

곡선궤도와 곡선교량의 상호작용 해석 기법 연구

Analysis of interaction between curved track and bridges

강민철¹⁾ 한상윤²⁾ 임남형³⁾ 박종섭⁴⁾ 한택희⁵⁾ 강영중⁶⁾

Kang, Min Chul Han, Sang Yun Lim, Nam Hyoung Park, Jong Sup Han, Taek Hee Kang, Young Jong

ABSTRACT

The analysis of interaction has been carried out by using foreign codes(UIC 774-3 R code of Europe etc.) because there is no code about interaction between track and bridge in Korea. But interaction between curved track and bridge was not mentioned by these foreign codes. Curved track is different from straight track because centrifugal force acts on the curved track and lateral displacement was caused in the curved track. This paper presents how to analyze interaction between curved track and bridge.

1. 서론

일반적으로 레일은 크게 노반과 교량 및 터널 구간을 지나간다. 이 중 교량 구간의 경우 지반과는 다르게 교량에 변위가 발생하게 되므로 레일은 도상을 통하여 교량에 발생하는 변위의 영향을 받게 되고 교량 또한 도상을 통하여 레일에 발생하는 변위의 영향을 받게 된다. 그리고 이렇게 영향을 주고받는 것을 교량과 레일의 상호작용이라 한다. 교량과 레일은 여러 가지 하중을 받는다. 그러나 장대레일 직선 궤도의 상호작용 검토에서는 교량에 작용하는 온도하중, 레일에 작용하는 시·제동하중 및 연직하중만을 고려하도록 되어있다. 여기서 레일의 축 응력에 가장 큰 영향을 주는 레일의 온도하중에 대한 고려가 없는 이유는 상호작용의 해석구간인 장대레일의 중간 부분에서는 레일의 온도하중에 의한 레일의 변위가 없기 때문에 변위에 의해 발생하는 상호작용에는 영향을 주지 않기 때문이다.

교량과 레일의 상호작용 해석에서는 UIC 기준에 따라 레일에 발생하는 축력에 대한 검토와 교량의 절대 변위 및 교량과 레일의 상대변위에 대한 검토를 한다. 이러한 검토가 필요한 이유는 레일에 발생하는 축 응력의 경우 좌굴이나 파괴를 일으키는 등 레일의 안정성에 직접적으로 영향을 주기 때문이고 교량과 레일에 발생하는 변위에 대한 검토는 변위의 정도가 심할 경우 도상에 흐트러짐을 유발하여 기존 상호작용 해석 검토에서 가정한 도상의 저항력을 현격히 저하시킬 수 있고 이러한 변화는 레일의 축력 해석 결과에 큰 영향을 주기 때문이다.

그러나 현재 우리나라에는 이러한 상호작용에 대한 자세한 규정이 없기 때문에 유럽의 Track/bridge Interaction Recommendation for calculations (UIC 774-3 R code), 일본의 신간선 기준, 대만의 대만 철도 기준 등을 사용하여 검토하고 있는 실정이다.

-
- 1) 고려대학교 석사 정회원
 - 2) 고려대학교 박사과정 정회원
 - 3) 충남대학교 조교수 정회원
 - 4) 상명대학교 전임강사 정회원
 - 5) 고려대학교 연구조교수 정회원
 - 6) 고려대학교 교수 정회원

철도 교량은 일반적인 교량과 마찬가지로 경우에 따라서는 곡선궤도를 갖는 곡선교량을 건설해야 하는 상황이 종종 발생한다. 또한 곡선궤도는 하중에 의한 거동이 직선궤도와 다르므로 특별히 구분하여 검토하여야 하는데 현재 쓰이고 있는 외국의 검토 기준에는 곡선 궤도에 대한 기준이 없다 따라서 현재 수행되고 있는 곡선궤도에 대한 상호작용 검토는 곡선 궤도를 직선 궤도로 바꾸어서 검토를 하거나 신축 이음부를 사용하여 장대레일 사용에 의한 축력을 줄이고 있는 것이 현실이다. 참고로 현재 우리나라에서 가장 많이 쓰이고 있는 UIC 774-3 R code에 의한 적용 가능한 최소 반경은 1500m로 규정되어 있다.

2. 곡선궤도와 교량의 상호작용 해석 기법

직선궤도와 곡선궤도의 가장 큰 차이점은 교축 직각 방향의 고려 여부이다. 궤도의 횡 방향으로도 휨과 비틀림이 발생하므로 단순히 연직 방향 휨 강성만을 고려하는 직선궤도에서 추가적으로 횡 방향 휨 강성 및 비틀림 강성을 고려하여야 하고 하중의 경우 직선궤도에서 작용하는 교량의 온도하중, 시·계동하중 및 연직하중과 함께 곡선 궤도에서만 발생하는 열차의 속도와 자중에 의한 원심하중을 고려하여야 한다. 또한 휨과 비틀림에 의한 횡 방향 변위가 발생하므로 직선궤도에서는 고려하지 않은 횡 방향 도상 저항과 비틀림에 저항 하는 회전 방향 도상 저항력을 고려해 주어야 한다. 해석에서는 직선궤도에서 검토하는 종 방향 변위와 레일이 축력과 함께 곡선궤도인 경우 횡 방향 변위가 발생하므로 추가적으로 횡 방향 변위에 대한 검토도 필요하다. 본 논문에서는 이러한 직선궤도와 곡선궤도의 차이점을 고려하여 다음과 같이 곡선궤도와 곡선교량의 상호작용 해석 기법을 제시하여 보았다. 여기서 OFFSET은 곡선궤도만의 특징은 아니지만 꼭 필요한 부분임에도 불구하고 현재 설계에서 고려하지 않고 있는 경우가 많으므로 이에 대해서도 간단하게 설명하였다.

