



철도교 설계를 위한 궤도-교량 상호작용 해석

Analysis of Track-Bridge Interaction for Design of Railway Bridge

1. 머리말

현대 철도에서는 레일의 이음매를 없애 진동, 소음, 충격을 줄임으로써 궤도와 구조물의 수명을 높이고 승객의 승차감을 향상시키기 위해 장대레일(continuously welded rail, CWR)을 부설하고 있다. 장대레일이 부설된 교량에서 철도 교량의 설계에 중요한 영향을 미치는 요소 중의 하나는 궤도와의 상호작용이다. 교량의 변형은 필연적으로 궤도 구성요소의 변형과 힘을 발생시키므로 궤도의 변형 또는 힘의 한계가 교량 변형의 구속조건이 된다. 따라서 철도교의 설계에서는 반드시 궤도와의 상호작용을 고려하여야 한다.

유럽에서는 궤도-교량 상호작용 검토에 관한 기준을 세부적으로 규정하고 있으며(UIC 774-3, EN 1991-2), 우리나라에서도 유럽 규정을 준용하여 철도설계지침(KR C-08080)에 반영한 바 있다. 여기서는 궤도-교량 상호작용의 개념과 주요 변수, 해석방법, 설계기준 등을 살펴보고 현재 설계기준이 가지고 있는 문제점과 그 개선방향을 짚어 보고자 한다.

2. 궤도-교량 상호작용

2.1 개념

장대레일이 부설된 궤도에서는 레일 양 끝의 자유 신축부(expansion zone or breathing zone)로부터 일정 거리 떨어지면 레일 변위는 발생하지 않고 레일 응력만 발생하는 부동구간(fixed zone)이 형성된다. 부동구간 내에 구조물이 있는 경우에는 구조물의 거동으로 인하여 궤도에 변위가 발생하게 되고 토공구간에 있는 부동구간과는 달리 그림 2와 같이 레일의 변위와 추가 응력이 발생하게 된다.

레일의 압축응력이 커지면 자갈궤도에서는 궤도의 좌굴(buckling)이 발생할 위험이 있고, 인장응력이 커지면 레일 파단이 발생할 위험이 높아진다. 또한 교량과의 상대변위가 너무 크게 발생하면 자갈궤도에서 자갈층의 이완이 생겨 궤도틀림(geometrical error of track)이 발생한다. 따라서 교량의 설계 시 이러한 궤도-교량 상호작용에 대한 검토가 필요하다.



