

## 제작차륜이동 시험기의 실동주행 가속도측정

### A Real Vehicle Tracking Acceleration Using A Tire-Wheel-Tracking Machine

성 익 현<sup>†</sup> · 성 승 열<sup>\*</sup>

Sung, Ikhyun · Seung, Seungyoul

**Abstract** In this paper, an analytical and experimental study is performed in order to determine the effects of interaction between a vehicle and a structure. For this purpose, a wheel tracking machine and an adequate single span bridge are designed. Results presented in the paper show that the real vehicle tracking accelerations including the interaction between the vehicle and the structure produce additional effects on the dynamic behavior of the structure including reversal and contrary behavior. Also, the interaction between the vehicle and the bridge is reproduced by applying the identified real vehicle tracking accelerations to a general finite element analysis program.

**Keywords** Moving Mass, Vehicle, Bridge, Interaction, Wheel Tracking Machine, Real Vehicle Tracking Acceleration

요 지 본 연구에서는 타이어를 장착한 차량시험기에서 교량과 차량의 상호작용효과를 분석하고자 반복하중 시험을 실시하고 이에 대한 동적반응을 파악하였다. 이를 위하여 차량-교량간 상호작용이 포함된 이동질량형 운하중 시험기를 단순교 형식의 교량에 적용하여 이동질량 반복주행실험을 수행하였다. 이동질량 반복주행실험 결과를 분석하여 차량-교량간의 상호작용을 포함한 가속도 형태의 실동주행차량가속도를 규명하였다. 규명된 차량의 실동주행차량가속도를 범용 해석프로그램에 적용하여 차량-교량 상호작용을 재현할 수 있었다.

핵 심 어 차량 교량 상호작용, 이동질량, 운하중시험기, 실동차량가속도

† 교신저자 : 정회원, 한서대학교, 토목공학과, 교수  
E-mail : iksung@hanseo.ac.kr  
TEL : (041)660-1050

\* 정회원, 한서대학교, 토목공학과, 석사과정

## 1. 서론

교량 위를 진행하는 차량의 경우 적재하중이 있다면 차량의 진행과 노면의 상태에 따라 교량바닥판에 주는 영향이 복잡한 형태를 갖는다. 또한 교량의 응답 역시 상호작용의 결과로 때로는 동적 응답규모는 차량 주행조건에 따라 동일 크기의 정적재하의 응답규모를 초과하는 연구결과도 있다 (김규춘, 1995; Yang et al., 1995). 이에 따라 차량-교량 간 상호작용에 관한 다양한 해석적 연구 및 실험적 연구가 수행되어왔다. 본 연구에서는 차량-교량 상호작용에 의한 교량의 동적거동을 규명하기 위한 다양한 데이터 수집을 위하여 이러한 반응을 실험적인 방법으로 재현하였다. 이를 위하여 기존의 크랭크형식 운하중 실험 장치를 개량하여 차량-교량 상호작용 효과의 재현이 가능한 이동질량형 운하중 실험 장치를 개발 하였다. 개발된 이동질량형 운하중 실험기를 이용하여 단순교 형식의 모형교량을 대상으로 이동질량주행실험을 수행하였다. 이동질량주행실험을 통하여 해석적으로 규명이 어려운 차량의 실동주행하중을 실험적인 방법으로 규명한 후 범용해석프로그램에 적용이 가능한 실동차량주행가속도의 형식으로 변환하였다. 변환된 차량주행입력파형을 이용하여 차량-교량 간 상호작용을 해석적인 방법으로 규명하고 이 결과를 이동질량이론을 적용한 해석적인 방법과 이동질량형 운하중실험기를 이용한 이동질량주행실험결과와 비교분석하여 검증하였다.

## 2. 차량-교량 상호작용

주행하는 차량과 교량의 상호작용은 차량을 다음과 같이 이동질량으로 고려함으로써 해석적으로 규명이 가능하다. 대표적인 2 축 혹은 후륜의 축간거리가 상대적으로 가까운 대형트럭하중은 Fig. 2와 같은 자유도를 포함하여 Fig. 1과 같은 2축 용수철 질량으로 이상화가 가능하다.