- 원심 하중
- Kerr 이론에 의한 비틀림 강성
- 회전 방향 도상 저항력
- 모멘트에 의한 추가적인 축 응력
- 횡 방향 도상저항력
- OFFSET

그림 1과 그림 2에서 직선궤도와 곡선궤도에서 고려해주어야 하는 도상 저항력 및 비틀림 강성을 알기 쉽게 표현하여 보았다.

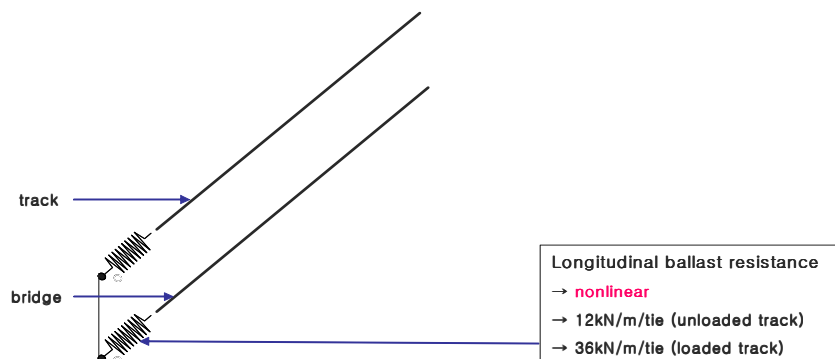


그림 1. 직선궤도의 도상 저항력

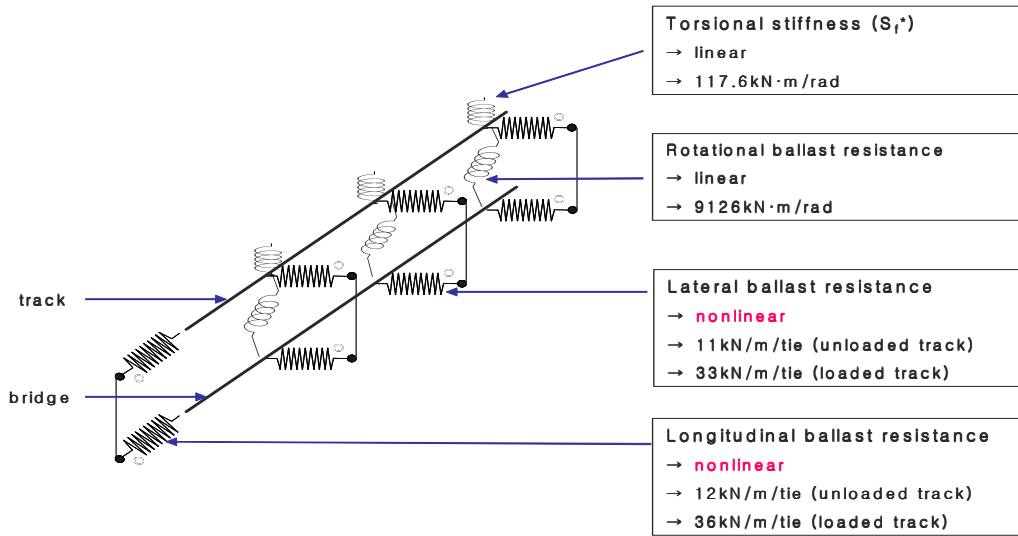


그림 2. 곡선궤도의 도상저항력 및 비틀림 강성

2.1 원심하중

원심하중의 경우 UIC 774-3 R에 기준이 없기 때문에 한국 고속철도 설계 기준인 Bridge Design Manual(BRDM) Final Report에 제시되어있는 원심하중을 적용하였다. BRDM에 의하면 원심하중은 레일면 위 1.8m 높이에서 그림 3과 같이 곡선 궤도의 횡 바깥쪽 방향으로 작용한다.

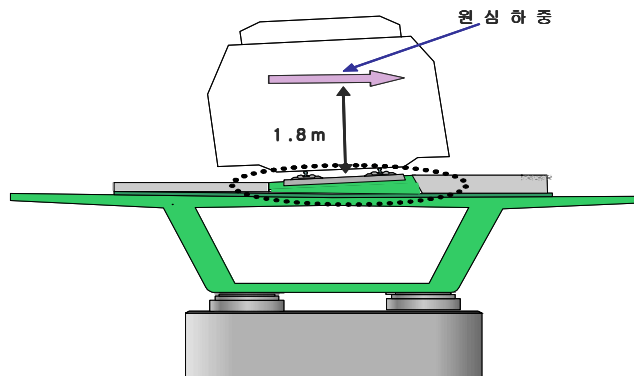


그림 3. 원심하중의 작용

BRDM에 의한 원심력에 관한 식은 다음과 같다.

