

# 고속열차하중 하의 강합성형 철도교의 진동

## Vibration of Steel Composite Railway Bridges under High Speed Train

장 승 필<sup>1)</sup> · 광 종 원<sup>2)</sup> · 하 상 길<sup>3)</sup> · 김 성 일<sup>4)</sup>

*Chang, Sung Pil Kwark, Jong Won Ha, Sang Gil Kim, Sung Il*

요 약 : 본 연구에서는 열차하중이 강합성형 철도교의 동적응답에 미치는 영향을 연구하였다. 2개의 I-거더와 가로보로 구성된 판형교는 판요소와 공간뼈대요소를 이용하여 모델링하였으며, 상판과 주형의 offset은 완전합성을 가정하여 구속방정식을 이용하여 연결하였으며 트랙구조는 고전적인 탄성지반위의 보 이론을 사용하여 이상화하였다. 2PC+2MT+16IT로 구성된 TGV열차의 수직처짐과 피칭회전을 고려한 2차원 수치모델을 개발하였다. 또한, 속도의존적 제동함수를 사용하여 열차의 제동을 고려하였다. 이동열차하중에 의한 교량의 동적거동 파악을 위하여 교량의 고유진동수 변화, speed parameter, 차량모델링 방법, 열차의 제동 등에 대한 매개변수연구를 수행하였다.

ABSTRACT : The influences of high speed train on the dynamic responses of steel composite railway bridges are investigated. The bridge system which has two I-girder and several cross beams is modeled with plate and frame elements. With assumption of concrete slabs are fully connected with steel girders, the offset between slabs and girders is modeled using constraint equation. The track system is modeled using beams on elastic foundation theory. And, the TGV train model is developed in 2-dimension considering bouncing and pitching motion. And, braking action of vehicle is considered using speed dependent braking function. To investigate the behavior of bridges due to moving trains, parametric studies on the variation of natural frequency of bridge, speed parameter, vehicle modeling method, braking action of train, etc. are performed.

핵심용어 : 이동하중, 고속철도, 강합성형 철도교

KEYWORDS : Moving Loads, High Speed Railway, Steel Composite Railway Bridge

1) 정희원, 서울대학교 토목공학과 교수  
2) 한국건설기술연구원 선임연구원  
3) 포항산업과학연구원 선임연구원  
4) 서울대학교 토목공학과 박사과정

본 논문에 대한 토의를 1999년 6월 30일까지 학회로 보내  
주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

21세기의 새로운 교통수단으로 신속안전하고 대량수송이 가능한 고속철도 건설사업은 국가 정책사업의 일환으로 대단위 사회간접자본에 대한 투자로 진행되고 있다.

이에따라 현재 경부고속철도가 건설 중에 있으며, 고속철도 구간의 대부분은 교량 및 고가구조물로 구성되므로 이에대한 분석 및 개발은 필연적이다. 교량에 작용하는 다양한 활하중 중, 고속철도 교량의 경우 중량, 고속으로 운행하는 고속열차에 의한 차량하중의 영향이 일반적으로 가장 크다. 그러므로, 기존 저속운행에 대한 충격효과만으로는 고속철도 교량의 진동특성을 파악하기 어려우며, 이에따른 고속철도 교량의 안전성과 설계 및 시공의 신뢰성 확보를 위하여 차량하중 동적해석이 요구된다.

차량하중을 받는 교량의 동적거동에 관한 이론적, 실험적 연구는 Willis와 Stokes(1849)<sup>(1)</sup>의 연구 등을 시작으로 1백년 이상 실행되어 왔다. Inglis(1934)<sup>(2)</sup>는 철도교에 대한 다양한 연구를 수행하였다. Fryba<sup>(3)</sup>는 이동하중에 대해 많은 경우에 관련된 해석해를 얻어냈다. 차량이 교량위를 주행하게 되면 많은 매개변수들에 의해 상호동적으로 거동하게 된다. 근래에 와서도 차량하중이 교량에 미치는 영향에 대한 다양한 연구가 수행되고 있으며, Gupta(1978)<sup>(4)</sup>는 차량의 제동하중을 계단식 함수로 고려하여 적용하였으며, O'Connor (1984)<sup>(5)</sup>는 차량 현가장치 특성 등에 대한 매개변수 연구를 수행하였고, 스위스의 Cantieni(1984)<sup>(6)</sup>는 실제 교량 226개에 대하여 실험적 연구를 수행하였다. Yang(1995)<sup>(7)</sup>은 충격계수 도출을 위한 다양한 매개변수 연구를 수행하였으며, Kwark(1997)<sup>(8)</sup>은 3차원 트럭모델 및 3차원 도로교 모델링에 대하여 새로운 속도의 존형 제동함수를 적용한 다양한 매개변수 연구를 수행하였다.

현재 경부고속철도 교량의 전구간이 콘크리트

교량만으로 구성되는데, 이는 강합성형 교량의 많은 장점에도 불구하고, 고속철도 운행특성상 중량의 열차가 고속운행됨으로서 교량에 작용하는 활하중에 의한 동적거동, 소음 등이 콘크리트 교량에 비하여 상대적으로 불리하기 때문에 계획단계 시부터 강합성형 교량의 적용은 고려되지 않았다. 그러므로, 국내연구실적이 미비한 고속열차하중하에서의 강합성형 교량의 동적거동 연구는 반드시 필요하다고 하겠다.

