

도시철도 차량의 사행동을 고려한 강아치 철도교의 동적응답

정창현¹, 조국환^{2*}, 신정열³

¹서울과학기술대학교 글로벌철도시스템공학과, ²서울과학기술대학교 철도건설공학과, ³한국도기술연구원 첨단궤도토목본부

Dynamic Responses of Steel-Arch Railway Bridge due to Snake Motion of Urban Railway Vehicles

Chang-Hyun Jeong¹, Kook-Hwan Cho^{2*}, Jeong-Ryol Shin³

¹Department of Global Railway System, Seoul National University of Science and Technology

²Department of Railway Construction Engineering, Seoul National University of Science and Technology

³Advanced Railroad Civil Engineering Division, Korea Railroad Research Institute

요약 철도교는 열차 축중에 의한 연직하중 분포 외에 열차주행에 따라 크기와 방향이 변하는 횡하중 분포를 나타낸다. 횡하중은 다양한 원인으로 발생하며 각 원인들이 연계하여 복잡한 응답을 나타낸다. 이러한 특성 때문에 설계기준은 교량형식과 무관하게 등가횡하중을 규정하고 있다. 철도교설계는 연직하중에 의한 동적해석을 수행하나 횡하중은 정적해석에 의존하며 횡진동 규정이 미흡하다. 본 연구는 강아치 철도교를 대상으로 사행동의 해석모델을 제시하고 도시철도 차량을 대상으로 교량-열차 상호작용해석을 통하여 정확한 동적응답과 사행동의 효과분석을 연구목적으로 한다. 이를 위하여 열차주행속도에 따라 파장을 매개변수로 선택하였다. 사행의 레일편차, 초기횡력, 위상차, 레일 종방향 마찰계수를 랜덤변수로 가정된 사행동 모델을 제시하고 시간적분법으로 동적응답을 분석하였다. 열차주행속도는 120km/h까지 10km/h 단위로 12가지를 적용하였다. 수치해석결과, 고유진동모드는 1차모드에서 횡변형이 우선적으로 발생하는 횡진동모드가 발생하였다. 거더 중앙부의 횡변위는 사행동을 무시할 경우 0.67mm이나 사행동을 고려하면 주행속도 120km/h에서 최대 4.7mm가 발생되어 약 7배 증가함을 알 수 있다. 이는 등가횡하중에 의한 정적 횡변위 2.4mm의 약 2배에 해당하는 변위이다. 일반적으로 주행속도가 증가하면 사행동을 고려한 횡변위도 증가하는데, 사행동 모델의 파장변화에 따른 횡변위는 특정속도에서 급증한다. 횡변위 응답분포가 급변하는 파장변화와 주행속도는 철도교의 진동특성과 연계되므로 각 교량모델에 따라 사행동 특성을 고려하여야 한다. 특히 횡진동모드가 지배하는 철도교설계는 사행동을 고려한 동적응답을 분석할 필요가 있다.

Abstract A railway bridge has both a vertical load distribution and a lateral load distribution with size and direction that change according to the train movement. Lateral loads have a variety of causes, and each of them is linked and shows a complex response. Due to these characteristics, design standards stipulate equivalent lateral loads regardless of the type of bridge. In railway bridge design, dynamic analysis is performed based on the vertical load, but static analysis is used for the lateral load, and lateral vibration regulations are insufficient. The purpose of this study is to present a model for the analysis of snake-like motion for a steel-arch railway bridge and to analyze the effects and dynamic responses through bridge/train interaction analysis for urban railway vehicles. To this end, the wavelength was selected as a parameter according to the train speed. A snake-like motion model was made with the rail deviation, initial lateral force, phase difference, and longitudinal friction coefficient of the rail as random variables. The dynamic responses were analyzed using a time integration method. Twelve train speeds up to 120 km/h were applied with intervals of 10 km/h. In the result of the numerical analysis, the natural vibration mode was lateral, and lateral deformation occurred preferentially in the primary mode. The lateral displacement in the center of a girder was 0.67 mm when the snake-like motion was ignored, but when considering the snake-like motion, up to 4.7 mm of displacement was generated at a speed of 120 km/h, which is an increase by about seven times. This displacement is equivalent to about twice the static lateral displacement of 2.4 mm due to an equivalent lateral load. In general, as the speed increases, the lateral displacement when considering snake-like motion also increases. The lateral displacement according to the wavelength change of the snake-like motion model also increases rapidly at a specific speed. The wavelength change and speed of the rapid change in the lateral displacement response distribution are linked to the behavior characteristics of the railway bridge, so the slope characteristics should be considered for each bridge model. In particular, in railway bridge design dominated by the lateral behavior mode, dynamic responses need to be analyzed while considering snake-like motion.

