

# 궤도의 불규칙성을 고려한 철도교량의 동적응답분석

## Dynamics Responses of Railway Bridges for Track Irregularities

박 흥 석\*  
Park, Hung-Seok

이 용 선\*\*  
Lee, Yong-Sun

이 상 호\*\*\*  
Lee, Sang-Ho

김 상 호\*\*\*\*  
Kim, Sang-Hyo

### 요 지

본 연구에서는 경부고속철도의 주요 교량형식인 PSC 박스교량을 3차원 뼈대요소를 사용하여 모형화하였으며, 궤도불규칙성의 형상은 지수 스펙트럴 밀도함수를 사용하여 생성시켰다. 경부고속철도차량(K-TGV) 중 동력차는 17자유도의 3차원 주행열차로 모형화하였고, 이러한 교량, 궤도불규칙성 및 차량 모형을 이용하여 교량과 차량의 상호작용을 해석할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 동적해석을 위한 교량과 차량의 운동방정식은 Lagrange 방정식을 사용하여 유도하였으며, 운동방정식의 수치해석에는 Newmark- $\beta$ 법을 사용하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 동력차의 주행에 의한 교량의 시간이력곡선을 구하였으며, 궤도불규칙성의 영향을 분석하였다. 또한 도상의 유무에 따른 교량동적거동의 특성과 함께 열하중의 편심의 영향도 분석하였다.

핵심용어 : 철도교, 증폭계수, 궤도불규칙성, 동적응답, 도상

### Abstract

In this study, a dynamic analysis procedure to evaluate the response behaviors of the railway bridge under a moving train is developed. The power car of K-TGV is modeled as a 17 degree of freedom system, and 3-dimensional frame elements are used to model the prestressed concrete box bridge. Track irregularity is modeled as a random process by using the spectral density function. The equation of motion of the bridge and train system is derived from the Lagrangian equation, and Newmark- $\beta$  method is used for numerical integrations. The developed procedure is used to evaluate the amplification factors for various traveling conditions, track irregularity, ballast effect and train load eccentricity.

*Keywords* : railway bridge, amplification factor, track irregularity, dynamic response, ballast

## 1. 서 론

최근 경제성장과 국민생활 수준의 향상으로 인한 교통량의 비약적인 증가와 공업기술의 발달에

힘입어 열차의 중량화와 고속화가 이루어지고 있다. 또한 컴퓨터의 발달로 교량구조물의 최적설계로 인한 설계단면의 합리화로 인해 교량의 각 부재에 작용하는 응력이 설계응력에 접근하고 있

\* 정회원·한국건설기술연구원 구조연구실, 선임연구원

\*\* 연세대학교 토목공학과, 박사과정

\*\*\* 정회원·연세대학교 사회환경시스템공학부, 조교수

\*\*\*\* 정회원·연세대학교 사회환경시스템공학부, 교수

• 이 논문에 대한 토론을 1998년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 1999년 3월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

으며, 사용부재의 경량화 등의 요인들은 과거에 경험하지 못했던 과다 진동이 발생하게 되는 원인이 되고 있다. 철도교량은 도로교와 비교하여 사하중에 대한 활하중의 비가 크므로 도로교에서 보다 큰 진동이 발생할 수 있고, 교량의 노후나 손상으로 인한 궤도불규칙성의 악화 등으로 인해 교량의 설계시 고려한 설계하중에 가까운 과다하중효과가 빈번하게 발생하고 있다.

열차하중에 의한 영향을 평가하는 연구는 초기에는 단순히 주행하중<sup>1)</sup>이나 주행질량<sup>2)</sup>을 이용한 충격계수의 평가에 관한 것이 주류를 이루었으나, 근래에 들어 주행열차<sup>3)~7)</sup>에 의한 진동문제도 다양화되어 실무설계에서 진동문제가 보다 신중하게 다루어지고 있으며, 관련 연구에서도 차량의 진동을 유발할 수 있는 각 스프링장치 질량(sprung mass)의 자유도를 점점 증가시켜 진동에 대한 영향을 보다 엄밀하게 평가하고 있다. 열차의 진동특성(1, 2차 현가장치의 강성과 감쇠, 스프링장치 질량, 비스프링장치 질량), 열차의 주행속도, 궤도의 불규칙성 등으로 인해 철도교량에 발생하는 동적응답을 실제와 가깝게 분석하려면 철도교량의 동적응답에 영향을 주는 교량구조물의 특성(길이, 질량, 강성, 감쇠 등)을 합리적으로 모형화<sup>8),9)</sup>하고 적절한 해석방법의 개발이 필수적으로 이루어져야 한다.

국내에서 이성우, 서윤석 등<sup>10)</sup>은 등가절점하중을 이용하여 이동하중을 받는 구조물에 대하여 유한요소법을 이용하여 동적해석을 수행하였다. 안주옥<sup>11)</sup>은 열차하중을 이동하중으로 고려하여 동적해석을 실시하였으며, 류윤선<sup>12)</sup>은 열차를 하나의 질량으로 모형화하고 레일은 탄성지지된 무한보로 모형화하여 열차-레일간의 연성진동해석을 실시하였다. 유철수<sup>13)</sup>는 열차를 2차원으로 모형화하고 레일의 불규칙성을 고려하여 열차의 주행이 교량에 미치는 충격효과를 연구하였다. 양신추<sup>14)</sup>는 열차를 2차원으로 모형화하고 궤도의 불규칙성에 의해 유발되는 조도하중을 고려하여 동적하중이 하부구조물에 미치는 영향을 연구하였다.

