

주행차량에 의한 궤도 동적특성의 매개변수 분석

Parametric Analysis in Dynamic Characteristics of Railway Track due to Travelling Vehicle

김 상 효* 이 용 선** 조 광 일***
Kim, Sang-Hyo Lee, Yong-Seon Cho, Kwang-II

ABSTRACT

The dynamic load effects are conveyed to the railway bridges through tracks which are generated by moving trains. The dynamic load effects may vary due to the dynamic characteristics of the applied vehicle loads and the railway bridges containing the track system. However, the track effects have been neglected or simplified by spring elements in the most studies since it is quite complex to consider the track systems in the dynamic analysis models of railway bridges. In this study, track system on railway bridges is modeled using a three-dimensional discrete-support model that can simulate the load carrying behavior of tracks. In addition, this program is developed with the precise 20-car model and a continuous PSC (prestressed concrete) box girder bridge, which is the main bridge type of Korea Train eXpress (KTX). Three-dimensional elements are used for both. The dynamic response of railway bridges is found to be affected depending on whether the track model is considered or not. The influencing rate depends on the traveling speed and different wheel-axle distance. The dynamic bridge response is decreased remarkably by the track systems around the resonant frequency. Therefore, the resonance effect can be reduced by modifying the track properties in the railway bridge.

1. 서 론

철도교의 동적응답을 분석할 때 고려되어야 할 중요한 문제 중 하나는 주행하는 열차와 교량사이의 동적 상호작용력을 계산하는 것이다. 이러한 상호작용력에 의해서 열차운행시 발생하는 동적하중은 궤도구조를 통하여 하부구조로 전달되며, 작용하중의 진동수와 궤도의 동적특성에 따라 교량의 응답이 달라질 수 있다. 특히 공진과 같이 차량하중과 교량특성에 의해 발생하는 현상은 차량하중이 궤도를 통하여 전달되는 과정에서 변하게 되므로 그 영향이 더 크게 나타날 수 있다. 따라서 궤도의 역할은 교량과 주행하는 열차 사이의 동적 상호작용력 해석에 있어서도 반드시 고려되어야 할 중요한 문제이다. 이러한 이유로 궤도구조가 교량거동에 미치는 영향을 분석함으로써 교량응답의 보다 정확한 파악을 통하여 안정적이고 경제적인 궤도와 교량을 설계할 수 있을 것으로 판단된다.

* 정회원·연세대학교 사회환경시스템공학부 교수	02-2123-2804	sanghvo@yonsei.ac.kr
** 정회원·연세대학교 토목공학과 박사과정	02-2123-2804	king2@yonsei.ac.kr
*** 정회원·연세대학교 토목공학과 박사과정	02-2123-2804	cky_222@hotmail.com

따라서 본 연구에서는 궤도구조의 특성을 편리하게 고려할 수 있는 이산지지모형을 이용하여 교량저동에 대한 궤도구조의 영향을 분석하고자 한다.

2. 궤도를 고려한 철도교량의 동적응답분석을 위한 모형화

2.1 궤도의 모형화

궤도구조에서 레일과 침목사이에서 1차 현가장치 역할을 하는 레일패드와 침목과 교량 사이에서 2차 현가장치 역할을 하는 도상을 스프링과 댐퍼로 그림 1과 같이 모형화하였다. 공간적으로 연속된 레일은 좌측과 우측에 대해 횡변위($U_0(0,0)$)와 연직변위($U_0(0,0)$)를 고려하였으며, 침목간격은 6000로 배치하고, 각 침목의 수평변위(U_H)와 연직변위(U_V)를 고려하였다. 궤간은 양 레일사이의 거리로서 우리나라의 표준 궤간인 1.4350를 적용하였다.