장 승 업

한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과 부교수

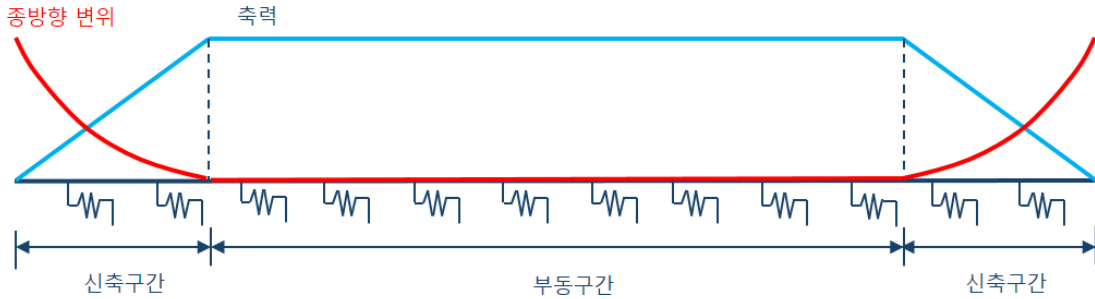


그림 1 장대레일 축력의 이상적인 분포

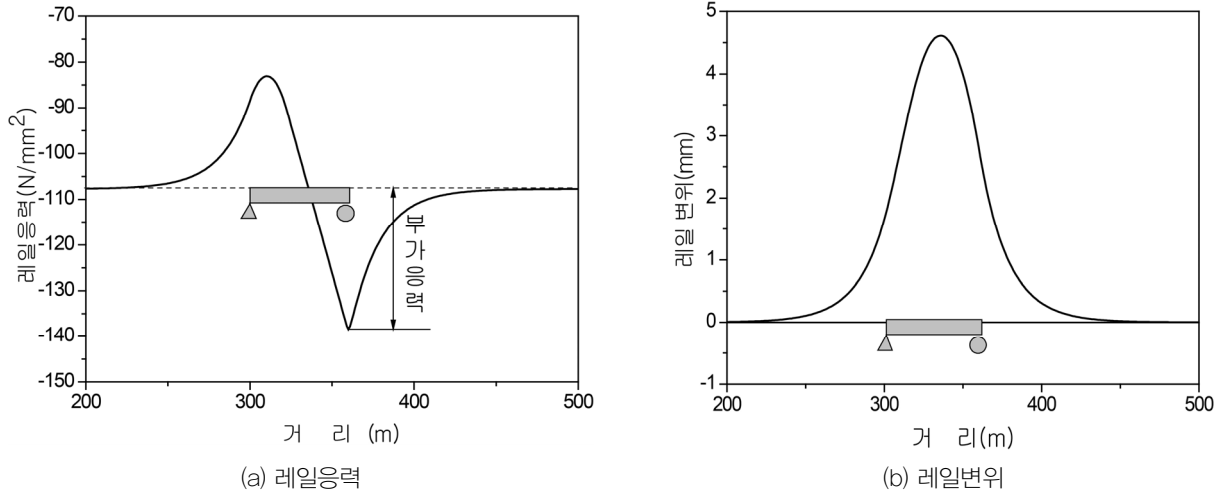


그림 2 궤도-교량 상호작용에 의한 레일응력과 변위 계산 예(KR C-08080)

2.2 주요 변수

2.2.1 궤도

(1) 궤도-교량 연결요소의 종방향 하중-변위 관계

궤도-교량 상호작용에 있어서 가장 중요한 영향인자 중 하나는 궤도 종저항력(longitudinal track restraint)이다. 궤도 종저항력은 레일의 종방향 변위에 대한 궤도의 단위길이 당 저항하는 힘으로 정의되며, 궤도 구조(자갈궤도, 콘크리트궤도 등), 레일체결장치의 종류, 열차하중의 유무 등에 따라 달라진다. 또한 자갈궤도의 경우는 자갈층의 다짐도(degree of compaction)에 따라서도 큰 차이를 보인다.

현장에서 궤도 종저항력을 측정할 경우 그림 3과 같은 비선형 하중-변위 관계를 보이며, 측정하는 침목의 위치에 따라 편차가 크게 나타난다. 궤도-교량 상호작용 해석에 있어서는 계산을 단순화하기 위하여 그림 3에서 실선으로 표시한 바와 같이 일반적으로 쌍일차(Bilinear) 모형

으로 나타낸다. 쌍일차 모형에서는 슬립(slip)이 발생하는 한계변위 u_0 와 종저항력 F_u 가 궤도-교량 종방향 하중-변위 관계의 변수가 된다. KR C-08080에서는 UIC 774-3에서 권고한대로 한계변위와 종저항력의 크기를 그림 4와 같이 제시하고 있으며, 궤도 및 하중 조건이 특별히 다르다고 판단되는 경우 공단의 승인을 얻어 별도의 값을 사용할 수 있도록 허용하고 있다.

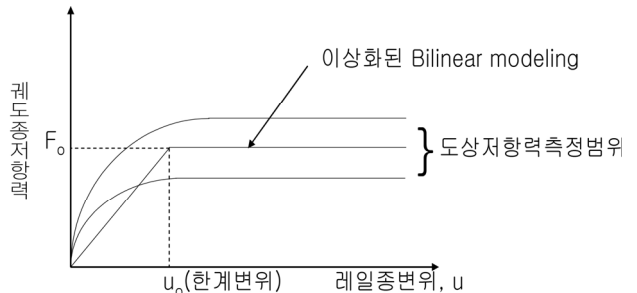


그림 3 궤도-교량 종방향 하중-변위선도 및 쌍일차(Bilinear) 모형(KR C-08080)

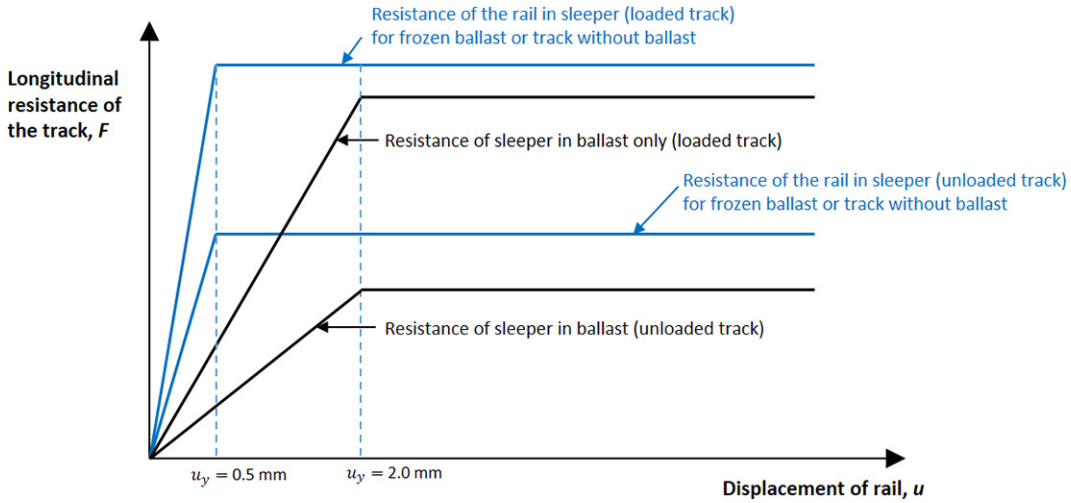


그림 4 궤도유형 및 열차하중 재하상태별 하중-변위선도(UIC 773-4R)

