

# 고속철도 차량의 주행이 교량에 미치는 충격효과

## The Dynamic Effect of Highspeed Trains on Railway Bridges

유 철 수<sup>1)</sup> · 강 영 종<sup>2)</sup> · 김 종 현<sup>3)</sup> · 권 재 현<sup>4)</sup>  
Yu, Chul Soo Kang, Young Jong Kim, Jong Heun Kweon, Jae Hyun

요 약 : 고속철도는 고속으로 이동하는 일련의 이동질량효과를 일으켜 교량에 동적인 처짐을 일으킨다. 이러한 이동질량의 동적효과는 동일한 크기의 정적하중이 작용했을때에 비해 교량내부에 큰 응력을 발생시키고, 이때 발생하는 상반응력은 피로의 문제를 야기시켜 교량의 수명을 단축시킬수 있으며 과도한 응력은 교량의 안전에도 영향을 줄 수 있다. 그러나 지금까지 교량의 설계는 정적인 개념으로 되어왔는데, 예를 들면 동적인 영향을 고려하는데 단순히 정적하중에다 충격계수를 곱해준다. 그러나 충격계수의 고려는 단순하므로 동적인 거동에 영향을 미치는 모든 요소를 다 고려할 수는 없다. 따라서 이 연구에서는 고속철도의 이동질량 모형을 연구하여 이를 컴퓨터 모의 기법을 통해 해석하여 교량에 미치는 복잡한 동적거동특성을 제시하였다.

ABSTRACT : The highspeed railway bridge which support continuous and high moving mass evaluate the dynamic state and make the displacement of the bridge makes more or less, but up to this time the bridges are designed by the static design concept, for example when we design bridge we use impact factor, which only times the static load makes dynamic load. But because it simples, it can't express all of the effects. And so, in this report we study the modeling method of the moving mass and the dynamic factor.

핵 심 용 어 : 이동질량, 충격계수, 증폭계수, 국부침투, PSD함수

KEYWORDS : moving mass, impact factor, amplification factor, power spectral density function

### 1. 서 론

철도교의 동적 응력에 영향을 끼치는 가장 중요한 요소는 교량구조물의 진동수 특성치와 차량

---

1) 정회원 고려대학교 토목환경학과 교수  
2) 정회원 고려대학교 토목환경학과 부교수  
3) 정회원 고려대학교 토목환경학과 대학원 박사과정  
4) 방재과학기술연구센터 연구원

---

본 논문에 대한 토의를 1998년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

의 진동수 특성치, 그리고 차량과 교량의 댐핑값, 차량의 속도, 궤도의 불규칙성 등등이 있다.

본 연구는 연행의 이동질량군이 교량의 동적거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 첫째 차량 모형, 대차 및 현가장치의 특성, 궤도의 불규칙성, 궤도의 조도, 제동하중의 영향으로 인한 교량의 동적거동에 대한 문헌을 검토하여 차량과 교량의 모형을 정하고 둘째 차량에 대한 교량의 동적 반응을 컴퓨터 모의 기법으로 해석하여 교량의 동적 반응을 분석하여 그 결과를 시방규정과 비교 검토하였다.

## 2. 교량 및 차량의 모형과 동역학적 해석 기법

### 2.1 차량 거동특성

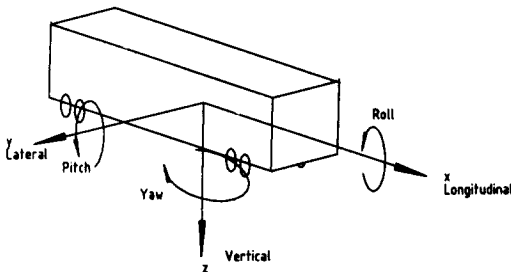


그림 1. 차량의 자유도

일반적으로 차량 혹은 기관차에 대한 동적연구에 사용되는 수학적인 모델링을 만드는데 차량의 시스템은 강체로 간주된다. 한개의 강체는 6개의 자유도를 가지는데, 각각의 6개의 자유도는 서로 couple되어 couple된 2차 상미분 방정식을 만들어 낸다. 따라서 시스템은 6N개의 미분방정식으로 나타내어지는데 여기서 N은 시스템의 성분들의 갯수이다.

이 연구에서는 차량과 교량에 대한 수직방향 거동과 휨모멘트에 한정해서 거동의 방정식을 시간에 따라 수치적으로 적분하는 시간 이력 해

석 수행을 통해 교량의 동적거동을 나타내고 있다.

### 2.2 차량의 제원

표 1. 기관차의 제원

본체	길이	22,607mm
	차폭	2,184mm
	높이	4,100mm
	질량중심고	2,041mm
	대차의 대수	2대
대차	대차중심간 거리	14,000mm
	앞뒤바퀴의 중심간 거리	3,000mm
	대차중심고	523mm
	대차의 질량중심위치	1501mm

표 2. 동력객차의 제원

본체	길이	21,845mm
	차폭	2,904mm
	높이	3,484mm
	질량중심고	1,711mm
	대차의대수	2대
대차	대차중심간 거리	18,700mm
	앞뒤바퀴의 중심간 거리	3,000mm
	대차중심고	543mm
	대차의 질량중심위치	1,500mm

표 3. 객차의 제원

본체	길이	18,700mm
	차폭	2,904mm
	높이	3,484mm
	질량중심고	평균1,613mm
	대차의 대수	17개/편성
대차	대차중심간 거리	18,700mm
	앞뒤바퀴의 중심간 거리	3,000mm
	대차중심고	581mm
	대차의 질량중심위치	1,500mm