주행 중인 차량의 전륜이 교량의 시점에서부터  $x_1$  만큼 떨어져 있고, 축거가  $s$  라면 차량의 중심위치  $x_v$  와 후륜의 위치  $x_2$  는 식 (1)과 식 (2)로 표현된다.

$$\text{차량의 중심위치} : x_v = (x_1 - a_1s) + e_z Q \tag{1}$$

$$\text{후륜위치} : x_2 = x_1 - s \tag{2}$$

여기서,  $Q = \frac{(z_1 - z_2)}{s}$  는 차체의 회전변위를 나타낸다.

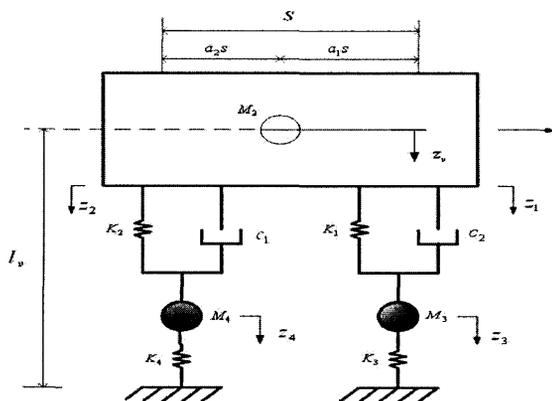


Fig. 1. 차량의 이상화

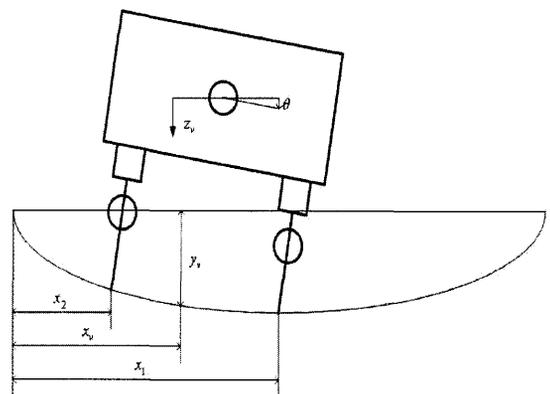


Fig. 2. 차량의 자유도

식(1)의  $e_z$ 는 주행 면으로부터 차량의 중심까지의 거리이다. 정지 시에는 일정한 값을 유지하나 주행이 시작되면 주행으로 인한 교량과 차량 각각의 진동에 의하여 전, 후륜 각각의 위치가 변화하며 차량의 중심위치도 역시 변화하게 된다. 이에 대한 변화량은 식(3)으로 표현된다.

$$e_z = e_v - (z_v - y_x - r_v)z \tag{3}$$

여기서,  $e_v$  = 초기상태의 주행면과 차량중심의 거리

$$z_v = a_2 z_1 + a_1 z_1$$

$$y_v = \sum_{n=1}^N q_n \sin \frac{n\pi}{l} (x_1 - a_1 s)$$

$$r_v = \frac{1}{2}(r_1 + r_2) ; \text{ 노면조도}$$

차량의 정지 시 현가 및 타이어 각 축에 작용하는 하중은 식(4), 식(5)로 표현된다.

$$\text{전륜 현가} : P_1 = M_2 g a_2 \tag{4}$$

$$\text{후륜 현가} : P_2 = M_2 g a_1$$

전, 후륜 타이어 작용하중

$$\text{전륜} : P_3 = P_1 + M_3 g = (M_2 a_2 + M_3) g \tag{5}$$

$$\text{후륜} : P_4 = P_2 + M_4 g = (M_2 a_1 + M_4) g$$

차량 본체의 회전운동으로 인한 Pitching Moment  $J$  는 차량 질량의 전, 후륜 배분에 따라 식(6)과 같이 나타난다.

$$J = M_2 a_1 a_2 s^2 \tag{6}$$

2축 차량과 교량의 진동에 대한 운동에너지, 위치 에너지 및 분산에너지는 각각 식(7), 식(8), 식(9)에 나타나 있다.