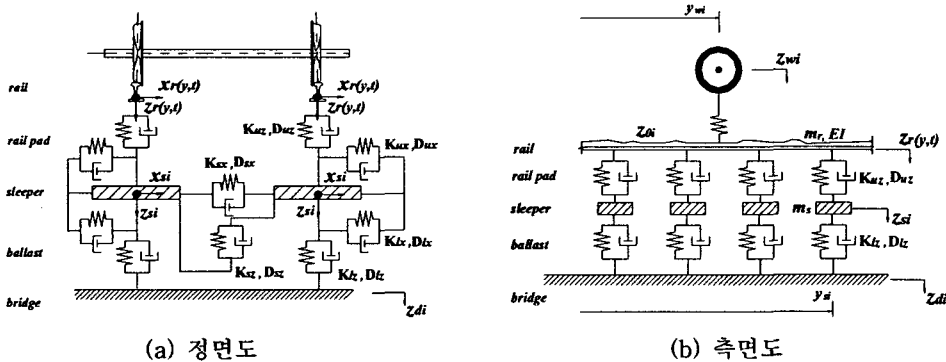


그림 1. 3차원 이산지지 궤도 모형

표 1. 궤도의 구성요소별 특성값

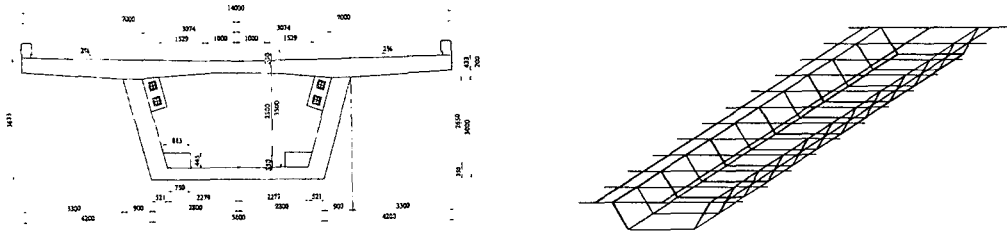
요소	물성	물성값	요소	물성	물성값
레일	탄성계수(E)	$2.06 \times 10^{11} (N/\text{cm}^2)$	침목	중량	$250 (\text{kg}/\text{cm}^3)$
	단위중량(ρ)	$60.8 (\text{kg}/\text{cm})$		수평스프링계수(K_H)	$\infty (N/\text{cm})$
	단면 2차모멘트(I_{00})	$3.09 \times 10^{-5} (\text{cm}^4)$		수평감쇠계수(C_H)	0
	단면 2차모멘트(I_{00})	$5.13 \times 10^{-6} (\text{cm}^4)$		전단스프링계수(K_{00})	0
레일패드	수평스프링계수(K_{00})	$\infty (N/\text{cm})$		전단감쇠계수(C_{00})	0
	연직스프링계수(K_{00})	$8.17 \times 10^7 (N/\text{cm})$		배치 간격	60 (mm)
	수평감쇠계수(C_{00})	$8.17 \times 10^3 (N/\text{cm})$	자갈 도상	수평스프링계수(K_H)	$1.2 \times 10^4 (N/\text{cm})$
	연직감쇠계수(C_{00})	$8.17 \times 10^3 (N/\text{cm})$		연직스프링계수(K_{00})	$5.11 \times 10^7 (N/\text{cm})$
		수평감쇠계수(C_H)		$3.12 \times 10^4 (N/\text{cm})$	
		연직감쇠계수(C_{00})		$3.12 \times 10^4 (N/\text{cm})$	

레일과 침목사이에서 1차 현가장치 역할을 하는 레일패드는 10mm의 고무패드를 사용하고, 레일과 침목은 정착장치로 수평 및 수직방향으로는 완전히 고정되어 있는 것으로 모형화하여 무한강성을 사용하였다. 침목은 PC 콘크리트를 사용하는데 침목간의 하중분배를 고려하기 위하여 수평스프링은 가해지는 하중의 크기에 비하여 콘크리트 침목의 압축 강성이 상당히 크므로 무한강성을 적용하였다. 수직스프링의 강성은 0으로 하여 연직방향으로 가해지는 하중은 각 침목지점을 통하여 바로 밑에 있는 도상으로 전달되도록 하였다. 도상은 35cm 두께의 자갈도상을 사용하고

수평스프링계수는 케도상 하중이 없을 경우 축력을 계산할 때 사용하는 마찰계수 값인 120N/0 를 이용하였다. 이러한 케도의 물성값은 표 1에 정리하였다.

2.2 교량의 모형화

본 연구에서는 교량의 휨, 전단, 비틀림 모두를 파악할 수 있도록 보요소가 강결된 절점에 의하여 상호 연결된 것으로 근사화하는 3차원 뼈대요소모형을 사용하여, 그림 2(a)와 같은 40m 단순 PSC박스거더교의 고속철도교량을 그림 2(b)과 같이 모형화하였다.



(a) PSC박스거더교 단면도 (단위:mm) (b) PSC박스거더교에 대한 3차원 뼈대요소모형
그림 2 PSC박스거더교의 모형화

2.3 차량의 모형화

국내 경부고속철도에 도입되는 KTX의 정규편성은 기본적으로 동력차 2량, 동력객차 2량 및 객차 16량(키객차 포함)의 총 20량으로 구성되어 있다. 그러나 본 연구에서는 해석시간의 단축과 주행차량에 의한 케도특성을 분석하기 위하여 그림 3과 같이 KTX 20량 1편성중 가장 무거운 동력차만을 3차원으로 모형화하여 사용하였다.

