

고무바퀴트랙하중 시험기를 이용한 왕복하중실험

성익현^{1*}

¹한서대학교 토목공학과

A Moving Track Test Using Tire-Wheel Tracking Machine

Ik-Hyun Sung^{1*}

¹Division of Civil Engineering, Hanseo University

요 약 본 연구에서는 차량-교량간의 상호작용 효과가 교량의 동적거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 차량-교량 간 상호작용이 가능하도록 윤하중 실험 장치를 개발하여 단순교량 형식의 교량을 대상으로 이동 질량 실험을 수행하였다. 이동질량 이론을 이용한 해석 결과와 이동질량 실험의 결과를 상호 분석하여 각각의 합리성을 검증하였다. 수행된 실험의 결과를 분석하여 개발된 윤하중 시험기는 차량-교량 간 상호작용에 의한 교량의 동적 거동을 재현할 수 있음을 알았다. 아울러 이동질량 실험의 결과를 분석하여 차량-교량 간 상호작용이 교량의 동적거동에 미치는 영향을 분석할 수 있었다.

Abstract In this paper, an analytical and experimental study is performed in order to determine the effects of interaction between vehicle and bridge superstructure. For this purpose an improved wheel tracking machine and an adequate single span bridge are designed. Results presented in the paper show that wheel tracking machine including moving mass effects can demonstrate more accurate dynamic interaction between vehicle and structure.

Key Words : Moving mass, Vehicle, bridge, Interaction, Wheel-tracking-machine, Moving mass test

1. 서론

본 연구에서는 차량-교량 상호작용에 의한 교량의 동적거동을 파악하고자 다양한 데이터 수집을 위하여 동적반응을 실험적인 방법으로 재현하였다. 이를 위하여 크랭크 식 윤하중시험기를 개량하여 차량-교량 상호작용 효과가 포함된 개량형 윤하중 시험기를 개발하였다. 시험기를 이용하여 단순교량 형식의 2가지 타입(F2F, Loop) 시험교량을 대상으로 왕복질량실험을 수행하였다. 이동질량 실험을 통해 재현된 차량-교량 간 상호작용에 의한 교량의 동적거동은 이동질량 이론을 이용한 해석적 방법으로 해석하고, 이 결과를 실험결과와 비교 분석하여 검증하였다. 또한 실험결과를 이용하여 차량-교량 간 상호작용이 교량의 동적거동에 미치는 영향을 분석하였다.

1.1 이동질량형 윤하중 시험기

본 연구에서는 기존의 크랭크형식 윤하중 실험기의 반

복재하특성을 이용하여 차량의 이동질량재하효과가 포함된 차량하중 시험기를 개발하였다. 주행차량은 일반적으로 단일하중, 이동하중, 이동질량 등으로 각각 표현이 가능하며[5],[7], 기존의 차량하중에 의한 교량의 피로성능 혹은 동적 성능 실험은 차량하중의 이상화 방식에 따라 다음 두 가지로 구분된다. 첫 번째, 일점 재하실험 방법이다. 이 방법은 지그가 포함된 동적 진동시험기를 이용하여 차량의 하중을 일정 지점에 대한 타이어의 반복하중으로 이상화하게 된다. 차량의 타이어가 일점을 연속적으로 통과함을 표현하는 실험 방식으로서 그림 1에 일점 재하 실험장치의 일반적인 형태가 나타나 있다. 이 경우 상판에 재하된 반복하중으로 인한 에너지의 총 합은 실제 차량 주행 시 발생하는 에너지에 가깝게 재하가 가능하며, 파괴시의 파괴형상 이외의 대체적인 피로성능의 규명은 가능하다. 하지만 일정한 지점에서 시료와 연직 방향의 반복하중이 재하되므로 차량-교량 상호작용에 의한 동적인 거동의 모사에는 한계가 있다. 하중의 경우는

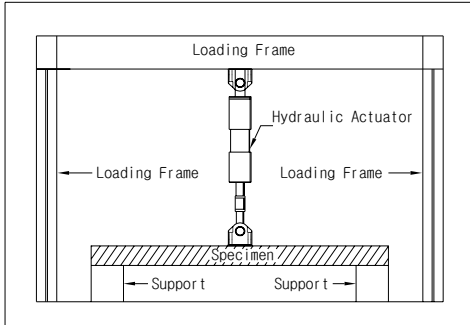
*교신저자 : 성익현 (iksung@hanseo.ac.kr)