$$\begin{aligned} \text{운동에너지} : T = & \frac{m}{2} \int_0^l (\dot{y})^2 dx + \frac{1}{2} M_2 (\dot{z}_v)^2 + \frac{1}{2} M_3 (\dot{z}_3)^2 + \frac{1}{2} J (\dot{Q}_4)^2 + \frac{1}{2} M_2 (\dot{x}_v)^2 \\ & + \frac{1}{2} M_3 (\dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2} M_4 (\dot{x}_2)^2 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \text{위치에너지} : V = & \frac{EI}{2} \int_0^l (\ddot{y})^2 dx + \frac{1}{2} K_1 (z_1 - z_3)^2 + \frac{1}{2} K_2 (z_2 - z_4)^2 + \frac{1}{2} K_3 (z_3 - y_1 - r_1)^2 \\ & + \frac{1}{2} K_4 (z_4 - y_2 - r_2)^2 - P_3 (y_1 + r_1) - P_4 (y_2 + r_2) \end{aligned} \tag{8}$$

$$\text{분산에너지} : D = \frac{c}{2} \int_0^l (\dot{y})^2 dx + \frac{1}{2} c_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2)^2 + \frac{1}{2} c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_4)^2 \tag{9}$$

식 (7), (8), (9)를 Lagrange 방정식과 보의 처짐 방정식을 이용하여 식을 정리하면 교량 상을 주행하는 차량과 교량의 상호작용이 고려된 운동방정식을 유도된다. 유도된 운동방정식을 수치해석 적 방법으로 계산하면 주행 차량 하중으로 인한 차량과

교량의 상호작용을 파악할 수 있다.

### 3. 이동질량 주행시험

#### 3.1 이동질량형 윤하중 시험기

본 연구에서는 차량의 이동질량효과가 포함된 이동질량형 윤하중 시험기를 사용하였다. (대우건설 등, 2005; 김종현 등, 2007) 주행차량은 일반적으로 단일하중, 이동하중, 이동질량 등으로 각각 표현이 가능하며 (Fryba, 1972), 이동질량형 윤하중 시험기는 실동차량의 주행효과를 정밀하게 표현 할 수 있는 이동질량으로 이상화 하였다. 기존의 교량 상 차량주행에 의한 교량의 피로성능 혹은 동적 성능 실험은 주행하는 차량하중의 표현 방식에 따라 다음 두 가지로 구분된다. 첫 번째, 일정점 재하실험 방법이다. 이 방법은 차량이 교량 상 일정 점을 반복 주행하는 현상을 동적 진동 실험기 등을 이용하여 일정 지점에 대한 반복하중으로 이상화하게 된다. Fig. 3에 일정점 재하 실험방법의 실험장치의 일반적인 형태가 나타나 있다. 이 경우 일정 점에 재하 된 반복하중으로 인한 에너지의 총 합은 실제 차량 주행 시 발생하는 에너지와 근사한 실험조건을 선정할 수 있으며, 파괴시의 파괴형상 이외의 대체적인 피로성능의 규명은 가능하다. 하지만 일정한 지점에 반복하중이 재하 되므로 차량-교량 상호작용에 의한 동적인 거동의 모사에는 한계가 있다.