## 2. 교량시스템

본 연구에서 다루어지는 교량시스템은 그림 1과 같이 프랑스 TGV 북부선에서 전형적으로 사용되고 있는 2개의 I형 주형을 가진 강합성형 교량이다. 본 연구에서는 상판은 4절점 판요소를 이용해 이상화하였으며, 강주형, 가로보 및 교각은 공간뼈대요소를 이용하여 모델링하였다. 사용된 유한요소는 일반적인 유한요소법을 이용하여 정식화하였다<sup>(13)</sup>.

상판의 중심면과 주형의 중심면의 연결은 강결요소라 불리는 구속방정식을 통해 판요소와 공간뼈대요소 자유도 사이의 관계를 성립시켜야 한다. 즉, 그림 2와 같이 부절점의 변위가 주절점의 변위로 표시되고 주절점의 회전에 의한 추가적인 변위로 서로 기하학적으로 다음식 (1)과 같이 연결된다.

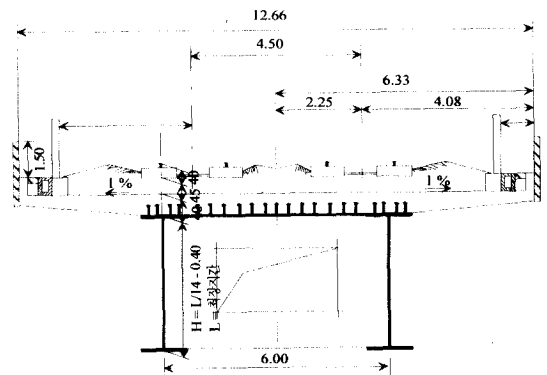


그림 1. 프랑스 TGV 북부선의 전형적인 강합성형 철도교량의 단면도

$$\begin{aligned}
 u^s &= u^m - (z^m - z^s)\theta_y^m + (y^m - y^s)\theta_z^m \\
 v^s &= v^m + (z^m - z^s)\theta_x^m - (x^m - x^s)\theta_z^m \\
 w^s &= w^m - (y^m - y^s)\theta_x^m + (x^m - x^s)\theta_y^m \\
 \theta_x^s &= \theta_x^m, \quad \theta_y^s = \theta_y^m, \quad \theta_z^s = \theta_z^m
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

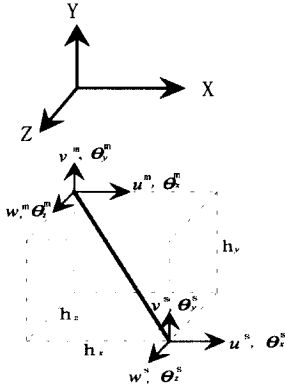


그림 2. 강결요소소의 자유도

### 3. 트렉시스템

철도교에서 외부하중에 의한 힘은 레일, 침목 (또는 슬리퍼), 도상으로 이루어진 트렉구조를 통하여 교량의 상판으로 전달된다.

열차하중에 의한 트렉의 거동을 해석하기 위해 많은 트렉모델이 수치적으로 제안되었으나, 고전적인 탄성지반위의 보(Beams on Elastic Foundation) 모델이 널리 사용되어왔다. 본 연구에서도 교량의 응답에 중점을 두고 있으므로 효율성과 응용성의 측면을 고려하여 BEF이론을 사용하여 트렉을 고려하였다. 즉, 그림 3과 같이 바뀌하중이 먼저 레일을 통하여 침목으로 전달되고, 침목의 힘은 도상을 통하여 계속해서 교량구조로 분배되며, 침목은 y방향의 유한 보로, 레일은 x방향의 무한보로 고려한다<sup>(13)</sup>.

BEF이론의 정식화는 각 레일이 탄성지반 위에 놓여있는 연속적인 보처럼 거동하고 기초의 반력이 모든지점에서 그 지점의 보의 처짐에 비례한

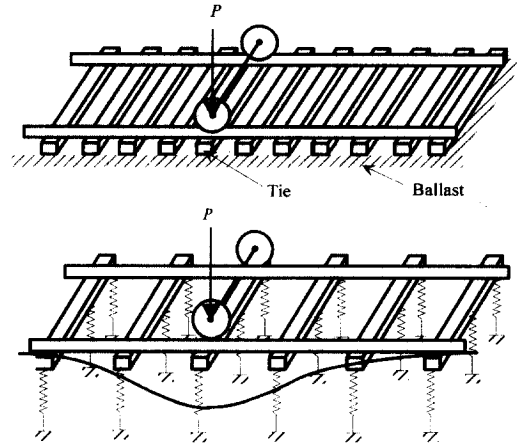


그림 3. 탄성지반위의 보를 이용한 트렉구조의 모델링

다는 가정에 바탕을 둔다. 즉,  $p = kw$  라는 가정은 지지매개체가 탄성적이라는 것을 의미한다.

즉, 고전적인 BEF이론에 의해 집중하중 또는 모멘트를 받는 무한보, 유한보의 처짐곡선과 압력 분포를 구하고 이를  $x$ - $y$ 평면 위의 압력분포로 바꾸면, 요소내에서 적분을 수행하면 교량에 작용하는 절점하중이 계산된다. 압력표면은 다음식 (2)와 같이 표현된다<sup>(13)</sup>.

$$p(x, y) = \begin{cases} \frac{P \lambda \lambda_{eff}}{(\cos 2\lambda L + \cosh 2\lambda L - 2)} g(x) f_1(y) & (0 \leq x \leq \infty, 0 \leq y \leq a) \\ \frac{P \lambda \lambda_{eff}}{(\cos 2\lambda L + \cosh 2\lambda L - 2)} g(x) f_2(y) & (0 \leq x \leq \infty, a \leq y \leq L) \end{cases}
 \tag{2}$$

여기서,  $\lambda$ ,  $\lambda_{eff}$ 는 특성길기와 유효특성값이다.