표 4. TGV K의 동특성

구분	단위	기관차	동력 객차	객차	
본체	Car Body Mass	kg	68000	36704	22118
	Bogie Mass	kg	7896	8286	7667.62
	Unspring Mass (per axle)	kg	2050	2050	2000
현가 (대차)	Primary Suspension Vertical Spring	KN/m	1250	1250	825
	Secondary Suspension Vertical Spring	KN/m	1270	400	300
	Primary SUSAENSION Vertical Damper	KNsec /m	10	10	6
	Secondary Suspension Vertical Damper	KNsec /m	20	20	20

2.3 교량의 특성

고속철도 교량에서 차량의 통과로 인한 수직 방향의 동적효과는 주로 상부구조에서 나타나고 있으며, 교량을 등단면의 보 또는 판으로 모형화하여 단경간 및 다경간 연속보에 대한 동적반응을 연구하고 있는데, 직선 단순보 모형을 이용하더라도 안전측의 교량거동을 충분히 파악할수 있다고 보고되고 있다.<sup>(7,8)</sup>

사용된 교량은 P.C.BOX 교량으로 그 제원은 다음과 같다.

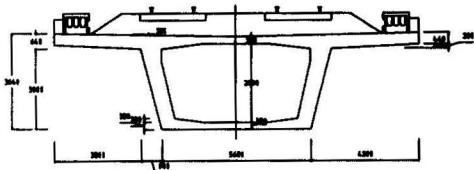


그림 2. 교량상부의 단면도

표 5. 해석에 사용된 교량의 제원

길이 (m)	단면적 (m <sup>2</sup> )	탄성계수 (KN/m <sup>2</sup> )	단면 2차 모멘트(m <sup>4</sup> )	단위길이당 질량(t/m)	교유주기 (sec)
25	10.49	29.43*106	10.078	42.62	0.151 (6.63Hz)
34.5	12.7	29.43*106	21.282	49.25	0.212 (4.71Hz)
40	12.37	29.43*106	20.447	48.425	0.289 (3.46Hz)
50	12.49	29.43*106	27.478	48.72	0.391 (2.56Hz)

고속철도는 중량이 큰 PC BOX교량으로 이루어져 있으므로 주행 열차대 교량 질량비가 대략 0.05이하이므로 주행차량대 교량의 질량비가 0.15이하에서는 주행질량의 효과가 주행하중의 효과보다 크다는 보고<sup>(3)</sup>가 있으므로 이 경우 주행 질량의 효과를 고려해야 할 것으로 사료된다.

2.4 제동의 고려

찰상이 생기기 전 상태의 제동력을 최대 제동력이라고 한다. 즉 점착력과 동일한 제동력이 최대 제동력이 된다. 여기서 최대 제동력이 작용한다고 가정한다.

이때의 점착계수는 다음과 같다<sup>(2)</sup>.

$$\mu = 0.326 \frac{1 + 0.279V}{1 + 0.369V}$$

$$T = \mu \cdot W_d \tag{1}$$

T: 점착력

$\mu$  : 점착계수

$W_d$  : 차량중량

V : 차량의 속도(km/h)

3. 불규칙면의 고려

3.1 궤도의 불규칙성

궤도의 불규칙면의 발생은 크게 고저 틀림, 줄

틀림, 수평틀림, 궤간틀림으로 나눌 수 있다. 그림 3.에 궤도의 불규칙성을 나타내었다.

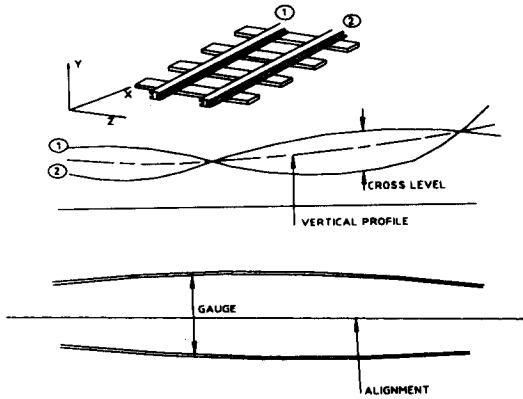


그림 3. 궤도의 불규칙성

복잡하고 불규칙적인 궤도의 특성을 나타내기 위해서 각국의 철도 시방규정에서는 궤도의 불규칙면을 PSD함수로 나타내었다.

FRA는 1980년부터 1981년까지 미국내 112000km 연장의 철로에 대해 800km의 시험구간의 철로의 노면을 조사하였다. 고저틀림을 나타내는 PSD함수는 다음과 같다. class 6이 가장 좋은 상태이고 class 1이 가장 나쁜 상태를 나타낸다. (6)

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

반면 SNCF(프랑스 국립 철도국)에서는 PSD함수를 다음과 같이 제시하였는데 이 함수는 파장 길이  $2m \leq L \leq 40m$  에 적합하다.

$$S(\phi) = \frac{10^{-10} A}{(1 + \phi/\phi_0)^2} \quad (3)$$

여기서  $\phi_0 = 0.307 \text{ c/m}$

레일의 상태가 좋을때:  $A = 160$

레일의 상태가 나쁠때:  $A = 550$

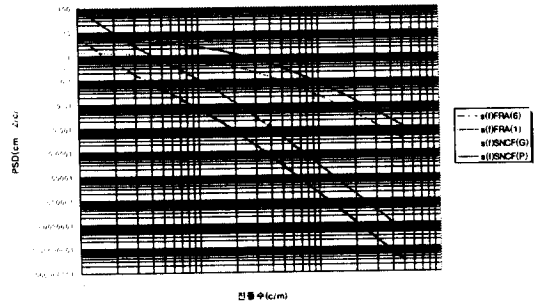


그림 4. 철로의 PSD함수

재현하면 다음과 같이 나타난다.