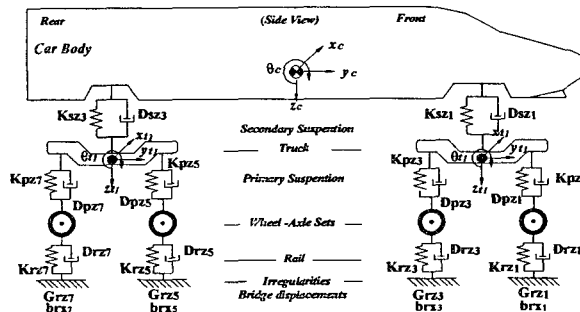


그림 3 동력차의 모형화

2.4 차륜과 레일 사이의 상호작용력

차륜과 레일의 접촉점에서의 상호 작용력(F)과 압축변위(Δ)는 Herzian 접촉강성을 이용하여 나타낼 수 있으며 아래의 식(1)과 같은 비선형 관계식이 된다.

$$F = \Delta_H \Delta^{3/2} \quad (1)$$

여기서, $\Delta_H (N^{-3/2})$ 는 재료의 특성과 차륜의 반경에 따른 상수이고, 변환함수를 이용해서 선형화시키면 Herzian 강성(Δ_H)은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_H = \frac{\Delta F}{\Delta \Delta} = \frac{3}{2} \Delta_H^{2/3} F^{1/3} \quad (2)$$

Jenkins의 연구에 의하면 Herzian 강성은 직경 10 인 차륜에 대해서 정적 축중이 7.50N인 경

우 새 차륜은 $1.4 \times 10^9 N/m$, 오래된 차륜은 $1.6 \times 10^9 N/m$ 인 것으로 나타났다. 본 연구에서는 새로 도입된 KTX 차량에 대하여 $1.4 \times 10^9 N/m$ 를 적용하였다.

차륜과 레일 사이의 상호작용력은 Herzian 상수와 차륜과 레일사이의 상대변위의 함수가 되며 아래의 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_H = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{E^2 R}{\pi}} \sqrt{\delta} \quad (3)$$

여기서, F_H 는 상호작용력, δ 는 Herzian 강성이고 u_{ti} 는 차륜과 레일 사이의 상대변위로 식(4)와 같다.

$$\delta = \delta_0 - \delta_1 - \delta_2 \quad (4)$$

여기서, δ_0 는 차륜의 변위, δ_1 은 레일의 변위, δ_2 는 레일의 노면 조도를 나타낸다.

3. 교량의 동적거동에 대한 궤도의 영향 분석

본 절에서는 KTX 동력차 주행시 궤도상수 변화에 따른 교량응답을 비교함으로써 궤도구조의 동적특성이 교량의 거동에 미치는 영향을 동적증폭계수를 이용하여 분석하였다.

