

장대교량 신축부에서 침목간격 확대가 차량의 주행안전성 및 궤도의 구조안정성에 미치는 영향

Effects of Expansion of Sleeper Span at the Deck End of a Long Continuous Bridge on Train Safety and Track Stability

양 신 추[†]
Sin-Chu Yang

(Received June 13, 2015 ; Revised August 11, 2015 ; Accepted August 21, 2015)

Key Words : Long Span Bridge(장대교량), Sleeper Span(침목간격), Safety of a Train(차량 주행안전성), Structural Stability of Track(궤도 구조안정성), Train-track Interaction(차량-궤도 상호작용)

ABSTRACT

Long continuous bridge deck can become contracted considerably as temperature drops, which can lead to a large expansion of sleeper span at the end of it. Since this huge sleeper span then can cause problems both with safety of train operation and structural stability of tracks, it is necessary to take the issue into consideration systematically in the designing process of the bridge. In this paper, an evaluation process through the analysis of train-track interaction was presented which can basically review the effects of the expansion of sleeper span at the end of long continuous bridge deck on the safety of the train and the structural stability of the track. The analyses of the interaction between the light rail train and tracks were carried out targeting the sleeper span as a main parameter. The safety of train operation and structural stability of tracks in a light rail system due to the expansion of the sleeper span were evaluated by comparing the numerical results with the related criteria.

기 호 설 명

\mathbf{u}_v : 차량시스템의 변위벡터
 $\dot{\mathbf{u}}_v$: 차량시스템의 속도벡터
 $\ddot{\mathbf{u}}_v$: 차량시스템의 가속도벡터
 \mathbf{M}^v : 차량시스템의 질량행렬
 \mathbf{C}^v : 차량시스템의 감쇠행렬
 \mathbf{K}^v : 차량시스템의 강성행렬

\mathbf{u}_t : 궤도시스템의 변위벡터
 $\dot{\mathbf{u}}_t$: 궤도시스템의 속도벡터
 $\ddot{\mathbf{u}}_t$: 궤도시스템의 가속도 벡터
 \mathbf{M}^t : 궤도시스템의 질량행렬
 \mathbf{C}^t : 궤도시스템의 감쇠행렬
 \mathbf{K}^t : 궤도시스템의 강성행렬
 \mathbf{K}^{hz} : 차량과 궤도시스템을 연결하는 헤르츠안
접촉스프링(hertzian contact springs)
NA : 차량 1편성 차축의 총수

[†] Corresponding Author ; Member, Korea Railroad research Institute
E-mail : scyang@krrri.re.kr

[‡] Recommended by Editor Hyung Jo Jung

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

- ψ_i : 티모센코 보요소(Timoshenko beam element)의 i -번째 형상함수
- ξ_c : 접촉점의 국부좌표
- F_{iw}^{hz} : 접촉하중
- c_{hz} : 헤르츠안상수
- k_{hz} : 비선형 헤르츠안 스프링강성
- \bar{k}_{hz} : 보상된 비선형 헤르츠안 스프링강성
- $\alpha(\xi_c)$: 접촉위치에서의 보상계수
- $u_{r/w}$: 차륜과 레일의 상대변위
- u_w : 접촉점에서 차륜변위
- U_j^v : 접촉점에서 레일변위
- $u_{irregularity}$: 궤도틀림

1. 서 론

열차의 속도향상 및 지형지물의 효율적 이용 등의 요구의 증가에 따라 철도선로는 점점 직선화되고 있으며, 그에 따라 하나의 노선에 있어서 교량구간이 차지하는 비율이 크게 증가하고 있다. 특히 최근 장대교량의 설계 및 시공기술의 발전에 따라 철도교에서도 수백미터 이상의 길이를 갖는 연속교가 건설되고 있다. 철도교에 있어서 매우 긴 연속교량을 건설할 경우 궤도와 교량의 종방향 상호작용에 따른 레일축력의 증가, 궤도좌굴의 발생 등에 대한 궤도의 구조안정성의 확보가 필요하다^(1,2). 이러한 장대 레일의 축력에 따른 문제 외에 매우 긴 연속교량을 건설할 경우에 발생하는 또 다른 문제는 연속상판의 온도신축에 따른 교량신축부에 매우 큰 종방향 변위의 발생 및 그에 따른 과대 침목간격의 발생이라 할 수 있다. 특정 개소에서 침목간격이 커질 경우 궤도 지지강성의 불연속으로 인하여 차량의 동요가 커지고 그에 따라 궤도의 거동도 커져 차량의 주행안전성 및 궤도의 구조안전성이 저하될 수 있다.