본 연구에서는 경부고속철도차량(K-TGV) 중동력차를 17자유도의 3차원 주행열차로 모형화

하고, 이를 이용하여 경부고속철도 주요 교량형식인 PSC 박스교량의 동적응답이 다양한 조건하에서 어떠한 특성을 가지는지 분석하였다. 즉, 궤도불규칙성과 주행속도에 따른 교량의 증폭계수와 도상및 편심의 효과에 의한 교량의 증폭계수에 대해 분석하였다.

## 2. 구조물의 운동방정식과 해석방법

일반적으로 구조물의 운동방정식은 d'Alembert의 원리, 가상변위의 원리 또는 Hamilton<sup>5)</sup>의 원리를 이용하여 유도할 수 있다. 본 연구에서는 Hamilton의 원리를 사용하였는데, 이는 에너지성분을 이용하는 것은 다른 방법과 동일하지만 구조계에 작용하는 관성력 및 보존력을 직접 사용하지 않고 이들 힘에 의해 어떤 임의시간( $t_1, t_2$ ) 동안에 구조계에 발생하는 운동에너지와 위치에너지의 변화를 이용하는 것으로 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T-V)dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc}dt = 0 \quad (1)$$

여기서,  $T$ 는 시스템의 전체운동에너지,  $V$ 는 시스템의 전체 위치에너지,  $W_{nc}$ 는 감쇠력과 임의의 외력을 포함하는 시스템에 작용하는 비보존력(nonconservative external forces),  $\delta$ 는 정해진 시간간격 동안 행해진 변분,  $t_1, t_2$ 는 시스템의 형상을 나타내는 시간이다. 식(1)을 일반화된 좌표  $q$ 에 의해 나타내면 다음과 같다.

$$\delta T = \sum_{i=1}^n \frac{\partial T}{\partial q_i} \delta q_i + \sum_{i=1}^n \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \delta \dot{q}_i \quad (2a)$$

$$\delta V = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial q_i} \delta q_i \quad (2b)$$

$$\delta W_{nc} = \sum_{i=1}^n P_{exi} \delta q_i - \sum_{i=1}^n C_i q_i \delta \dot{q}_i \quad (2c)$$

여기서,  $P_{ex}$ 는 외력,  $C_i$ 는 감쇠계수를 나타낸다. 식(2)를 식(1)에 대입하여 정리하면 다음의 식

(3)과 같은 Lagrange's 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right] - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} + (C_i \dot{q}_i) = P_{ex_i} \quad (3)$$

식(3)에서 얻어진 운동방정식을 수치적으로 해석하는 방법에는 직접적분법(direct integration method)과 모우드 중첩법(mode superposition method) 등이 있다. 본 연구에서는 차량과 교량의 운동방정식에 대한 해석방법으로 직접적분법의 하나인 Newmark β법을 사용하였는데, Newmark β법에 의한 수치적 해석에 사용된 식은 다음과 같다.

$$a_{n+1} = \frac{1}{\beta \Delta t^2} (x_{n+1} - x_n) - \frac{1}{\beta \Delta t} v_n - \left(1 - \frac{1}{2\beta}\right) a_n \quad (4a)$$

$$v_{n+1} = \frac{\gamma}{\beta \Delta t} (x_{n+1} - x_n) - \left(\frac{\gamma}{\beta} - 1\right) v_n - \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right) \Delta t a_n \quad (4b)$$

여기서,  $x_n$ ,  $v_n$ 과  $a_n$ 은  $n$ 번째 시간단계에서 각각 위치절점에서의 변위, 속도 및 가속도를 나타내는 벡터이며  $\beta$ 와  $\gamma$ 는 적분특성을 결정해 주는 상수이다. 본 연구에서는  $\beta = \frac{1}{4}$ ,  $\gamma = \frac{1}{2}$ 을 사용하는 평균가속도법(average acceleration method)을 이용하여 동적해석을 수행하였다.<sup>16), 17)</sup>

### 3. 궤도불규칙성의 모형화

궤도불규칙성<sup>18), 19)</sup>의 모형화를 위한 기하학적인 형태는 그림 1에서와 같이 4가지의 매개변수, 즉 두 개의 레일 횡축 방향의 평균위치를 나타내는 줄(alignment,  $\xi_a$ ), 두 레일간의 폭을 나타내는 궤간(gauge,  $2\xi_g$ ), 두 레일간의 높이 차이를 나타내는 수평(cross-level,  $2\xi_c$ ), 두 레일의 높이 평균을 나타내는 궤도면(vertical profile,  $\xi_v$ ) 등

으로 표시된다. 이것을 식으로 표시하면 식(5) 및 식(6)과 같다.

$$gauge(2\xi_g) = (x_1 - x_2) \quad (5a)$$

$$cross\ level(2\xi_c) = (z_1 - z_2) \quad (5b)$$

$$alignment(\xi_a) = (x_1 + x_2)/2 \quad (5c)$$

$$vertical\ profile(\xi_v) = (z_1 + z_2)/2 \quad (5d)$$

$$z_1 = \xi_v + \xi_c \quad z_2 = \xi_v - \xi_c \quad (6a)$$

$$x_1 = \xi_a + \xi_g, \quad x_2 = \xi_a - \xi_g \quad (6b)$$

여기서,  $z_1$ ,  $z_2$ 는 좌우측 레일의 수직방향 좌표,  $x_1$ ,  $x_2$ 는 좌우측 레일의 횡방향 좌표이다.

