

# 차량-교량 상호작용에 의한 교량 모달 특성의 변화 Variation of modal parameters of bridges due to vehicle-bridge interaction

권순덕\*·김철영\*\*·장승필\*\*\*

Soon-Duck Kwon, Chul-Young Kim and Sung-Pil Chang

Key Words : moving load, modal properties, vehicle, bridge, interaction, ambient vibration test.

## ABSTRACT

This paper addresses the results of experimental and analytical study on the effects of dynamic interaction between vehicle and bridge on modal properties of bridge. Based on ambient vibration test and vehicle impact test on a bridge, it is found that the natural frequencies of bridge are varied by vehicle passing. Analytical studies for the effects of vehicle position, speed, damping, mass ratio and frequency ratio on bridge-vehicle interaction are carried out using complex eigenvalue analysis and numerical integration in time domain. The results show that vehicle properties except speed cause significant change of natural frequency as well as damping of bridge.

## 1. 서론

차량과 교량의 상호작용에 관한 기존 연구를 보면 차량에 의한 교량의 동적 응답을 구하기 위한 해석적인 방법을 제시하고, 몇가지 주요 매개변수들이 충격계수에 미치는 영향을 파악하는데 주력하고 있다. 한편 상시진동실험은 교통흐름에 방해를 주지 않으며, 가진을 위한 별도의 장치없이 교량의 동특성을 추출할 수 있으므로 장대교량의 실험에 많이 사용되고 있다. 그런데 자중이 큰 장대교량과는 달리 주요 가진력이 차량하중인 중소규모 교량의 경우에, 교량의 자중에 비하여 차량의 무게가 상당하므로 차량이 교량의 동특성에 어떤 형태로든지 영향을 끼치리라는 것은 짐작할 수 있다.

기존 연구를 보면 차량의 중량, 축 수, 축 간격, 속도, 제동, 연행효과, 편심주행, 현가장치, 질량비, 진동수비 등이나 교량의 경간장, 경간 수, 노면조도, 진동수 등이 교량의 충격계수에 미치는 영향을 파악하는데 집중되어 있다. 그러나 차량이 교량의 동특성 자체에 미치는 영향에 대해서는 연구가 거의 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서는 차량과 교량의 상호작용이 교량의 동특성에 미치는 영향을 파악하는데 목적을 두었다. 이를 위하여 단경간 교량을 대상으로 상시진동실험과 차량충격실험을 수행하여 교량의 동특성의 변화를 실증적으로 보여주고자 한다. 아울러 차량과 교량

의 상호작용 해석모델에 대한 복소고유치해석 및 시간이력 해석을 수행하여 차량의 위치, 속도, 감쇠비, 질량비, 진동수비가 교량의 동특성에 미치는 영향에 대한 매개변수 연구를 수행하였다.

## 2. 상시진동실험을 통한 상호작용 평가

### 2.1 실험의 목적 및 방법

실험에서는 차량과 교량의 상호작용의 영향이 반영된 교량의 고유진동수를 추출하는데 목적을 두었다. 한편 감쇠비는 추출방법에 따라 많은 편차가 나므로 차량에 의한 영향을 파악하기 힘들다고 판단하여 실험 대상에서 제외하였다. 본 연구에서 실시한 구체적인 실험 방법으로는 (1) 해석과 비교하기 위하여 교량의 강성을 파악하기 위한 정적재하실험, (2) 교량의 고유진동수와 모드 형상을 추출하기 위한 상시진동실험, (3) 차량과 교량의 상호작용을 직접적으로 파악하기 위한 차량충격실험을 실시하였다.

### 2.2 상시진동실험

본 연구에서는 상대적으로 차량의 영향이 클 것으로 판단되는 단경간 교량을 대상으로 고유진동수를 추출하는 실험을 실시하였다. 한편 감쇠비는 추출방법에 따라 많은 편차가 나므로 차량에 의한 영향을 파악하기 힘들다고 판단하여 실험 대상에서 제외하였다. 대상 교량은 고속도로 교량의 데이터 베이스를 검색하여 자중과 강성이 작고 고유진동수가 차량과 비슷한 2~3Hz 범위 내에 있는 교량들을 선정하여 현장답사 후에 결정하였다. 실험을 실시한 농로 5 육교는 1981년에 완공된 플레이트 거더교이며, 경간장은 46m 이고 설계하중은 DB18 이다.