선로의 긴 구간에서 침목간격들의 변화가 레일의 파상마모(corrugation)에 미치는 영향에 대한 연구사례가 보고되고 있지만^(3,4), 특정 개소에서 비정상적인 침목간격의 확대에 따른 차량의 주행안전성 및 궤도의 구조안정성에 미치는 연구사례는 거의 없었다고 할 수 있다. 이것은 이러한 문제가 부각되는



Fig. 1 A special device to support the rail at the center of a large sleeper span

철도교량을 설계해야 하는 경우가 매우 드물고, 그러한 경우가 있다 하더라도 기존 침목간격 60 cm에서 몇 십 cm가 더 커지면 관행적으로 별도의 검토 없이 Fig. 1에서와 같은 특수장치를 설치하기 때문에 판단된다. 그러나 이러한 특수 장치는 매우 고가여서 경제적 설계를 위해서는 침목간격의 확대에 따른 차량의 주행안전성 및 궤도의 구조 안정성검토를 통하여 꼭 설치할 필요가 있는 경우에 한하여 설치할 필요가 있다.

이 논문에서는 차량-궤도 상호작용 해석을 통하여 침목간격의 확대가 차량 안전성 및 궤도에 구조안정성에 미치는 영향을 근본적으로 분석하는 방법을 제시하였다. 경량전철시스템을 대상으로 하여 침목간격을 주요 파라미터로 하여 차량-궤도 상호작용 해석을 수행하였다. 해석결과와 관련 기준과의 비교를 통해서 경량전철 시스템에서 장대 연속교량 끝단에서 침목간격 확대에 따른 차량 주행안전성 및 궤도에 구조안정성을 평가하였다.

2. 차량-궤도 상호작용 해석

2.1 해석 모델

장대교량의 단부에서 침목간격 확대에 따른 차량의 주행안전성 및 궤도의 구조안정성을 정확하게 조사하기 위해서는 차량-궤도-교량 상호작용 해석을 수행할 필요가 있다. 일반적으로 차량과 장대교량의 상호작용에 의해서는 긴 거리에서 서서히 진동하는 저주파 차체진동이 발생하는 반면에, 침목간격의 확대

구간에서는 짧은 구간에서 급격히 진동하는 고주파 차축진동이 발생한다. 따라서 침목확대구간에서는 차체보다는 주로 차축의 진동에 의하여 운중변동이 크게 발생하며, 차축은 교량전체의 거동보다는 차량이 교량 단부를 통과할 때 교량 단부의 국부 거동에 의하여 영향을 크게 받는다고 할 수 있다. 이러한 점을 고려할 때 침목확대구간에서 차량의 주행안전성 및 궤도의 구조안전성을 보다 안전한 축으로 검토하기 위해서는 교량단부가 차륜진동을 가장 크게 유발하게 하는 교량변형이 발생하는 순간을 고려하여 차량-궤도 상호작용해석을 수행할 필요가 있다. 따라서 이 연구에서는 교량상판 단부에서 꺾임각 (angular rotation at the end of deck) 이 최대로 발생한 것을 가정하여 차량-궤도 상호작용해석을 수행하였다.

차량-궤도 상호작용 해석 시 순간적인 운중 감소에 따른 열차의 탈선안전성을 평가하기 위해서는 차량의 거동은 물론 차륜과 레일사이의 비선형 접촉이 고려될 필요가 있다. 다른 한편 궤도의 구조 안정성 검토를 위해서는 침목의 이산지지 간격은 물론 레일 및 체결구의 동적 거동특성이 고려되어야 할 것이다. 이 연구에서는 이러한 요구조건들을 고려할 수 있는 차량-궤도 상호작용 해석프로그램을 사용하였다. 이 프로그램은 저자에 의하여 개발되어 그 타당성이 입증된 바 있는데^(5,6), 해석모델을 간략하게 소개하면 다음과 같다.

차량 1량의 서브모델(sub model)은 Fig. 2와 같이 차체와 2개의 대차, 그리고 4개의 윤축(wheel set)으로 구성되며, 이들은 각각 강체운동을 하는 것으로 가정하여 질점(lumped mass)으로 모델링된다. 차체와 대차를 연결하는 2차 현수장치와 대차와 윤축을 연결하는 1차 현수장치는 스프링과 감쇠(damping) 요소(element)로 모델링된다. 차량은 수직운동만 하는 것으로 가정하여 10개의 자유도 시스템으로 나타낸다.