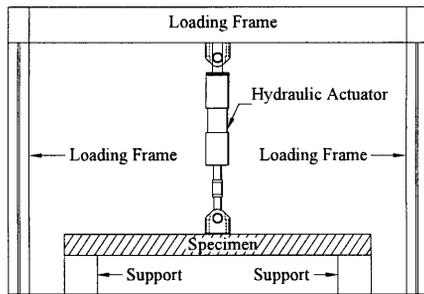


Fig. 3. 일정점 재하실험

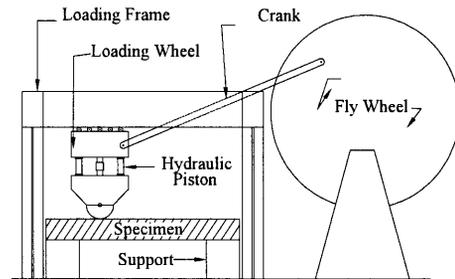


Fig. 4. 크랭크식 윤하중 실험

또한 일정 점에 반복적으로 재하 되는 형식이므로 재하지점 이외부분의 재하하중의 부재로 인하여 동적인 거동에 의한 동적 성능은 규명이 불가능하다. 또한 특정 점에 대해 피로하중이 집중됨으로서, 파괴 시 재하지점의 편칭과괴거동을 나타내기도 한다. 두 번째로는 차량하중을 이동하중으로 이상화한 Fig. 4와 같은 크랭크식 윤하중 시험기를 이용하는 방법이다. 이 방법은 차량의 하중을 재하바퀴의 상부에서 피스톤 등을 이용하여 시료에 압력의 형태로 재하하면서 일정한 주행거리를 반복적으로 이동한다. 따라서 하중의 연속적인 이동 재하가 가능하여 일정점 반복재하의 경우보다는 실제 조건과 근접하여 실동차량주행에 의한 피로성능 규명의 측면에서는 좀 더 합리적이다. 이 방법은 재하방식의 특성상 재하지점에서는 피스톤의 지지점과 바닥판간의 거리가 일정해야 한다. 따라서 시편은 재하방향과 일치하는 방향의 거동이 발생하게 되며 이로 인해 시편에 제한된 동적 모드가 나타나고, 하중의 모드와 구조물의 모드간의 상호연계성을 파악하기 어렵다. 따라서 차량-교량 상호작용에 의한 동적인 거동역시 제한적이게 된다. 또한 단일륜으로 차량을 이상화 하게 되는 경우 차량하중을 단일륜에 집중하게 되어 바퀴에 재하 되는 하중의 양이 상대적으로 크므로, 실제 차량에서 사용되는 고무재질의 타이어보다 강한 재질의 타이어가 필요하며, 상판과 재하바퀴의 강성차이에 의한 국부 파괴를 감소시키기 위한 재하륜과 시편 사이에 강성차이를 감소시키는 탄성체의 주행판이 필요하기도 하다.

본 연구에서는 기존의 크랭크식 윤하중 실험기에 실동차량에 가까운 실험차량의 형태를 도입하여 이동질량 효과를 포함한 실제 주행차량의 효과에 근접한 이동질량형 윤하중 시험기를 사용하였다. Fig. 5와 Fig. 6에 연구에 사용된 이동질량형 윤하중 시험기가 나타나 있다. 윤하중시험기는 구동부와 시편거치부분 및 실험차량부분으로 구성되어있다. 모터와 구동회전Arm으로 구성된 구동부분은 크랭크를 이용하여 실험차량과 연결되며 구동 회전 Arm의 회전운동은 크랭크를 통하여 수평병진운동으로

변환되어 실험차량은 시편 상을 왕복 주행한다. 구동부분과 실험차량은 크랭크만으로 연결되므로 실험차량 및 시편각각에 연직 방향으로 실 차량 주행 시에 가까운 자유로운 거동이 발생하여 차량과 교량간의 상호작용 효과가 발현된다. Fig. 7은 본 연구에 사용된 실험차량의 제원이다. 실험차량은 표준차량(대우건설 등, 2005)의 규격에 따라 하중 블럭을 이용하여 전륜부에 총 하중의 65%, 후륜부에 총 하중의 35%가 재하되었다. Table 1은 이동질량형 윤하중 시험기의 사양 및 본 연구 의 실험 조건이다.