(2) 레일의 단면 치수와 물성

레일 단면 치수와 탄성계수, 열팽창계수 등 물성도 궤도 축력의 크기에 영향을 미치는 영향인자이다. 레일 단면은 고속철도의 경우 UIC60, 일반철도에서는 KR60이 주로 적용되며, 레일 탄성계수는 $2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$, 열팽창계수는 $1.2 \times 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, 포아송비는 0.3을 적용한다. UIC 및 KS에서 규정하는 것과 다른 레일을 적용하는 경우에는 별도의 값을 적용할 수 있다.

2.2.2 교량

(1) 교량 상부구조 경간 구성

교량을 구성하는 경간수(number of span), 각 경간 당 교량받침 수, 고정 및 이동단의 위치, 경간장, 고정지점 간 거리 등은 모두 궤도-교량 상호작용에 영향을 미치는 중요인자이다. 특히 가장 지배적인 인자인 고정지점 간 거리(expansion length)는 구조물의 열 팽창 시 움직이지

않는 지점 간의 거리이며, 그림 5와 같이 정의된다.

(2) 교량 상부구조의 휨 강성과 중립축 높이

교량에 열차 수직하중이 작용하면 상부구조의 휨에 의하여 그림 6과 같이 교량 단부에 수평 변위가 발생하고 따라서 궤도의 변형과 힘이 발생한다. 열차 수직하중에 따른 변형의 크기는 상부구조의 휨강성과 중립축 높이, 하부구조의 종방향 강성 등의 영향을 받는다.

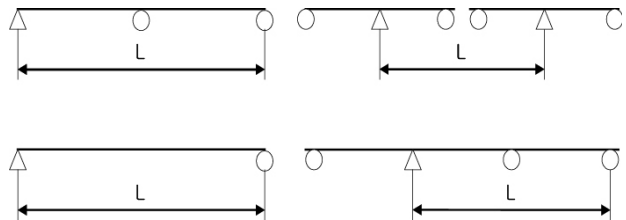


그림 5 교좌장치 배치별 고정지점 간 거리(L)(KR C-08080)

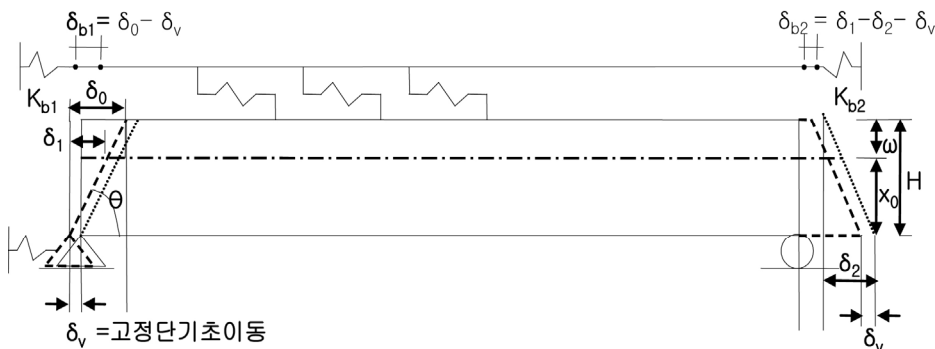


그림 6 열차수직하중에 의한 상판 휨발생 및 그에 따른 수평변위 발생(KR C-08080)

(3) 교량 하부구조의 종방향 강성

레일에 발생하는 힘에 대응하여 교량 상부구조의 종방향 이동에 저항하는 반력은 교각 및 교량 받침의 설계에 있어서 중요하다. 또한 받침의 교좌장치 종방향 스프링계수, 교각의 휨강성, 기초의 수평 및 회전강성 등에 의해 결정되는 하부구조의 종방향 강성은 궤도-교량 상호작용에 중요한 영향인자로 작용하므로 궤도-교량 상호작용 해석에서 반드시 이 종방향 강성을 고려하여야 한다.

2.3 설계 작용(actions)

궤도와 교량 사이에 상호작용을 유발하는 작용은 다음과 같은 것이 있다.

- 레일과 교량 상부구조의 신축을 유발하는 온도하중
- 시·제동하중
- 열차 수직하중
- 크리프(Creep) 및 건조수축(Shrinkage)
- 교량 상부구조의 상·하부 온도차
- 교각 전후면 사이의 온도차

이들 중 온도하중, 시·제동하중, 열차 수직하중이 가장 큰 역할을 하므로 궤도-교량 상호작용은 이들만을 고려한다.