Keywords : Steel-Arch Railway Bridge, Snake Motion, Wavelength, Lateral Force, Dynamic Lateral Behavior

본 논문은 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원(과제번호:2021-0928)으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Kook-Hwan Cho(Seoul National University of Science and Technology)

email: khcho@seoultech.ac.kr

Received June 16, 2023

Revised July 24, 2023

Accepted August 10, 2023

Published August 31, 2023

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

아치철도교와 같은 강철도교는 장경간을 적용하면 과도한 처짐이 발생하거나 진동에 매우 민감한 구조가 된다. 과도한 정적처짐, 동적변위와 가속도는 철도교의 안전성, 사용성 및 승차감에 영향을 주며 열차의 탈선을 야기할 수도 있다. 그러므로 철도교의 구조 안정성을 확보하기 위하여 정적거동과 동적변위, 가속도 등 동적응답을 분석하여야 한다. 일반적으로 횡변위는 횡하중이나 비틀림에 의하여 나타날 수 있다. 철도교 횡하중으로 풍하중도 있으나 열차주행으로 인한 차륜과 레일사이에서 발생하는 사행동이 대표적이다.

횡진동모드가 지배적인 강아치철도교는 연직하중이 작용하여도 횡진동이 지배적으로 나타난다. 더욱이 열차주행에 의한 사행동은 직접적으로 횡하중과 횡거동을 야기한다. 횡진동모드가 지배하는 강아치 철도교는 사행동을 고려한 동적응답을 분석하여 구조안정성을 확인하여야 한다. 횡하중을 나타내는 사행은 주행안전성과 승차감에 큰 영향을 미치기 때문이다. 이와 같은 이유로 철도교설계분야에서 사행동을 고려한 동적응답 분석이 요구되거나 설계기준이 없고 이에 대한 정보와 기존 연구 등이 매우 미흡한 실정이다. 그러므로 본 연구는 강아치 철도교를 대상으로 도시철도차량에 대한 교량-열차 상호작용 해석을 통하여 정확한 동적응답 해석 및 사행으로 인한 동적효과 분석을 연구 목적으로 한다. 일반적으로 사행은 차륜형상, 차륜과 레일의 편차, 수평력, 마찰력 등 다양한 발생 원인이 있으나 이에 대한 정보가 전혀 없다. 그러므로 열차주행속도에 따른 파장과 변동형력을 매개변수로 가정한 사행동 모델을 제시하고 시간적분법을 이용하여 동적응답을 결정하였다.

1.2 연구동향

철도교의 동적해석은 Willis(1849)에 의해 시작되었다[1]. Garg(1985)등은 차량 궤도-교량의 상호작용으로 인한 강트러스 철도교의 연직 및 횡방향의 궤도불규칙성의 궤도상태를 고려한 동적응답을 연구하였다[2].

국내는 장동일 등(1989)이 트러스교에 대하여 모드중첩법을 이용한 이동하중과 Newmark의 직접적분법을 이용한 이동질량해석을 수행하였다[3]. 김성일(2000)은 KTX 열차의 정밀해석모형을 제시하고, 열차-교량의 상호작용해석으로 교량의 동적응답 및 공진현상을 연구하였다[4]. 이승일(2001)은 고속화차의 대차에 대하여 대

차 횡진동에 의한 임계속도를 제시하였다[5]. 오지택 등(2003)은 무도상 판형교의 횡방향 동적거동특성 분석을 위한 실험적 연구를 수행하였다[6].

이와 같이 이동하중에 따른 교량의 동적영향 및 진동 특성, 교량의 사용성과 열차의 주행안정성에 대한 관심이 높아지면서, 열차모델개발과 트러스, 아치, 장대사장 케이블교량과 같은 다양한 교량에 대한 열차-교량 상호작용 해석연구가 활발히 진행되고 있다. 반면에 사행동을 고려한 교량구조의 동적응답분석은 매우 부족한 실정이다. 최근 사행동에 대한 관심이 증가하면서 사행동의 동적응답효과 분석연구도 기대할 수 있다.

1.3 연구내용 및 범위

차륜과 레일사이에서 발생하는 수평력은 교량의 횡하중으로 전달된다. 설계기준의 횡하중은 연직 축중하중의 일정비율로 가정한 정적등가하중을 규정하고 있다. 그러나 횡하중은 열차주행속도에 따라 다양한 형태로 급변하고 예상치 못한 동적효과를 나타낸다. 대표적인 동적 횡하중의 원인이 사행동이다. 강아치 철도교의 사행동에 대한 국내외 계속자료는 전무하다. 사행동에 대한 기존 연구도 매우 미흡하다. 그러므로 본 연구는 사행동을 랜덤변수로 가정한 사행동 모델을 제시하고 열차-교량상호작용에 의한 동적응답을 분석하였다.

연구대상 교량은 폭이 좁고 아치라이즈비가 큰 장경간 강아치 철도교로서 횡진동모드가 지배적인 교량이다. 교량의 주요부재들은 3차원 뼈대요소를 사용하였다. 레일과 침목은 레일의 작용력을 침목을 통하여 교량거더에 전달하는 강체 전달요소로 이상화하였다. 이는 레일과 침목의 변형보다 교량의 동적응답 획득이 주요 과제이기 때문이다.