\* 전북대학교 토목공학과 조교수  
E-mail : sdkwon@chonbuk.ac.kr  
Tel : (063) 270-2289, Fax : (063) 270-2421

\*\* 명지대학교 토목환경공학부 교수

\*\*\* 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

### 2.3 실험 결과

표 1에서는 상시진동실험과 차량충격실험으로 구한 교량의 고유진동수를 비교하였다. 표를 보면 상호작용이 교량의 고유진동수에 상당한 영향을 미친다는 사실을 두 군데에서 확인할 수 있다. 첫 번째는 상시진동실험과 차량충격실험에서 구한 고유진동수의 차이이다. 두 실험에서 구한 수직 1차 진동수는 각각 2.38Hz와 2.13Hz로서 약 10.5%의 차이를 보이고 있다. 이러한 차이가 발생한 이유로는 차량의 위치에 따라 상호작용의 정도에 차이가 있으므로, 공간중앙 근처에서 실험한 차량충격실험의 경우에 상호작용의 강도가 더 컸으며 그 결과로 교량의 고유진동수가 더 낮아진 것으로 설명할 수 있다. 차량과 교량의 진동수가 근접한 수직 1차 모드를 제외한 다른 모드의 경우에 그 차이가 현저히 줄었다.

두 번째는 상시진동실험에서 측정된 가속도중에서 중차량과 경차량에 의한 신호를 분리 추출하여 구한 고유진동수를 비교한 경우이다. 이 경우에도 중차량의 가진에 의한 고유진동수가 경차량에 의한 것보다 더 낮다는 사실은 차량의 중량이 교량의 고유진동수에 영향을 미치고 있음을 보여준다. 또한 대략 중차량과 경차량의 평균적인 무게를 지닌 모든 차량에 의한 고유진동수가 두 값 사이에 있다는 점도 차량의 무게의 영향을 다시 확인시켜 준다. 따라서 이러한 사실로부터 차량이 통과하는 교량의 고유진동수는 일정하지 않으며 차량과의 상호작용으로 변화한다는 사실을 실험적으로 확인할 수 있다.

## 3. 차량-교량 상호작용 해석

### 3.1 연구 방법

복잡한 해석 모델의 경우에 실제 교량과 차량을 정확히 모델링하기 위하여 여러 가지 자료들을 사용하므로 어떤 요소가 어떤 영향을 미치는가를 분리하여 파악하기 힘들다. 따라서 본 연구에서는

상호작용의 영향을 명확히 파악하는데 목적을 두고 있으므로 간단한 해석 모델을 사용하였다. 교량은 수직진동을 하는 단순보로 설정하였고, 차량은 스프링과 감쇠기가 질점을 지지하는 1자유도 계로 단순화시켰다. 해석 방법으로는 먼저 복소고유치 해석을 수행하여 차량과 교량이 연계된 시스템에 대한 고유진동수와 감쇠비를 구하였다. 또한 차량 주행시 교량의 응답을 구하기 위해서는 시간영역의 수치적분을 수행하였다.

해석 예제로는 실험을 실시한 중리 5 육교를 사용하였으며, 차량의 경우에도 차량충격실험에서 사용된 덤프 트럭의 체원을 그대로 이용하였다. 상호작용에 미치는 차량의 영향을 파악하는데 중점을 두기 위하여 이미 많이 연구된 교량의 제원, 노면조도, 단차, 제동 등은 매개변수 연구에서 제외하고, 차량의 위치, 속도, 감쇠비 그리고 차량과 교량의 질량비, 진동수비에 대하여 매개변수 연구를 수행하였다. 아울러 하나의 매개변수에 대한 영향을 해석할 때 다른 변수들은 항상 일정한 값을 유지시켜서 여러 변수가 상호 영향을 미치지 않도록 하였다.