표 1 온도변화의 크기와 열팽창계수의 표준값(KR C-08080)

구 분	최대 온도차(°C)	열팽창계수 ($\times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$)
레일	+40, -50	1.2
교량	콘크리트	± 25
	강 및 강합성	± 35 (보통), ± 45 (한랭)

주) 레일 및 교량의 기준온도(reference temperature)는 레일이 부설 될 때의 온도를 기준으로 한다.

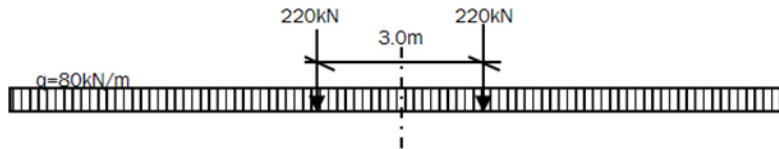
2.3.1 온도하중

온도하중은 전 구간 장대레일인 경우 레일의 온도가 변하더라도 종방향 변위가 발생하지 않아 궤도-교량 상호작용이 발생하지 않으므로 구조물의 온도변화만 고려한다. 한 쪽 이상의 레일신축이음매가 있는 경우에는 레일과 구조물의 온도변화를 동시에 고려한다. KR C-08080에서는 온도변화의 크기와 열팽창계수의 표준값을 표 1과 같이 정하고 있다.

2.3.2 열차하중

열차하중으로는 수직하중과 시·제동하중을 고려한다. 시제동하중은 등분포하중으로 레일 두부 상면에 작용하는 것으로 가정한다. 열차 수직하중 역시 철도설계기준(노반편)(2015)에 규정된 하중선도와 등가인 분포하중으로 적용하며 충격계수는 적용하지 않는다. 2복선 이상의 교량인 경우 2개의 선로에만 하중을 재하한다. 이 때 하나

KRL-2012



0.75(KRL-2012)
여객 전용선

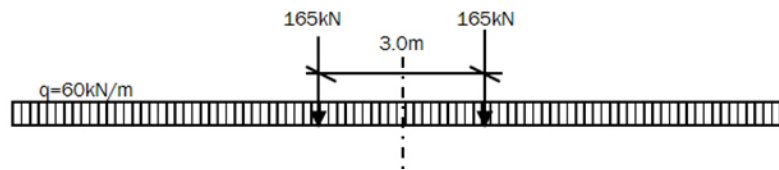


그림 7 열차하중 철도설계기준(노반편), 2015

의 선로에는 시동하중이 다른 하나의 선로에는 제동하중이 작용하는 것으로 하며, 하중의 재하 위치는 검토 대상(응력 또는 변위)에 따라 가장 불리한 위치에 재하해야 한다. 이 밖에 KR C-08080에서 하중의 크기와 재하 방법을 상세히 규정하고 있다.

3. 해석방법과 평가기준

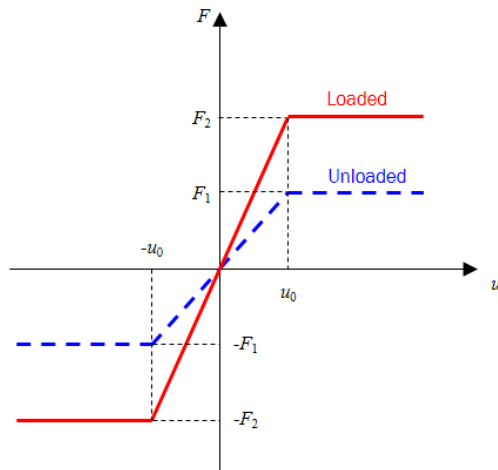
3.1 해석방법

해석방법은 크게 개별 해석법(separate analysis)와 완전 해석법(순차 해석법)(complete analysis or sequential analysis)으로 나눌 수 있다. 개별 해석법은 온도하중, 시·제동하중, 열차 수직하중을 각각 재하하여 각 하중에 의한 결

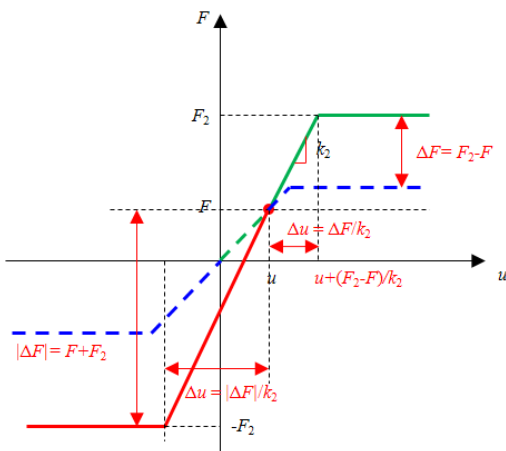
과를 다음 식과 같이 조합하는 방법이다.

$$\sum R = \alpha R(\text{온도하중}) + \beta R(\text{시/제동하중}) + \gamma R(\text{열차수직하중}) \quad (1)$$