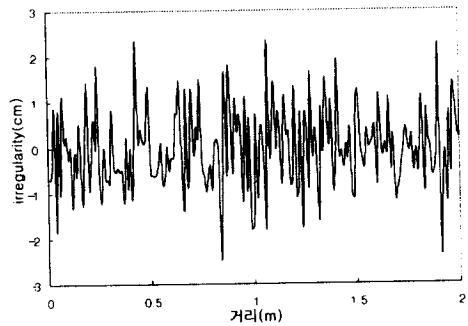


그림 5. FRA(CLASS1)

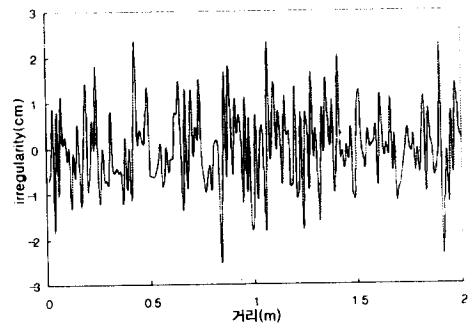


그림 6. SNCF(POOR)

### 3.2 차량의 불규칙성

바퀴의 편마모는 차량에 주기적인 진동을 일으킬 수 있으므로 이로 인해 교량에 충격효과를 일으킬 수 있다. 바퀴편마모에 의한 충격효과는 바퀴 중심축과 교량의 중립축간의 수직방향 거리 변화로 고려할 수 있다.

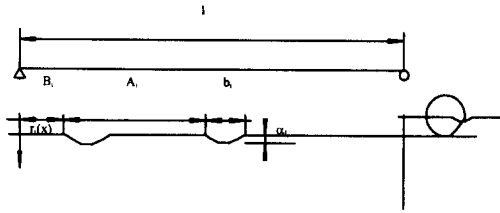


그림 7. 바퀴의 편마모

$$r_i = \begin{cases} \frac{1}{2} \cdot a_i \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{b_i} (x - k_i - B_i) \right) \\ 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{for } \begin{cases} B_i + kA_i \leq x \leq B_i + kA_i + b_i \\ B_i + kA_i + b_i < x < B_i + (k+1)A_i \end{cases}$$

$i = 1, 2, \dots$  차량의 축

$k = 0, 1, 2, 3 \dots$

$a_i$  = 편마모의 깊이

$b_i$  = 편마모의 발생거리

$A_i$  = 바퀴의 원주

$B_i = x=0$  에서 첫번째 편마모로 인한 충격 효과가 발생하는 지점까지의 거리

## 4. 교량과 차량의 운동방정식

### 4.1 교량의 동적거동 해석

운동방정식은 Hamilton원리에 근거한 에너지 성분 이용법에 의해 구할 수 있는데 이 방법은 힘에 의해 그 계에 발생하는 운동에너지와 위치에너

지를 이용하는 것이다.

대부분의 구조계에 있어 운동에너지 및 위치에너지는 일반화좌표를 이용하여 표시가능하므로 이 관계를 Hamilton원리에 대입하여 변분법을 적용하면 식(5)를 얻게 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = 0 \quad (5)$$

$T$  = 운동에너지

$V$  = 위치에너지

$D$  = 감쇄 작용에 의한 분산에너지

$q_i$  = 일반화 좌표

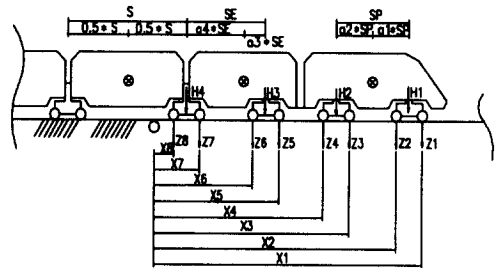
### 4.2 차량의 운동방정식

#### 4.2.1 차량의 모델링

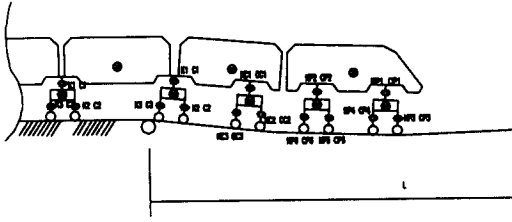
현가장치는 선형 스프링과 속도에 비례하는 감쇄 댐퍼로 구성되어 있으며 차량의 흔들림을 줄이기 위해 객차와 객차사이에 연결되어 있는 접촉대차를 쓰므로 차량과 차량사이의 거동이 서로 구속되어 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

#### 4.2.2 방정식의 유도

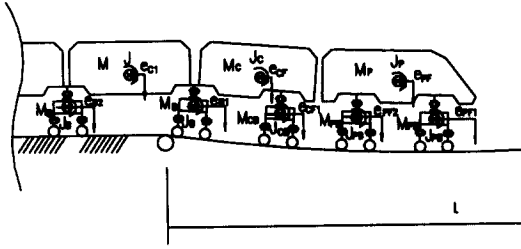
각 에너지항을 Lagrange방정식에 대입하고 마찰력  $F_v$ 를 고려하여 풀면 이 진동계의 운동방정식이 유도된다.<sup>(4,9)</sup>



(A) 차량의 교속방향이동좌표



(B) 현가장치



(C) 차량의 질량 및 관성모멘트

그림 8. 차량과 교량의 변위좌표와 기호

(1) 차량의 운동방정식

$$[A] \begin{Bmatrix} \ddot{h} \\ \ddot{x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [B] \cdot \{h\} + [D] \cdot \{h\} + [B_1] \cdot \{y\} + [D_1] \cdot \{y\} \\ RHS \end{Bmatrix} \quad (6)$$