또한 주행면의 조건은 교량-차량 시스템의 부가적인 진동에 매우 중요한 요소이다. 철도교에서는 트래에 의해서 생기는 표면의 불규칙성이 포장 조건에 의한 도로교와는 차이가 있다. 즉, 철도교의 표면 불규칙성의 영향에 관한 해석에 있어서는 바뀌의 편마모, dipped joint, 종구배 등이 고려되어야 한다<sup>(13)</sup>.

#### 4. 차량시스템

국내 고속철도에 이용되는 TGV 열차는 일반 열차와는 다른 구조를 갖는 열차이다. 즉, 각 객차마다 독립적인 대차시스템을 갖고 있는 일반 열차와 달리 TGV 열차는 객차와 객차사이에 대차가 존재하는 시스템이다.

TGV 열차는 2PC+2MT+16IT 시스템으로 2량의 동력차와 2량의 동력객차, 16량의 객차로 구성되어 있다. 동력차는 각 2개의 대차로 구성되며 동력객차는 한개의 독립적인 대차와 객차와의 연결부에 한개의 대차가 존재하며, 객차와 객차사이에 역시 한개의 대차가 존재한다. 대차는 각 대차당 2개의 윤축을 가지고 있다. 이와같이, 총 23개의 대차와 46개의 윤축으로 구성되어 있다.

본 연구에서는 TGV 열차를 이동집중하중(Moving Constant Force), 단자유도 시스템의 조합(Single-d.o.f System), 그리고, 2차원 모델링(TGV 2-dimensional System)의 세가지 방법으로 수치모델링을 구현하였다.

이동집중하중에 의한 모델링은 교량-차량 간의 상호작용을 고려할 수 없으며, 단지 차량하중을 힘(force)으로만 고려하게 된다. 단자유도 시스템은 차량의 각 축을 기준으로 몸체, 현가장치의 강

성, 댐핑을 고려하여 한개의 자유도로 표현하며 총 46개의 축에 대하여 각 차량 축 간의 상호작용은 무시하였으며, 교량-차량간의 상호작용을 고려한다.

그림 4는 TGV 2차원 동적모델과 활성자유도를 나타낸다. 본체에서 수직방향 처짐(bouncing)과 pitching 회전을 고려하였으며, 대차에서 수직방향 처짐을 고려하여 TGV 2PC+2MT+16IT 열차는 총 63개의 자유도로 표현된다. 교량-차량간의 상호작용을 고려하며, 관절형 대차시스템의 특성에 의한 객차간 상호연결을 구속방정식을 이용하여 고려하였다. 사용된 열차의 주요한 특성치는 표 1과 같다<sup>(13)</sup>.

차량의 운동방정식은 Hamilton의 원리에서 유도된 Lagrange 방정식을 이용하여 유도하였다. 다음은 일반화된 Lagrange 방정식이다.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}'_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = 0 \quad (3)$$

여기서, 차량의 전체 운동에너지  $T$ 는 차량시스템요소의 질량 및 수직변위의 속도와 피칭회전의 속도를 이용하여 구하며, 위치에너지  $V$ 와 분산에너지  $D$ 는 본체와 대차, 대차와 윤축사이의 상대

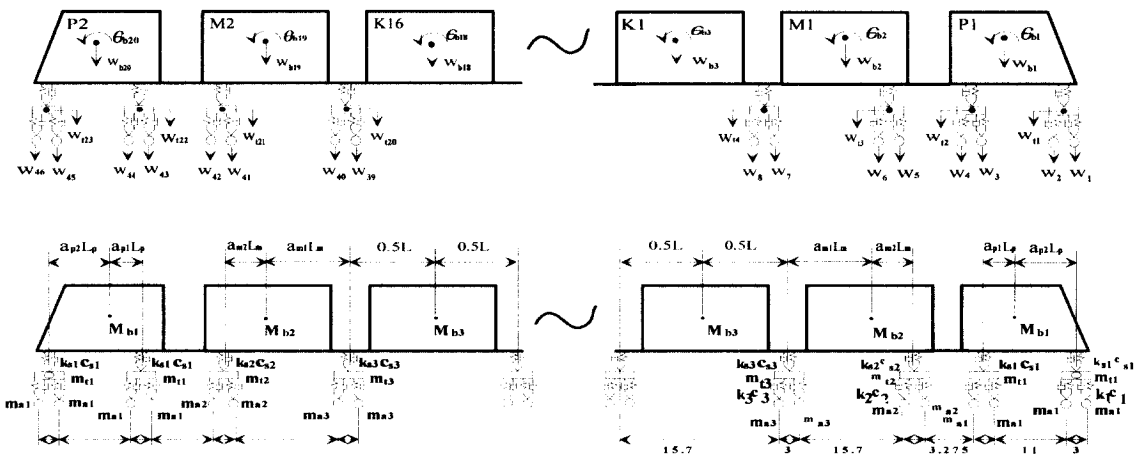


그림 4. TGV 2차원 동적해석모델

표 1. 본 연구에서 사용된 TGV 열차의 물성치

	Power Car Motor Bogie	Motorized Trailer Motor Bogie	Intermediate Carrying Bogie
Mass of the Body (kg)	54960	48411	26000
Primary sprung mass per bogie (kg)	2420	2514	3050
Unsprung mass per axle (kg)	2050	2050	2000
Primary vertical stiffness per axle box (kN/m)	1250	1250	825
Secondary vertical stiffness per bogie side (kN/m)	1270	400	300
Primary vertical damper setting per axle box (kN.s/m)	10	10	6
Secondary damper setting per bogie side (kN.s/m)	20	20	20