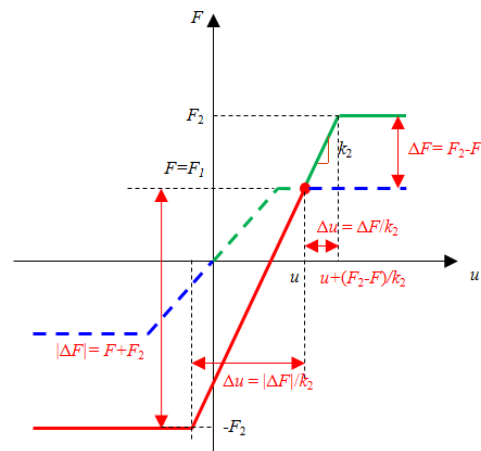
이 때 각 레일의 축력과 변위의 최대값이 아니라 동일 지점의 값을 조합한 다음, 여러 조합 값 중에서 최대값을 결정해야 한다. 조합계수 α, β, γ 는 일반적으로 1을 적용한다. 또한 온도하중을 적용할 때에는 열차하중이 없을 경우의 중저항력 특성을 적용하고, 시·제동하중과 열차 수직하중 재하 시에는 열차하중이 있는 경우의 중저항력 특성을 적용한다. 온도하중 재하 시 소성영역에 위치하는 레일 지지점에서는 시·제동하중과 열차 수직하중이 재하



(a) 열차하중 재하/비재하 시



(b) 탄성상태에서 열차하중이 작용하는 경우



(c) 소성상태에서 열차하중이 작용하는 경우

그림 8 완전 해석법에서 가정하는 레일 지지점의 중방향 힘-변위 관계 예(Yang and Jang, 2016)

될 때 더 이상 힘이 증가하지 않고, 바로 슬립이 발생하게 되지만 개별 해석법을 적용하게 되면, 이런 영향을 반영하지 못한다. 따라서 일반적으로 개별 해석법을 적용하면 레일 응력을 과대평가하고, 변위는 과소평가한다.

완전 해석법은 반면 시공단계 해석과 같이 온도하중에 의한 레일의 변위와 응력을 유지한 상태에서 추가로 시·제동하중과 열차 수직하중을 동시에 재하하는 방법이다. 따라서 보다 실제 현상에 가까운 해석법으로 생각되고 있다. 다만 온도하중 하에서 특정 레일 지지점의 소성영역 또는 탄성영역 중 어느 영역에 있느냐, 그리고 수직하중의 크기(열차하중의 유무)에 따라 각각의 종방향 힘-변위 관계가 규정되어야 한다. 이런 종방향 힘-변위 관계가 아직은 충분히 정립되지 않았기 때문에 현재 KR C-08080에서는 개별 해석법을 적용하여 평가하도록 규정하고 있다.

3.2 모델링 방법

그림 9에서는 궤도-교량 상호작용 해석모델의 구성을 간략히 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 교량 받침 배치,

교량 상부구조 및 하부구조의 제원, 물성 등 교량 변수와 레일 단면적, 궤도의 종저항력 등 궤도 변수를 가능한한 정확히 반영하여야 한다.

궤도와 교량 상부구조, 그리고 받침의 높이에 따른 영향을 실제와 같이 고려할 수 있도록 그림 10과 같이 높이를 반영한 강제요소(rigid link)를 적용하여 모형화할 필요가 있다. 다만 단순화를 위해 레일의 높이는 상판 상부면과 일치하는 것으로 간주해도 무방하다.

교량 받침과 교각, 기초의 종방향 강성은 선형 연결요소를 이용하여 하나의 등가 스프링 강성으로 모형화할 수 있다. 교량 하부구조의 등가스프링 강성은 그림 11에 나타낸 바에 따라 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$K = \frac{H}{\sum \delta} \tag{2}$$

여기서, H 는 종방향 작용력, δ 는 종방향 변위로 아래와 같이 산정한다.

$$\delta = \delta_p + \delta_\phi + \delta_h + \delta_a \tag{3}$$

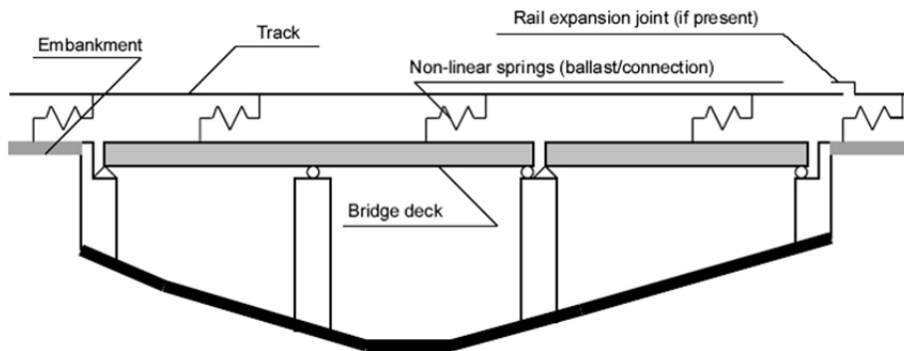


그림 9 궤도-교량 상호작용 해석 모델의 구성(UIC 774-3R)