원심하중(Centrifugal force)

$$= \alpha \times \text{vertical load}, \left(\alpha = \frac{s^2 \times f}{127R} \right) \quad (1)$$

여기서,

s = 열차의 설계 속도 (km/h) (최대 350km/h)

f = 열차의 속도와 열차 하중 작용 길이를 고려한 감소계수

R = 곡선반경 (m)

L = 곡선 궤도에서의 열차하중 작용 길이 (m)

2.2 Kerr 이론에 의한 비틀림 강성

2.2.1 Kerr의 이론

일반적으로 궤도와 교량의 상호작용 해석은 보 요소에 의한 해석이 많이 이루어지고 있다. 그러나 이러한 보 요소 해석인 경우 직선 궤도에서는 고려하지 않아도 되는 침목과 채결제의 횡 방향 힘에 대한 저항(비틀림 강성)을 곡선 궤도에서는 고려해 주어야 한다. Kerr의 이론을 사용하여 그림 4와 같이 하나의 회전 스프링 강성으로 표현하였다.

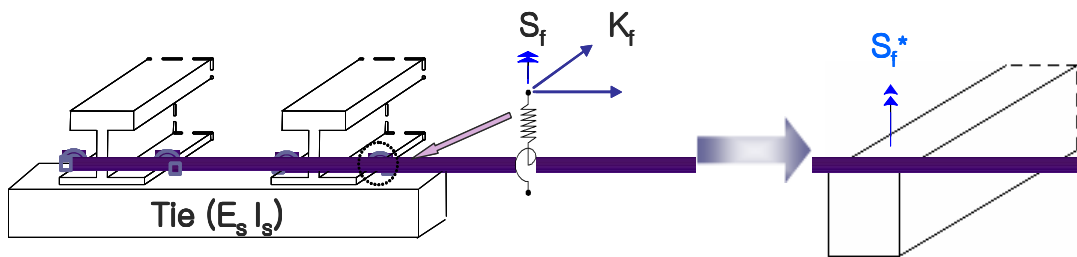


그림 4. 비틀림 강성

Kerr에 의해 제안된 비틀림 강성에 대한 식은 다음과 같다.

$$S_f^* = \frac{2}{\frac{1}{S_f} + \frac{h}{6E_s I_s} + \frac{4}{K_f h^2}} \quad (2)$$

여기서,

S_f^* = The substitute torsional stiffness per tie

S_f = the torsional stiffness of one fastener

$E_s I_s$ = the bending stiffness of a tie

K_f = the longitudinal stiffness of one fastener

2.2.2 Kerr 이론의 검증

비틀림 강성에 대한 검증은 그림 5와 같이 총 길이 50.4m의 실제 모델과 비틀림 강성(S_f^*)을 사용한 빔 모델의 중앙부에 0.5kN의 하중을 태운 후 발생하는 최대 횡 방향 변위를 비교하여 수행하였다. 여기서 경계조건은 회전, 롤러 조건을 사용하였는데 실제 모델의 경우 끝부분 침목의 중간부에 위치시켰고 보 모델의 경우 종 방향으로 실제 모델과 같은 곳에 위치시켰다.

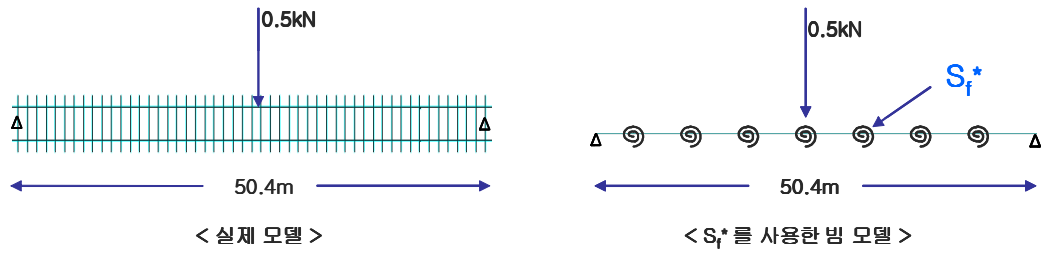


그림 5. 보 모델의 검증

검증을 위한 해석의 결과는 표 1과 같다.

표 1. 검증의 결과

	횡 방향 변위	오차
실제 모델	2.7489cm	2.2%
보 모델	2.6871cm	

실제 모델에서 발생하는 횡 방향 변위와 보 모델에서 발생하는 횡 방향 변위의 차가 거의 없으므로 Kerr에 의한 보 모델을 사용하는데 문제가 없다는 결론은 얻을 수 있다.