상호작용의 영향을 평가하기 위하여 몇가지 무차원 변수들을 사용하였다. 동적 응답을 비교하기 위해서는 동적확대계수(DMF)를 사용하였는데, DMF는 최대 동적변위를 최대 정적변위로 나눈 값으로 정의하였다. 한편 차량이 교량 위를 통과함에 따라 차량 위치별로 교량의 동특성이 다를 수 있다. 따라서 차량 1회 통과시 동특성치의 평균변화율을 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{Averaged Variation} = \int \left( \frac{f_i(x/L) - f_o}{f_o} \right) dx \quad (1)$$

여기서  $f_o$ : 차량이 없을 때의 동특성치,  $f_i$ : 차량이  $x$ 에 있을 때의 동특성치,  $L$ : 교량의 길이

### 3.2 차량 모델링 방법의 영향

그림 1에서는 차량을 각각 이동하중, 이동질량, 이동차량으로 모델링했을 때, 교량의 기저 모드에 대한 고유진동수의 변화를 보여주고 있다. 그림에

표 1. 차량에 의한 교량 고유진동수의 변화

Mode	상시진동실험			차량충격실험 (4)	차이		
	모든차량(1)	중차량(2)	경차량(3)		1-2)/(1)	1-3)/(1)	(1-4)/(1)
수직1차(v1)	2.38 Hz	2.34 Hz	2.39 Hz	2.13 Hz	1.68 %	-0.42 %	10.50 %
비틀1차(t1)	3.23 Hz	3.13 Hz	3.31 Hz	-	3.10 %	-2.48 %	-
수직2차(v2)	8.13 Hz	8.09 Hz	8.14 Hz	7.89 Hz	0.49 %	-0.12 %	2.95 %
비틀2차(t2)	8.77 Hz	8.73 Hz	8.91 Hz	-	0.49 %	-1.60 %	-

서 측정치는 차량충격실험으로 구한 교량의 진동수이다. 이동질량의 경우에 자체의 관성력이 있으므로 교량과 결합하여 고유진동수를 변화시키며, 이동차량의 경우에 더욱 크게 변화시킨다. 따라서 차량의 질량이 교량의 동특성에 영향을 미치는 것은 명확하며, 아울러 이동차량의 변화가 더 큰 것을 보면 현가장치가 미치는 효과도 상당함을 확인할 수 있다. 아울러 이동질량의 경우에는 모든 모드에 비슷한 영향을 끼치지만, 이동차량의 경우에는 차량과 교량의 진동수가 근접한 모드에서만 변화가 크고 다른 모드에서는 거의 변화가 없었다. 이러한 사실은 감쇠비 변화를 나타낸 그림 2 에서도 다시 확인할 수 있다.

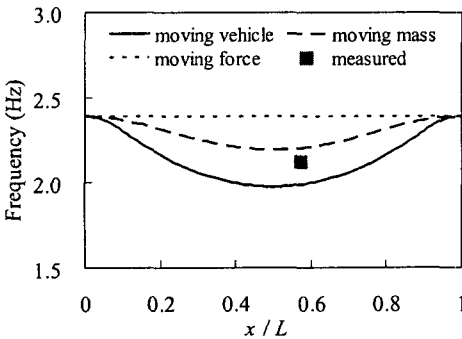


그림 1. 차량 모델링 방법에 따른 교량 고유진동수의 변화

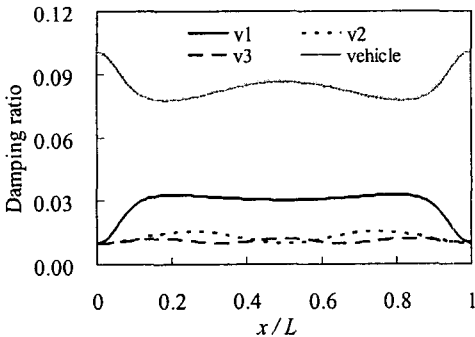


그림 2. 차량 위치별 감쇠비의 변화

### 3.3 차량 속도의 영향

차량의 속도에 의한 영향을 파악하기 위해서는 무차원 계수인 속도 파라미터 ( $\pi v/\omega_1 L$ )를 사용하였다. 그림 3 에서는 속도에 따른 고유진동수를 보여주고 있는데 거의 영향을 받지 않고 있으며, 감쇠비도 동일한 결과를 보였다. 따라서 차량의 속도는 교량의 동특성에 거의 영향을 끼치지 않는 것으로 나타났다.