여기서

$$\begin{Bmatrix} \ddot{h}_1 \\ \ddot{h}_2 \\ \vdots \\ \ddot{h}_{n+6} \\ \ddot{h}_{n+7} \\ \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \\ \vdots \\ \ddot{z}_{2n+13} \\ \ddot{z}_{2n+14} \end{Bmatrix} \{ \ddot{h} \} = \begin{Bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \\ \vdots \\ \dot{h}_{n+6} \\ \dot{h}_{n+7} \\ \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \vdots \\ \dot{z}_{2n+13} \\ \dot{z}_{2n+14} \end{Bmatrix} \{ \dot{h} \} = \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_{n+6} \\ h_{n+7} \\ z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_{2n+13} \\ z_{2n+14} \end{Bmatrix} \{ h \}$$

$$\begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix}_{n+7} \{ \ddot{y} \} = \begin{Bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix}_{n+7} \{ \dot{y} \} = \begin{Bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_{2n+14} \end{Bmatrix}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{1,1} & \cdots & A_{1,3n+22} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ SYM & & A_{3n+22,3n+22} \end{bmatrix} \quad [B] = \begin{bmatrix} B_{1,1} & \cdots & B_{1,3n+21} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ SYM & & B_{3n+21,3n+21} \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{1,1} & \cdots & D_{1,3n+21} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ SYM & & D_{3n+21,3n+21} \end{bmatrix} \quad [B_1] = \begin{bmatrix} B_{1,1} & \cdots & B_{1,3n+21} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ SYM & & B_{3n+21,3n+21} \end{bmatrix}$$

$$[D_1] = \begin{bmatrix} D_{1,1} & \cdots & D_{1,3n+21} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ SYM & & D_{3n+21,3n+21} \end{bmatrix}$$

$$RHS = \sum_{j=1}^{2n+14} \{ K_{Bj}(z_j - y_j) + P_j \} \frac{dy_j}{dx} - Fv \quad (7)$$

$j=1,2,3,\dots,2n+14$  :  $j$  번째 차륜

(2) 교량의 운동방정식

$$q_i + 2\xi\omega_i q + \omega_i^2 q = \frac{1}{m \int_0^L \psi_i^2 dx} \left[ \sum_{j=1}^{2n+14} \{ K_{Bj}(z_j - y_j) + C_{Bj}(z_j - y_j) + P_j \} \psi_i(x_j) \right]$$

(8)

$i=1,2,3 \dots$  :  $i$  번째 모드

$j=1,2,3,\dots,2n+14$  :  $j$  번째 차륜

여기서  $i$ 는 교량의 각 모드의 형상함수를 나타내며, 편의를 위해서 각 대차의 차륜의 현가장치의 탄성계수와 감쇠계수를  $K_{Bj}$ 와  $C_{Bj}$ 로 나타내었고 각 차륜에 걸리는 정적윤하중은  $P_j$ 로 나타내었다.

## 5. 교량의 동적거동 해석 프로그램

### 5.1 컴퓨터 프로그램

집중하중과는 달리 집중질량의 경우 차량의 교량에서의 위치에 따라 운동방정식의 질량항이 변하므로 그 해를 수치해석적인 방법으로 구해야 한다. 4절에서 유도한 운동방정식은 차량과 교량이 운동이 연결되어 있어 연립으로 풀어야 한다. 따라서 수치해석방법은 Newmark  $\beta$ 법( $=1/6$ )을 이용하여 교량지간의 중앙점 반응을 계산하였다.

수치 계산시 시간간격  $dt$ 는 다음식에 의해 선택 하였으며

$$dt \leq 0.1T_{\min}$$

여기서  $T_{\min}$  : 해석시 고려된 최고차 진동모드 의 주기

$dt$  시간 간격마다 가속도의 오차가 0.1%보다 작게 될때까지 반복 계산하였다.

## 6. 교량의 동적거동 해석

### 6.1 충격계수

차량의 주행으로 인해 발생하는 교량과 차량의 상호거동은 차량의 정적하중보다 증가된 동적하중 을 유발시킨다. 이때 증가된 동적하중을 충격계수 라고 부르며 다음과 같이 표시한다.

$$i = \frac{\text{동적응답최대치}}{\text{정적응답}} - 1 \quad (9)$$

우리나라 고속철도 시방서에서 제시한 충격계 수는 다음과 같다.

1) 주요 본선

$$i_m = \frac{1.44}{\sqrt{L_c - 0.2}} = -0.18 \quad (10)$$

(2) 그외의 선

$$i_m = \frac{2.16}{\sqrt{L_c - 0.2}} = -0.27 \quad (11)$$

$i_m$  : 모멘트 충격계수

$L_c$  : 충격계수 산정시 특정길이

정적하중에 대한 동적하중의 응답비를 증폭계 수(Amplification Factor)라고 하고 다음과 같 이 나타낸다.

$$A.F. (\text{Amplification Factor}) = \frac{\text{동적응답}}{\text{정적응답}} \quad (12)$$

### 6.2 교량의 거동형태

고속철도는 자동차와는 달리 각 차량이 일정속 도로 일정간격을 유지하며 지나가므로 객차의 주 행 주기가 교량의 기본주기와 같은 위상에 있게 될 경우 객차의 연행에 의한 증폭효과도 크게 나 타난다. 그 효과는 다음과 같다..