2.3 회전 방향 도상 저항력

그림 3과 같이 원심하중이 작용할 경우 궤도에 원심하중에 의한 비틀림 모멘트가 발생하고 이러한 비틀림 모멘트는 도상을 통하여 교량에 전달될 것이다. 따라서 비틀림 회전 모멘트를 전달할 수 있는 도상 저항력이 필요하다. 그러나 현재 나와 있는 code에는 이에 대한 정의가 없다. 따라서 본 논문에서는 회전 방향 도상 저항력을 다음과 같이 유도하여 사용하였다.

회전 방향 도상 저항력의 기본 개념은 그림 6에 나온 침목의 연직방향 도상 저항력인 궤도(트랙) 계수를 이용하여 그림 7에서처럼 하나의 회전 스프링으로 나타내는 것이다.

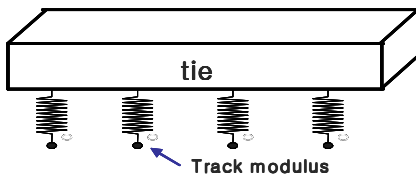


그림 6. 트랙 계수

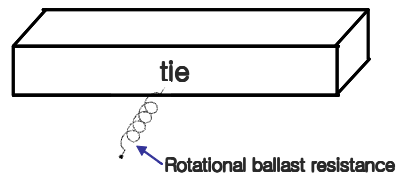


그림 7. 회전 도상 저항력

회전 방향 도상저항력은 다음과 같이 구할 수 있다.

우선 그림 8과 같이 21600kN/m/tie의 궤도(트랙) 계수를 갖고 침목의 길이가 2.6m인 실제 모델을 가정한다.

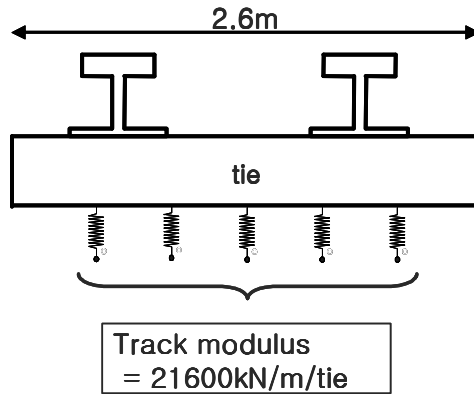


그림 8. 하중 제한 전

여기에 그림 9와 같이 트랙 계수를 크게 2개의 스프링으로 나누고 각각 변위가 반대 방향으로 1m씩 발생하게 하중을 제한한다.

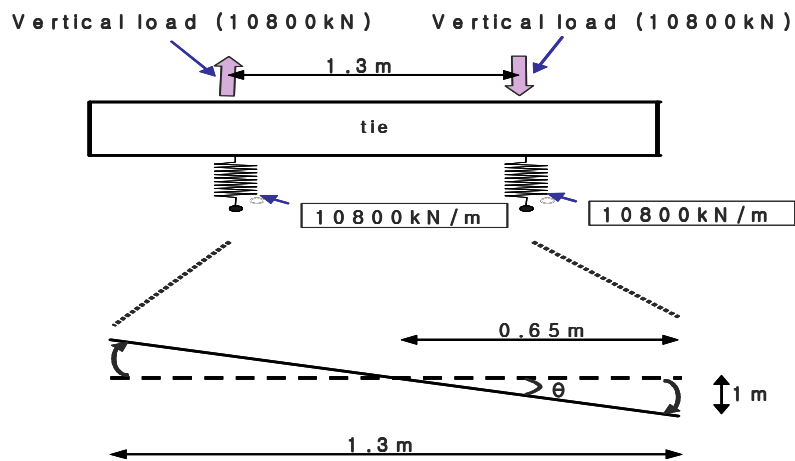


그림 9. 하중 제한 후

실제 발생하는 침목의 회전 변위는 매우 작은 값이기 때문에 다음과 같은 θ 에 관한 식이 성립한다.

$$0.65 \times \theta = 1 \quad (3)$$

이 때 작용하는 모멘트 하중을 구하면 다음과 같다.

$$Moment = 10800 \times 1.3 = 14040kN \cdot m \quad (4)$$

여기서, 회전 방향 도상 저항력의 정의인 단위 회전 변위 당 모멘트 하중으로 다음과 같이 회전 방향 도상 저항력의 값을 구할 수 있다.

회전 방향 도상 저항력

$$= \frac{\text{moment}}{\theta} = \frac{14040}{\frac{1}{0.65}} = 9126 \text{ kN} \cdot \text{m/rad} \quad (5)$$

2.4 모멘트에 의한 추가적인 축 응력

2.4.1 모멘트에 의한 축력 이론

궤도에 횡 방향 모멘트가 작용하였을 경우 실제 궤도 모델은 그림 10과 같이 각각의 레일에는 축력이 발생하게 될 것이다.