궤도의 불규칙성을 표현하기 위하여 Hamid가 제안한 PSD<sup>20)</sup>(power spectral density) 함수는 식(7) 및 식(8)과 같다.

① 궤도면(vertical profile)과 줄(alignment)에 대해 :

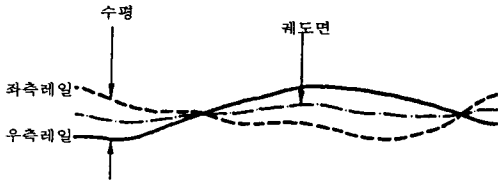
$$s(\phi) = \frac{A\phi_2^2(\phi^2 + \phi_1^2)}{\phi^4(\phi^2 + \phi_2^2)} \quad (7)$$

② 수평(cross-level)과 궤간(gauge)에 대해 :

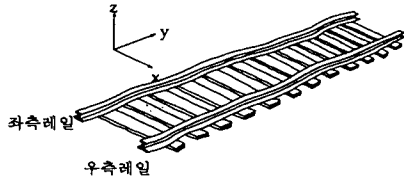
$$s(\phi) = \frac{A\phi_2^2}{(\phi^2 + \phi_1^2)(\phi^2 + \phi_2^2)} \quad (8)$$

여기서,  $s(\phi)$ 는 지수 스펙트럴 밀도( $m^2/cycle/m$ ),  $\phi$ 는 파수( $cycle/m$ ),  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ 는 각각 굴절(break) 파수( $cycle/m$ ),  $A$ 는 조도 매개변수( $m^2/cycle/m$ )이다.

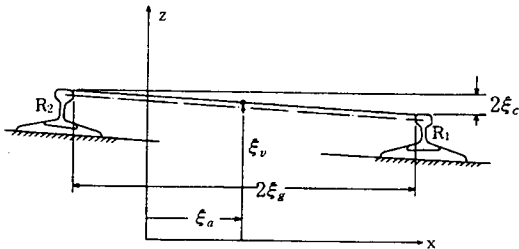
미국 연방철도국(FRA, Federal Railroad Administration)에서 제정한 궤도등급 1~6의  $A$ ,  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ 값이 스펙트럴 밀도함수별로 표 1과 표 2에 정리되어 있으며, 6등급이 가장 양호한 상태이고 1등급이 가장 불량한 상태를 나타낸다. 궤



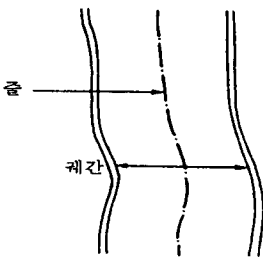
(a) 수평과 궤도면



(b) 레일의 일반형상



(c) 궤도불규칙성의 좌표정의



(d) 줄과 궤간

그림 1 궤도불규칙성에 대한 정의

도불규칙성은 모의발생기법을 이용하여 식 (9)를 사용하여 생성시켰다.

$$X(s) = \sum_{n=1}^N R_n \cos(2\pi\phi_n s - \theta_n) \quad (9)$$

표 1 궤도면과 줄의 PSD 함수의 계수값(식7)

궤도 불규칙성	매개 변수	궤도등급					
		1	2	3	4	5	6
궤도면 (vertical profile)	A	15.5	8.85	4.92	2.75	1.57	0.98
	$\phi_1$	23.3					
	$\phi_2$	13.1					
줄 (alignment)	A	9.83	5.51	3.15	1.77	0.98	0.59
	$\phi_1$	32.8					
	$\phi_2$	18.4					

표 2 궤간과 수평의 PSD 함수의 계수값(식8)

궤도 불규칙성	매개 변수	궤도등급					
		1	2	3	4	5	6
궤간 (gauge)	A	9.83	5.51	3.15	1.77	0.98	0.59
	$\phi_1$	29.2					
	$\phi_2$	23.3					
수평 (cross level)	A	4.52	3.15	2.16	1.38	0.98	0.59
	$\phi_1$	23.3					
	$\phi_2$	13.1					

※ 단위 : A ( $10^4 m^3$ ),  $\phi_1$  ( $10^3 m^{-1}$ ),  $\phi_2$  ( $10^2 m^{-1}$ )

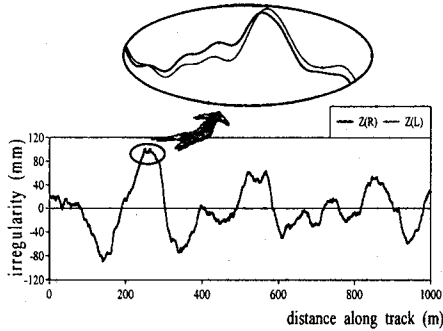
여기서,  $R_n = \sqrt{4S(\phi_n) \cdot \Delta\phi}$ ,  $\theta_n$ 는 위상각 ( $0, 2\pi$ )이다. 파수  $\phi_n$ 은 0.0033~0.3280 cycle/m 까지의 범위의 값을 가지며 0.0033 cycle/m 보다 작거나 0.3280 cycle/m 보다 큰 범위에 대해서는 고려하지 않았다.