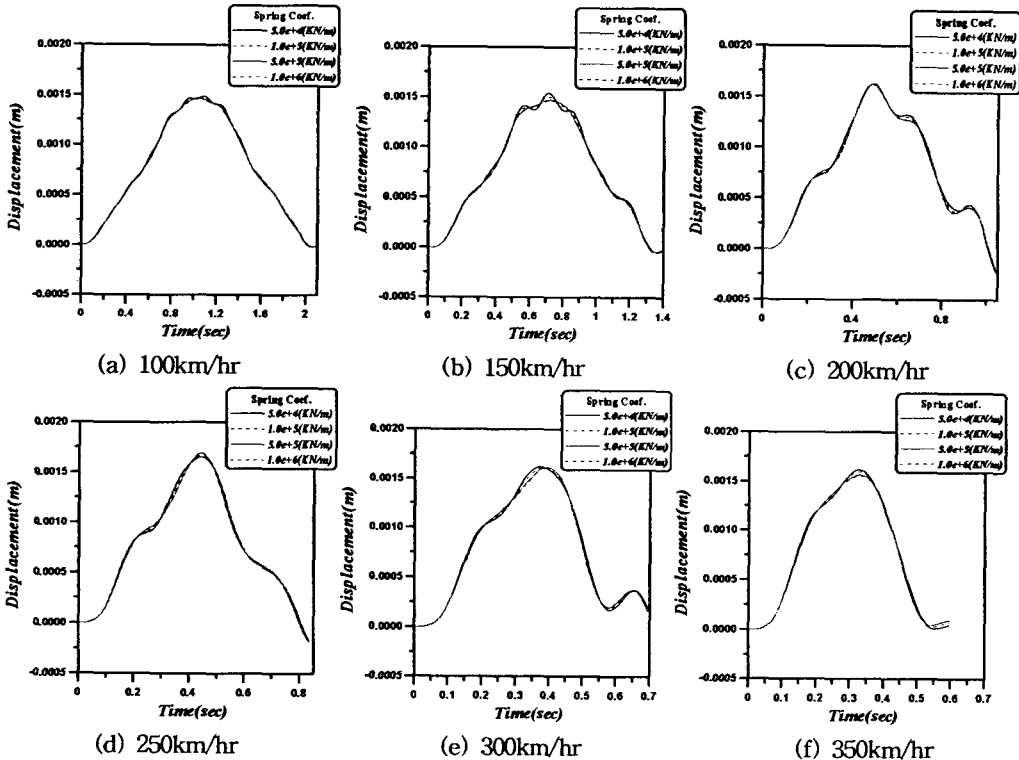


그림 4 레일패드 스프링상수 변화에 따른 교량 변위의 시간이력곡선

3.1 궤도의 특성에 따른 동적응답 분석

궤도특성 변화에 따라 궤도가 교량의 동적응답에 미치는 영향을 분석하기 위하여 레일패드와 도상의 스프링상수를 $5.0 \times 10^4 KN/m$ 에서 $1.0 \times 10^6 KN/m$ 까지 변화시켜서 해석하였다. 본 연구의 대상교량인 40m의 단순 PSC박스 거더교를 KTX 동력차 주행시 중앙지점에서의 동적증폭계수 변화를 비교·분석하였다. 또한 이동축중의 주기변화와 궤도의 동적특성의 상관관계로 발생하는 교

량응답의 영향을 분석하기 위해 차량의 주행속도를 100km/hr에서 350km/h까지 50km/hr간격으로 증가시키며 해석하였다.

그림 4는 레일패드의 스프링상수 변화에 따른 지간 중앙점 동적변위의 시간이력곡선을 속도별로 나타낸 것이며, 그림 5와 그림 6은 레일패드와 도상의 스프링상수 변화에 따른 동적증폭계수의 변화를 보여준다. 그림 4와 같이 속도에 따라 궤도의 동적특성 변화시 교량의 응답은 다양하게 변화함을 알 수 있다. 250km/hr의 경우 스프링상수의 값이 작아짐에 따라 동적증폭계수도 작아지는 것으로 나타났고, 150km/hr와 350km/hr에서는 스프링상수의 값이 작아짐에 따라 동적증폭계수가 커지는 것으로 나타났다.

또한 KTX 동력차의 대차 중심간 거리는 14m이며 이로 인해 발생하는 속도별 이동축중의 진동수는 차량이 100km/hr~350km/hr로 주행시 2Hz에서 7Hz까지 변하게 된다. 따라서 각 속도별 교량응답은 이러한 범위의 진동수를 가지는 이동축중이 궤도를 통해 전달되는 하중에 의한 것이다. 고속철도의 궤도특성값인 레일패드의 스프링상수가 $8.17 \times 10^4 \text{KN/M}$ 이고 도상의 스프링상수가 $5.11 \times 10^4 \text{KN/M}$ 일 때를 기준으로 궤도가 교량응답에 미치는 영향을 분석해 보면 150km/hr와 350km/hr로 주행시 이동축중의 진동수는 3Hz와 7Hz로 이 진동수에 대한 증가가 가장 크게 나타났으며 주행속도가 250km/hr일 때 이동축중의 진동수는 5Hz로 감소가 크게 나타났다. 여기서 250km/hr일 경우에는 교량의 고유진동수가 4.39Hz인 것을 감안했을 때 궤도를 간단하게 모형화한 경우 차량과 교량의 공진으로 변위가 크게 나오는 것과 달리 궤도를 고려했을 경우, 공진에 대한 영향이 상대적으로 감소되어 나타났는데 이것은 궤도를 통한 하중분산효과에 의한 것으로 판단된다.