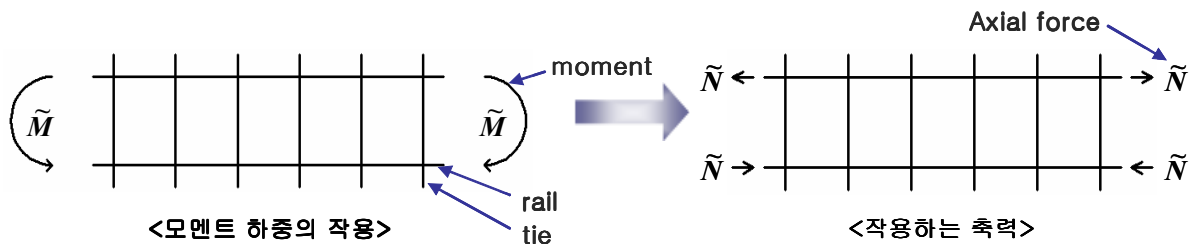


그림 10. 실제 모델

그러나 일반적인 상호작용에서 이용되는 보 요소의 경우에는 그림 11과 같이 이러한 축력을 고려하지 못한다.

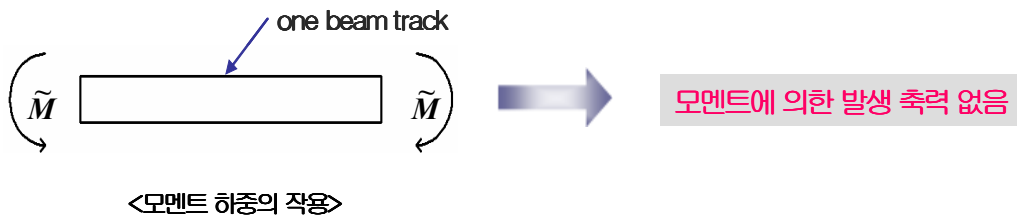


그림 11. 보 모델

따라서 다음과 같이 횡 방향 모멘트에 의한 레일의 축력을 구하는 식을 유도하여 보았다.

우선 Kerr와 Accorsi에 의해 궤도에 걸리는 모멘트에 관한 식은 다음과 같다.

$$\hat{M} = M_b + \tilde{M} = -2EI\hat{v}'' + h\tilde{N} \quad (6)$$

여기서,

$$\tilde{N} = -EA\hat{u}'$$

$$\hat{M} = \text{bending moment}$$

$$\tilde{M} = -hEA\hat{u}'$$

= the bending moment absorbed by the axial forces (\tilde{N})

$$M_b = -2EI\hat{v}''$$

= the bending moment in the two rails

즉, 전체 모멘트는 레일에 발생하는 힘에 의한 모멘트와 축력에 의해 발생하는 모멘트로 구분되어짐을 알 수 있다. 여기서, 축력에 관련된 \tilde{M} 만을 따로 보면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

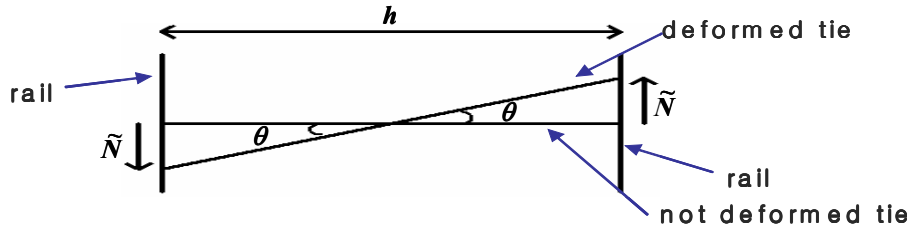


그림 12. 축력에 의한 모멘트

우선 단위 회전 변위 당 모멘트하중인 회전 강성(S_f^*)에 회전변위(θ)를 곱하면 축력에 의한 모멘트(\tilde{M})를 구할 수 있다. 따라서 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\tilde{M} = -hEA\hat{u}' = h\tilde{N} = S_f^*\theta \quad (7)$$

여기서, 본 연구에서 응용할 수 있는 축력에 관한 식을 구하면 다음과 같다.

$$\tilde{N} = \frac{S_f^*\theta}{h} \quad (8)$$

2.4.2 축력에 관한 식의 검증

축력에 대한 식(8)의 검증은 그림 5에서 보여준 모델로 수행하였다.

검증을 위한 해석의 결과는 그림 13과 같다.

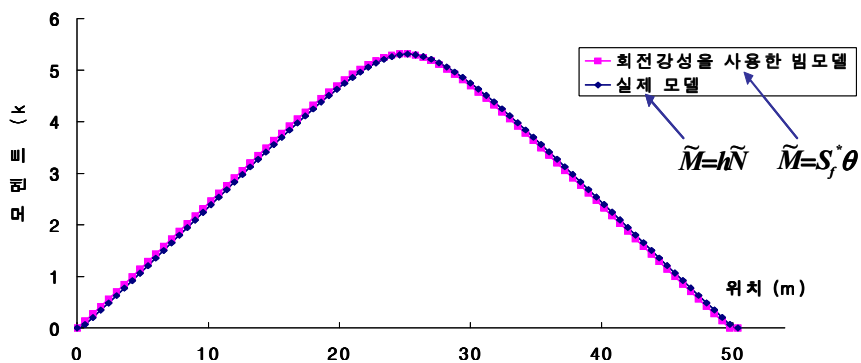


그림 13. 축력에 관한 식의 검증

2.5 횡 방향 도상 저항력

횡 방향 도상 저항력은 종 방향 도상저항력과 마찬가지로 그림 14와 같은 비선형 재료 모델을 사용하였고 열차의 연직하중에 의한 증가도 종 방향 도상 저항력과 같이 3배로 하였다. 열차의 연직하중이 없는 경우에는 최대 종 방향 도상 저항력을 침목 당 11kN으로 하였고 연직하중이 제하된 경우에는 침목 당 33kN으로 하였다. 두 경우 모두 소성한계변위는 0.2cm로 하였다.