변위를 고려하여 구할 수 있다. 자세한 정식화는 참고문헌<sup>(13)</sup>에 나타나있다. 결국, 교량의 운동방정식처럼 다음식 (4)와 같이 열차의 운동방정식이 구성되며, Newmark-β 방법에 의하여 풀게된다.

$$[M_v]\{\ddot{u}_v\} + [C_v]\{\dot{u}_v\} + [K_v]\{u_v\} = \{F_v\} \quad (4)$$

등속도가 아닌 제동이나 가속에 의한 비등속 운동에 대한 연구가 최근 이루어지고 있다. 제동의 영향은 수치해석에서 제동함수를 사용하여 수학적으로 고려되어진다. 제동에 관한 기존연구에서는 TRRL(Transport and Road Research Laboratory)의 실험결과에 바탕을 둔 계단형 함수(Step-type function)가 사용되어져 왔다<sup>(4)</sup>. 계단형 제동함수는 교량에 작용하는 종방향 힘이 한계치에 도달할 때까지는 선형적으로 증가한 후, 차량이 멈출 때까지 이를 유지한다. 그러나, 일부 연구자들은 동적마찰계수가 속도에 의존한다는 것을 바탕으로 하여 제동거리를 전개시키기 위해서 여러가지 속도를 가진 제동에 관한 실험을 행하였다. 본 연구에서는 ASTM의 실험결과에 바탕을 둔 속도의존형 제동함수(Speed-dependent braking function)를 이용하여 제동하중을 계산한다<sup>(8)</sup>.

일반 도로와 달리 철로에서의 제동함수는 강철 바퀴와 레일의 마찰관계를 나타내며 차량의 종류에 따라서 다르게 제안된다. 그러므로, 향후 TGV

열차의 정확한 제동하중에 대한 자료를 통한 제동 함수 결정에 대한 연구가 필요하다.

제동하중과 레일 표면의 마찰계수를 결정하는데 있어서 차량속도의 의존성이 다음식 (5)와 같이 고려된다. 여기서, 계수  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ 는 레일표면의 상태 및 차량의 종류에 따라서 다르게 제안된다<sup>(9)</sup>.

$$\begin{aligned} F_B(v) &= M_v g \mu(v) \\ \mu(v) &= c_1 \frac{1 + c_2 v}{1 + c_3 v} \end{aligned} \quad (5)$$

## 5. 예제 및 매개변수연구

차량과 교량의 운동방정식은 직접적분법인 Newmark-β 방법을 사용하여 각각 풀게되며, 가정과 보정에 의한 반복법(predictor-corrector iteration)에 의하여 결합된 방정식을 푼다. 개발된 전산프로그램을 이용하여 매개변수 연구를 수행하였다.

본 연구에서 사용된 교량모델은 2개의 주형을 가진 I-거더 단순교와 3경간 연속교이다. 각 교량의 제원은 프랑스 TGV 북부선에서 실제 사용되고 있는 교량의 제원[11]을 기준으로 변화시키며 고찰하였다. 사용된 교량의 형식 및 제원은 표 2와 같다. 해석에 사용된 교량은 감쇠비를 2%로 가정하였다.

표 2. 예제에 사용된 교량의 제원

지간		단순교			연속교
		30m	35m	40m	30+50+30m
주형	높이(m)	2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8	2.7, 3.0, 3.3, 3.5	2.9, 3.3, 3.5, 3.7, 4.0	3.5
	플랜지폭(cm)	60, 80, 100	60, 80, 100	60, 80, 100	80
	플랜지두께(cm)	5.0, 6.2, 7.5	5.0, 6.5, 8.0	5.5, 8.0, 12.0	7.5
가로보	갯수	5, 6, 7	6, 7, 8	6, 7, 8	7
상판	폭(m)	12.6	12.6, 13.2, 13.6, 14.0	12.6, 13.2, 13.6, 14.0	14.0
	두께(cm)	35, 40	35, 38, 40, 42, 45	35, 38, 40, 42, 45	40

5.1 교량의 고유진동수에 따른 동적거동

열차하중에 의한 교량의 동적거동은 교량의 고유진동수, 차량의 속도와 유효타격간격(effective beating interval)에 의해 교량의 공진현상을 예측할 수 있다. 교량의 고유진동수와 차량의 크로스진동수(crossing frequency)가 일치하게 되면 공진현상이 발생하게 된다. TGV 열차의 유효타격간격은 18.7m로 볼 수 있으므로 교량이 설계속도 350km/h를 초과해서 공진이 일어나도록 유도하려면 교량의 첫번째 고유진동수  $\omega_1$ 은 약 5.2Hz를 상회하여야 함을 예측할 수 있다.