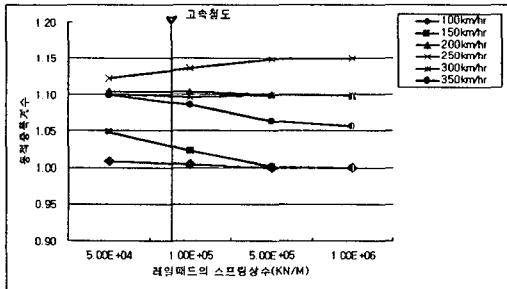


그림 5 레일패드 계수에 따른 동적증폭계수

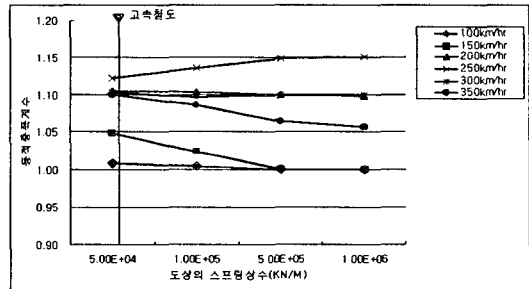


그림 6 도상 계수에 따른 동적증폭계수

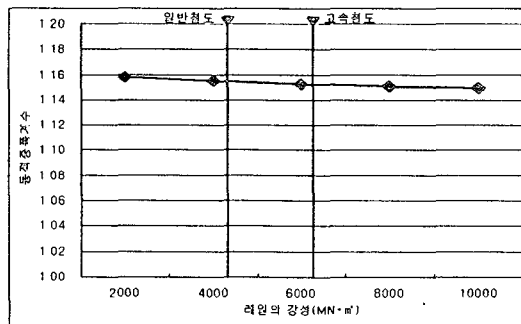


그림 7 레일 강성계수에 따른 동적증폭계수

3.2 주행시 레일의 휨에 의한 영향 분석

본 절에서는 차량주행시 침목을 지점으로 하는 레일의 휨에 의한 동적하중이 교량의 응답에 미치는 영향이 어느 정도인가를 분석하기 위하여 레일패드와 도상의 강성을 무한대로 두고 레일 휨

의 지배적 특성인 레일의 강성을 변화시켜가면서 대상교량에 대하여 KTX 동력차가 250km/hr로 주행시 지간 중앙지점에서 나타나는 동적증폭계수의 변화를 비교·분석하였다.

해석 결과 그림 7에 나타난 것과 같이 레일 강성이 작아짐에 따라 동적증폭계수가 증가하였다. 강성이 $10,000MN/m^2$ 인 경우 1.15로 궤도가 없는 경우와 거의 비슷하게 나타났고 고속철도궤도에서 사용된 60kg 레일의 강성인 $6,300MN/m^2$ 인 경우는 1.152로 $10,000MN/m^2$ 일 경우에 비해 0.17% 증가하였다. 이러한 결과로 미루어 볼 때 차량주행시 침묵사이에서 레일의 휨은 동적하중을 증가시켜 교량응답을 증가시키는 것으로 판단된다.

4. 결론

궤도구조를 3차원 이산지지 모형으로 모형화하여 열차 주행에 따른 교량응답을 본 연구에서 개발한 궤도모형을 이용하여 그 영향을 분석하였다. 이산지지 궤도모형과 KTX의 동력차를 이용하여 궤도특성에 따른 교량응답을 분석한 결과 속도의 변화에 따라 응답의 차이가 발생하는데, 이것은 열차주행속도에 따름 이동축중의 재하주기가 변하므로써, 이에 따라 궤도를 통해 교량에 전달되는 이동축중이 변화되기 때문으로 판단된다. 따라서 고속으로 주행하는 철도교 해석에 있어서 궤도의 특성을 고려함으로써 KTX 주행시 발생할 수 있는 공진효과를 정확히 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. Wiriychai, A., Chu, K. H., and Garg, V. K. (1982), "Bridge Impact due to Wheel and Track Irregularities", *Journal of Structural Engineering*, Vol.108, No.4, pp.648-666.
2. Jenkins, H. H., Stephenson, J. E., Clayton, G. A., Morland, G. W., and Lyon. D. (1974), "The Effect of Track and Vehicle Parameter on Wheel/Rail Vertical Dynamic Forces", *Railway Engineering Journal*.
3. Zhai, W. and Cai, Z.(1997), "Dynamic Interaction between a Lumped Mass Vehicle and a Discretely Supported Continuous Rail track", *Computer&Structures*, Vol.63, No.5, pp.987-997.
4. Yang, Y. B. and Yau, J. D.(1997), "Vehicle-bridge Interaction Element for Dynamic Analysis", *Journal of Structural Engineering*, Vol.123, No.11, pp.1512-1518.
5. Cheng, Y. S., Au, F. T. K., and Cheng, Y. K.(2001), "Vibration of Railway Bridges under a Moving Train by Using Bridge-track-vehicle Element", *Engineering Structures*, Vol.23, pp.1597-1606.