다량으로 연결된 열차의 경우 기본적으로 대차-객차 사이가 단 1개의 연직봉으로 연결되어 자유롭고 원활한 열차의 면내회전이 가능하도록 구성되어 있다. 이로 인하여 사행동이 발생한다. 기본적으로 사행동은 좌우레일 사이에 요잉(yawing) 모멘트를 발생시키며 교량거더에 동적 횡하중으로 전달된다.

그 외 다양한 사행동의 발생 원인을 추정하고 있으나 원인별 사행동 자료나 사행동 특성이 제시된 바가 없다. 다만 사행동은 레일의 기하학적 형상 및 차륜의 답면 특성에 따라 차륜의 레일접촉편차가 주된 원인이며 이는 정현함수로 표현되는 횡하중을 야기한다[7]. 즉, 사행동과 사행동 원인들은 모두 불확실성이 큰 대표적인 랜덤변수에 해당한다. 사행동과 더불어 열차의 특정 주행속

도에서 레일에 횡방향 충격하중이 발생하며 이를 현팅현상이라고 부른다.

따라서 본 연구는 열차주행속도에 따른 현팅현상을 포함하여 사행동 원인을 고려한 사행동 모델을 정의하였다. 즉, 파장을 매개변수로 선택하였고 변동횡력은 속도 변화에 따른 초기횡력의 정현함수를 적용하였다. 사행의 레일편차, 초기횡력, 위상차, 레일 종방향 마찰계수는 랜덤변수를 적용하였다. 열차주행속도는 120km/h까지 10km/h 단위로 12가지를 적용하였다.

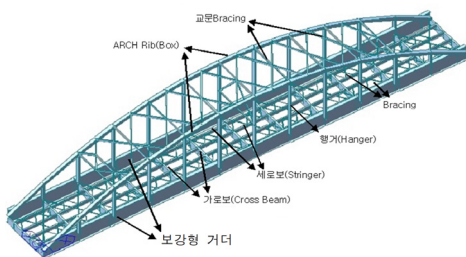
해석은 선형탄성해석을 적용하였다. 열차-교량 상호작용은 교량의 운동방정식, 부구조이론에 따른 주행열차 모델과 열차 운동방정식을 유도·적용하였다. 객차와 대차의 관성력에 의한 추가 이동질량효과는 무시하였다. 그 이유는 객차-대차-차륜으로 이어지는 연결점에 자유도를 선택하지 않았기 때문이다. 또 레일-대차는 스프링에 의한 상향력으로 재하되므로 객차와 대차의 관성력을 차륜-대차사이 스프링에 적절히 배분되지 않기 때문이다.

이상과 같이 본 연구는 매개변수와 랜덤변수로 가정한 사행동 모델을 이용하여 열차주행속도 변화에 따른 동적 횡하중을 모사하고 열차-교량 상호작용을 고려한 시간적 분법을 수행하였다. 동적해석 결과인 횡변위응답은 설계 기준의 등가횡하중에 의한 횡변위와 비교·분석하였다.

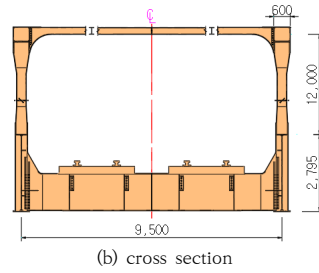
2. 강아치 철도교 모델

2.1 교량의 해석모델

실제공용중인 강아치철도교를 해석모델로 선택하여 구조거동을 분석하였다. 본 연구대상의 랭거아치교는 경간장 80m, 폭 9.5m, 높이 14.8m로 아치리브, 보강거더, 가로보, 세로보, 브레이싱으로 구성되어 있다. 해석 모델은 Fig. 1과 같다.



(a) Three Dimensional view



(b) cross section

Fig. 1. Three Dimensional Analysis Model

2.2 사행동의 해석모델

철도차량 차륜의 답면(Wheel tread)은 곡선을 원활하게 통과하도록 테이퍼로 이루어져 있다. 이로 인해 S자 형태의 정현파 사행동이 발생한다. 사행동으로 인한 차륜의 횡방향 운동은 차량이 일반 직선궤도 주행 시 한 개의 축으로 고정된 양쪽 차륜의 원뿔형 답면에 기인하여 발생한다[7,11].

휠 답면은 내측 플렌지부의 직경이 크고, 외측의 직경이 작은 원뿔 형태이므로 휠 답면 중앙과 레일의 상면 중앙이 접촉된 초기 조건에서 접촉점이 횡(좌우)방향으로 옮겨지면 좌우 차륜의 구름반경 차이에 의해 차축이 좌우방향 주기운동을 나타낸다. 이러한 운동은 Klingel에 의해 정립되었다[7,11]. 이 이론을 바탕으로 일반적인 직선궤도에서 차량의 사행동은 Fig. 2와 같이 횡(좌우)진동과 요잉이 합성된 운동을 나타낸다. 차륜이 횡방향으로 움직이면 레일 접촉점 위치는 좌우가 다르게 된다. 좌우 차륜의 접촉 반경이 다르면 차량은 선회 운동을 한다.