접수일 09년 12월 10일

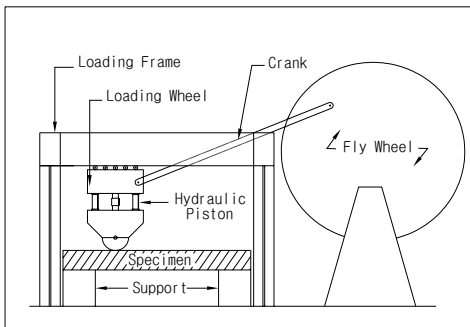
수정일 10년 01월 16일

게재확정일 10년 01월 20일

차량의 주행의 경우를 이상화 하여 정적인 하중의 형식으로 재하 되나, 실제 차량은 연속적인 주행을 하므로 재하지점 이외의 재하하중의 부재로 인하여 하중의 반복에 의한 피로현상 이외의 동적인 거동에 의한 동적 성능은 규명이 불가능하다. 또한 특정위치에 대해 피로하중이 집중됨으로서, 파괴 시 재하지점의 편칭현상이 발생하기도 한다.



[그림 1] 고정점 재하 실험



[그림 2] 크랭크형식 운하중 실험

두 번째로는 차량하중을 이동하중으로 이상화한 그림 2와 같은 크랭크형식 운하중시험기를 이용하는 방법이다. 연직방향의 압력으로 재하하면서 일정한 주행거리를 반복적으로 이동한다. 따라서 하중의 연속적인 이동 재하가 가능하여 실제 조건과 근접하고 피로성능 규명의 측면에서는 좀 더 합리적이다. 이 방법은 재하방식의 특성상 재하지점에서는 피스톤의 지지 점과 바닥판간의 거리가 일정해야 한다. 따라서 실제하중과 같은 타이어 하중과 같이 탄성하중재하가 불가능하다. 이로 인하여 제한된 동적 모드가 나타나고, 하중의 모드와 구조물의 모드간의 상호연계성을 파악하기 어렵다. 따라서 차량-교량 상호작용에 의한 동적인 거동역시 제한적이게 된다. 또한 단일

바퀴로 차량을 이상화 하게 되는 경우 바퀴에 재하 되는 하중의 양이 상대적으로 크므로, 실제 차량에서 사용되는 고무재질의 타이어보다 강한 재질의 타이어가 필요하며, 상판과 재하바퀴의 강성차이에 의한 국부 파괴를 감소시키기 위한 재하바퀴와 시편 사이에 고무 등의 완충 판이 필요하다. 본 연구에서는 기존의 운하중 시험기에 타이어 접지 및 실 차량의 형태를 도입하여 하중재하는 물론 이동질량 효과를 포함하여 실제 주행차량의 효과에 근접한 이동질량 형 고무바퀴트랙하중 시험기를 개발하였다. 그림 6에 연구에 사용된 이동질량 형 운하중 실험기가 나타나 있다. 구동 회전 Arm의 회전운동은 크랭크를 통하여 수평병진운동으로 변환되어 실험차량을 왕복 이동시키게 된다. 구동부분과 실험차량은 크랭크만으로 연결되므로 실험차량 및 시편은 실 차량 주행 시에 가까운 자유로운 거동이 발생하여 차량과 교량간의 상호작용 효과가 발현된다.

2. 이동질량 해석

2.1 이동질량운동방정식

주행하는 차량과 교량의 상호작용은 차량을 그림1과 같이 이동질량으로 고려함으로써 해석적으로 규명이 가능하다[1].