궤도 서브모델은 레일 체결장치가 강성노반 위에 놓인 것으로 하여 각각 탄성보로 모형화하였다. 최상부층을 구성하는 레일은 티모센코 연속보로 나타내진다. 하부의 체결장치 및 패드는 질점, 선형스프링(linear spring) 및 댐퍼(damper)로 모델링하였다.

차량과 궤도의 상호작용해석시스템의 운동방정식

은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}^v & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}^t \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_v \\ \ddot{\mathbf{u}}_t \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}^v & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}^t \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\mathbf{u}}_v \\ \dot{\mathbf{u}}_t \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}^v & \mathbf{K}^{hz} \\ [\mathbf{K}^{hz}]^T & \mathbf{K}^t \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}_v \\ \mathbf{u}_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{P}_v \\ \mathbf{P}_t \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{u}_v , $\dot{\mathbf{u}}_v$, 그리고 $\ddot{\mathbf{u}}_v$ 는 각각 차량시스템의 변위, 속도, 그리고 가속도 벡터이며, \mathbf{M}^v , \mathbf{C}^v , 그리고 \mathbf{K}^v 는 각각 차량시스템의 질량, 감쇠, 그리고 강성행렬이다. 또한 \mathbf{u}_t , $\dot{\mathbf{u}}_t$, 그리고 $\ddot{\mathbf{u}}_t$ 는 각각 궤도시스템의 변위, 속도, 그리고 가속도 벡터이며, \mathbf{M}^t , \mathbf{C}^t , 그리고 \mathbf{K}^t 는 각각 궤도시스템의 질량, 감쇠, 그리고 강성행렬이다. 식 (1)에서 \mathbf{K}^{hz} 은 차륜과 궤도시스템을 연결하는 헤르츠안 접촉스프링(Hertzian contact springs)으로부터 발생하는 강성행렬이다. 초기에 차량-궤도시스템이 정적 평형상태에 있었다고 가정하면 식 (1)에서 하중벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{P}_v \\ \mathbf{P}_t \end{pmatrix}^T = \sum_{iw=1}^{NA} F_{iw}^{hz} \{ \dots, -1, \dots, \psi_1(\xi_c), \psi_2(\xi_c), \dots, \psi_3(\xi_c), \psi_4(\xi_c), \dots \}^T \quad (2)$$

식 (2)에서 NA는 차량 1편성 차축의 총수이며, iw 는 차량의 i -번째 차축을 나타내며, $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_4$ 는 2-절점 티모센코 보요소(Timoshenko beam element)의 형상함수들(shape functions)이다. 또한 ξ_c 는 i -번째 차축의 접촉점의 국부좌표이며, F_{iw}^{hz} 는 접촉하중으로서 다음 식으로 나타내진다.

$$F_{iw}^{hz} = \begin{cases} \frac{k_{hz}}{1 + \alpha(\xi_c)k_{hz}} u_{r/w} = \bar{k}_{hz} u_{r/w} & \text{if } u_{r/w} > 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3)$$

여기서 k_{hz} 는 비선형 헤르츠안 스프링강성(nonlinear Hertzian spring stiffness)으로서 다음 3차 특성식(characteristic equation)으로 구해진다.

$$\alpha(\xi_j)k_{hz}^3 + k_{hz}^2 - c_{hz}^2 u_{r/w} = 0 \tag{4}$$

식 (4)에서 c_{hz} 는 헤르츠안상수(Hertzian spring constant)이고, $\alpha(\xi_c)$ 는 접촉위치에서의 보상계수이며, $u_{r/w}$ 는 차륜과 레일의 상대변위로서 다음 식으로 나타내진다.

$$u_{r/w} = u_w - U_j^v - u_{irregularity} \tag{5}$$

여기서 u_w 및 U_j^v 는 각각 접촉점에서 차륜과 레일변위이며, $u_{irregularity}$ 는 궤도틀림이다.

식 (2)의 우측에 있는 괄호 안에 5개의 값은 차례로 i -번째 차축과 연결된 궤도와 관련한 자유도들에 대응한다. 5개 값을 제외한 나머지 값은 0이다.

차량의 주행속도는 도시철도 설계속도인 80 km/h 를 고려하였다. Table 1 및 2는 각각 해석에 사용된 차량 및 궤도의 제원과 물성치를 나타낸다.