Table 1. 윤하중 실험장치의 사양 및 실험조건

사 양		실험조건
차량주행거리	3.4m (±1.7m)	3.4m (±1.7m)
구동ARM 회전속도	1.6 rpm ~ 31.2 rpm	7.8 rpm
시편크기(가로x세로)	최대 5.0m x 10.0m	2.0m x 3.6m
하중범위	0.2 tonf - 25 tonf	4.5tonf
Tire Rim 외경	최소 15"	17"

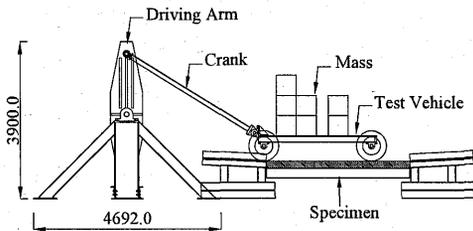


Fig. 5. 이동질량형 윤하중 실험기 단면도

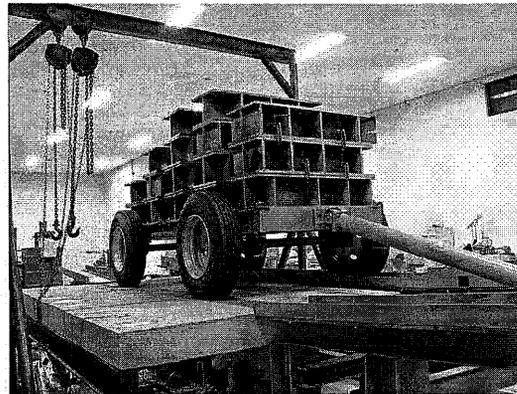


Fig. 6. 실험차량의 위치

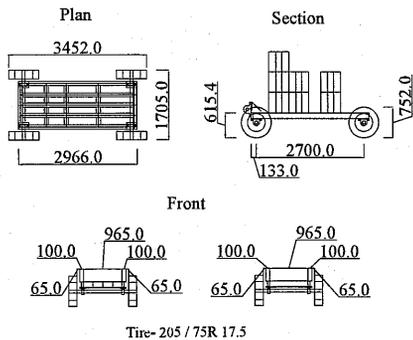
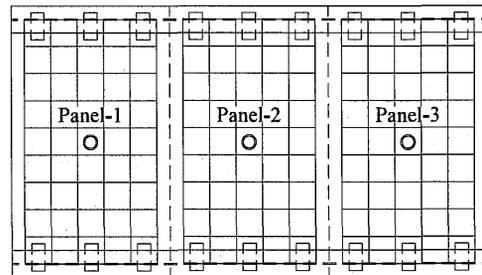


Fig. 7. 실험차량



○ LVDT & Accelerometer

Fig. 8. 계측지점

### 3.2 실험시편 및 실험방법

이동질량주행실험은 단순교 형식의 2주형 교량을 대상으로 하였다. 대상 시편의 규격은 Fig. 8에 나타나 있다. Fig. 8과 같은 1.2m x 2.0m x 0.18m 규격의 패널 3기를 female to female 형식으로 연결하여 단순교의 형식으로 Fig. 9와 Fig. 10과 같이 거치하였다. 주형은 0.2m×0.2m 규격의 H-beam을 사용하였으며 상판과는 M16규격의 스테드 볼트를 이용하여 일체화 하였다. 단순교 형식은 연속교 혹은 기타 복잡한 형식에 비하여 교량자체의 동적 거동이 비교적 단순하여 차량 교량간의 상호작용에 의한 동적거동의 영향을 좀 더 분명히 파악할 수 있다. 시편의 제원은 첫 번째, 시편의 제작 시 크기 및 물성의 상사에 의한 오차 발생가능성을 억제하여 정밀성을 확보하고, 두 번째, 시편 자체의 중량과 실험차량의 반복주행으로 발생 가능한 위험을 최소화하여 실험안전을 확보하기 위하여 실제 시공이 가능한 최소규모를 면밀히 분석하여 전술한 제원으로 선정, 제작되었다. 실험시편은 조립식 프리캐스트 콘크리트 패널 형식 (Matsui, 1997; Issa et al., 1998; Fatmir, 2002)이며 반복제하 방향은 실험 교량의 교축 방향이었다. 또한 실동주행하중의 규명을 위하여 재하차량의 전륜부와 후륜부의 동적처짐을 각각 계측하였다. 시편의 처짐을 측정하기 위한 계측장치는 100mm 사양의 spring type LVDT가 사용되었으며 패널중앙부의 가속도는 5g 사양의 가속도계를 이용하였다. 계측 데이터 수집 및 분석장치로는 signal amplifier 기능과 데이터 수집기능을 겸하는 IO Systems 사의 Data Shuttle Express(32ch사양)와 Kyowa 사의 UCAM-60A를 제어프로그램을 이용하여 PC 와 연결하여 사용하였다. PC와 계측데이터 수집 및 분석장치 간의 정확한 연결을 위하여 전용 terminal block과 signal cable을 이용하였다. 운하중 시험기에는 실험차량의 주행에 이용되는 대형모터가 부착되어있어 Noise 유발의 가능성이 있다. 따라서 안정된 미소전류 및 미소저항의 측정을 위하여 계측장치의 circuit 상에서 접지점을 통일하였고, 교류전원 관련 잔류잡음의 저감을 위하여 data shuttle express 및 UCAM-60A 와 PC 각각의 전원부에 독립적이고 정밀한 AC noise filter를 적용하였다.