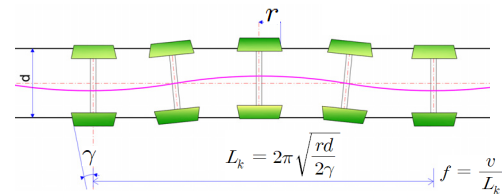


Fig. 2. Klingel movement[7,11]

사행동으로 인한 횡변위는 Eq. (1a)로 표현되며 사행동으로 인한 파장은 Eq. (1c) 나타낼 수 있다. 사행동 진동수는 Eq. (1d)과 같이 나타낼 수 있으며 여기서 L_k 는 사행동파장, r 은 차륜반경, d 는 궤간, γ 는 차륜답면구배, f 는 사행동진동수, v 는 주행속도, y 는 횡변위를 의미한다[8].

$$y = A \sin kx + B \cos kx \tag{1a}$$

$$k = \sqrt{\frac{2\gamma}{rd}} \quad (1b)$$

$$L_k = \frac{2\pi}{k} = 2\pi \sqrt{\frac{rd}{2\gamma}} \quad (1c)$$

$$f = \frac{v}{L_k} \quad (1d)$$

2.3 설계기준

국내 철도설계기준은 교량 설계시 횡하중을 고려하도록 하고 있는데, 차량 횡하중은 다음 Fig. 3과 같이 연형 집중이동하중으로 보며, 레일면의 높이에서 교축에 직각이고 수평으로 작용한다고 가정한다. 이때 차량 횡하중 Q는 I하중의 1동륜 축중의 20%로 가정한다. 복선 이상의 선로를 지지하는 구조물은 1궤도만 고려한다[9].

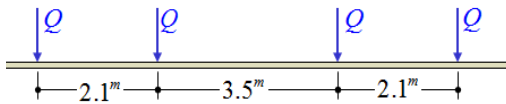


Fig. 3. Train Lateral Loads[9]

2.4 열차하중모델

본 연구대상인 도시철도의 차량하중과 차량간격은 Fig. 4와 같다[10]. 도시철도의 운행속도는 120km/h를 고려하였다. 일반적으로 열차의 주행속도가 철도교의 동적응답에 가장 큰 영향을 미치나 본 연구는 규정속도로 주행하는 도시철도로 제한하며 사행동에 따른 동적응답만을 주된 논제로 선택하였다.

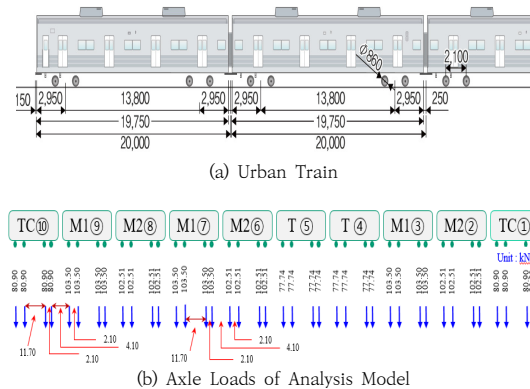


Fig. 4. Train Loading Model

3. 자유진동 해석

연구대상 철도교에 대하여 자유진동해석으로 고유진동수분포를 분석하였다. 해석모델에 대한 고유진동수는 Table 1과 같고 진동모드는 Fig. 5와 같다.

Table 1. Natural frequencies of Bridge

Mode	Frequency(Hz)	Remark
1	2.033	Lateral
2	2.947	Vertical
3	3.088	Lateral
4	3.301	Lateral

해석결과, 1차 진동모드는 전체 아치부재가 횡방향으로 전도되는 모드이다. 이는 구조물의 거더폭(9.5m)보다 단면높이(12m)의 비가 크기 때문이다. 2차는 좌우측이 상향과 하향으로 변형되는 연직방향 진동모드이다. 3, 4차는 횡진동을 나타낸다. 즉, 해당모델은 횡진동이 지배적이다. 즉, 연직하중이 작용하여도 횡진동이 우선적으로 발생한다. 횡진동이 지배적인 일반교량은 마치 비틀림과 같은 변형을 발생시키며 각 부재는 예기치 못한 비틀림변형을 유발하게 된다. 또 횡방향 응답이 지배하므로 사용성에도 불안정하다.