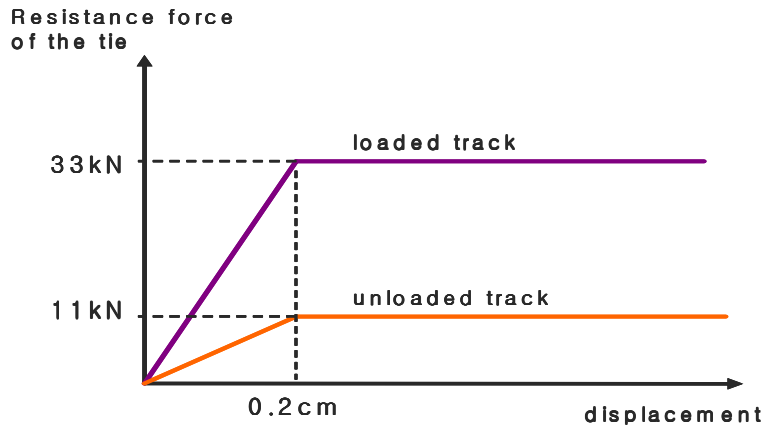


그림 14. 횡 방향 도상 저항력

2.6 OFFSET

우선 offset 기능이 작용하지 않은 경우는 그림 15와 같이 중립축과 지점 경계조건 그리고 도상과 교량의 연결선이 같은 선상에 위치하게 된다. 여기서, 중립축은 휨에 의한 종 방향 변위가 없는 선이기 때문에 그림 15와 같이 연직하중이 작용하여도 어떠한 종 방향 변위도 발생하지 않게 된다. 따라서 연직하중에 의한 레일의 축력은 발생하지 않게 된다. 그러나 실제 교량은 그림 16과 같이 중립축과 지점 경계조건 및 교량과 도상의 연결선이 각각 다른 선상에 존재한다. 따라서 연직하중이 작용하였을 경우 발생하는 휨 변위에 의해서 교량과 도상의 연결선 즉 교량의 상부에서는 δ 라는 종 방향 변위가 발생하게 된다. 또한 중립축의 위치 또한 전체적인 종 방향 변위를 결정하는데 중요한 역할을 하게 된다.

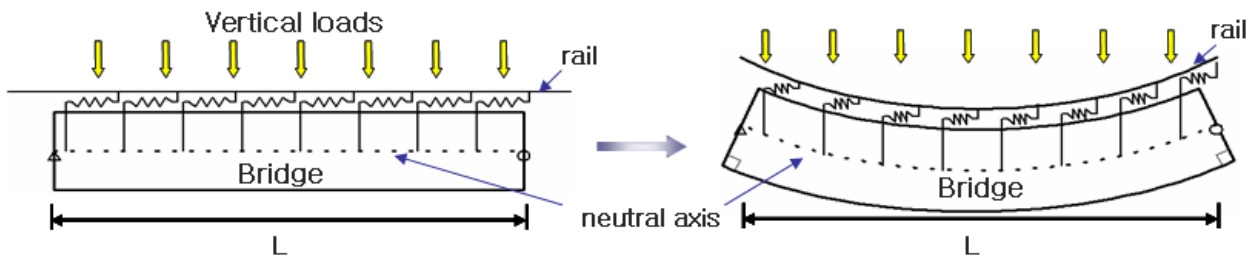


그림 15. OFFSET이 작용하지 않은 경우

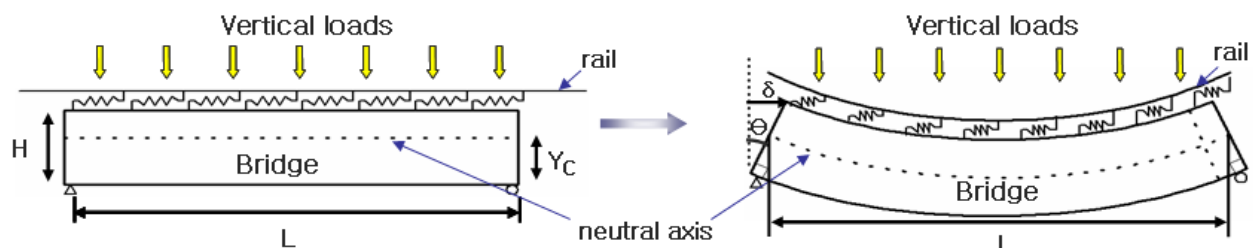


그림 16. OFFSET이 작용한 경우

해석 모델에 사용된 offset의 개념을 정리하면 다음과 같다.