차량의 중심위치 :

$$x_v = (x_1 - a_1s) + e_z Q \quad (1)$$

후륜위치 :

$$x_2 = x_1 - s \quad (2)$$

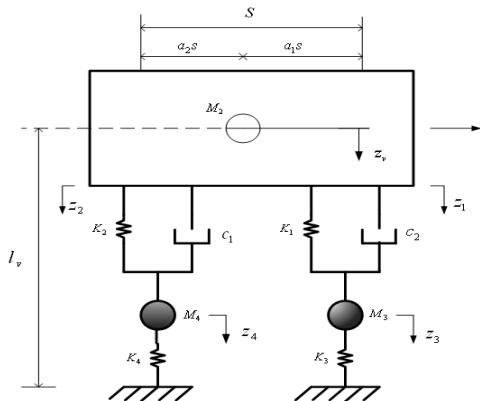
여기서, $Q = \frac{(z_1 - z_2)}{s}$ 는 차체의 회전변위를 나타낸다.

전, 후륜 타이어 작용하중

$$\text{전륜} : P_3 = P_1 + M_3g = (M_2a_2 + M_3)g$$

$$\text{후륜} : P_4 = P_2 + M_4g = (M_2a_1 + M_4)g \quad (3)$$

2축 차량과 교량의 진동에 대한 운동에너지, 위치 에너지 분산에너지는 각각 식(4), 식(5), 식(6)에 나타나 있다.



[그림 3] 차량의 이상화

운동에너지 :

$$T = \frac{m}{2} \int_0^l (\dot{y})^2 dx + \frac{1}{2} M_2 (\dot{z}_v)^2 + \frac{1}{2} M_3 (\dot{z}_3)^2 + \frac{1}{2} J (\dot{Q}_4)^2 + \frac{1}{2} M_2 (\dot{x}_v)^2 + \frac{1}{2} M_3 (\dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2} M_4 (\dot{x}_2)^2 \quad (4)$$

위치에너지 :

$$V = \frac{EI}{2} \int_0^l (\ddot{y})^2 dx + \frac{1}{2} K_1 (z_1 - z_3)^2 + \frac{1}{2} K_2 (z_2 - z_4)^2 + \frac{1}{2} K_3 (z_3 - y_1 - r_1)^2 + \frac{1}{2} K_4 (z_4 - y_2 - r_2)^2 - P_3 (y_1 + r_1) - P_4 (y_2 + r_2) \quad (5)$$

분산에너지 :

$$D = \frac{c}{2} \int_0^l (\dot{y})^2 dx + \frac{1}{2} c_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2)^2 + \frac{1}{2} c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_4)^2 \quad (6)$$

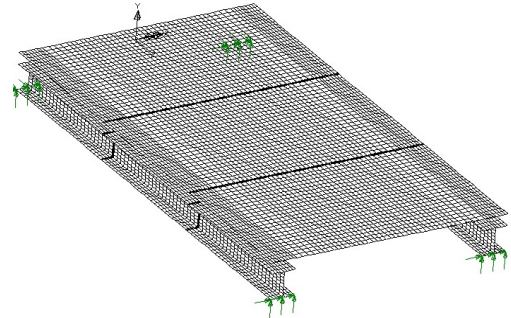
식 (4),(5),(6)을 Lagrange 방정식과 보의 처짐 방정식을 이용하여 식을 정리하면 교량 상을 주행하는 차량과 교량의 상호작용이 고려된 운동방정식이 유도된다.

2.2 실동차량주행속도를 이용한 해석

2.2.1 해석모델 및 해석조건

본 연구에서는 실동차량주행속도를 적용한 범용해석과 이동질량이론을 적용한 해석을 수행하였다. 표 1에 해석조건을 표기하였다. 이동질량이론을 적용한 해석은

analysis1로 표현하였고, 실동차량주행속도를 적용한 해석은 analysis2로 나타내었다.



[그림 4] 해석모델

[표 1] 해석조건

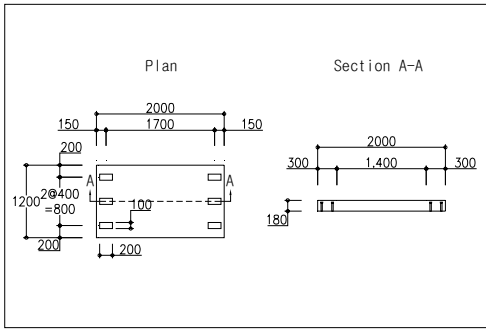
항목	해석조건
하중	2축 이동질량 (analysis 1) 실동차량주행가속도 (analysis 2)
계산거리	3.4m (±1.7m)
콘크리트강도	28MPa(상판) 40MPa(연결부 및 배당층)
차량정적하중	44.1kN (analysis1)

그림 4에 범용해석프로그램을 이용한 해석에 사용된 모델이 나타나있다. 범용 구조 해석 프로그램인 LUSAS를 사용하였고, 탄성영역에서 해석을 수행하였다. 해석모델의 상판 및 주형은 3차원 셀 요소를 적용하였고 상판과 주형간은 완전합성으로 가정하여 constraint equation 옵션을 이용하였다.