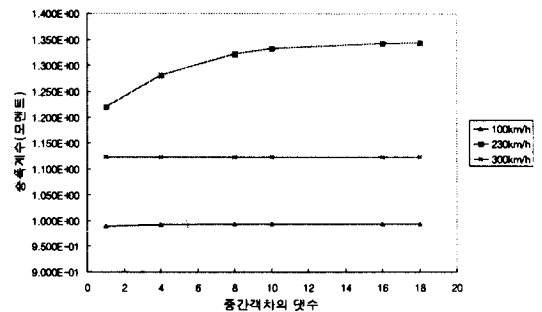


그림 9. 중간객차량과 증폭계수

차량이 일정한 간격  $S_0$ 로 주행할 때 교량의 기 본주기  $T_1$ 와 다음 식이 성립하면 이들은 같은 위 상(Phase)에 있게 되어 교량의 반응은 최대가 된다.

$$S_0 / v_0 = n T_1$$

여기서  $v_0$  는 차량의 속도

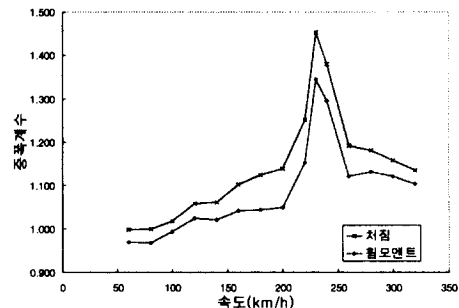


그림 10. 처짐과 휨모멘트의 증폭계수

속도가 변함에 따라 발생하는 최대 증폭계수는 그림8.에 나타내었다. 40m교량의 경우 교량의 고유주기가 0.151sec일 때 중간객차의 연행의 유효거리가 18.7m이므로 이때 공진이 233km/h부근에서 나타난다. 따라서 이때의 증폭계수가 크게 증가를 나타내고 있다.

### 6.3 불규칙면의 영향

#### 6.3.1 바퀴의 편마모

편마모로 인해 교량에 발생하는 충격효과는 휨모멘트의 경우 60km/h에서 5.2%의 증가를 보였으나 고속으로 갈수록 편마모를 고려하지 않았을때와 차이가 줄어들고 있다. 그러나 이에 비해 처짐의 경우는 바퀴의 편마모의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타나고 있다.

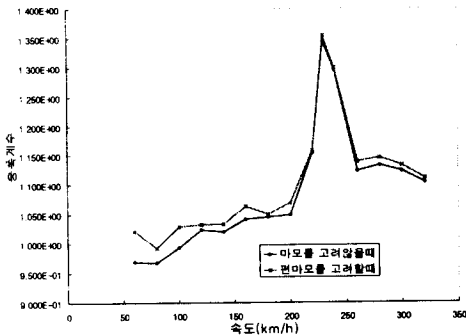


그림 11. 편마모를 고려할때 휨모멘트의 증폭계수

#### 6.3.2 통계적 불규칙면의 영향

40m지간의 교량에 대해 FRA에서 제시한 PSD함수와 SNCF에서 제시한 PSD함수로 불규칙면을 재현하였다.

FRA기준에서는 1등급과 6등급을 재현하였다. 여기서 6등급은 노면의 상태가 가장 양호한 철로를 말한다. PRA 기준으로 불규칙면을 재현하였을때는 불규칙면을 고려하지 않았을때와 비교해서 큰 차이가 발생하지 않으며 고속으로 갈수록 그

차이가 줄어들고 있다. 휨 모멘트의 증폭계수는 Class1의 경우 60km/h에서는 2.69%의 증가를 보이고 있으나 고속으로 갈수록 이 차이가 줄어들고 있다. Class6의 경우에도 고속으로 갈수록 차이가 줄어들고 있으나 저속에서부터 오차가 0.5%이내이므로 거의 영향이 없다고 할 수 있다. 변위의 증폭계수도 휨모멘트와 비슷한 경향을 보이고 있다.

SNCF기준으로 불규칙면을 재현하였을때는 FRA에서 제시한 경우와 비교해서 큰 증가를 보였는데 이는 PSD함수에 의해 재현된 불규칙면을 보아도 알수 있듯이 SNCF의 PSD함수가 FRA의 그것보다 큰 값을 나타내기 때문이다. 휨 모멘트는 궤도의 상태가 불량한 경우 불규칙면을 고려하지 않았을때와 비교해 보면 60km/h에서 5.2%로 최대차이를 보이고 있고 230km/h에서는 2.4%의 증가를 보이고 있다. 반면에 궤도가 양호할때 60km/h에서 2.67%로 최대차이를 보이고 속도가 증가할수록 그 차이가 줄어들고 230km/h에서는 1.2%의 증가를 보였다. 처짐의 경우에도 비슷한 경향을 보이고 있다.

이상에서 살펴본 바와 같이 궤도의 통계적인 불규칙성은 저속에서는 교량의 동적 거동에 영향을 미치나 속도가 빨라질수록 그 영향이 줄어드는 경향을 보이고 있다. 다음표에서 각각의 경우 증폭계수를 나타내었다. 여기서 궤도의 불규칙성을 고려하지않은 경우는 NO IRRE로 표기하였다.

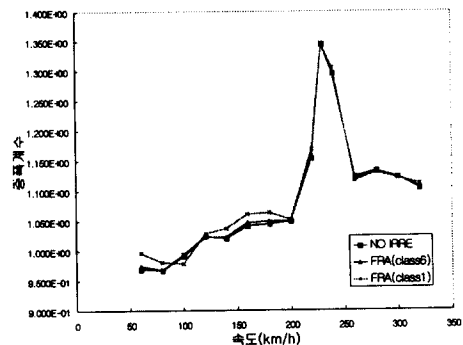


그림 12. 휨모멘트의 증폭계수(FRA)