그림 5는 단순교 지간 40m 교량들에 대해 교량의 고유진동수 변화에 따른 최대 DMF, 최

대 단부회전각, 상판의 최대수직가속도의 변화를 보여준다. 5.2Hz 미만의 첫번째 고유진동수를 갖는 교량의 경우에는 공진을 일으키는 한계속도가 설계속도인 350km/h 이하에 존재하며, 이 때 시방규정을 초과하는 불안한 동적거동을 보인다. 그러나, 고유진동수가 5.2Hz를 초과하는 교량들의 경우 설계속도 350km/h에서의 응답으로, 매우 안정적인 동적거동을 나타냄을 알 수 있다.

본 연구에서 사용된 강합성형 교량의 경우, 고유진동수는 상판의 폭이나 두께, 가로보 등에 의한 변화보다는 주형의 물성치, 그중 형고에 가장 민감한 변화를 보이며, 설계속도 내에서 공진을 피할 수 있는 5.2Hz 이상의 고유진동수를 가지려면, 지간 30m 교량의 경우 형고가 2.4m 이상

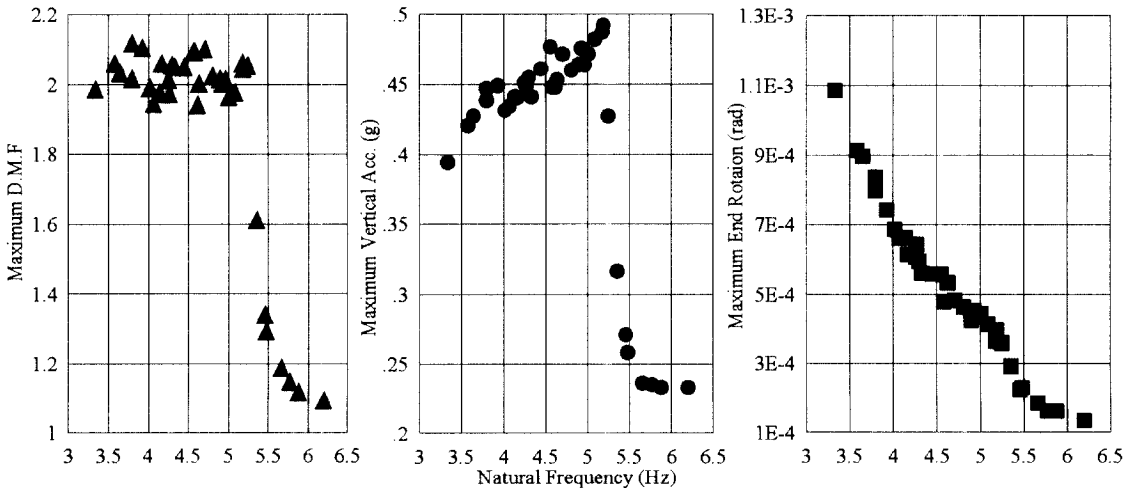


그림 5. 교량의 고유진동수 변화에 따른 동적응답

이어야 하며, 지간 35m 교량의 경우에는 3.0m 이상, 지간 40m 교량은 형고 3.7m 이상이어야 하는 것으로 나타났다.

## 5.2 속도매개변수(Speed Parameter)

차량-교량 간의 상호작용을 고려한 동적해석에서는 교량 및 차량의 동적특성, 차량의 속도, 노면조도 등 수많은 매개변수가 작용하게 된다

근래의 연구자들은 이와 같은 수많은 매개변수간의 관계를 간단화하기 위하여 노력의 일환으로 속도매개변수( $\alpha$ )를 1960년대 말에 처음으로 사용하였다. 속도매개변수는 연구자들마다 약간씩 변형시켜 사용되고 있지만, 결과적으로는 공진의 개념에서 도출된 것으로 다음과 같은 무차원 계수이다.

$$\alpha = \frac{V}{\omega_1 S_{eff}}$$

$V$  : 차량의 속도

$\omega_1$  : 교량의 첫번째 고유진동수

$S_{eff}$  : 유효타격간격

공진의 개념과 같이 속도매개변수( $\alpha$ )가 1.0이 되면 공진이 발생하게 되어 가장 큰 응답이 나타남을 예상할 수 있다. 그러나, 속도매개변수는 차량의 동특성을 고려하지 않는다는 단점이 있으므로 이에대한 보완이 필요하다.

## 5.3 차량모델링 방법에 따른 동적거동

열차하중의 모델링 방법에 따른 동적응답 결과를 비교하였다. 즉, 열차하중을 이동집중하중(CF), 단자유도 시스템(SDOF), 2차원 시스템(TGV2D)의 세가지로 모델링한 후 그 결과를 비교하였다.