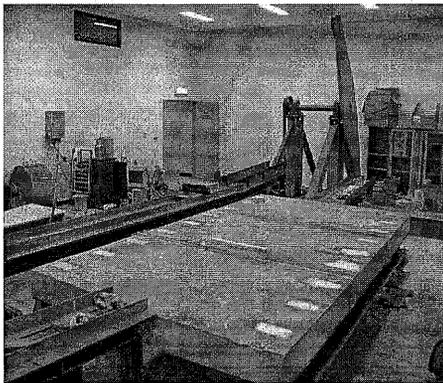


Fig. 9. 시편 거치

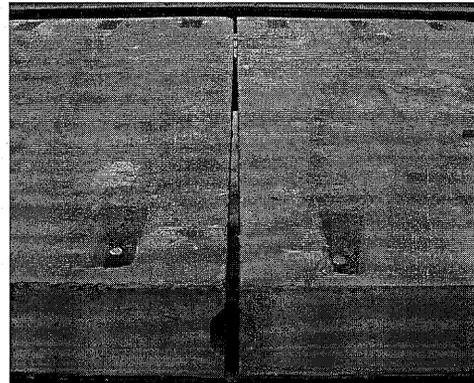


Fig. 10. F2F시편연결

## 4. 결과분석

Fig. 11부터 Fig. 14는 각각 재하차량의 전륜부 연직처짐, 후륜부 연직처짐, 전륜부 실동차량주행 가속도, 후륜부 실동차량주행 가속도를 나타낸다. 연직 하(下)방향을 (-)의 부호로 표현하였으며 실험차량이 주행방향 전환 후 시편의 최외측 패널부터 중앙부 패널을 지나 반대편 최외측 패널로 주행하는 경우를 나타냈다. Fig. 13과 Fig. 14의 실동차량주행가속도는 범용해석프로그램을 이용하여 차량-교량 간 상호작용이 포함된 해석이 가능하도록 운하중 반복주행중실험 중 차량의 전륜 및 후륜의 연직처짐을 측정하고 이를 각각의 재하차량의 전륜 및 후륜의 연직가속도로 변환한 것이다.

Fig. 11과 Fig. 12의 경우 차량-교량 상호작용에 의해 연직하방향과 상방향 움직임을 번갈아 나타낸다. 방향전환후 1초까지의 상하방향의 반복횟수는 1초 이후의 반복횟수보다 빠르며 주행이 진행됨에 따라 연직 하방향과 상방향 움직임이 감소한다. 전륜의 경우 방향전환 후 1초까지는 최대 -28mm부터 +26mm의 범위이며(Fig. 11), 후륜의 경우는 최대 -28mm에서부터 +19mm의 범위이다(Fig. 12). 1초 이후는 전륜의 경우 최대 -5mm에서 +6mm의 범위이며 후륜의 경우 최대 -3mm에서 +4mm범위이다.

재하차량의 정적재하량은 3.1절에서와 같이 전륜부에 전체 정적재하량의 65%가 재하되며 후륜에 35%가 재하되었다.