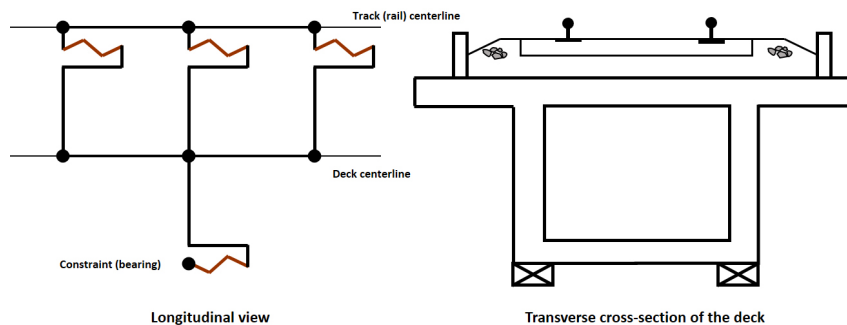


그림 10 레일, 교량 상부구조, 받침 간의 연결(KR C-08080)

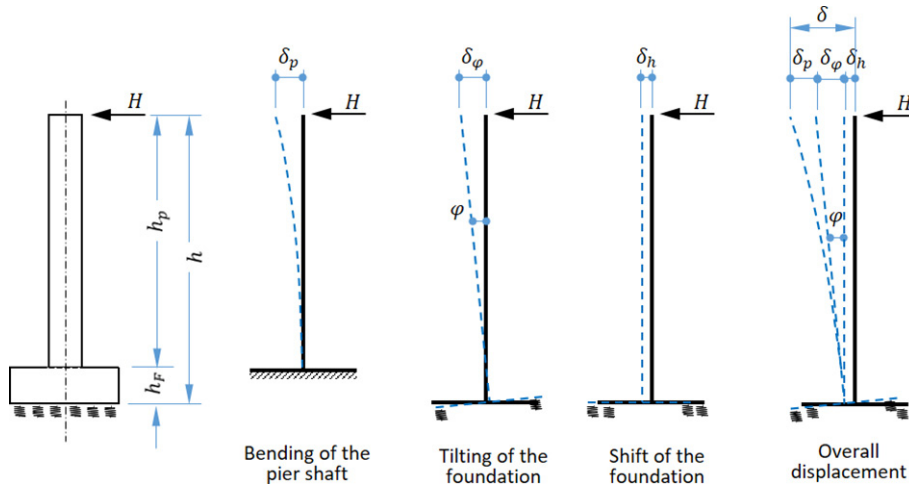


그림 11 교좌장치 지점에서의 종방향 저항력의 모형화(UIC 774-3R)

여기서, δ_p 는 교각의 휨에 의한 변위, δ_ϕ 는 기초의 회전에 의한 변위, δ_h 는 기초의 슬라이딩에 의한 변위, δ_a 는 탄성 받침의 변위를 나타낸다. 기초의 강성을 구할 때 온도하중에 대해서는 정적탄성계수를 시·제동하중에 대해서는 동적 탄성계수를 적용한다. 이동단의 마찰저항은 보수적으로 해석할 때는 무시하되 신뢰할만한 데이터가 있는 경우는 0~5% 범위에서 가정할 수 있도록 하고 있다. 레일 응력을 평가하는 경우 교량 하부의 종방향 강성이 없는 것으로 가정하여 고정 경계로 처리할 수도 있지만 이렇게 하면 지나치게 보수적인 결과를 줄 수 있으므로 지양해야 한다.

해석의 정확성을 높이기 위하여 레일과 교량 상부구조를 모델링하는 요소의 최대길이는 2m 이내로 하고, 인접 토공구간을 최소 100m 이상까지 모형화하여 임의의 경계 설정에 따른 오차를 최소화하는 것이 좋다.

3.3 평가기준

평가항목은 레일 축응력, 변위 그리고 지점 반력 등이다. KR C-08080에서 아래의 항목에 대해 허용값을 표 2와 같이 규정하고 있다.

- ① 온도하중, 시제동하중, 열차 수직하중 조합에 의한 레일의 부가 축응력
- ② 시·제동하중에 의한 레일-교량 종방향 상대 변위, 교량 상부구조의 종방향 변위
- ③ 열차 수직하중에 의한 교량 상부구조 단부 꺾임에

의한 단부 변위

- ④ 온도하중 및 시제동하중 조합에 의한 교량 받침에 작용하는 종방향 반력

변위의 허용값은 자갈층의 안정성을 보장하기 위해 제시된 기준이므로 콘크리트궤도가 부설된 교량에서는 변위에 대한 검토를 실시하지 않는다. 그 대신 교량 단부 꺾임에 의한 영향은 KR C-08090에 따라 별도로 레일체결 장치에 작용하는 힘에 대한 검토를 실시한다. 지점 반력에 대해서는 별도의 허용값을 규정하지 않고, 교량 받침과 하부구조의 설계에 적용한다.