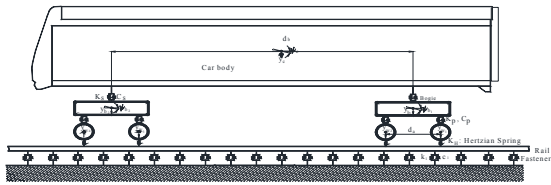


Fig. 2 Analysis model of train and track interaction

Table 1 Basic parametric values of the train

Mass of the carbody	15.42 ton
Mass moment of inertia of the car body	28.82 ton·m ²
Mass of the bogie	3.102 ton
Mass moment of inertia of the bogie(Y-Y)	1.321 ton·m ²
Wheelset mass	0.592 ton
Stiffness coefficient of the primary suspension	330.0 MN/m
Damping coefficient of the primary suspension	16.0 MN.sec/m
Stiffness coefficient of the secondary suspension	210.0 MN/m
Damping coefficient of the secondary suspension	10.0 MN.sec/m
Distance between the centerlines of successive bogies	12 mm
Distance between successive axles	2.15 mm
Carbody length	17.2 mm
Wheel radius	315 mm

2.2 교량단부 꺾임에 의한 궤도틀림 계산

교량단부에 꺾임각이 발생할 경우 Fig. 3과 같이 궤도의 변위가 발생하고 궤도변위는 차량과 궤도의 상호작용에 영향을 미치게 된다. 따라서 차량과 궤도의 상호작용해석에 교량단부 꺾임에 의한 궤도변위를 고려하기 위하여 궤도변위를 산정하였다. 궤도변위 산정 시 궤도모델은 체결구가 KS50kg 레일을 지지하는 1차 보 모델을 적용하였다. 따라서 레일은 보요소로 모델링하였으며, 체결구는 수직스프링으로 모델링하였다. 교량상판 꺾임각은 교량상판이 꺾임각 형상으로 사전 수직변위(prescribed vertical displacement)가 발생한 것으로 고려되었다. 철도구조물설계기준⁽⁷⁾에 의하면 열차속도 120 km/h 이하에서 경간장이 30 m 이상일 경우 단부꺾임각 한도를 9%로 하고 있으므로 기준 허용한도까지 단부 꺾임을 발생할 때를 가정하여 궤도변위를 계산하였다. 교량단부에 매우 큰 신축이 발생하는 경우 궤도에서는 통상적으로 신축이음매를 부설한다. 현재 상용되고 있는 신축이음매의 최대 신축량은 350 mm 정도이므로 신축에 따른 침목간격의 확대량은 일반구간 680 mm에서 1,030 mm까지 50 mm 단위로 계산하였다. 교량 수축량 350 mm는 연속화된 상판길이가 500 m인 경우(실제 검토대상 교량은 344 m) 교량 상판 온도가 중립온도로부터 70 °C 하강할 때 발생하므로, 실제 현장에서 발생할 수 있는 온도변화보다도 충분히 큰 온도변화가 고려되었다고 할 수 있다.

Fig. 4(a), (b)는 계산된 궤도변위와 레일 저부응력을

Table 2 Basic parametric values of the track

50 kg rail	Rail mass per meter	50.4D-3 ton/m
	Rail cross-section area	6.429D-3 m ²
	Elastic modulus of rail	2.10×108 kN/m ²
	Poisson's ratio of rail	0.3
	Rail second moment of area	1929.0D-8 m ⁴
	Rail profile radius on top	0.3 m
	Timoshenko shear coefficient	0.34
60 kg rail	Rail mass per meter	60.3D-3 ton/m
	Rail cross-section area	7.750D-3 m ²
	Elastic modulus of rail	2.10×108 kN/m ²
	Poisson's ratio of rail	0.3
	Rail second moment of area	3090.0D-8 m ⁴
	Rail profile radius on top	0.3 m
	Timoshenko shear coefficient	0.34
	Vertical fastener damping(SFC)	220.0 kN/(m/sec)
	Vertical fastener stiffness(SFC)	51.0D+3 kN/m

나타낸 것이다. 차량-궤도 상호작용해석에 있어서는 계산된 궤도변위는 식 (3)에서 궤도틀림으로 주어진다.