3. 고무바퀴트랙하중 시험기의 트랙시험

3.1 실험 시편 및 실험방법

실험은 단순교량 형식의 2주형 교량을 대상으로 하였다. 대상 시편의 규격은 그림 5와 같다. 1.2m x 2.0m x 0.18m 규격의 패널 3기를 Female to Female 형식으로 연결하여 단순교의 형식으로 그림 6과 같이 거치하였다. 고무바퀴를 적용하고 실동차량조건에 맞추어 축중분배가 가능한 시험기는 총 3.4m의 주행거리를 최대 속도 24.95km/h로 반복 주행이 가능하며, 사용가능 하중의 범위는 1.96kN부터 245kN이다.

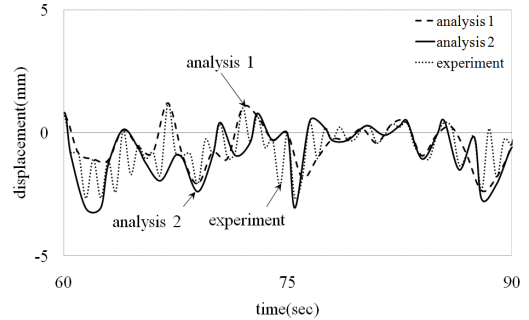


[그림 5] 프리케스트 패널규격

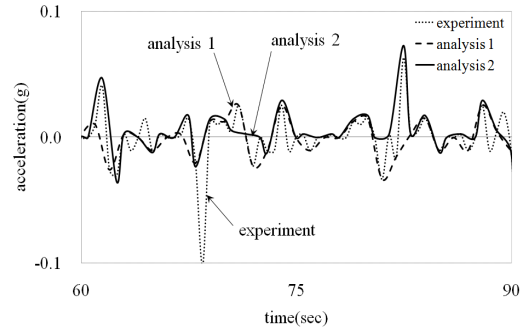


[그림 6] 실험차량의 위치

대체로 동일한 범위 내에서의 해석결과와 실험결과가 잘 일치함을 알 수 있다.



[그림 7] 중앙 부 처짐(해석-실험비교)



[그림 8] 중앙부 가속도 (해석-실험비교)

4. 실험결과

4.1 시험편의 처짐 및 가속도

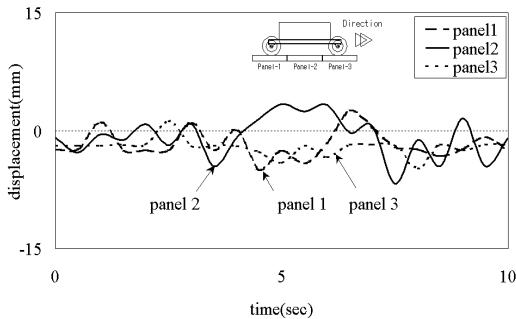
그림 7과 그림 8은 이동질량이론 해석 결과(analysis1) 및 실동차량주행가속도(analysis2)를 적용한 해석 결과와 타이어트랙시험기 이동질량실험결과와의 비교를 나타내었다. 시편중앙부 처짐의 경우 최대값 범위는 실험에서 -3.4mm 부터 +2.2mm 로 나타났으며 이동질량이론을 적용한 해석결과에서는 -2.9mm부터 +2.2mm 로 나타났다. 실동차량주행가속도를 적용한 해석결과에서는 -3.0mm부터 +2.5mm로 나타났다. 시편중앙부 연직가속도의 경우는 실험결과에서는 -0.10g부터 +0.08g 범위로 나타났으며 이동질량이론해석결과에서는 -0.03g부터 +0.05g 로 나타났다. 실동주행가속도 해석결과에서는 -0.04g부터 +0.09g로 나타났다. 시편중앙부 처짐의 최대값 범위는 실험결과와 해석결과가 거의 일치하는 경향을 나타냈다. 가속도의 경우 그림 8에서와 같이 최대 약 2배의 차이를 보이는 구간이 나타났으나 이러한 특정부분이외의 경우