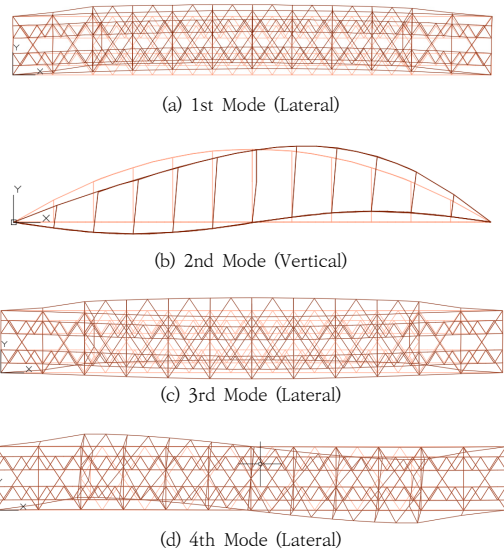


Fig. 5. Typical Vibration Modes and Mode Shapes

4. 사행동을 고려한 강철도교 해석

4.1 사행동의 설계변수

철도차량은 차륜의 기하학적 형상으로 인하여 사행동이 발생한다. 사행동은 레일-차륜 접촉면에 2개의 수평력과 1개의 연직력을 발생시킨다. 2개의 수평력은 교축과 교축직각방향 성분이며 교축방향 힘을 축력, 교축직각방향 성분은 횡력이라고 부른다. 본 연구는 교축과 연직방향 성분들을 무시하고 Fig. 6과 같이 횡력과 마찰력만을 고려하기로 한다. 여기서 F_h 는 횡력, F_r 은 마찰력을 나타낸다. 여기에서, LF, LR은 각각 좌측레일 전방 및 후방차륜을, RF, RR은 각각 우측레일 전방 및 후방차륜을 나타낸다.

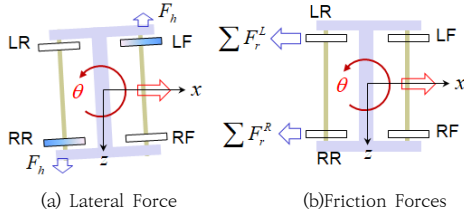


Fig. 6. Lateral and Friction Forces according to the rotation of Bogie

사행동은 시간에 따른 횡력 F_h 과 마찰력 F_r 에 의하여 요잉모멘트가 발생한다. 이는 주행안전성을 좌우하는 거동이다. 횡력과 마찰력은 구성부재특성에 따른 내적요인과 다양한 주행여건에 따른 외적요인에 의하여 변할 수 있다. 그럼에도 횡력과 마찰력은 Eq. (2)와 같이 간단한 정현함수로 표현할 수 있다. 여기서 H_0 는 변동함수에 의한 초기횡력이다. v 는 열차의 주행속도, L_k 는 파장, ϕ 는 위상차, ω 는 가진주파수이며 $\omega = 2\pi v/L_k$ 로 표현된다. 마찰력에서 W_0 는 연직방향 힘, μ_0 는 마찰계수이다. 초기횡력과 마찰력의 위상차와 파장은 주행환경에 따라 별도로 구분·적용할 수도 있다.

$$F_h = H_0 \sin\left(\frac{2\pi vt}{L_k} + \phi\right) = H_0 \sin(\omega t + \phi) \quad (2a)$$

$$F_r = W_0 \mu_0 \sin\left(\frac{2\pi vt}{L_k} + \phi\right) \quad (2b)$$

사행동을 야기하는 변수들은 다양하고 그 효과는 불명확하다. 본 연구는 여러 가지 사행동 원인 중에서 대표적

인 5가지를 랜덤변수로 가정하였다. 파장을 매개변수로 선택하였고 속도 변화에 따른 변동횡력을 적용하였다. 변동횡력(F_h)은 초기횡력(H_0)에 따라 변하는 정현함수 값이다. 5가지 랜덤변수는 레일과 차륜의 편심량 c_0 , 초기횡력 H_0 , 위상차 ϕ_0 , 레일과 차륜사이의 마찰계수 μ_0 , 연직하중 W_0 이다.

Table 2. Reference values of random variables

Part	Rail-Wheel Eccentri.	Initial L.F.	Phase Differ.	Friction Coeff.	Vertical Load
Symbol	c_0	H_0	ϕ_0	μ_0	W_0
Value	5mm	0~10.5kN	15°	0.4	52.5kN
Range(%)	20	20	20	20	20

*초기횡력 및 연직하중은 바퀴 하나에 대한 하중임

초기횡력 H_0 는 속도 증가에 따라 초기횡력도 증가하도록 2차곡선 함수식으로 모사하였다. Fig. 7은 2차함수에 의한 초기횡력을 그래프를 나타내었다.

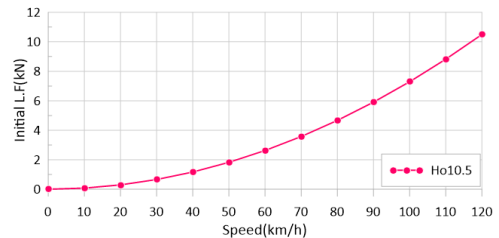


Fig. 7. Initial Lateral Force Graph

사행에 의한 거더 내부의 하중성분과 전달매트릭스는 Fig. 8과 같이 임의의 거더 내부에 작용하는 힘들로 변환시킬 수 있다.