3. 해석결과 분석

교량 처짐에 의해서는 주로 차체 수직가속도가 발생한다고 할 수 있다. 따라서 교량구간에서 안전에 가장 위험한 순간은 궤도틀림에 의하여 최대 차체 수직 및 횡가속도가 발생한 상황에서 교량 처짐에 의한 차체 수직가속도가 여기에 더해지는 상황이라 할 수 있다. 따라서 교량구간에서 차량의 주행안전은 교량처짐에 의하여 발생할 수 있는 차체가속도의 최대값으로 주어진다. 차체의 수직가속도는 근사적으로 윤증감소율과 거의 같기 때문에⁽⁹⁾ 차량 주행 안전을 위한 교량의 설계 요건으로서 목표 윤증감소율을 정하고 있다. 이와 같이 교량구간에서 차량 주행안전에 대한 요건이 도출되는 기본 개념을 고려할 때 교량단부의 침목 간격이 확대되는 짧은 구간에서 차량의 주행안전에 대한 요건도 교량구간과 동일하게 적용되어야 할 것이다.

교량단부의 꺾임각은 침목간격이 확대되는 구간에서 상부로 향하는 레일변위를 발생시킨다. 따라서 침목확대구간에서 레일처짐에 따른 주행안전성을 조사하기 위해서는 꺾임각이 없는 상태에서 레일변위를 계산할 필요가 있다. Fig. 5는 교량단부에서 침목간격이 기존간격에서 350 mm 더 확대되고 교량상판에서 꺾임각이 발생하지 않을 때 4개 차륜이 레일과 접촉하는 지점에서 레일변위(rail displacement)를 거리에 따라 나타낸 것이다. Fig. 5의 결과로부터 침목이 확대되는 침목사이의 중앙에서 레일변위는

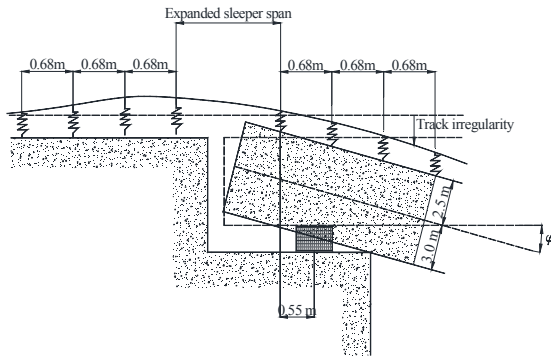
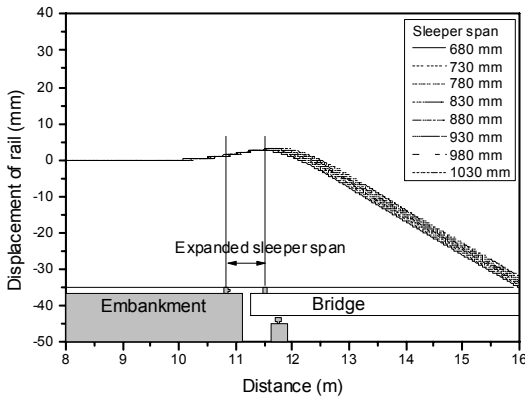
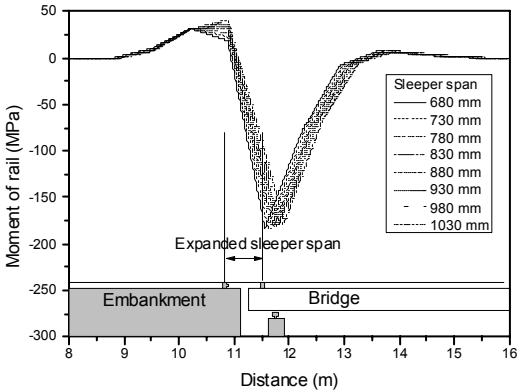


Fig. 3 Rail displacement due to the deck end rotation



(a) Displacement



(b) Moment

Fig. 4 Displacement and bending stress of the rail due to the deck and rotation

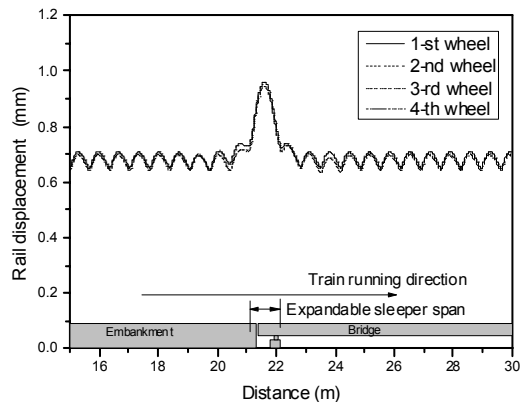


Fig. 5 Rail displacement at the wheel and rail contact points when the sleeper span is 1,030 mm