이러한 특정구간의 차이는 해석조건 및 실험조건의 차이에 의한 것으로 판단되며 이동질량이론을 적용한 해석결과와 실동차량주행가속도를 이용한 해석결과는 차이를 보이는 구간이 나타나지 않고 대체로 일치함을 알 수 있다. 이를 통하여 본 연구에 사용된 실동차량주행가속도를 이용한 범용해석은 실제차량주행상황을 합리적으로 표현할 수 있다고 판단되었다.

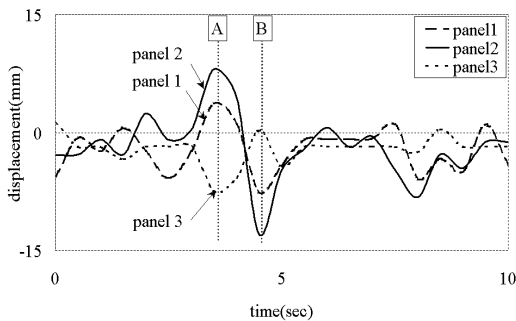
4.2 처짐 상반 현상

그림 9는 시점 부 패널(패널1), 종점 부 패널(패널3)의 처짐 방향과 중앙부 패널(패널2)의 처짐 방향이 상반되는 경우이며, 중앙부 패널(패널2)상에 재하차량의 차륜이 위치하지 않는 경우에 발생된다. 다음 그림 10은 패널별 처짐 방향의 연속적인 반전현상이 나타나 있다. 이 현상은 시편의 상 방향 처짐과 하 방향 처짐이 차량의 주행에 따라 연속적으로 반전되는 현상으로서 재하차량과 시편 모두에 실제 차량 주행 시와 같이 연직 상 방향 구속이 없

음을 알 수 있다.



[그림 9] 처짐의 상반현상

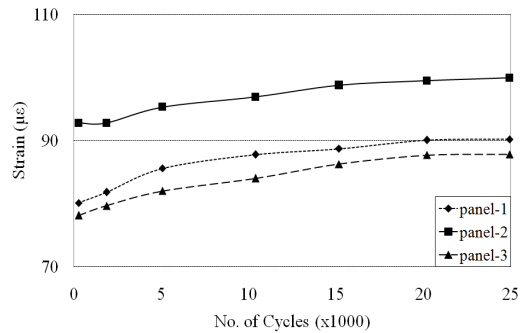


[그림 10] 처짐의 반전현상

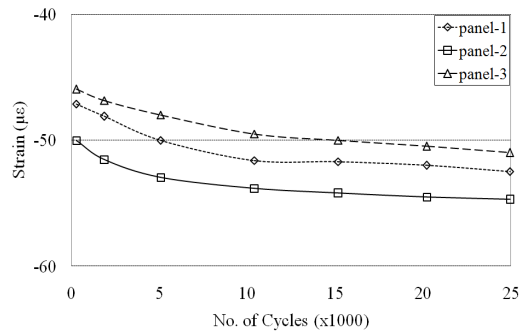
처짐 방향의 연속적인 반전현상은 재하차량의 반복 주행 시와 재하차량의 통과시점 이후에 발생된다. 이는 [A] 점에서 패널1, 패널2의 상 방향 처짐과 패널 3의 하 방향 처짐이 발생한 후 [B]점까지 약 1초의 진행시간 동안 패널 1 과 패널 2는 각각 하 방향 처짐으로 패널 3의 처짐 방향은 상 방향으로 급격하게 변화한다. 이때 패널2의 경우 총 변화량은 약 +8mm 에서부터 약 -12mm 까지 최대 20mm 의 변화량을 나타나게 된다. 이와 같은 처짐의 변화량은 크기에서는 정적 처짐의 변화량 2.8mm 의 700% 에 이르고, 발현시간도 비교적 짧은 시간(본 연구의 경우 1초간)에 걸쳐 연속적으로 발생한다.