발생방법을 살펴보면 식 (7)을 이용하여 궤도면 ( $\xi$ )을 발생시키고 식 (8)을 이용하여 수평 ( $2\xi_c$ )을 발생시킨 후에, 식 (6)과 같이 좌측은  $\xi_v + \xi_c$ , 우측은  $\xi_v - \xi_c$ 로 산정하여 수직좌표를 발생시켰다. FRA 1등급과 6등급에 대해 좌우레일의 수직좌표를 구간 1,000m에 대해 발생시켜 그림 2의 (a), (b)에 각각 나타내었다. 6등급의 궤도불규칙성이 1등급에 비해 매우 좋음을 알 수 있다.

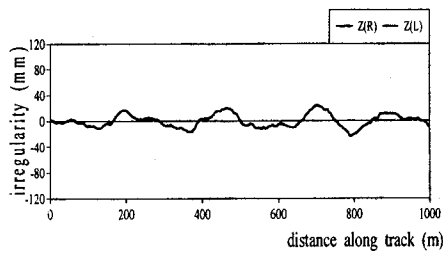
#### 4. 해석모형

##### 4.1 교량모형

본 연구의 대상교량은 40m PSC 박스 단순교이고, 1실 박스교이며 복선을 갖는 교량이다. 이 교량을 6개의 자유도를 갖는 십자형 공간뼈대요



(a) 궤도등급 1



(b) 궤도등급 6

그림 2 궤도불규칙성의 발생예(수직좌표)

소를 사용하여 모형화하였고, 궤도의 단위중량은  $1.17t^3$ 이다. 교량의 감쇠비는 5%를 사용하였고, 대상교량의 단면제원은 그림 3에 나타내었다.

#### 4.2 차량모형

과거 대부분의 연구에서는 차량의 수직운동과 피칭운동만을 고려한 2차원 차량모형을 사용하였으나, 차량의 진동이 구조물에 미치는 영향을 좀더 실제적으로 고려하기 위하여 3차원 차량모형을 사용하게 되었다. 차량의 3차원 모형을 기존 2차원 모형에 비하여 차량의 피칭운동뿐만 아니라 차량의 롤링운동까지 고려할 수 있으며, 작용하는 차륜하중의 공간적 분배를 보다 실제상황에 근사하게 나타낼 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 1개의 차체, 2개의 대차 및 4개의 윤축장치로 구성된 K-TGV 동력차를 그림 4와 같이 3차원으로 모형화하였으며, 일반적인 방법에 따라 질량을 현가장치 상질량과 현가장치 하

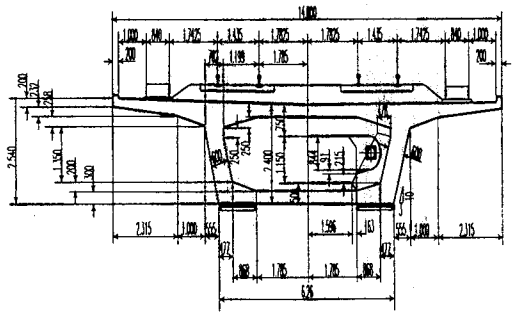
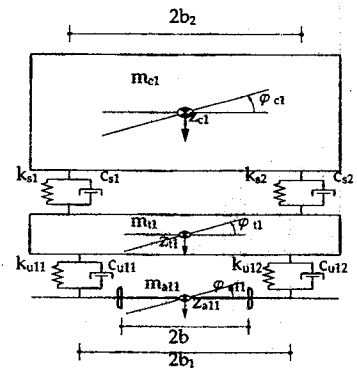
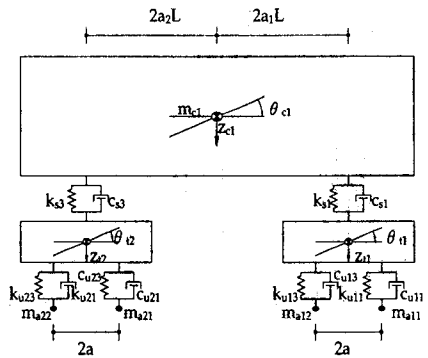


그림 3 PSC 박스교의 단면제원 (단위 : mm)



(a) 정면도



(b) 측면도

그림 4 K-TGV 동력차의 모형화

질량으로 구분하였다. K-TGV 동력차의 모형화에서 차체 및 대차는 수직변위 ( $z$ ), 피칭 ( $\theta$ ), 롤링

( $\phi$ )의 3개의 자유도를 가지며, 4개의 윤축장치는 각각 수직변위와 롤링의 2개 자유도를 갖는 것으로 모형화하였다. 따라서 K-TGV 동력차의 전체 자유도는 차체 3개, 대차 6개, 윤축장치 8개로 모두 17자유도이다. 본 연구에서 사용된 K-TGV 동력차에 대한 제원을 표 3 및 표 4에 나타내었으며, 차량의 모형화를 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 1) 모든 질량체는 강체이다.
- 2) 차체 및 대차는 수직운동, 피칭운동, 롤링운동을 하며, 각각의 무게중심에 대하여 발생한다.
- 3) 윤축장치는 수직운동과 롤링운동을 하며, 롤링운동은 윤축의 무게중심에 대하여 일어난다.
- 4) 교량위에서 열차는 일정한 속도로 주행한다.
- 5) 바퀴는 레일과 하나의 점에서 접촉한다.
- 6) 현가장치의 스프링상수와 감쇠는 선형이며, 감쇠력은 속도에 비례한다.