그리고 이와 별도로 레일이 파단되었을 때 벌어지는 정도(개구량)를 검토하도록 하고 있다. 레일 파단 시 개구량은 다음 식에서 정한 값을 넘지 않도록 규정하고 있다.

$$d = \sqrt{R^2 - (R - y)^2} \tag{4}$$

여기서, R 은 차륜반경이고, y 는 레일 파단부에서의 레일 수직 처짐으로 다음 식으로 계산된다.

$$y = \frac{P}{2EI\beta_L^3} e^{-\beta_L x} \cos\beta_L x \tag{5}$$

$$\beta_L = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \tag{6}$$

EI 는 레일의 휨강성이고, k 는 단위 길이당 레일지지계수(1/2 궤도)이며, P 는 윤중이다.

표 2 레일 부가응력과 변위의 허용값(KR C-08080)

(a) 레일 부가응력

하중	곡선반경 (m)	최대부가압축응력 (MPa)		최대부가인장응력 (MPa)	
		자갈궤도*	콘크리트궤도	자갈궤도	콘크리트궤도
온도하중 시·제동하중 열차 수직하중	1500	72	92	92	92
	700	58			
	600	54			
	300	27			

주) * 60kg 레일을 사용하고, 자갈도상 깊이는 30cm 이상, 유지 보수상태가 양호한 궤도(이 조건을 벗어나는 경우 별도의 좌굴해석을 통해 허용값을 정해야 한다.)

(b) 변위(자갈궤도에만 적용)

하중	레일-교량 종방향 상대변위 (mm)	교량 상부구조 간의 종방향 상대변위 (mm)		교량 상부구조의 수직 단차 (mm)	
		레일신축이음매가 없는 경우	레일신축이음매가 있는 경우 ^a	열차속도 160 km/h 이하	열차속도 160 km/h 초과
시·제동하중	4	±5	±30	-	-
열차 수직하중	-	8 ^b		3	2

주) ^a 자갈이 연속적으로 부설되어 있거나 자갈막이판이 설치된 경우

^b 교량만 해석한 경우는 10mm까지 허용한다.

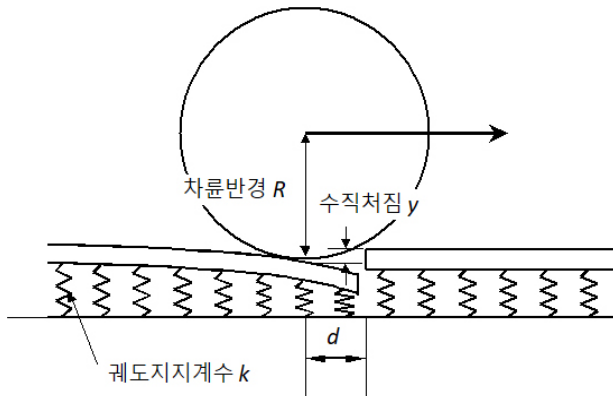


그림 12 레일 파단 시 개구량 발생한도 계산을 위한 개요도(KR C-08080)

4. 궤도-교량 상호작용을 고려한 교량 및 궤도의 설계

앞서 설명한 바와 같이 경간 길이, 경간의 구성, 받침의 배치, 고정 지점 간 거리, 상부구조의 휨강성, 그리고 하부구조의 종방향 강성 등 대부분의 주요 설계 변수가 궤도-교량 상호작용에 영향인자로 작용하기 때문에 철도교의

설계에서 궤도-교량 상호작용을 고려하는 것은 매우 중요하다.

그러나 교량의 설계만으로 충분하지 못한 경우가 있으므로 궤도 설계에서 이를 보완하여야 한다. 레일 부가 축응력이 기준을 초과할 경우 가장 쉽게 생각할 수 있는 대책은 레일신축이음매(rail expansion joint, REJ)를 설치하는 것이다(그림 13 참조). 레일신축이음매는 레일의 변위를 허용하여 레일 축력을 전달하지 않도록 하므로 레일 부가 축응력이 발생하지 않는다. 그러나 레일신축이음매는 레일의 단면이 변화하고, 레일을 체결하는 구조가 복잡하며 큰 변위가 발생하므로 잦은 유지보수를 필요로 한다. 특히 자갈궤도에서는 변위가 허용되므로 침목의 이동이 발생할 수 있어서 빈번한 궤도틀림을 유발한다. 따라서 레일신축이음매의 적용은 가급적 피하는 것이 바람직하다.