한편 그림 4 에서는 속도 파라미터에 따른

DMF의 변화를 보여주고 있다. 그런데 차량이 없는 경우에 대한 진동수를 사용한 속도 파라미터의 경우는 약 0.08 과 0.16 근처에서 DMF의 국부적인 최고점이 발생한다. 하지만 차량을 포함한 진동수로 속도 파라미터를 계산한 경우에 0.1 과 0.2 근처에서 최고점이 나타난다. DMF는 속도 파라미터의 정수배 혹은 그 역수배에 비례한다고 알려져 있다. 따라서 차량을 고려한 속도 파라미터가 더 정확하다는 점은 차량이 교량 위를 통과할 때 상당한 상호작용을 한다는 사실을 다시 한번 확인시켜준다.

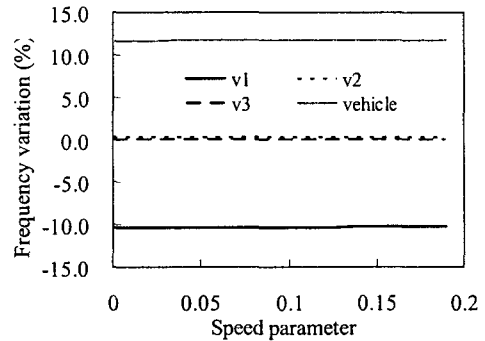


그림 3. 차량 속도의 영향

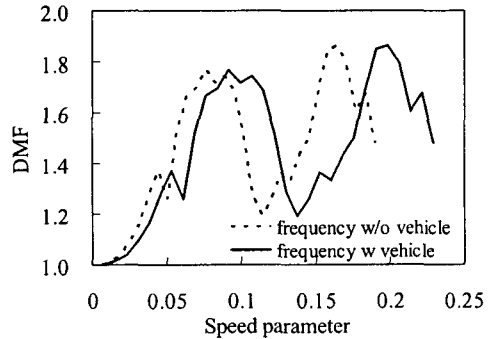


그림 4. 차량-교량 상호작용에 의한 속도 파라미터의 변화

### 3.4 차량 감쇠비의 영향

차량 현가장치의 성능에 따라 교량의 동적 변위에 차이가 날 수 있다는 사실은 일부 실험을 통하여 알려져 있다. 본 연구에서는 차량의 감쇠가 교량의 동특성에도 상당한 영향을 끼침을 발견할 수 있었다. 그림 5 는 차량의 감쇠비에 따른 전체 시스템의 감쇠비 평균변화율을 보여주고 있는데, 교량의 수직 1 차 모드에 대한 감쇠비가 400% 가까이 변화였다. 하지만 교량의 진동수가 받는 영향은 그리 크지 않았다. Green 등(1997)은 이동

하중에 비하여 이동차량의 응답이 작은 이유로 상호작용에 의한 교량 감쇠비의 증가라는 가설을 제시했는데, 그러한 사실을 그림 5 에서 명확히 확인할 수 있다.

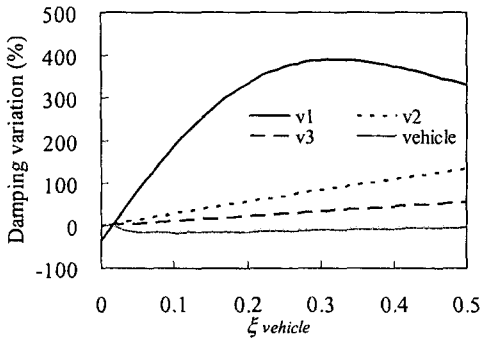


그림 5. 차량 감쇠의 영향

### 3.5 차량-교량 질량비의 영향

차량과 교량의 질량비에 대한 영향은 그림 6 에 나타나 있다. 그림을 보면 질량비가 증가함에 따라 진동수도 거의 비례하여 증가한다. 하지만 감쇠의 경우에는 질량비가 증가함에 따라 수직 1 차 모드에서 감쇠비가 급격히 증가하다가 질량비가 0.1 부근이 되면 그 다음부터는 거의 일정하게 된다.