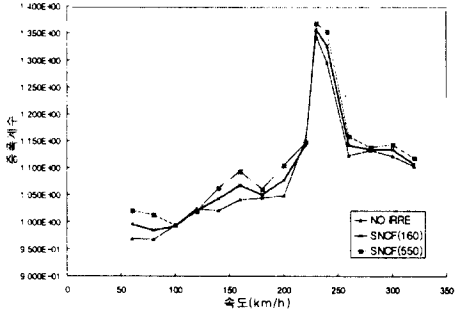


그림 13. 힘모멘트의 증폭계수(SNCF)

## 6.4 제동의 고려

### 6.4.1 단일차량의 제동

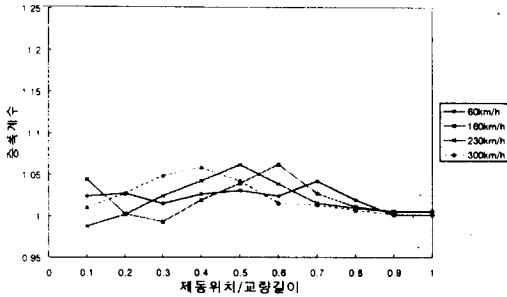


그림 14. 제동위치에 힘모멘트의 증폭계수

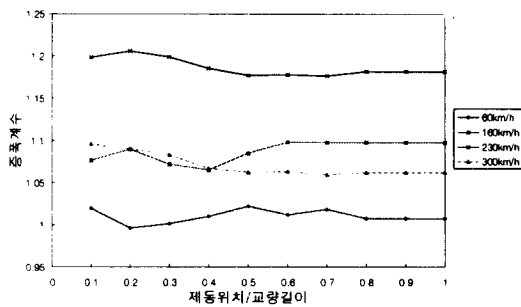


그림 15. 제동위치에 처짐의 증폭계수

차량이 제동을 할때는 제동에 의한 관성력으로 인해 차량이 앞으로 쏠리는 현상이 발생한다. 이로 인해 차량의 각 축에 걸리는 동적운하중이 변하므로 교량의 응답이 변화하게 된다. 우선 제동

의 특성을 고찰하기 위해 동력차만을 고려해 보면 제동위치에 따라 발생하는 증폭계수는 다음과 같다. 여기서는 각 속도마다 제동위치를 교량의 10분의 1씩 증가시켜 가며 증폭계수를 산정하였다.

그림 14.와 그림 15.에서 보이듯이 차량의 속도가 빠를수록 최대 응답이 일어나는 제동위치가 교량진입부에 가까스로 이동한다. 이는 차량의 현가장치가 제동에 의해 반응하는 일정한 주기에 비해 차량의 이동속도가 증가하기 때문이다.

그림 16.와 그림 17.는 차량의 현가장치에 걸리는 축하중을 나타낸다. 이 그림은 차량이 교량의 중앙에서 제동을 시작하였을때의 현가장치에 걸리는 하중을 나타낸 것이다. 그림 17.에서 보는 바와 같이 230km/h에서는 제동시작위치에서 현가의 증폭이 최대가 되는 지점까지는 '0.38\*교량길이\*차량속도'만큼 시간이 걸린다 따라서 최대 증폭계수가 발생하는 지점에서 '0.38\*교량길이\*차량속도'만큼 앞서서 제동을 걸때 최대 증폭계수 발생위치에서 축하중이 최대값을 가지므로 최대 증폭계수를 가진다. 따라서 이와 같이 현가장치의 축하중변화를 고려하여 각 속도마다 축의 현가장치가 반응하는 동안 차량의 이동거리를 구해 제동지점을 구하고 이때 발생하는 최대 증폭계수를 구해보면 다음 그림과 같다. 따라서 연행에 의한 주행시 각 속도에 따른 제동위치도 이에 준하여 계산하였다.

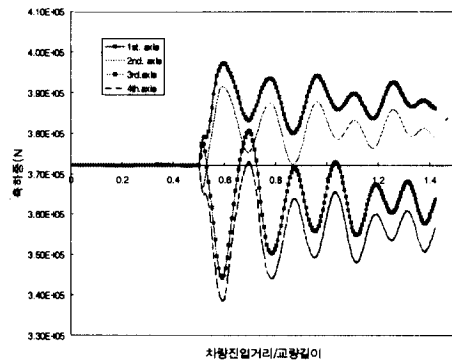


그림 16. 60km/h 주행중 제동시 축하중

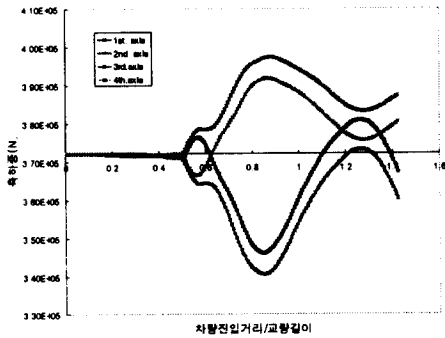


그림 17. 20km/h 주행중 제동시 속하중

동력차의 제동으로 발생하는 증폭계수는 다음의 그림 18.와 그림 19.과 같다. 최대 증폭계수의 경우 휨모멘트는 5.6%의 증가를 나타내었고 처짐의 경우에는 1.8%를 나타내었다. 특이한 점