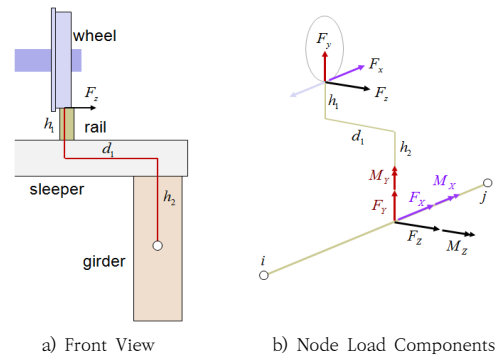


Fig. 8. Node Load Components of Rails and Girder

거더의 임의점에 작용하는 하중벡터를 $\{F_X, F_Y, F_Z, M_X, M_Y, M_Z\}$ 라고 정의하면 하중전달은 Eq. (3) 과 같은 매트릭스 식으로 나타낼 수 있다. 여기서 아래첨자 대문자는 거더에 작용하는 힘의 방향성분을 나타낸다.

$$\begin{Bmatrix} F_X \\ F_Y \\ F_Z \\ M_X \\ M_Y \\ M_Z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & d_1(h_2+h_2) \\ -d_1 & 0 & 0 \\ (h_1+h_2) & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{Bmatrix} \quad (3)$$

마찰력은 거더의 교축방향 하중과 면외방향 모멘트하중으로 전달된다. 레일 횡력은 거더의 교축직각방향 횡력과 비틀림모멘트로 전달되게 된다. 모멘트하중 발생 이유는 크게 3가지로 구분할 수 있다. 첫째, 거더의 중심축과 차륜-레일 접촉면과의 편심량이 존재하기 때문이다. 둘째, 레일-침목과 침목-거더가 많은 수의 체결장치로 연결되어있어 마치 강철연결이라고 가정할 수 있기 때문이다. 셋째, 레일과 침목은 힘을 전달하는 강체로 가정하였기 때문이다.

4.2 정적해석에 의한 변위

정적해석의 경우 실하중에 의한 수평변위는 도시철도 운행차량에 대한 연행집중하중을 적용하였다. 축중하중은 105kN에 대한 20%값을 수평방향으로 재하하였다. 정적수치해석결과 거더중앙부에서 최대연직변위 17.218mm, 최대횡변위는 2.418mm 발생하였다. Fig. 9는 정적해석결과 횡변위를 나타내었다.

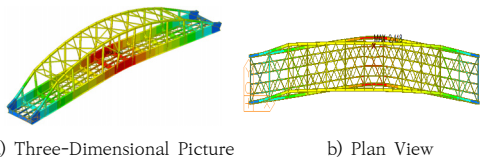


Fig. 9. Lateral Displacement

4.3 동적해석에 의한 변위

사행동 고려 유무에 따라 변위를 비교 분석하였다. 비교위치는 열차주행방향 거더 경간중앙부이다.

4.3.1 사행동 미고려

도시철도 운행열차가 교량 위를 이동할 경우 열차의

연직하중은 고려하고 사행동으로 인한 횡방향 하중은 고려하지 않았다. 거더중앙부의 절점변위에 대하여 응답을 분석하였다.

열차하중이 재하되는 위치의 거더 중앙절점에서 각 방향별 최대변위를 정리하면 Table 3과 같다. 열차하중이 연직하중이므로 연직변위(Dy)가 큰 값을 나타낸다. 그러나 편재하에 따른 횡변위(Dz)도 동시에 발생한다. 거더 중앙부 변위는 사행동에 따른 횡하중을 고려하지 않을 경우 Table 3과 같이 속도 증가에 따라 큰 변화가 없다.

Table 3. Max. Displacement at Mid-Span of Girder

Speed (km/h)	Displ.(mm)		Speed (km/h)	Displ.(mm)	
	Dy	Dz		Dy	Dz
10	16.056	0.599	70	16.150	0.636
20	16.083	0.595	80	16.091	0.625
30	16.066	0.595	90	16.063	0.621
40	16.083	0.595	100	16.076	0.629
50	16.083	0.616	110	16.051	0.648
60	16.104	0.615	120	16.054	0.672

4.3.2 사행동 고려

사행동 파장의 매개변수는 15.6m(윤축의 파장), 27.4m(대차의 파장), 40m(경간의1/2), 80m(교량경간), 106m(경간의 4/3), 160m(경간의 2배)등 6가지를 선택하였다. 축중횡력은 운행차량 연직하중의 20%를 횡하중(21.0kN)으로 재하하였다.

축중횡력 21.0kN은 운행차량 연직하중의 20%에 해당하는 하중이며 설계기준에 제시된 값이다. 6가지 사행동 파장별 거더 중앙부 절점의 연직변위(Dy)는 Fig. 10과 Table 4에 도시하였다. Fig. 10의 가로축은 시간 축을 대신하여 나타낸 것으로, 교량 시점을 0으로 하여 열차가 교량 진입 후 교량을 완전히 빠져나갈 때까지의 열차 선두부 위치를 의미한다.

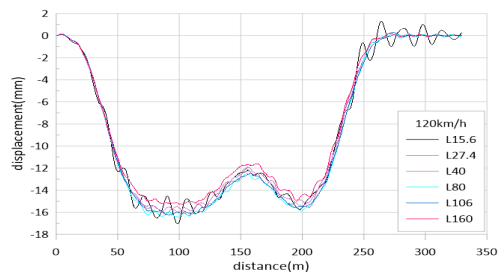


Fig. 10. vertical disp.(mm) according to the wavelength (V=120km/h)

파장별 분석결과, 사행동 파장 160m이고 주행속도 120km/h일 때 최대연직처짐은 15.29mm 발생하였다. 사행동 파장 15.6m이고 주행속도 120km/h 일때 최대 연직처짐은 17.07mm 발생되어 파장별 속도에 따른 연직처짐의 최대 변동폭은 2mm 발생하였다. 이는 정적 해석 결과값 17.218mm와 차이가 없다.