### 5. 주행열차에 의한 교량의 동적응답분석

#### 5.1 교량의 정·동적거동 분석

K-TGV 동력차를 사용하여 PSC 박스교에 대한 정·동적해석결과를 분석하여 개발된 프로그램

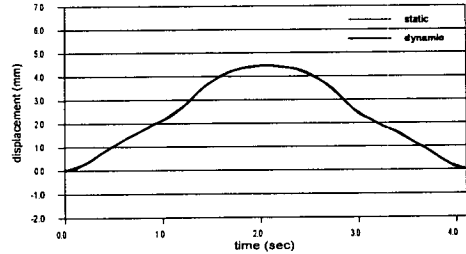
표 3 TGV 동력차 제원표

동력차 전후 대차간 중심거리	14.0m
대차내 전후축간 거리	3.0m
평균 정적 축하중	17t
차체 중량	54.916t
대차 중량	2.446t
윤축장치 중량	2.048t

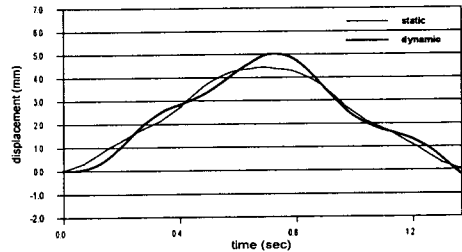
표 4 TGV 동력차의 스프링계수와 감쇠계수

특성값	스프링계수 (MN/m)	감쇠계수 (MNs/m)
기 호	$K_s$	$C_s$
2차 현가장치	1.268	0.02
1차 현가장치	1.225	0.01

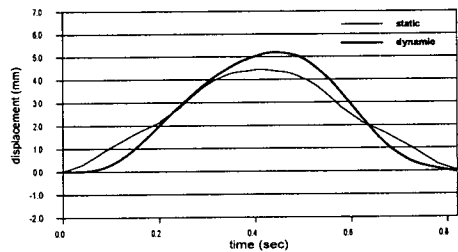
램의 타당성을 검토하였다. 동적해석시 시간적분 간격은 0.0002초로 선정하였다. 그림 5와 6에는 레도불규칙성이 없을 때 열차주행속도 증가에 따



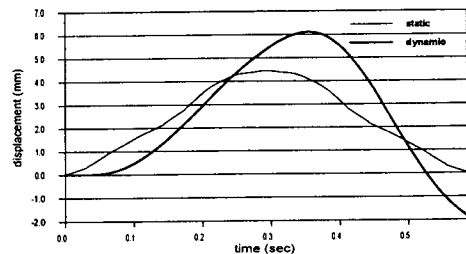
(a) 주행속도 50km/h



(b) 주행속도 150km/h

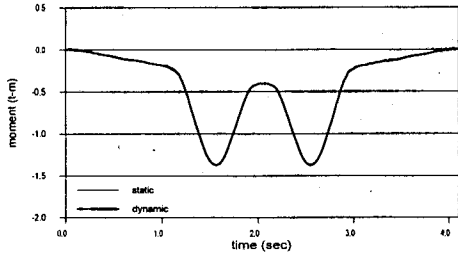


(c) 주행속도 250km/h

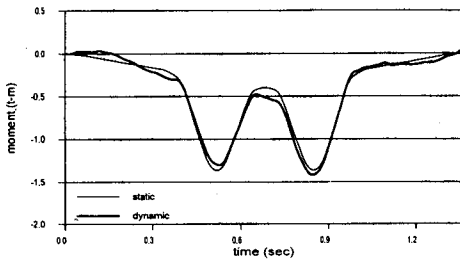


(d) 주행속도 350km/h

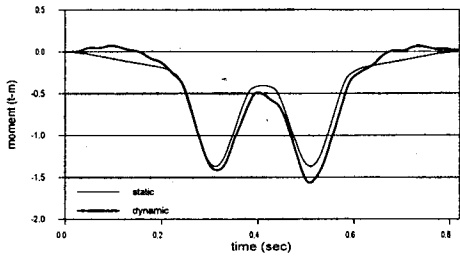
그림 5 주행속도변화에 따른 처짐 이력곡선



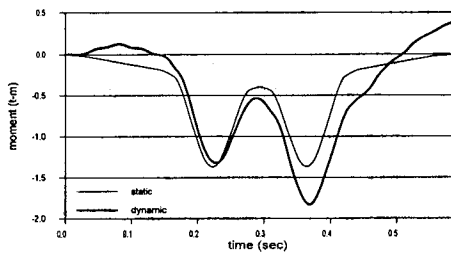
(a) 주행속도 50km/h



(b) 주행속도 150km/h



(c) 주행속도 250km/h



(d) 주행속도 350km/h

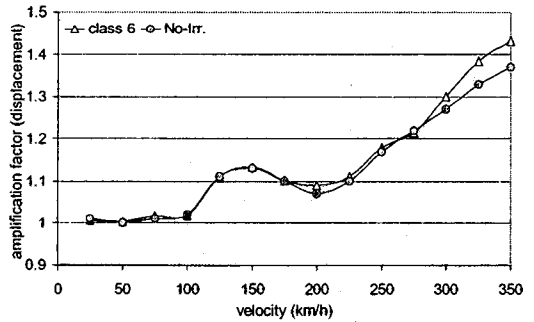
그림 6 주행속도변화에 따른 휨모멘트 이력곡선

은 PSC 박스교의 시간중양점에서의 처짐과 휨모멘트에 대한 시간이력곡선을 각각 나타내었다.