그림 7은 단순교와 3경간 연속교 두번째 경간

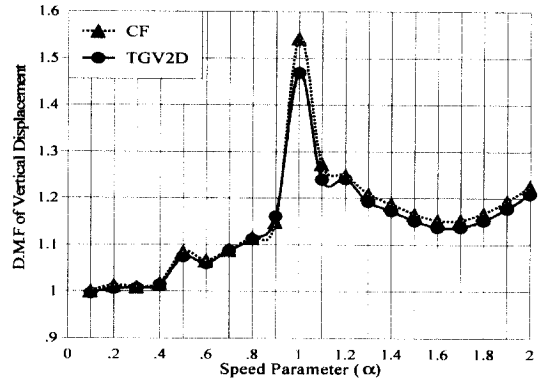


그림 6. 속도매개변수( $\alpha$ )의 변화에 따른 수직처짐 D.M.F.의 변화

의 중심부에서의 수직처짐의 차량모델링 방법에 따른 D.M.F.의 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이, 대부분의 속도구간에서 차량모델링 방법에 따른 교량의 동적응답의 크기는 비슷한 경향을 보이

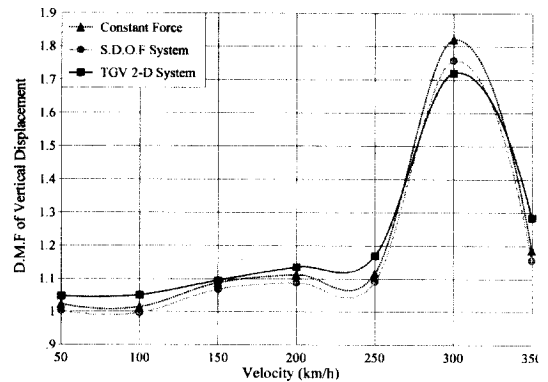
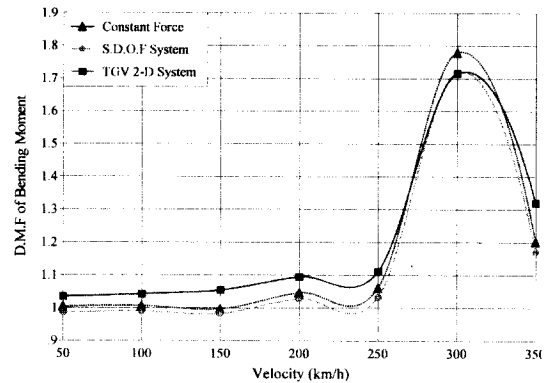


그림 7. 차량모델링 방법에 따른 수직처짐 D.M.F.의 변화

나, 가장 큰 응답이 발생하는 한계속도(Critical Velocity)부근에서는 이동집중하중에 의한 응답이 큰 것으로 나타났다. 그러나, 열차 현가장치의 댐핑 등 차량 특성치에 따라 이러한 응답 결과는 달라질 수 있다. 향후 보다 정확하고 상세한 자료에 의해 그 결과를 고찰하여야 할 것으로 판단된다.

#### 5.4 차량의 등속운동과 제동운동

열차의 제동에 의한 동적응답을 고찰하기 위하여 속도의존형 제동합수를 이용하여 제동하중을 모사하여 등속운동과 제동운동에 의한 응답을 비교하였다.

그림 8은 차량의 제동위치에 따른 3경간 연속교의 세번째 경간 중심부에서의 수직처짐의 D.M.F를 보여준다. 그래프에서 보듯이 차량의 제동위치를 변화시키며 시작속도 250km/h와 350km/h에 대하여 응답을 고찰하였다. 본 연구의 예제 해석 결과, 수직처짐의 D.M.F는 제동하중에 의하여 단순교의 경우 최대 7.83%, 3경간 연속교의 경우 최대 16.82%의 증가가 발생하였다. 종방향 부재력의 경우, 교량에 진입하기 전에 제동이 시작될 경우 제동위치에 따른 변화가 작으나, 제동 위치가 교량 중점에 가까워질수록 그 응답이 커짐을 알 수 있었다<sup>(13)</sup>.

#### 5.5 도상의 영향

도상이 교량의 응답에 미치는 영향을 파악하기 위하여 동적응답을 분석하였다. 트래구조의 모델링을 위한 도상의 물성치에서 기초상수( $k_0$ )의 결정은 Hetényi[10]의 연구를 참고하였으며, 레일과 침목에 대한 물성치는 참고문헌<sup>(12)</sup>에 제시된 값을 사용하였다. 그림 9는 그 결과를 보여준다. 교량에 전달되는 차륜하중의 완화와 재분배 효과가 저속에서는 발생하였으나, 그 이상의 속도에서는 이런 효과가 발생하지 않는 것으로 나타났다.

#### 5.6 주행면의 불규칙성

종구배, dipped joint, 바퀴의 편마모에 의한 교량의 응답에 미치는 영향을 파악하기 위한 해석을 수행하였다. 그림 9와 같이 종방향 구배는 차량에 지지점 운동(support motion)과 같이 바퀴에 반복운동(cyclic motion)을 발생시키고 차량-교량 상호작용에 의해서 추가적인 하중이 교량에 가해지게 되므로 종방향 구배는 주행면 불규칙성을 고려하지 않았을 때에 비하여 최고 7.47% D.M.F 증가를 보였다. Dipped joint와 바퀴의 편마모에 의한 교량의 동적변화는 미세한 증가를 나타냈다.