Table 4. Max. Vertical Disp(mm) at Mid-Span of Girder

Speed (km/h)	L15.6m	L27.4m	L40.0m	L80.0m	L106m	L160m
10	16.62	16.31	16.58	16.71	16.76	16.32
20	16.47	16.24	16.18	16.55	16.41	16.36
40	16.63	16.28	16.06	16.63	16.35	15.72
60	16.27	16.16	16.00	16.43	16.34	15.62
80	16.33	16.04	16.08	16.49	16.36	15.59
100	16.25	16.23	15.99	16.39	16.25	15.43
120	17.07	16.31	16.07	16.45	16.26	15.29

주행속도 120km/h일 때 거더 중앙부 횡변위(Dz)는 Fig. 11에 도시하였다.

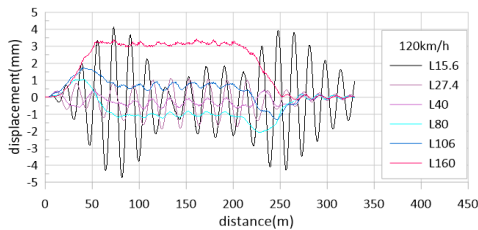


Fig. 11. Lateral disp.(mm) according to the wavelength (V=120km/h)

파장별 최대 횡변위는 Table 5와 같다. Fig. 12는 이를 도시한 그래프이다.

Table 5. Max. Lateral Disp(mm) at Mid-Span of Girder

Speed (km/h)	L15.6m	L27.4m	L40.0m	L80.0m	L106m	L160m
10	0.53	0.48	0.57	0.45	0.49	0.42
20	0.50	0.42	0.49	0.51	0.39	0.33
40	0.53	0.44	0.43	0.61	0.42	0.43
60	0.78	0.58	0.47	0.83	0.55	0.90
80	1.26	0.72	0.54	1.17	0.84	1.53
100	2.71	1.08	0.58	1.56	1.18	2.40
120	4.73	1.86	0.70	2.09	1.75	3.42

거더 중앙부 횡변위(Dz)는 속도증가에 따라 파장도 임의속도에서 크게 발생한다.

Fig. 11과 같이 윤축의 파장 15.6m는 속도증가에 따라 횡변위도 급변한다. 운행차량의 연직하중 20%에 해당하는 횡하중이 작용하면 주행속도 120km/h에서 윤축의 사행동 파장 15.6m일 때 횡변위는 최대 4.73mm 발생하였다. 이는 사행동을 고려하지 않은 경우 발생한 횡변위 0.67 mm 보다 약 7배 큰 변위이다. 교량길이 2배에 해당하는 사행동 파장 160m일 때 횡변위는 최대 3.42mm 발생하였다. 이는 실하중의 정적 횡변위 2.418mm 보다 1.96~1.41배 큰 변위이다. 횡변위의 증가는 교량손상 및 열차탈선을 야기할 수 있다. 반복되는 횡변위는 주요부재들의 응력들을 누적시켜 형상변화와 국부손상을 야기할 수 있다.

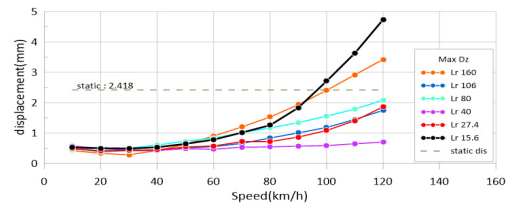


Fig. 12. Max. lateral disp.(mm) according to the wavelength

5. 결론

본 연구는 강아치 철도교를 대상으로 도시철도차량 운행에 따른 교량의 정·동적응답과 사행동 효과를 분석하였다. 교량 중앙점에서 연직과 횡변위를 중점적으로 관찰하였다. 횡변위에 대한 허용변위 설계규정이 없으므로 동적횡변위응답은 등가 횡하중이 작용하는 정적 횡변위와 비교하였다.

고유치 해석결과, 강아치 철도교의 1차 고유진동수는 2.033Hz이며 횡진동모드가 지배적이다. 즉 연직하중이 작용하여도 연직변형보다 횡변형이 우선적으로 발생한다.

횡변위는 정적과 동적해석결과를 비교하였다. 또 사행동을 고려하지 않거나 고려할 경우도 비교 분석하였다. 연직변위는 사행동 고려 여부와 관계없이 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 횡진동모드가 지배적인 경우 흔히 볼 수 있는 진동특성이기도 하다.