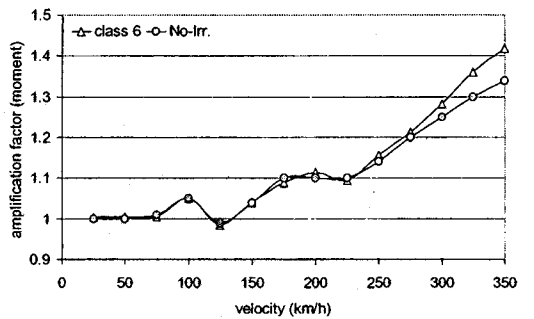
그림에서 가는 실선은 정적해석결과이고, 굵은 실선은 동적해석결과를 나타낸다. 분석결과 저속에서는 동적거동이 정적거동과 거의 같음을 알 수 있으며, 속도가 증가할수록 동적거동의 진폭이 증가하는 것으로 나타났다. 일반적으로 동적 최대처짐이 정적최대발생지점을 지나서 나타나는 것을 볼 수 있고, 처짐에 대한 증폭계수가 휨모멘트에 의한 증폭계수보다 다소 크게 나타남을 알 수 있다.

5.2 궤도불규칙성에 의한 교량의 동적거동

궤도의 불규칙한 형상은 열차주행에 의한 교량의 동적응답에 영향을 주는 중요한 인자이다. 따라서 본 절에서는 궤도불규칙성과 교량의 동적응답과의 관계를 분석하였다. 궤도불규칙성에 따른 증폭계수의 변화를 검토하기 위해 FRA 궤도등급중 가장 상태가 좋은 6등급과 불규칙성이 없는 완벽한 궤도에 대해 주행속도에 따른 모의분석을



(a) 처짐에 대한 증폭계수



(b) 휨모멘트에 대한 증폭계수

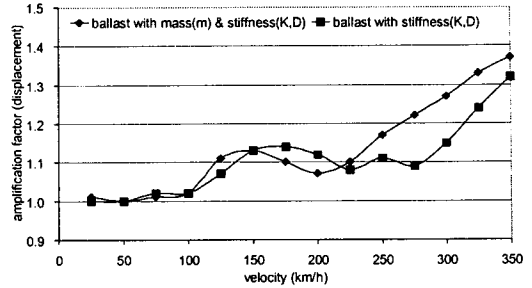
그림 7 궤도형상에 따른 증폭계수의 변화

실시하여 그림 7에 나타내었다. 그림에 나타난 증폭계수는 모의분석 5회의 평균값이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 6등급 궤도와 불규칙성이 없는 궤도의 주행속도별 증폭계수는 비슷한 경향을 나타내고, 주행속도의 증가에 따라 증폭계수가 증가하는 경향이다. 주행속도가 낮을 경우에 2가지 궤도의 증폭계수는 거의 같은 값을 나타내지만, 주행속도가 높아질수록 증폭계수의 차이가 커지고 있음을 알 수 있다. 즉, 저속주행 시보다 고속주행시 궤도의 불규칙성이 교량의 동적거동에 영향이 크고, 따라서 경부고속철도교량과 같이 열차가 고속으로 주행할 경우 궤도불규칙성을 고려한 교량의 동적해석이 요구된다.

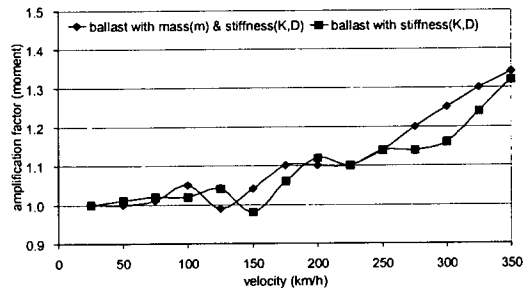
### 5.3 도상의 유무에 의한 교량의 동적거동

그림 3에 나타낸 40m PSC 박스교만의 자중은 약 1,028ton이다. 그러나 도상의 효과를 고려하기 위해 도상의 무게를 교량모형에 반영시키면 290ton이 증가된 1,318ton으로 교량자체 무게의 30% 가량이 증가된다. 이러한 원인으로 도상의 질량이 모형화에 포함되지 않은 무도상교량의 고유진동수는 2.6680Hz 이지만, 도상의 질량이 반영된 유도상교량의 고유진동수는 2.3647Hz 로 약 9% 정도 고유진동수가 낮아진다. 즉, 무도상교량과 유도상교량은 교량모형 자체가 달라져, 교량의 동적거동에 대한 직접적인 비교를 할 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 도상의 효과를 알아보기 위해 도상의 강성효과만이 고려된 경우, 강성과 질량효과가 둘 다 고려된 경우를 무도상교량과 함께 비교하였다. 도상의 강성효과는 도상의 스프링과 감쇠를 레일의 스프링과 감쇠에 연결시켜 반영하였으며, 도상의 질량효과는 교량의 질량에 추가시켜 반영하였다. 이러한 3가지 경우에 대해 K-TGV 동력차가 불규칙성이 없는 레일을 가진 40m PSC 박스 단순교 위를 일정한 속도로 주행할 때 지간중양절에서의 각 속도별 증폭계수변화를 그림 8 및 그림 9에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 주행속도가 증가되면 증폭계수는 증가하는 경향을 나타내고 있다.