Fig. 14와 Fig. 15에 변환된 실동차량주행가속도가 나타나있다. Fig. 12와 Fig. 13의 경향과 같이 방향전환 후 1초까지 상하방향의 반복횟수가 1초 이후의 반복횟수보다 빠르며, 시간에 따라 점차 감소하는 경향을 보인다. 전륜의 경우 방향전환 후 1초까지는 최대 -10.2g부터 +16.1g의 범위이며(Fig. 11), 후륜의 경우는 최대 -2.5g에서부터 +2.0g의 범위이다(Fig. 12). 1초 이후는 전륜의 경우 최대 -0.06g에서 +0.2g의 범위이며 후륜의 경우 최대 -0.15g에서 +0.3g의 범위이다.

차량 변위와 가속도 모두 재하방향과 일치하는 연직하방향의 반응과 더불어서 차량-교량 상호작용에 의한 연직상방향 반응이 발생함을 알 수 있으며 특히 전륜 및 후륜의 가속도의 경우 방향 전환 후 1초까지의 범위에서는 전륜의 경우 연직하방향에 비해 최대 156%, 후륜의 경우 최대 80%로 나타났다. 차량-교량 상호작용이 발생하는 경우 재하하중인 실험차량에도 재하방향과 상이한 반응이 나타남을 알 수 있었고 따라서 시편에서도 재하방향과 상이한 방향의 반응도 예측이 가능했다.

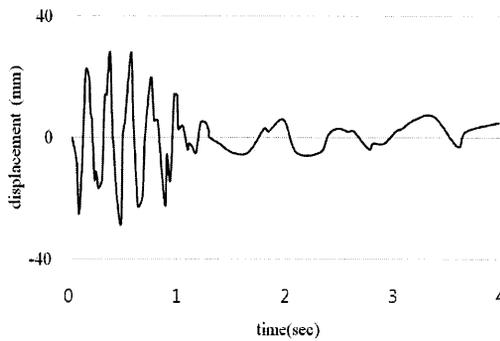


Fig. 11. 전륜연직변위

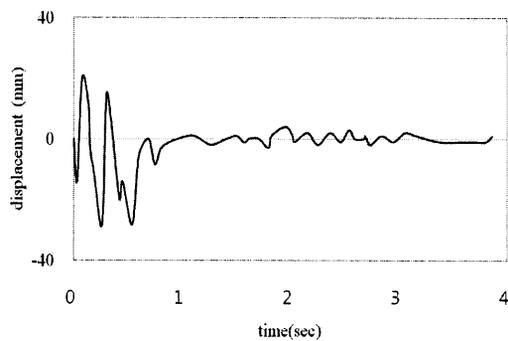


Fig. 12. 후륜연직변위

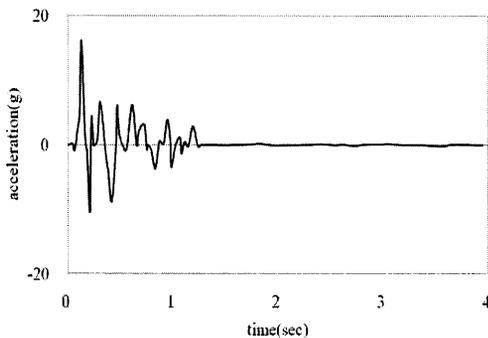


Fig. 13. 실동차량주행가속도(전륜부)

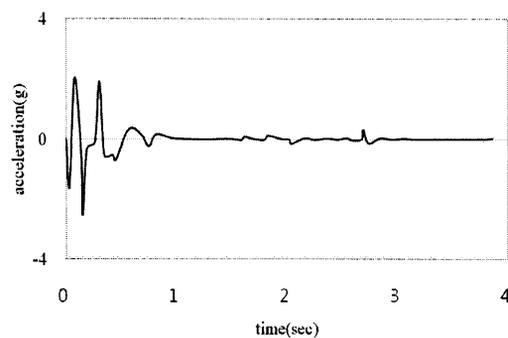


Fig. 14. 실동차량주행가속도(후륜부)