거더중앙부 횡변위는 사행동을 무시하면 0.67 mm 정도 발생한다. 사행동을 고려하면 열차주행속도 120km/h에서 횡변위는 최대 4.733mm 발생한다. 이는 사행동을 고려하지 않은 경우보다 약 7배 큰 변위이다. 또 정적횡변위 2.4mm의 약 2배에 해당하는 변위이다. 사행동을

고려할 경우 주행속도의 증가에 따라 횡변위는 증가하고 파장변화에 따라 특정주행속도에서 크게 발생한다. 랜덤 효과를 무시할 경우 횡변위는 최대 0.015mm 차이가 발생하였다. 이는 랜덤변수보다 파장의 매개변수가 지배적인 요소임을 알 수 있다. 본 연구는 열차주행과 궤도 불규칙성에 의한 사행동을 랜덤자료로 가정하여 사행동이 교량의 동적응답에 미치는 영향을 분석하였다. 사행동을 고려한 동적횡변위분포들은 합리적인 실무적용범위를 제시하는 기초자료로 활용할 수 있다. 향후, 이론적 접근뿐만 아니라 지속적인 현장계측자료분석과 장기간 실험연구를 병행하여, 보다 적절하고 현실적인 사행동 모사모형을 제시할 계획이다.

References

- [1] Willis, R., "Report of Commissioners Appointed to Inquire the Application of Iron to Railway Structures", Appendix B., His Majesty's Stationary Office, London, England, 1849.
<https://www.semanticscholar.org/paper/Report-of-the-commissioners-appointed-to-inquire-of-Galton/b3357d1f18bd14f4eccc55c1d5b40381efad62bf>
- [2] K. H. Chu, V. K. Garg, and T. L. Wang, "Impact in Railway Prestressed Concrete Bridges", Journal of Structural Engineering, Vol.112, No.5, pp.1036-1051, 1986.
[https://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1986\)112:5\(1036\)](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)0733-9445(1986)112:5(1036))
- [3] D. I. Chang, K. H. Choi, J. D. Lee, "A Study on Dynamic Response of Truss Bridge due to Moving Train Loads", Journal of the Korean Civil Society, pp.1-10, jun. 1989.
<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchArticle.do?cn=JAKO198917451624746&dbt=NART>
- [4] S. I. Kim, "Bridge-train interaction analysis of high-speed railway bridges", Ph.D dissertation, Seoul National University, Korea, 2000.
<http://www.riss.kr/link?id=T7648656>
- [5] S. I. Lee, Y. S. Choi, "Running Safety of High Speed Freight Bogie", Journal of the Korean Society for Railway, pp. 116-122, 2001.
<http://www.riss.kr/link?id=A76244416>
- [6] Ji. Taek. Oh, "Field Test to Investigate Lateral Dynamic Characteristics of Steel Plate Girder Railway Bridge without Ballast", Journal of the Korean Society for Railway, pp. 591-595, 2003.
https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE00796126&language=ko_KR&hasTopBanner=true
- [7] Byung. hyun. Yun, "Determination of Optimum Gauge Width and Tongue Rail Profile for Vehicle Running Properties Improvement on High-Speed Turnout", Ph.D dissertation, Seoul National University of Science and Technology, Korea, 2021.
https://library.seoultech.ac.kr/#/eds/detail?an=edsker_000004901100&dbId=edsker
- [8] Ji. Taek. Oh, "A Comparative Analysis of Standard Train Loads for Intercontinental Rail Connections", Korea Railroad Research Institute, pp. 248-268, 2004.
<https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO201000019047>
- [9] "Standard for design of railway bridge", Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016.
<https://www.codil.or.kr/viewDtlConWrkDtlSch.do?gubun=constd&pMetaCode=CIGCDC190020>
- [10] "Standard Specification for Urban Railway Facilities", Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013.
<https://www.codil.or.kr/detailAnwGuide.do?nserialno=1279>
- [11] F. Attivissimo, A. Danese, N. Giaquinto and P. Sforza., "A railway measurement system to evaluate the wheel-rail interaction quality", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 56(5), pp. 1583-1589, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.903583>

정 창 현(Chang-Hyun Jeong)

[정회원]



- 2019년 8월 : 서울시립대학교 과학기술대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2020년 2월 : 서울과학기술대학교 글로벌철도시스템공학과(박사수료)
- 1992년 12월 ~ 1997년 7월 : 한국종합기술개발공사
- 1998년 8월 ~ 2010년 9월 : 청석엔지니어링
- 2010년 10월 ~ 현재 : ㈜티앤산업

<관심분야>

토목 구조, 구조 진동

조 국 환(Kook-Hwan Cho)

[정회원]



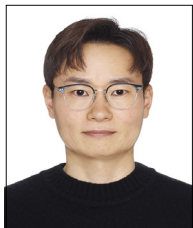
- 1990년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 2002년 5월 : North Carolina State University, Department of Civil Engineering (공학박사)
- 2005년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도건설공학과 교수

<관심분야>

철도건설, 토질및기초

신 정 열(Jeong-Ryol Shin)

[정회원]



- 1998년 8월 : 고려대학교 대학원 토목환경공학과 (공학석사)
- 2010년 8월 : KAIST 대학원 건설 및 환경공학과 (공학박사)
- 1998년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원
- 2022년 2월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 겸임교수

<관심분야>

토목구조, 구조동역학, 철도시설, 궤도