4.3 패널 중앙부의 주 철근 변형률

그림 11, 그림 12는 반복주행실험의 패널 중앙부의 주 철근 변형률이고 표 2는 패널중앙부 인장변형률과 압축 변형률의 비율을 나타낸다. 인장변형률을 (+)의 부호로 표현하였다.



[그림 11] 패널중앙주철근변형률(인장변형률)



[그림 12] 패널중앙주철근변형률(압축변형률)

[표 2] 패널중앙인장과 압축변형률 비율(%)

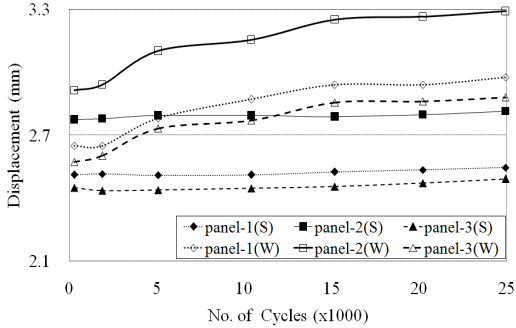
Cycles	300	2000	5000	10000	15000	20000	25000
panel-1	58.8	58.8	58.4	58.8	58.3	57.8	58.2
panel-2	53.9	55.6	55.6	55.6	54.9	54.8	54.7
panel-3	58.8	58.8	58.5	58.9	58.0	57.6	58.1

타이어를 가진 재하차량에 의한 상반현상 및 반전현상으로 인하여 패널 중앙부 변형률은 인장변형률과 함께 압축변형률도 발생한다. 패널중앙부 인장변형률과 압축 변형률의 비율은 중앙부 패널에 비해 시점부와 종점 부 패널의 비율이 크며 이는 최대 58.9%에 이른다. 패널간의 연결부는 F2F (Female to Female) 형식으로서 40MPa 강도의 무 수축 모르터를 이용하여 연결하였다. 패널연결부 압축변형률은 인장변형률의 최대 58.6%에 해당하며 반복주행횟수가 증가함에 따라 이 비율도 증가하는 추세를 나타낸다.

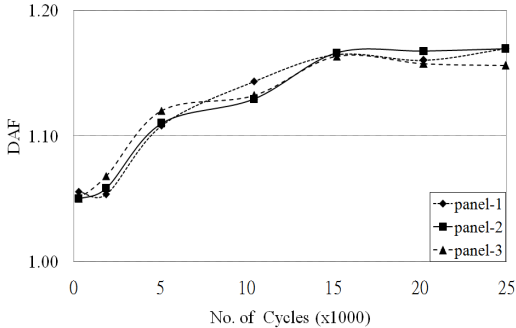
4.4 동적증폭계수

그림 13은 반복주행실험과 정적상태에서의 패널 중앙부 연직 처짐을 비교한 결과이다. 그림의 (S)는 정적 처짐

을 나타내며 (W)는 이동질량 반복주행실험을 나타낸다. 정적 처짐은 반복 주행실험 중 각 5000회 반복시마다 실험차량을 정지시킨 후 측정한 것이다.



[그림 13] 패널중앙부연직 정적 및 동적 처짐



[그림 14] 동적증폭계수(처짐)

반복횟수의 증가에 따라 정적 처짐의 증가에 반복주행 실험시의 처짐의 증가가 커짐을 알 수 있으며, 반복주행 횟수가 5000회를 넘어서면서 그 차이가 더 커짐을 알 수 있다. 그림 14의 동적증폭계수에서는 반복횟수 5000회 미만에서는 이동질량반복주행시의 처짐이 정적 처짐을 최대 5.8% 상회하였으나, 5000회를 지나면서 최대 11% 상회하며 25000회 재하 후 최대 동적증폭계수는 패널 2에서 1.16을 나타내게 된다. 이러한 동적증폭계수는 충격 계수로 사용하는 1.30보다는 작은 값에 해당하나 추가적으로 연직 하 방향 거동의 51.5%에서 58.2%에 이르는 연직 상 방향거동도 발생하므로 실제로 시편의 동적증폭계수는 충격계수를 초과한다고 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 가급적 실동차량에 근접한 형태의 왕복