1. 상부 교량의 종 방향 변위 = 하부 교량의 종 방향 변위 + 교량의 높이 × 회전 모멘트 변위
2. 교량의 중립축에서의 길이 변화는 없다.

3. 곡선 궤도의 해석 기법을 이용한 예제

2장에서의 해석 기법을 이용하여 하나의 모델에 대해서 곡선반경에 따른 축력의 변화를 간단하게 해석을 하여보았다.

3.1 해석의 모델

해석에 사용된 교량은 하나의 궤도를 갖는 철도교이며 콘크리트 슬래브를 갖는 강 박스 형식의 실제 사용된 교량이다. 열차의 길이는 300m이며 그림 17과 같이 열차의 중심부가 교량의 중심부와 만나는 위치에서 70km/h의 속도로 진행하다 급제동한 경우를 가정하였다. 모델은 180m 길이의 양단 롤러 가운데 회전 지점부를 갖는 2경간 교량이다.

해석에 사용된 교량의 제원은 다음과 같다.

- ◎ 길이(L) : 2@90m = 180m (2경간 연속교)
- ◎ 면적(A) : 0.5m²
- ◎ 종 방향 관성모멘트(I_X) : 0.5m⁴
- ◎ 횡 방향 관성모멘트(I_Y) : 0.8m⁴
- ◎ 비틀림 상수(K_T) : 0.4m⁴
- ◎ 탄성계수(E) : 210000000kN/m²
- ◎ 온도팽창계수(α) : 1.0×10⁻⁵/°C

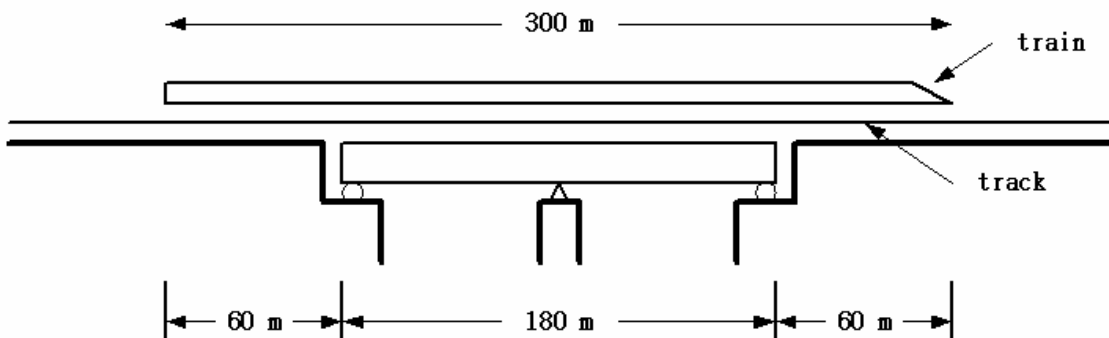


그림 17. 해석 모델

3.1 해석의 결과

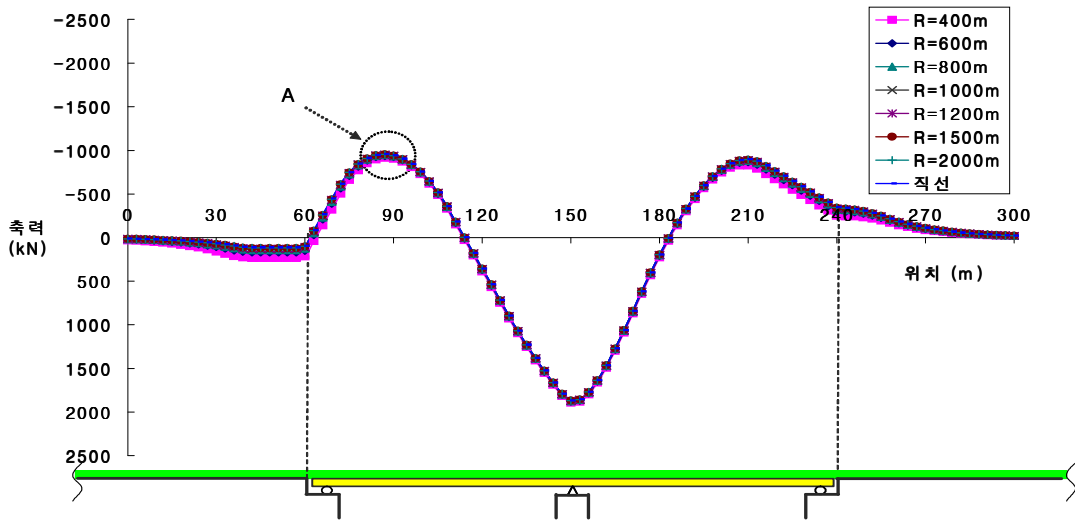


그림 18. 온도하중 및 열차하중 작용한 경우

그림 18은 +35℃의 온도하중을 교량에 작용한 후 열차하중(제동하중, 연직하중, 원심하중)을 레일에 작용하였을 경우에 발생하는 레일의 축력이다. 본 해석 모델의 경우 A점에서 최대 압축력을 갖고 곡선 반경에 따라 약간의 축력의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

