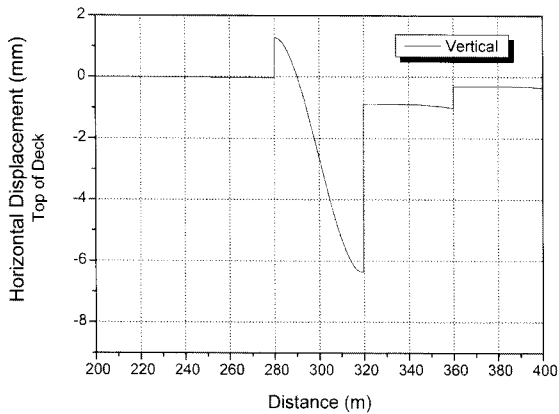


그림 20 열차 수직하중에 대한 교량상판 종방향 상대변위

6. 맺음말

이상에서 분기기와 교량의 종방향 상호작용을 고려한 장대레일의 안전성 검토를 위한 기본적인 분기기의 거동특성과 모델링 기법, 검토 기준, 그리고 해석 예에 대하여 설명하였다. 교량상 분기기의 부설 빈도가 점차 증가하고 있는 상황에서 분기기-교량 종방향 상호작용 해석기법이 일반화되어 교량상 분기기의 해석과 설계의 어려움을 해소하여 보다 수월한 교량의 경간 배치와 교량상 분기기의 부설이 이루어 질 수 있기를 바란다.

참고 문헌

1. 김인재, “교량과 분기기 상호작용에 관한 연구”, 박사학위논문, 서울산업대학교, 철도전문대학원, 2007
2. 김인재, 양신추, 한상철, “교량과 분기기 상호작용에 관한 연구”, 한국철도학회 논문집, 제9권 6호, pp.689-694, 2006
3. 한국철도시설공단, “궤도-교량 종방향 상호작용 해석 지침(안)”, 2008
4. 한국철도시설공단, “교량상 장대레일 축력저감 및 궤도 안정성 향상 방안” 연구보고서, 2008

[담당 : 김만철, 편집위원]