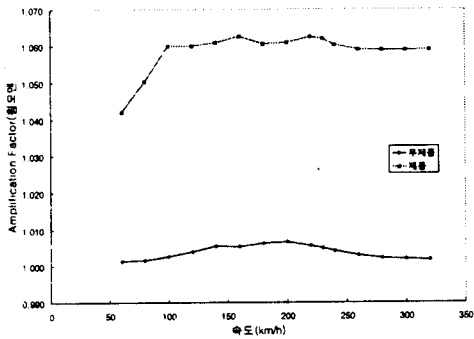


그림 18. 휨모멘트의 증폭계수

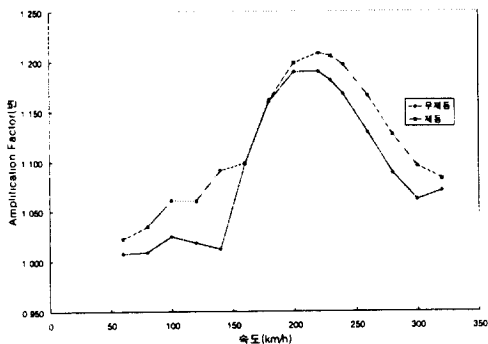


그림 19. 처짐의 증폭계수

은 처짐의 경우와는 달리 속도가 증가함에 따른 모멘트의 증분이 크지 않다는 것인데, 이는 고차 모드의 기여도때문이다

#### 6.4.2 연행차량의 제동

고속철도 차량은 앞뒤에 연결되어 있는 동력차량의 하중이 중간객차의 하중에 비해 크므로 증폭계수의 최대값들은 끝단의 동력차량이 교량을 통과할때 발생한다. 따라서 제동을 고려한 최대 증폭계수값은 동력차량의 통과시 발생한다.

제동의 효과는 교량길이에 따라 그 응답이 변하는데 이는 제동의 효과는 제동으로 인해 발생하는 차량의 슬립으로 각축에 걸리는 하중의 변화에 의해 나타나는데 교량길이가 달라지면 교량위에 위치한 차량축의 숫자가 달라지기 때문이다. 40m교량의 경우 230km/h 이하의 속도에서는 뒷동력차량이 교량을 통과할때 증폭계수의 값이 앞동력차량이 통과할 때보다 크게 나타나므로 앞동력차량 진입 초기의 제동으로는 제동으로 인해 증가한 증폭계수값이 주행시 증폭계수보다 작게 나타났다. 따라서 연행시에는 제동의 효과보다는 교량의 초기 동적거동과 연행으로 인해 발생하는 공진의 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 뒷동력차량 진입시 제동의 효과는 전반적으로 앞뒤차량들의 상반된 속하중의 변화로 인해 속하중변화량이 상쇄되는 효과를 가져와 큰 증가는 나타나지 않고 있다.

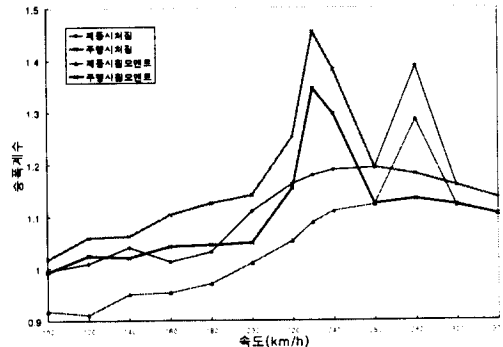


그림 20. 앞동력차량 진입시 증폭계수

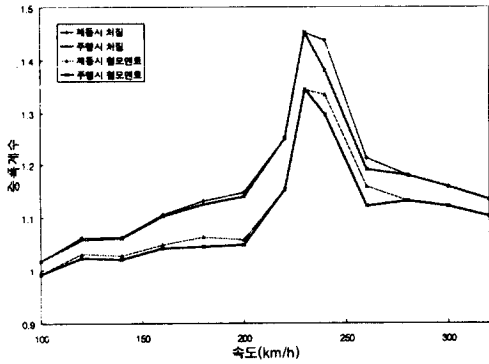


그림 21. 뒷동력차량 진입시 증폭계수

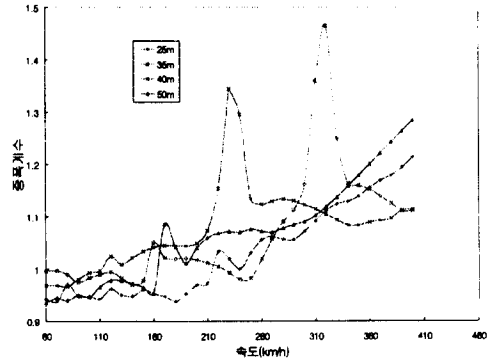


그림 22. 경간길이의와 횡모멘트의 증폭계수

### 6.5 경간 길이의 영향

그림 22과 23는 경간길이가 각기 다른 교량의 속도에 따라 발생하는 처짐과 횡의 증폭계수를 나타내고 있다. 속도가 빨라질수록 충격계수의 값들은 증가하는 경향을 가지고 있으며, 특정 속도에서 국부침두가 발생하는데 그림에서 보면 국부침두의 값은 경간 길이가 길어질수록 줄어들고 있으며 발생하는 속도는 경간길이가 길어짐에 따라 줄어들고 있다. 이러한 국부침두의 발생은 교량의 고유주기와 관련이 있으며 차량의 연행으로 인한 공진에 기인한 것이다.

그림 24과 25에서는 차량의 속도를 각각 230km/h와 300km/h로 하였을때 시방서의 충격계수와 계산된 값을 비교하였다. 특히 230km/h에서 국부침두가 발생하는 40m경간의 교량에서는 충격계수의 값이 0.34로 시방서의 0.055보다 크게 초과하는 것으로 나타났다.