일반구간에 비하여 상대적으로 변위가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 교량단부에 꺾임각이 발생하지 않을 경우 확대되는 침목 중앙에서 레일변위의 최대값을 침목간격 확대량에 따라 나타낸 것이다. Fig. 6의 결과로부터 최대레일변위는 침목간격에 따라서 거의 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 이 결과로부터 침목간격이 최대 350 mm 더 확대되더라도 최대레일변위는 0.97 mm 미만으로 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 변위는 일반적으로 자갈궤도에서 발생할 수 있는 레일 최대변위 1.5 mm보다는 매우 작은 정도로 침목간격 확대에 따라 다소 증가하는 레일치짐은 차량의 주행안전성에는 별 영향을 주지 못할 것으로 판단된다.

Fig. 7은 교량단부에서 침목간격이 기존간격에서 350 mm 더 확대되고 교량상판에서 꺾임각이 발생하였을 때 4개 차륜에 대한 윤중감소율(wheel load reduction factor)을 거리에 따라 나타낸 것이다. 이때 윤중감소율은 정적 윤중에서 동적 윤중을 뺀 차이를 정적 윤중으로 나눈 값으로 정의된다. Fig. 7의 결과로부터 침목확대구간에서 윤중변화가 크게 발생하며, 최대 윤중감소는 침목확대구간을 열차가 막 통과하였을 때 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 교량단부에 꺾임각이 발생하였을 경우와 그렇지 않았을 경우에 대하여 윤중감소의 최대값을 침목간격 확대량에 따라 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과로부터 교량단부에 꺾임각이 발생하였을 때는 꺾임각이 발생하지 않았을 때보다 윤중감소가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 이 결과로부터 침목간격의 확대량이 증가하더라도 윤중감소율의 변화는 크지 않은 것을 알 수 있는데, 이것은 열차속도가 낮고 축중이 가벼운 경량전철을 대상으로 검토하였기 때문으로 판단된다. 일본철도기술연구소에서 제정한 철도구조물등설계표준·동해설의 변위제한기준⁽⁸⁾에 의하면 윤중감소율을 0.37로 정하고 있는데, 이 기준을 적용할 때 경량전철인 경우 교량단부가 수축하여 침목간격이 기존간격에서 350 mm 더 확대되더라도 주행안전에는 문제가 없는 것을 알 수 있다.

교량단부 침목확대구간에서 콘크리트궤도의 구조 안정성에 가장 큰 영향을 주는 요소는 레일에 발생하는 휨응력(bending stress)과 체결구에 작용하는 압축응력이라 할 수 있다. 레일의 휨응력은 교량 꺾

임 및 차량하중에 의하여 발생하므로 이들 두 요인에 의하여 조합된 응력이 검토되어야 할 것이다. Fig. 9는 교량단부에서 침목간격이 기존간격에서 350 mm 더 확대되고 교량상판에서 꺾임각이 발생하였을 때 차륜접촉점 위치에서 레일휨응력을 나타낸 것이다. 이 결과로부터 침목이 확대될 경우 휨응력이 비교적 크게 증가할 수 있음을 알 수 있으며, 최대휨응력은 침목확대구간 중앙에서 발생함을 알 수 있다. Fig. 10은 교량 꺾임 및 차량하중이 조합되는 경우 레일의 압축 및 인장 휨응력의 최대값을 나타낸 것이다. 이 결과로부터 레일의 최대압축 휨응력은 차량하중이 작용하지 않은 상태에서 교량단부의 꺾임각 자체에 의하여 매우 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 반면에 최대인장 휨응력은 교량의 꺾임각과 차량하중의 조합에 의하여 발생하나 최대압축 휨응력보다는 매우 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 이 결과로부터 침목간격의 확대량의 증가에 따라 휨응력의 크기는 약간 증가하나 그 증가율은 크지 않음을 알 수 있다. 신축이음부와 같이 축력이 해방되는 개소에서 피로를 고려한 레일의 허용 휨응력 한도치가 156.8 MPa⁽⁹⁾이므로, 순수 궤도틀림과 경합을 고려하여 그 70%인 110 MPa를 적용할 때 침목간격 확대만으로는 레일응력은 기준값보다 충분히 작게 발생하는 것을 알 수 있다. 그러나 교량 꺾임각을 9%까지 허용할 경우에는 꺾임각 자체로 콘크리트궤도에 구조적 안정성에는 크게 문제를 유발할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 교량설계 시 교각단부의 꺾임각을 엄격하게 제한할 필요가 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 교량단부에서 침목간격이 기존간격에서 350 mm 더 확대되고 교량상판에서 꺾임각이 발생하였을 때 확대되는 침목 및 그 외측의 각 1개의 침목을 포함한 4개의 침목에서 체결구의 레일패드가 받는 압축응력을 시간에 따라 나타낸 것이다. Fig. 12는 침목간격 확대량에 따라 차량하중에 의한 레일패드가 받는 최대 압축응력을 나타낸 것이다. Fig. 12의 결과로부터 침목간격의 확대량이 증가함에 따라 레일패드가 받는 응력은 증가하는 것을 알 수 있다. 체결구 레일패드의 허용압축응력은 2 MPa를 기준으로 하고 있는데⁽⁹⁾, 이 기준을 적용할 때 침목간격이 350 mm 더 확대되더라도 체결구의 사용성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