그림 8은 유도상교량을 강성효과만 고려한 경우와 질량효과까지 고려한 경우의 주행속도별 증폭계수를 나타낸 것이다. 주행속도가 비교적 저



(a) 처짐에 대한 증폭계수



(b) 휨모멘트에 대한 증폭계수

그림 8 유도상교량의 증폭계수의 변화

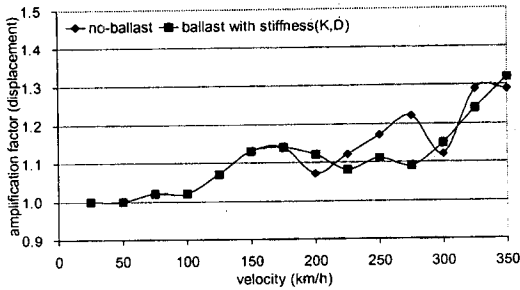
속일 때에는 강성효과만을 고려한 경우와 질량효과까지 고려한 경우가 비슷한 값을 나타내고 있지만, 주행속도가 비교적 고속일 경우에는 질량효과까지 고려한 경우가 강성효과만 고려한 경우보다 증폭계수가 커짐을 알 수 있다. 또한 처짐에 대한 증폭계수가 휨모멘트에 대한 증폭계수보다 약간 높게 나타남을 알 수 있다.

그림 9에는 무도상교량과 강성효과만을 고려한 유도상교량을 비교한 것이다. 유도상교량인 경우 주행속도가 높아지면 증폭계수가 점진적으로 증가되는 경향을 나타내지만, 무도상교량은 유도상교량보다 증폭계수의 변화폭이 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 도상은 열차주행시의 충격력을 완화시켜 주고 하중을 분산시켜, 보다 교량을 안정적이게 만드는 것을 알 수 있다.

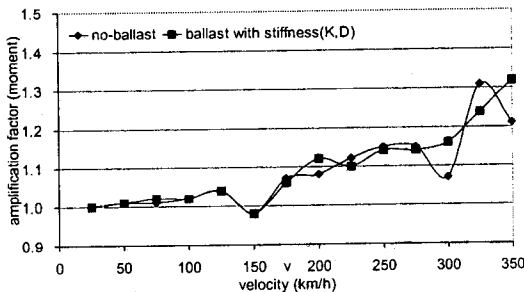
### 5.4 열차하중의 편심에 의한 교량의 동적거동

기존의 대부분의 연구에서 열차의 무게중심은 항상 횡방향으로 정중앙에 위치한다고 가정하고 수행되어 왔다. 그러나 차량의 부속기관들의 배





(a) 처짐에 대한 증폭계수



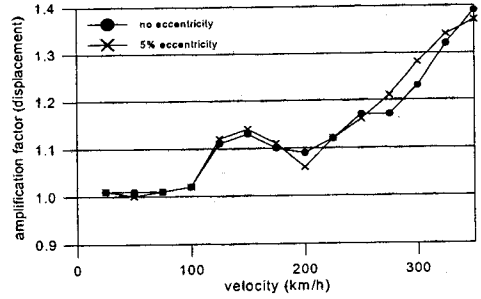
(b) 휨모멘트에 대한 증폭계수

그림 9 무도상교량과 강성효과만을 고려한 유도상교량의 증폭계수의 변화

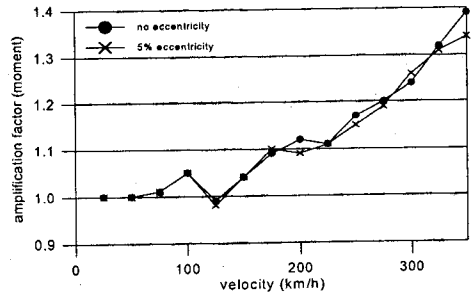
치, 승객 또는 화물의 재하위치 등 여러 가지 요인에 의해 무게중심이 정중앙에 오지 않을 수 있다. 그림 10에는 열차하중의 무게중심이 횡방향으로 정중앙에 있을 때와 5%의 편심을 가지고 작용될 때 지간중앙점에서의 증폭계수변화를 나타내었다. 증폭계수의 변화는 비슷한 경향을 나타내지만, 편심 유무에 따라 증폭계수가 약간의 차이를 보이고 있으며, 처짐에 대한 증폭계수의 경우 대체적으로 편심이 있는 경우가 큰 값을 나타내는 경향이다. 또한 경부고속철도 최고운영속도인 300km/h 부근에서 처짐에 의한 증폭계수는 뚜렷한 증가를 나타내고 있어, 편심이 발생할 경우에 대한 고려도 필요할 것으로 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 경부고속철도 교량형식인 PSC 박스교와 K-TGV 동력차를 3차원으로 모형화하였고, 지수 스펙트럴 밀도함수를 이용하여 궤도



(a) 처짐에 대한 증폭계수



(b) 휨모멘트에 대한 증폭계수

그림 10 열차하중의 횡방향 편심에 의한 교량의 증폭계수변화

불규칙성을 생성시켰다. 이러한 교량-궤도-차량 모형을 이용하여 K-TGV 동력차의 다양한 주행 조건에 따른 교량의 동적응답에 대한 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 주행열차하중에 의한 교량의 동적거동은 교량의 질량과 강성 등에 의해 결정되는 동적특성과 열차의 주행속도 및 동적특성에 따라 민감하게 변화하는 것으로 분석되었다. 따라서 교량 설계시 이러한 문제가 합리적으로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

2) 궤도불규칙성에 따른 교량의 동적거동은 불규칙성이 없을 경우와 비교해 경향은 비슷하지만, 주행속도가 증가할수록 불규칙성의 영향이 커지는 것으로 분석되었다.