표 6. 경간길이에 따른 증폭계수

경간길이(m) \ 증폭계수	25	35	40	50
230km/h	1.019	0.993	1.345	1.071
300km/h	1.073	1.161	1.123	1.091
충격계수+1	1.120	1.072	1.055	1.030

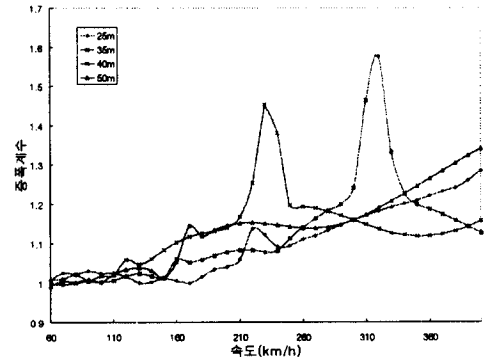


그림 23. 경간길이의와 처짐의 증폭계수

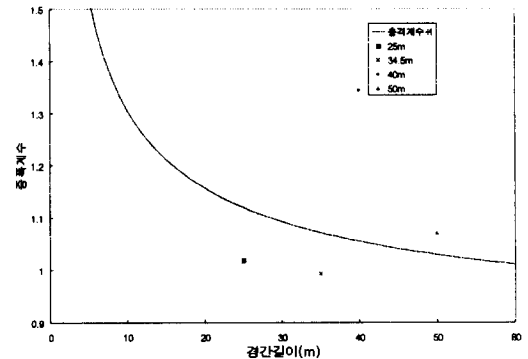


그림 24. 230km/h로 주행시 횡모멘트의 증폭계수

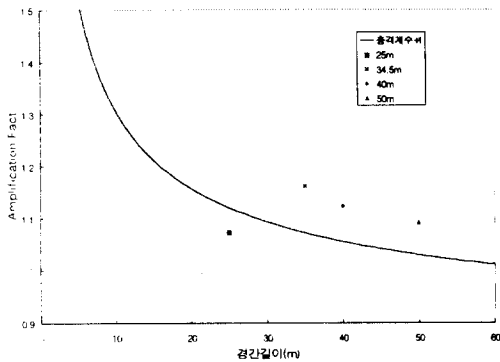


그림 25. 300km/h로 주행시 휨모멘트의 증폭계수

## 7. 결 론

이동 질량의 동적효과는 동일한 크기의 정적하중이 작용했을때에 비해 교량내부에 큰 응력을 발생시키고 이때 발생하는 상반응력은 피로의 문제를 야기시켜 교량의 수명을 단축시킬수 있다. 따라서 이러한 일련의 동적거동특성을 고찰하기 위해서 고속철도차량과 교량의 동적거동을 수학적으로 모델링하고 컴퓨터 모의 기법을 통해 차량 속도와 증폭계수, 차량의 연행의 영향으로 인해 발생하는 공진의 효과, 차량의 제동시 최대증폭계수, 차량 속도와 제동위치와의 관계, 차량하중의 증가에 따른 동적거동의 변화, 경간 길이 변화가 증폭계수에 미치는 영향을 연구 검토하였다. 이 연구결과로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 차량이 230km/h로 주행할때, 40m와 50m 교량의 휨모멘트의 증폭계수값이 시방서에서 제시한 충격계수에 비해 각각 29.5%와 6% 초과한다. 특히 40m경간의 교량의 경우 이 속도에서 큰 국부침투가 발생하였는데 이는 차량의 연행으로 인한 증폭효과에 기인한다.

2. 바퀴 편마모와 궤도 불규칙면이 거칠수록 그로 인한 증폭계수값은 증가하고 있으나, 차량의 속도가 빨라질수록 영향력이 줄어들고 있다.

3. 특정 속도에서 주행하는 차량의 수가 증가할수록 그 차량의 연행으로 인해 증폭계수의 값이

증가하는 것으로 나타났는데 이러한 영향은 교량의 동적특성치에 따라 그 발생 속도대를 달리한다. 특히 경간길이가 길어질수록 낮은 속도로 이동하며 그 증폭정도는 줄어드는 것으로 나타났다. 따라서 충격계수를 산정할때는 이러한 연행효과에 의해 나타나는 공진에 대한 고려가 필요하다.

4. 임의의 속도에서 제동을 하면 제동으로 인해 나타나는 앞슬립으로 각각의 차량축하중이 변화하여 증폭계수에 중요한 영향을 미친다. 최대 증폭계수값을 나타내는 제동의 위치는 차량축하중이 최대가 되는 차량축의 거동주기에 관련되므로 차량의 속도에 따라 다르다. 40m 경간의 교량에서는 제동의 영향은 양쪽 끝단의 동력차가 교량을 통과할때 각기 다르게 나타나며 주행시 후방에 위치한 동력차가 교량의 통과할때 제동의 영향이 크게 나타났다.

## 감사의 말

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) 고속전철 사업기획단(1991), 고속전철 표준 시방서
- (2) 한국고속철도 건설공단(1993), 고속철도 핸드북
- (3) 김규춘(1993), 차량통과 및 制動으로 인한 도로교의 동적거동해석, 박사학위 논문, 고려대학교
- (4) Roy R. Craig, Jr. (1981), Structural Dynamics, John Wiley & Sons, Inc.
- (5) Ladislav Fryba(1996), Dynamics Of Railway Bridges, Thomas Telford
- (6) V. K. Garg & R. V. Dukkipati(1984), Dynamics Of Railway Vehicle Systems, ACADEMIC PRESS
- (7) R. K. Gupta and R.W.Traill-Nash, (1980), Vehicle Braking on Highway Bridges, J. Engrg. Mechanics Div., Proc. Of ASCE, Vol. 106, No.Em4, Aug., 641-658

(8) R.K. Gupta and R.W.Traill-Nash, (1980), Bridge Dynamic Loading due to Road Surface Irregularities and Braking of Vehicle, Earthquake Engrg. And Struct. Dynamics, Vol. 8, 83-96

(9) N.L. Mulcahy, V.A. Pulmano and R.W. Traill-Nash(1980). Effects of Vehicle Braking on the Dynamic Loading of bridges, UNCIV Report No.R-191. Univ. of New South Walew, Kensington, NSW, Australia.

(접수일자 : 1997. 9. 18)