주행하중을 테스트하기 위한 시험편을 제작하여 구조물-차량의 동적응답을 확인하고자 하였으며 구조물은 프리캐스트 콘크리트 패널 상판의 단순교량 형식의 교량에 적용하였다. 이상의 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 시험기와 교량간의 상호작용은 탄성고무바퀴를 통하여 주행 하에 되 튀김현상으로 인하여 단순교형식의 교량에서도 다양한 형태의 거동을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 일반 실 차량 주행 시 노면조도를 포함한 상태에서 이론적 결과이외에 추가적 거동이 존재함을 알 수 있다.
2. 차량-교량간의 상호작용은 단순교형식의 경우에도 재하방향과 일치하는 연직 하(下)방향의 가속도 및 처짐뿐만 아니라 추가적인 연직 상(上)방향 가속도 및 처짐이 발생함을 알 수 있었다. 연직 상(上)방향의 가속도 및 처짐은 연직 하 방향 가속도 및 처짐의 58%를 상회하기도 하였다. 또한 변형률의 경우 연직 하 방향 재하에 의해 예측 가능한 인장변형뿐만 아니라 추가적인 압축변형을 나타냄을 알 수 있었다. 이러한 압축변형은 인장변형의 58%를 상회하기도 하였다. 따라서 차량-교량 간 상호작용이 포함된 실 주행조건을 고려하는 교량의 성능평가에는 추가적으로 발생 가능한 연직 상(上)방향 거동 및 압축거동을 고려하여야 할 것으로 판단되었다.
3. 시험을 통하여 추가적인 연직 상(上)방향 거동 및 압축거동으로 인하여 비교적 적은 반복재하횟수에서 균열을 발생시킬 수 있음을 알았다.
4. 본 연구에 사용된 이동질량 형 윤회중 시험기를 이용한 실험적 방법은 기존의 다양한 연구방법들과 더불어 차량-교량 간 상호작용의 규명에 효과적인 것으로 판단된다. 또한 이를 통하여 좀더 현실에 가까운 조건에서 교량의 동적피로성능 규명등과 보다 더 정확한 차량-교량상호작용 이론 연구 등에 적용할 수 있을 것으로 판단되었다.

참고문헌

- [1] 김규춘,(1994),“차량통행 및 제동으로 인한 도로교의 동적거동 해석”, 고려대학교 박사학위 논문
- [2] 김영진, 조창백, 김병석 (2003), “윤회중 실험장치에 관한 연구”, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.529-534
- [3] (주)대우건설, 세종대학교, 한국도로공사, (2005),“승용차 전용 조립식 고가도로 건설기술 개발”, 건설교통부 건설기술 연구개발 보고서

- [4] Argyris. J.and Mlejnek, H-P. (1991) “Dynamics of Structures”, Elsevier Science Publishing. pp. 562-565
- [5] Biggs, J.M (1982), “Introduction to Structural Dynamics”, McGraw-Hill, Inc. pp. 315-323
- [6] Fatmir Menkulasi (2002), “Horizontal Shear Connectors for Precast Prestressed Bridge Deck Panels”, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [7] Fryba, L. (1972), “Vibration of Solids and Structures under Moving Loads”. Noordhoff International Publishing
- [8] Issa, M. A.,Yousif, A. A.,Kaspar, I.I. and Khayyat, S.y., “Analysis of Full Depth Precast Concrete Bridge Deck Panels”, PCI Journal, Jan-Feb., pp. 74-85, 1998.
- [9] Matsui, S., “Technology Development of Bridge Deck,-Innovations on Durability and Construction-”, Journal of Bridge and Foundation Engineering, Vol.31, No.8, pp.84-94. 1997.
- [10] Yang, Y.B.,Liao,S.S. and Lin,B.H., “Impact formulas for Vehicle Moving over Simple and Continuous Beams.”, Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 121, No. 11, pp.1644-1650, 1995.

성 익 현(Ik-Hyun Sung)

[정회원]



- 1988년 10월 ~ 1990년 6월 : 한국과학기술원 과학기술대학 연구원
- 1995년 8월 : 고려대학교 토목환경공학과 (구조공학박사)
- 1995년 10월 ~ 1998년 2월 : 한국도로공사 책임연구원
- 1998년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 비선형동역학