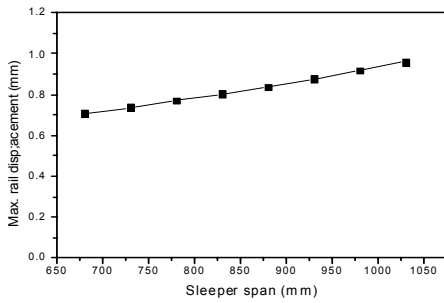


Fig. 6 Maximum rail displacement according to sleeper span

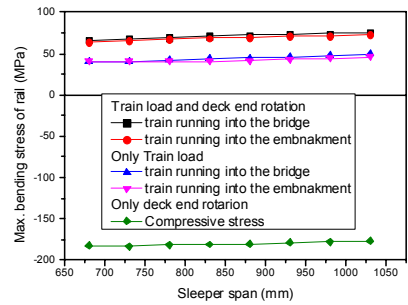


Fig. 10 Maximum bending stress of rail factor according to sleeper span

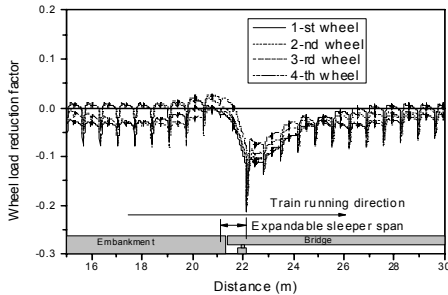


Fig. 7 Wheel load reduction factors of 4 wheels when the sleeper span is 1,030 mm

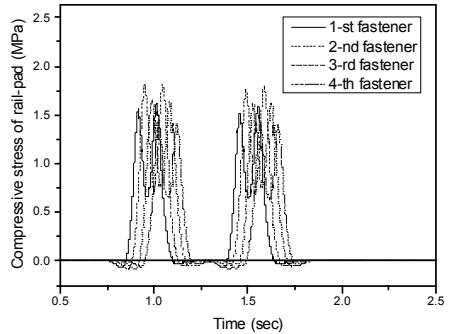


Fig. 11 Compressive stress of the rail pad when the sleeper span is 1,030 mm

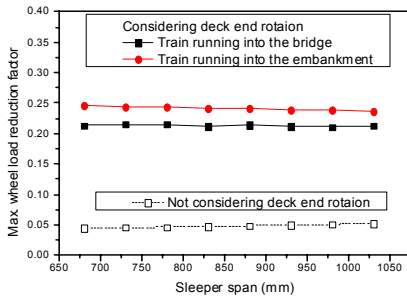


Fig. 8 Maximum wheel load reduction factor according to sleeper span

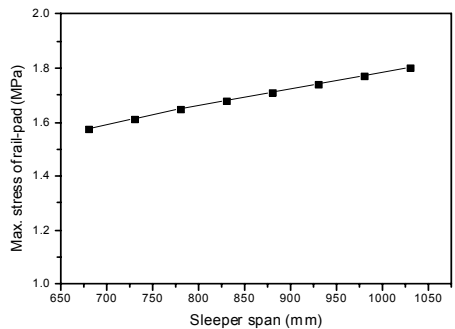


Fig. 12 Maximum compressive stress of the rail pad according to sleeper span

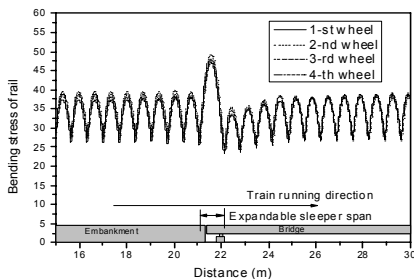


Fig. 9 Bending stress of the rail at the wheel-rail contact points when the sleeper span is 1,030 mm