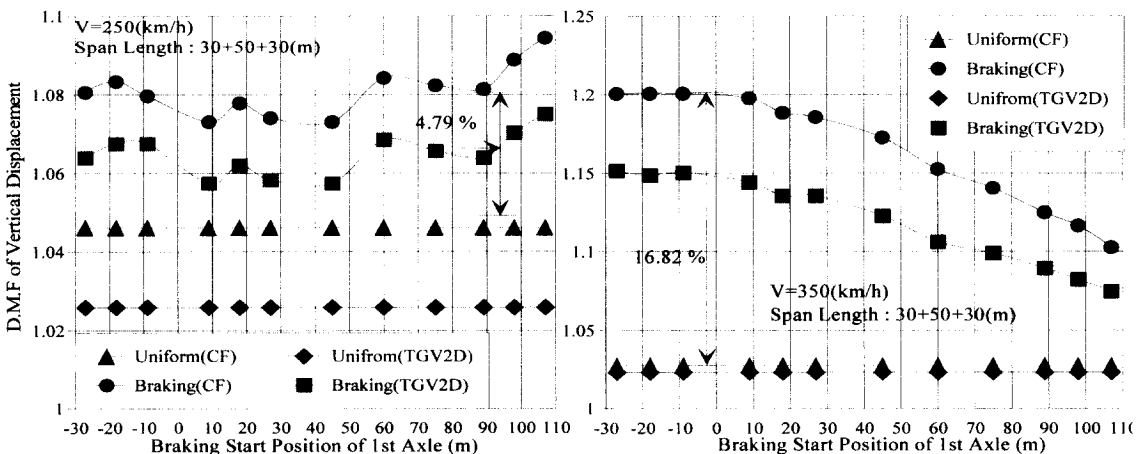


그림 8. 제동위치에 따른 연속교 세번째 경간 중앙부 수직처짐 D.M.F의 변화



## 5.7 교량의 감쇠에 따른 동적응답

교량의 감쇠는 진동제어에 주된 역할을 하게 된다. 실 구조물의 감쇠란 매우 다양할 뿐 아니라 감쇠값 산정에 어려운 점이 많다. 본 연구에서는 교량의 감쇠를 비례감쇠(proportional damping)인 Rayleigh damping으로 가정하여 연구를 수행하였다. 그림 10은 단순교에 대하여 감쇠비를 1%, 2%, 5%, 10%, 20%로 변화시키며 그 동적응답의 차이를 비교한 것이다. 한계속도와 350 (km/h), 두가지 속도에 대하여 수직처짐의 D.M.F, 상판의 최대수직가속도, 최대 단부격임각의 응답을 도시한 것이다. 그림에서와 같이 공진이 발생하는 한계속도의 경우 교량의 감쇠에 따라 그 응답이 급격히 줄어들었으며, 350km/h 주행의 경우는 상대적으로 감소의 폭은 작았다. 한계속도에서도 교량의 감쇠비가 5%이상일 경우 매우 안정적인 응답을 보였다. 이 결과에서 알 수 있듯이 교량의 감쇠는 동적응답에 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

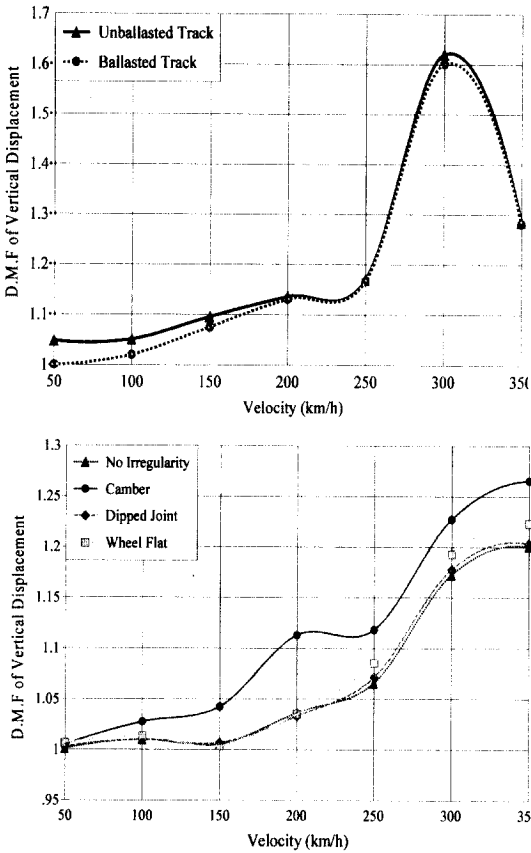


그림 9. 주행속도에 따른 도상의 영향과 주행면 불규칙성의 영향

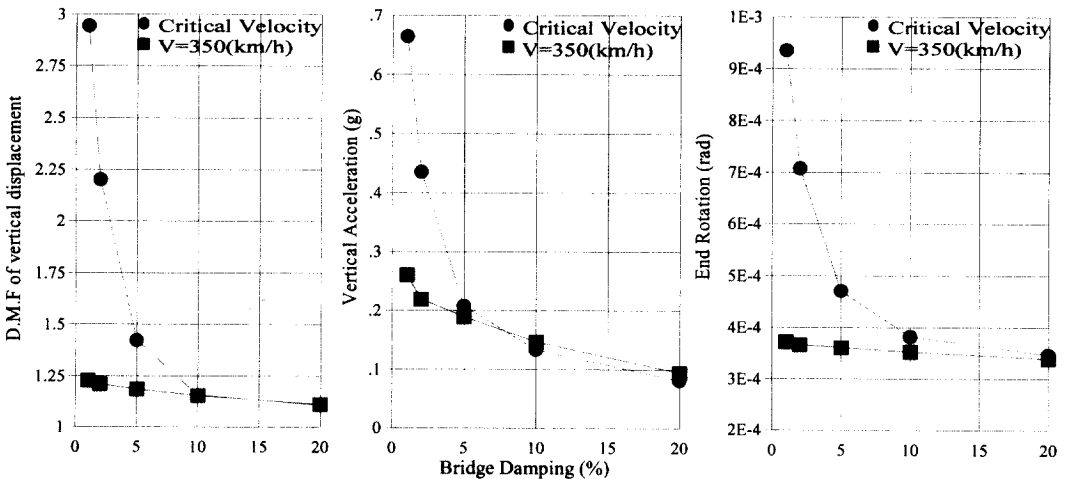


그림 10. 교량의 감쇠에 따른 동적응답의 변화

## 6. 결 론

위의 예제해석과 매개변수연구를 통하여 다음 결론을 도출하였다.