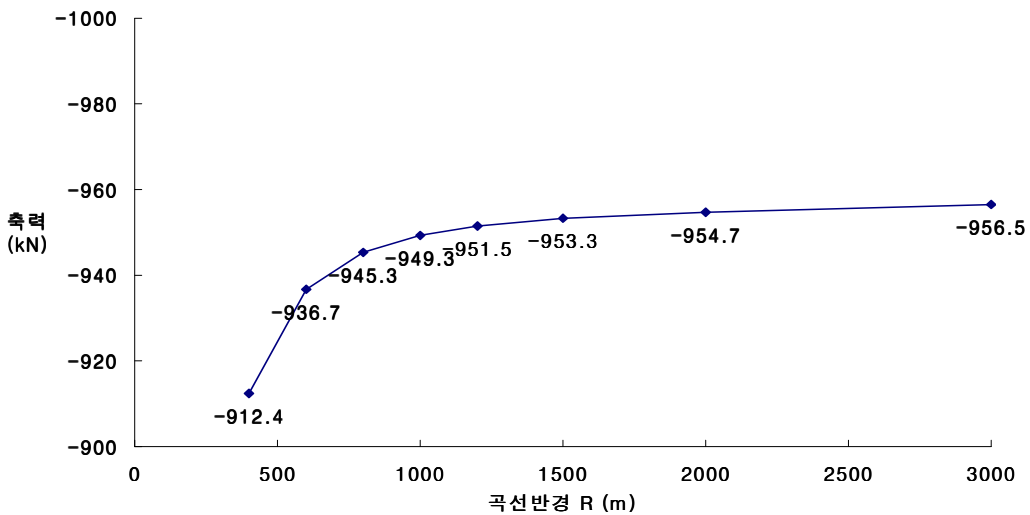


그림 19. A점에서의 곡선반경에 따른 축력

그림 19는 그림 18의 A점에서 발생하는 축력을 곡선반경에 따라 비교하여 보여준 그래프이다. 주로 원심하중에 의해 발생된 곡선반경에 따른 축력 값의 변화는 곡선반경이 작아질수록 점점 감소하게 되고 그 비율이 커지는 것을 알 수 있다. 여기서, 최대 압축력만을 다룬 이유는 교량에 +35℃의 온도하중이

작용할 경우에는 필연적으로 레일에도 +온도하중이 작용하기 때문이다. 레일에 작용하는 온도하중은 다른 하중들보다도 레일에 가장 큰 영향을 주기 때문에 레일하중에 의한 축력을 뺀 부과 축력의 경우에는 압축력만을 고려하게 되는 것이다. -온도하중이 작용한 경우도 마찬가지로 인장력만을 고려하게 된다.

4. 결론

곡선교량과 곡선레일의 상호작용 검토에서는 일반적인 직선교량과 레일의 상호작용 검토와는 달리 곡선화에 따른 여러 가지 해석 조건들을 고려해 주어야 한다. 우선 추가적인 하중작용으로 축력 및 횡 방향과 종 방향 변위에 큰 영향을 미치는 원심 하중을 고려하였고, 이러한 원심하중을 받아주는 횡 방향의 도상저항력 개념을 도입하였다. 또한 해석의 편의상 가장 많이 사용되는 해석모델인 보 요소 모델의 사용을 위해 Kerr 이론에 의한 비틀림 강성과 모멘트에 의한 추가적인 축 응력을 고려하였으며 원심하중에 의한 회전 모멘트를 보다 정확히 해석하기 위해 회전 방향 도상 저항력을 적용하였다. 이러한 특징들을 고려하여 곡선궤도와 교량의 상호작용 해석을 수행한 결과에 의하면 그림 19에서 알 수 있듯이 곡선 반경이 변함에 따라 축력의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

감사의 글

“이 논문은 2005년 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임” (국가 지정연구실사업-미래형 철도 구조 시스템 기술 구축)

참고문헌

1. Kerr, A.D. and Accorsi, M.L (1987). "Numerical Validation of The Track Equations for Static Problems." int. J. Mesh. Sci., Vol. 29, No. 1, pp. 15~27
2. Track/bridge interaction recommendation for calculations (UIC Code 774-3 R), 2001
3. European Rail Research Institute(ERRI D202/DT 362), "Ballast resistance under three-dimensional loading", 1997
4. European Rail Research Institute(ERRI D202/RP 4), "Stability of continuous welded track" 1999
5. 임남형(2001), "Three Dimensional Nonlinear Analysis of Continuous Welded Rail Tracks.", 공학박사, 학위논문, 고려대학교
6. 김경삼(2003), "철도 교량 장대레일 축력의 영향인자.", 공학석사, 학위논문, 고려대학교
7. 안홍환(2004), "궤도 구성 인자들이 장대레일 궤도 안정성에 미치는 영향.", 공학석사, 학위논문, 고려대학교
8. 서사범(2002), 선로공학
9. Contract for Service-EXT. No 1 to Task Order No1, Bridge Design Manual (BRDM) Final Report, 1995
11. 철도설계기준(철도교편), 1999