4. 결 론

이 연구에서는 차량-궤도 상호작용 해석을 통하여 침목간격의 확대에 따른 차량의 주행안전성 및 궤도의 구조 안정성의 영향을 분석하였다. 경량 전철시스템을 대상으로 하여 침목간격을 주요 파라메타로 하여 차량-궤도 상호작용 해석을 수행하였

다. 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 침목간격의 확대 폭이 커짐에 따라 윤증감소율, 레일응력, 그리고 레일패드 응력 등이 커져 열차의 주행안전성 및 궤도의 구조안정성이 저하됨을 알 수 있었다. (2) 그러나 축중이 가볍고 속도가 저속인 경량전철에서는 침목간격이 680 mm에서 레일의 신축이음매가 최대 허용할 수 있는 스트로크(stroke) 350 mm까지 더 확대되더라도 열차의 주행안전성 및 궤도의 구조 안정성의 기준은 충분히 만족되는 것을 알 수 있었다. 따라서 경량전철에서는 침목간격이 350 mm까지 추가적으로 확대되더라도 별도의 대책을 수립할 필요가 없는 것을 알 수 있었다. (3) 경량전철 콘크리트궤도에서 교량단부 꺾임각을 9%까지 허용할 경우 차량의 주행안정성을 확보될 수 있으나 상판 꺾임에 의하여 매우 큰 레일 휨응력이 발생하므로 교량 설계 시 상판 꺾임각을 엄격히 제한할 필요가 있음을 알 수 있었다.

이상의 결론은 경량전철 한하여 도출된 것이며, 축중이 무겁고 속도가 빠른 기존철도 또는 고속철도에서는 침목간격이 확대됨에 따라 차량의 주행안전성 및 궤도의 구조안정성에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 차량, 궤도, 그리고 교량 조건이 이 연구에서 검토한 조건과 다른 경우에는 근본적으로 재평가가 요구되며, 이 연구에서의 제시한 평가방법은 검토 시 유용하게 적용될 것으로 기대된다.

후 기

이 연구는 한국철도기술연구원 “인천도시철도 2호선 궤도 안전성 검토용역”으로 수행되었습니다.

References

- (1) UIC Code 774-3-R, 2001, Track/Bridge Interaction, Recommendations for Calculations, Union International des Chemins de Fer (UIC), Paris France.
- (2) EN 1991-2, 2003, Eurocode 1: Actions on Structures, Part 2: General Actions, Traffic Loads on

Bridges, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.

(3) Ernesto, G. V., JoséA. T., Gorka, G. Z. and Carlos, A. D., 1998, Effect of Sleeper Distance on Rail Corrugation, WEAR, Vol. 217, No. 1, pp. 140~146.

(4) Jin, X., Xiao, X., Wen, Z. and Zhou, Z., 2008, Effect of Sleeper Pitch on Rail Corrugation at a Tangent Track in Vehicle Hunting, WEAR, Vol. 265, No. 9-10, pp. 1163~1175.

(5) Yang, S. C., 2009, Enhancement of the Finite-element Method for the Analysis of Vertical Train-track Interactions, Proc. IMechE Part F: J. Rail and Rapid Transit, Vol. 223, No. 6, pp. 609~620.

(6) Yang, S. C. and Kim, E., 2012, Effect on Vehicle and Track Interaction of Installation Faults in the Concrete Bearing Surface of a Direct-fixation Track, Journal of Sound and Vibration, Vol. 331, No. 1, pp. 192~212.

(7) Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011, Railway Design Standard(structure), Korea Rail Network Authority.

(8) RTRI(Railway Technical Research Institute), 2006, Design Standard for Railway Structures and Commentary - Displacement Limits, Japan.

(9) Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2002, Technical Standard in Railway(Civil), Japan, Department of Railway.



Sin-Chu Yang is received B.S. degrees from Yonsei University in 1981. He then received M.S. and Ph.D. degrees from KAIST in 1985 and 1992, respectively. He is currently a Chief researcher at High speed Railroad System Research Center in Korea Railroad research Institute. His research interests are in the area of the railway structural engineering, train-track-structure interaction, and ground-borne noise.