- 설계속도 내에서 공진이 일어날 경우, 교량은 동적으로 불안한 거동을 보이게 된다. 수치해석 예제로 사용된 교량의 고유진동수는 각 물성치 중 형고에 가장 민감한 반응을 보이며, 설계속도 내에서 공진을 피할 수 있는 5.2Hz 이상의 고유진동수를 가지려면, 지간 30m 교량의 경우 형고가 2.4m 이상이어야 하며, 지간 35m 교량의 경우에는 3.0m 이상, 지간 40m 교량은 형고 3.7m 이상이어야 하는 것으로 나타났다.

- 이동하중에 의한 교량의 동적거동에 관계되는 수많은 매개변수를 줄이기 위해 개발된 속도매개변수는 공진의 개념에서 도출된 것으로 교량의 고유진동수, 유효타격간격이 결정되면 동적응답의 예측에 활용할 수 있다.

- 열차하중 모델링 방법에 따른 동적응답은 본 연구에서의 차량 동특성치를 사용할 경우, 대체적으로 2차원 모델링에 의한 응답이 이동집중하중이나 단자유도 시스템 조합의 경우와 비슷하거나 약간 큰 양상을 보이나, 공진이 발생하는 한계속도 부근에서는 응답이 작은 것으로 나타났다.

- 본 연구에서의 수행된 예제의 경우, 차량의 제동에 의하여 등속운동에 비해 최대 16.82%의 응답 증가를 일으킬 수 있는 것으로 나타났으며, 제동의 시작위치 및 차량이 응답이 계산되는 점 근처에서 정지하게 될 때 교량의 응답에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

- 도상을 고려하는 경우에는 저속에서는 하중의 완화와 재분배 효과가 크나 고속에서는 그 영향이 미미한 것으로 파악되었다.

- 주행면의 불규칙성 중, dipped joint와 바퀴편마모는 그 영향이 작지만, 종방향 구배의 경우 이를 고려하여야 하는 것으로 판단된다.

- 교량의 응답은 감쇠비에 따라 매우 다른 양상을 보였으며, 특히, 공진 발생시의 응답은 교량

의 감쇠에 매우 민감한 변화를 보임을 알 수 있다. 따라서 적절한 감진장치 등의 배치로 교량의 감쇠비를 높이는 것이 필요하다.

향후 본 연구에서 수행된 다양한 매개변수해석을 보다 심도있게 수행하고, 보다 정확한 열차의 동특성치와 제동함수를 통한 더욱 정밀한 차량모델링을 위한 노력이 필요하며, 특히 실제 교량에 대한 실험연구는 반드시 필요하다고 하겠다.

## 감사의 말

본 연구는 포항산업과학연구원의 연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다. 또한, 자료협조를 해주신 한국고속철도공단에도 감사의 뜻을 전합니다.

## 참 고 문 헌

- (1) Willis, R., et al. "Experiments for determining the effects produced by causing weights to travel over bars with different velocities", Reports of the commissioners appointed to inquire into the application of iron to railway structures, W. Clowes & Sons, London, 1849
- (2) Inglis, C.E., A mathematical treatise on vibration in railway bridges, The University Press., Cambridge, 1934
- (3) Frýba, L., Vibration of Solids and Structures under Moving Loads, Noordhoff International Publishing, Groningen, The Netherlands, 1971.
- (4) Gupta, R.K., "The Effects of Acceleration and Braking of Vehicles on the Dynamic Loading of Highway Bridges," Phd thesis presented to University of New South Wales, Australia, in 1978.
- (5) Kunjamoo, K.K.F. & O'Connor, C., "Truck Suspension Models". Journal of Transp. Eng., 109(5), pp.706-720.

- 1984.
- (6) Cantieni, R., "Dynamic Load Testing of Highway Bridges," IABSE, Proceedings P-75/84, 1984.
- (7) Y. B. Yang, S. S. Liao and B. H. Lin, "Impact formulas for vehicles moving over simple & continuous beams", ASCE, ST, Vol.121, No.11, pp.1644-1650, 1995.
- (8) 곽종원, "차량의 제동을 고려한 교량의 동적거동", 박사학위논문, 서울대학교, 1997.
- (9) 이종득, 철도공학, 蘆海出版社, 서울, 大韓民國, 5月 1989, pp 324, 325.
- (10) Hetényi, M, Beams on Elastic Foundation, 6th. ed. Cushing-Malloy, INC., USA, 1961, pp. 10-96.
- (11) Bulletin Ponts Métalliques No. 16, OTUA, 1993
- (12) 한국고속철도건설공단, "천안역사 진동저감 관련 연구보고서 - 열차주행시 하부구조물에 작용하는 동하중의 산정", 1994.
- (13) 포항산업과학연구원, "고속철도 강교량의 동적응답", 1998.2
- (접수일자 : 1998년 5월 18일)