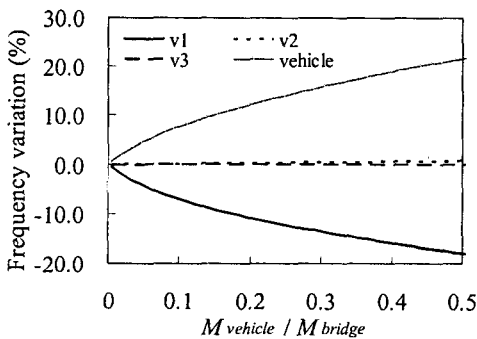


그림 6. 차량-교량 질량비의 영향

### 3.6 차량-교량 진동수비의 영향

그림 7 을 보면 진동수비가 1 이상인 경우에는 진동수비가 증가하면 계속 상당한 영향을 받는 반면에, 1 이하인 경우에는 진동수비가 감소하면 급격히 그 영향이 줄어든다. 한편 Yang 등(1995)의 연구에서는 교량의 동적 응답에 미치는 진동수비의 영향을 무시할 만하다고 하였다. 하지만 이는 상당히 높은 진동수비 영역에 대한 결과이므로 현실성이 떨어진다. 따라서 본 연구의 결과로 볼 때, 진동수비가 0.3 이하이면 상호작용을 무시하

여도 큰 영향이 없는 것으로 판단된다.

일반적으로 하중 진동수( $\pi v/L$ )는 교량의 진동수와 비교하여 낮다고 알려져 있는데(Pan, 2002), 이는 하중 진동수가 변하는 것이 아니고 교량의 진동수가 변하여 발생하는 현상으로 그림 7 로 설명이 가능하다. 즉 차량의 진동수가 교량의 기저 진동수보다 낮을 경우에는 교량의 진동수는 증가하게 되어 정수 역수배보다 높은 속도 파라미터에서 피크가 나타난다. 하지만 반대로 차량의 진동수가 교량의 진동수보다 높을 경우에는 그림 4 처럼 정수 역수배보다 낮은 영역에서 피크가 나타나는 것처럼 보이게 된다.

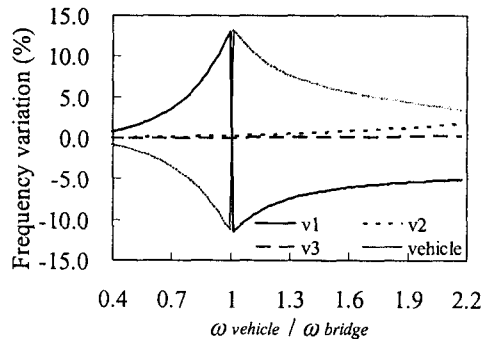


그림 7. 차량-교량 진동수비의 영향

## 4. 결론

본 연구에서는 교량의 동특성에 미치는 차량-교량 상호작용의 영향을 실험적 및 해석적인 방법을 사용하여 분석하였다. 실험 결과를 보면, 차량이 통과하는 교량의 고유진동수는 일정하지 않으며 차량과의 상호작용으로 변화하는 것으로 나타났다. 아울러 이론적인 연구를 통하여 속도를 제외한 차량의 특성들이 단경간 교량의 고유진동수와 감쇠비에 상당한 영향을 미친다는 사실을 밝혔다.

## 참고문헌

- (1) 건설교통부, 1999, "교량 상시계측 및 분석시스템 개발과 그 적용성에 관한 연구", 연구보고서.
- (2) Green, M. F. and Cebon, D., 1997, "Dynamic interaction between heavy vehicles and highway bridges", Computers & Structures, 62(2).
- (3) Pan, T. C. and Li, J., 2002, "Dynamic vehicle element method for transient response of coupled vehicle-structure systems", J. of Structural Engineering, ASCE, 128(2).
- (4) Yang, Y. B., Liao, S. S. and Lin, B. H., 1995, "Impact formulas for vehicles moving over simple and continuous beams", Journal of Structural Engineering, ASCE, 121(11).