## 5. 결론

본 연구에서는 차량-교량상부구조물간 이동질량을 갖는 시험기를 사용하여 동적응답을 프리캐스트교량상판에 적용하여 분석한 결과 일반 타이어를 장착한 시험차량의 왕복 주행 하중에 대한 실험적 및 이론적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 차량-교량간 상호작용이 포함된 이동질량형 윤하중 시험기를 단순교형식 교량에 적용하여 이동질량 반복주행실험을 수행하였다. 이동질량 반복주행실험 결과를 분석하여 차량-교량간의 상호작용이 포함된 실동차량주행 가속도를 얻을 수 있었다. 얻어진 실동차량주행 가속도를 범용 해석프로그램에 적용하여 차량 주행을 통한 차량-교량 상호작용에 관한 해석을 수행하고 이를 이동질량이론을 적용한 해석결과 및 이동질량형 윤하중 실험결과와 비교, 분석하여 실동차량주행가속도의 합리성을 검증하였다. 이상의 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실동차량주행가속도를 이용한 해석결과를 보면 타이어를 갖고 이동하는 실제차량주행상황을 이동하중을 이용한 해석방법에 비하여 보다 합리적으로 표현할 수 있다고 판단되었다.

(2) 차량-교량간의 상호작용은 차량의 주행 조건에 따라 교량뿐 아니라 차량에도 재하방향과 일치하는 연직하(下)방향의 가속도 및 처짐뿐만 아니라 추가적인 연직상(上)방향 가속도 및 처짐이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 연직 상(上)방향의 가속도는 전륜의 경우 연직하방향 가속도의 56%를 상회하기도 하였다.

(3) 따라서 차량주행으로 인한 차량-교량간 상호작용이 포함된 실 주행조건을 고려하는 경우는 재하방향과 일치하는 연직하(下)방향의 거동과 함께 추가적으로 발생 가능한 연직 상(上)방향 거동을 고려하여야 할 것으로 판단되었다.

(4) 본 연구에 사용된 실동차량주행가속도를 이용한 해석방법은 이동질량형 운하중 실험기를 이용한 실험적 방법과 이동질량 이론을 적용한 해석방법들과 더불어 차량-교량간 상호작용의 규명에 효과적인 것으로 판단된다. 이를 통하여 좀더 현실에 가까운 조건에서 교량의 동적성능 규명등과 보다 더 정확한 차량-교량상호작용에 관한 이론 연구등에 적용할 수 있을 것으로 판단되었다.

### 참고문헌

- [1] Fatmir, M. (2002). Horizontal Shear Connectors for Precast Prestressed Bridge Deck Panels. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- [2] Fryba, L. (1972). Vibration of Solids and Structures under Moving Loads. Noordhoff International Publishing.
- [3] Issa, M.A., Yousif, A.A., Kaspar, I.I., Khayat, S.Y. (1998). "Analysis of full depth precast concrete bridge deck panels." PCI Journal, Vol.43, No.1, pp.74-85.
- [4] Matsui, S. (1997). "Technology development of bridge deck - Innovation, durability and construction." Journal of Bridge and Foundation Engineering, Vol.31, No.8, pp.84-94.
- [5] Yang, Y.B., Liao, S.S., Lin, B.H. (1995). "Impact formulas for vehicle moving over simple and continuous beams." Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.121, No.11, pp.1644-1650.
- [6] 김규춘 (1994). 차량통행 및 제동으로 인한 도로교의 동적거동 해석. 박사학위논문, 고려대학교.
- [7] 김종현, 성익현, 김상철, 김승억 (2007). "운하중 실험기를 이용한 이동질량 실험." 대한토목학회 논문집, Vol.27 No.6A, pp.789-795.
- [8] 대우건설, 세종대학교, 한국도로공사 (2005). 승용차 전용 조립식 고가도로 건설기술 개발. 건설교통부 건설기술 연구 개발보고서.

- ▶ 논문접수일 : 2011년 07월 11일
- ▶ 심사의뢰일 : 2011년 07월 12일
- ▶ 심사완료일 : 2011년 07월 25일