3) 철도교에는 도로교와 달리 충격하중을 완화시키고 하중을 분산시켜 주는 도상이 있는 것이 특징이다. 이러한 도상효과를 분석하기 위해 유도상교량과 무도상교량을 감쇠효과를 비롯하여 질량효과와 강성효과 측면에서 비교하였다. 분

석결과 도상은 교량의 동적거동을 상당히 안정시켜 주나 증폭계수는 다소 증가하는 것으로 나타났다.

4) 차량하중의 편심에 의한 효과는 무게중심이 횡방향으로 정중앙에 있을 때와 5%가 편심되었을 때를 비교하였다. 분석결과 특정한 고속주행 속도대에서 증폭계수가 상당히 커지는 것으로 분석되어, 고속철도교량에서는 이에 대한 고려가 필요한 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 논문은 건설교통부, 통상산업부 및 과학기술처가 지원하는 선도기술개발사업중 한국건설기술연구원이 주관하는 고속전철 교량기술 개발사업의 일환으로 이루어진 것으로, 이에 감사의 뜻을 표합니다.

### 참고 문헌

1. Fr ba, L., *Dynamics of Railway Bridges*, Thomas Telford, London, 1996.
2. Yang, Y. B. and Yau, J. D., "Vehicle-Bridge Interaction Element for Dynamic Analysis", *J. of Structural Engineering*, Vol.123, No.11, 1997, pp.1512~1518.
3. Chu, K. H., Garg, V. K., and Dhar, C. L., "Railway-Bridge Impact : Simplified Train and Bridge Model", *J. of Structural Engineering*, Vol.105, No.ST9, 1979, pp.1823~1844.
4. Wiriyachai, A., Chu, K. H., and Garg, V. K., "Impact Study by Various Bridge Models", *J. of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.10, 1982, pp.31~45.
5. Chu, K. H., Garg, V. K., and Bhatti, M. H. "Impact in Truss Bridge due to Freight Trains", *J. of Engineering Mechanics*, Vol. 111, No.2, Feb., 1985., pp.159~174.
6. Chu, K. H., Garg, V. K., and Wang, T. L., "Impact in Railway Prestressed Concrete Bridges", *J. of Structural Engineering*, Vol. 112, No.5, 1986, pp.1036~1051.
7. Wang, T. L., Garg, V. K., and Chu, K. H., "Railway Bridge Vehicle Interaction Studies

- with New Vehicle Model", *J. of Structural Engineering*, Vol.117, No.7, 1991, pp.2099~2116.
8. Hambly, E. C., *Bridge Deck Behaviour*, 2nd ed., E & FN SPON, London, 1991.
9. Weaver, W. and Gere, J. M., *Matrix Analysis of Framed Structures*, 3th ed., D. Van Nostrand Company, New York, 1990.
10. 이성우, 서윤석, "이동하중을 받는 구조물의 동적 유한요소 해석", *대한토목학회 학술발표회 논문집*, 1993.10, pp.284~287.
11. 안주옥, 박상준, "열차하중을 받는 트러스교의 동적하중모형 연구", *한국전산구조공학회 학술발표회 논문집*, 1996, pp.111~118.
12. 류윤선, 조희복, 김사수, "접촉 강성을 고려한 차량-레일계의 연성 진동 해석", *한국소음진동 공학회지*, 제7권 제6호, 1997, pp.953~958.
13. 유철수, 강영종, 김종현, 권재현, "고속철도 차량의 주행이 교량에 미치는 충격 효과", *대한토목학회 학술발표회 논문집*, 1996.11, pp.213~216
14. 양신추, 이승원, "고속열차 주행시 교량과 인접한 구조물에서 발생하는 진동해석", *대한토목학회 논문집*, 제17권 제1-3호, 1997.5, pp.433~445.
15. Clough, R. W. and Penzien, J., *Dynamics of Structures*, 2nd ed., Mcgraw-Hill, New York, 1992.
16. Bathe, K. J., *Finite Element Procedures*, Prentice-Hall, New Jersey, 1996.
17. Doyle, J. F., *Static and Dynamic Analysis of Structures*, Kluwer Academic Publishers, 1991.
18. Nigam, N. C. and Narayanan, S., *Applications of Random Vibrations*, Narosa Publishing House, New Delhi, 1994,
19. Garivaltis, D. S., Garg, V. K., and D'Souza, A. F. "Dynamic Response of a Six-axle Locomotive to Random Irregularities", *Vehicle System Dynamics*, Vol.9, No.3, 1980, pp.117~147.
20. Garg, V. K. and Dukkipati, R. V., *Dynamics of Railway Vehicle Systems*, Academic Press, Don Mills, 1984.

(접수일자 : 1998. 7. 12)