레일신축이음매에 대한 대안으로 사용하는 방법이 레일체결장치의 종저항력을 줄이는 방법이다. 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 하나는 일반적으로 활동체결구(zero-longitudinal restraint rail fastening system, ZLR)라고 하는 종방향 저항력이 거의 없는 체결장치를 레일 축응력이 가장 큰 위치에 부설하는 방법이다(그림 14 참조). 이렇게



그림 13 레일신축이음매(Rhodes, 2017)

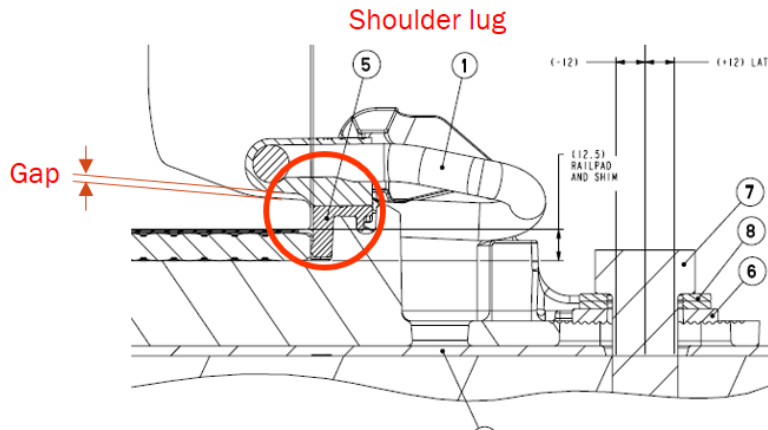


그림 14 ZLR 레일체결장치(Rhodes, 2017)

하면 ZLR이 부설된 구간에서 레일-교량 상대변위가 발생하고, 축응력이 더 이상 증가하지 않는다. 두 번째 방법은 교량 전 구간에 걸쳐 종저항력이 작은 레일체결장치를 부설하는 방법이다. 레일 축응력의 크기는 궤도 종저항력에 비례하므로 종저항력을 낮춤으로써 레일 축응력을 저감할 수 있다. 단 두 방법 모두 레일 파단 시 개구량이 허용값을 만족하여야 한다.

5. 맺음말

이상 본 기사에서는 궤도-교량 상호작용에 대한 개념과 해석방법, 설계기준 등에 대해 간단히 살펴보았다. 현재 기준은 몇 가지 측면에서 문제점이 제기되고 있다.

우선 개별 해석을 적용하도록 규정하고 있는데 이는

레일 축응력을 과대평가될 가능성이 있다. 따라서 순차 해석을 적용하는 완전 해석법을 적용할 수 있도록 궤도-교량 종방향 힘-변위 관계를 제시하고 해석방법에 대한 세부적인 사항들을 규정할 필요가 있다.

다음으로 레일 축응력과 변위 허용값에 대해서도 국내 레일 강도, 국내 환경조건을 고려하여 보완할 필요가 있다.

또 콘크리트궤도가 부설된 교량에서는 단부 꺾임에 대해 별도의 변위 제한 기준을 두지 않고 있고 별도의 절차에 따라 교량 단부의 레일 고정점에 작용하는 힘을 계산하도록 하고 있다. 그러나 이 규정은 독일에서만 적용하고 있는 규정이고, 유럽 기준에서 공식적으로 채택하지 않고 있다. 우리나라에서 이를 도입하여 적용하고 있으나 (KR C-08090) 지나치게 보수적인 설계를 가져온다는 지적이 많다. 따라서 이 규정에 대해서도 체계적인 검토와 보완이 필요할 것으로 판단된다.

유럽에서도 궤도-교량 상호작용 검토 규정의 개선 방안에 대해서 많은 논의가 있고, 최근 관련 보고서를 출간한 바 있다(CEN/TR 17231, 2018). 우리도 국내 실정에 맞도록 더 많은 논의와 보완이 필요하리라 사료된다.

참고문헌

1. CEN/TR 17231 (2018) Eurocode 1 - Actions on Structures. Traffic Loads on Bridges. Track-Bridge Interaction, Technical Report, CEN/TC 250, Committee for European Standards (CEN).
2. UIC 774-3R (2001) Track/bridge interaction. Recommendations for calculation, 2nd edition, International Union of Railways (UIC).
3. EN 1991-2 (2006) Eurocode 1: Actions on structures. Part 2. Traffic loads on bridges, Committee for European Standards.
4. KR C-08080 (2017) 궤도-교량 상호작용 해석, 한국철도시설공단.
5. KR C-08090 (2014) 교량 단부 콘크리트궤도 사용성 검토, 한국철도시설공단.
6. Yang, S. C., Jang, S. Y. (2016) Track-bridge interaction analysis using interface elements adaptive to various loading cases, Journal of Bridge Engineering, ASCE. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000916.
7. Rhodes, D. (2017) Track-Bridge Interaction, Presentation at Korea Railroad Research Institute.
8. 철도설계기준(노반편) (2015) 국토교통부. 