

차량 주행을 고려한 교량의 동적 사용성 평가에 관한 연구

한경희*, 성익현**, 김병삼***

*우성엔지니어링 대표

**한서대학교 토목공학과

***다산컨설턴트 전무이사

e-mail: iksung@hanseo.ac.kr

A Study on Dynamic Serviceability Evaluation of Bridge considering Traffic Effects.

Kyung-Hee Han*, Ik-Hyun Sung**, Byung-Sam Kim*

*WooSung Engineering

**Dept. of Civil Engineering, Hanseo University

***Dasan Consultants Co. Ltd.

요 약

본 연구에서는 차량-교량간 상호작용효과가 교량의 동적거동에 미치는 영향을 분석하기 위한 차량 주행 하중에 대한 실험적 및 이론적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 차량 교량간 상호작용이 포함된 이동질량형 운하중 실험기를 단순교형식 교량에 적용하여 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. 또한 차량주행시 교량의 사용성평가에 대한 기본자료를 판단할 수 있었다.
핵심 용어 : 이동질량, 차량, 교량, 상호작용, 운하중 실험기, 실동주행차량가속도

1. 서론

교량 상 차량주행은 이동하중인 차량 하중에 의한 교량-차량간의 상호작용으로 인해 교량, 차량 각각에 복잡한 반응을 일으킨다. 이동질량으로 작용하는 차량하중에 의한 교량의 동적 응답규모는 차량주행 조건에 따라 동일한 크기의 정적재하에 의한 응답규모를 초과하며 (Fryba,1972; Argyris,1991; 김규춘,1995; Yang,1995), 차량-교량간의 상호작용에 의해 상반 응력(reversal stress), 반응의 반전거동등을 발생시킨다.(김규춘,1995;김종현등,2007) 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 기

존의 크랭크형식 운하중실험기를 개량하여 차량-교량 상호작용 효과의 재현이 가능한 이동질량형 운하중 실험기를 개발 하였다. 개발된 이동질량형 운하중 실험기를 이용하여 단순교 형식의 모형교량을 대상으로 이동질량주행실험을 수행하였다. 이동질량주행실험을 통하여 해석적으로 규명이 어려운 차량의 실동주행하중을 실험적인 방법으로 규명한후 범용해석프로그램에 적용이 가능한 실동차량주행가속도의 형식으로 변환하였다. 변환된 차량주행입력파형을 이용하여 차량-교량간 상호작용을 해석적인 방법으로 규명하고 이 결과를 이동질량이론을 적용한 해석적인 방법과 이동질량형 운하중실험기를 이용한 이동질량주행실험결과와 비교분석하여 검증하였다.

1.1. 차량-교량 상호작용

주행하는 차량과 교량의 상호작용은 차량을 그림

1과 같이 이동질량으로 고려함으로써 해석적으로 규명이 가능하다.

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

$$\text{후륜위치} : x_2 = x_1 - s \quad (2)$$

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

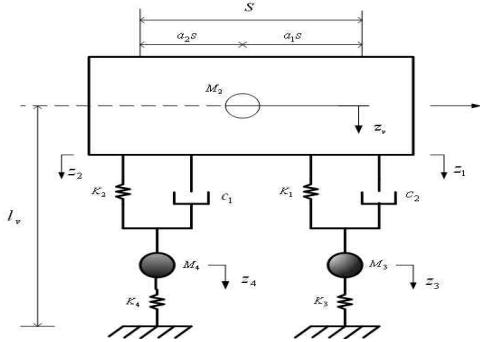


그림 1. 차량의 이상화

진, 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.

운동에너지 :

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

위치에너지 :

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

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.

1.2. 윤하중 실험기 제작

본 연구에서는 기존의 크랭크식 윤하중 실험기에 실험차량에 가까운 실험차량의 형태를 도입하여 이동질량 효과를 포함한 실제 주행차량의 효과에 근접한 이동질량형 윤하중 실험기를 사용하였다. 그림 2과 그림3에 연구에 사용된 이동질량형 윤하중 실험기가 나타나 있다. 구동부분과 실험차량은 크랭크

으로 연결되므로 실험차량 및 시편 각각에 연직방향으로 실험차량 주행시에 가까운 자유로운 거동이 발생하여 차량과 교량간의 상호작용 효과가 발현된다. 실험차량은 표준차량(한국도로공사등, 2005)의 규격에 따라 하중 블럭을 이용하여 전륜부에 총하중의 65%, 후륜부에 총하중의 35%가 재하되었다.

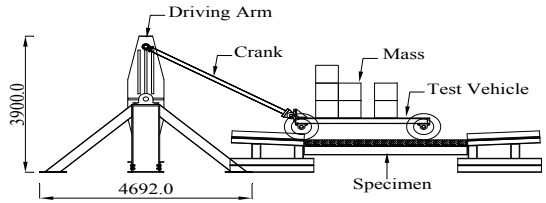
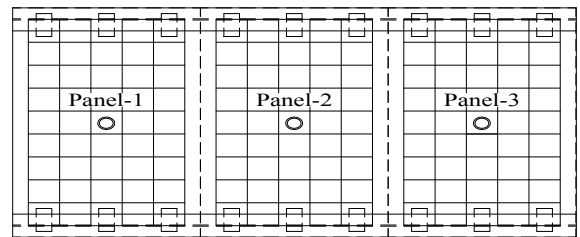


그림 2. 이동질량형 윤하중 실험기 단면도



그림 3. 이동질량형 윤하중 실험기



○ LVDT & Accelerometer

그림 4. 시편 및 계측지점

2. 계측 및 분석

각 패널 중앙부의 처짐 및 가속도를 측정하였으며 그림 4에 계측지점이 나타나 있다. 또한 실험주행하중의 규명을 위하여 재하차량의 전륜부와 후륜부의 동적처짐을 각각 계측하였다.

2.1 실험 시편 및 실험결과

이동질량주행실험은 단순교 형식의 2주형 교량을 대상으로 하였다. 그림 4와 같은 1.2m x 2.0m x 0.18m 규격의 패널 3기를 Female to Female 형식으로 연결하여 단순교의 형식으로 거치하였다. 주형은

0.2m×0.2m 규격의 H-beam을 사용하였으며 상판과는 M16규격의 스테드 볼트를 이용하여 일체화 하였다.

2.2 패널 연결부의 변형률

표 1. 패널연결부 인장변형률과 압축변형률의 비율(%)

No. of Cycles	300	2000	5000	10000	15000	20000	25000
Ratio	54.8	55.2	56.1	57.3	58.2	58.6	58.6

패널연결부 압축변형률은 인장변형률의 최대 58.6%에 해당하며 반복주행횟수가 증가함에 따라 이 비율도 증가하는 추세를 나타낸다. 이러한 인장 변형과 압축변형의 발생은 시편이 교축방향으로 자유로운 움직임이 발생함을 보여주고 있다.

2.3 동적증폭계수

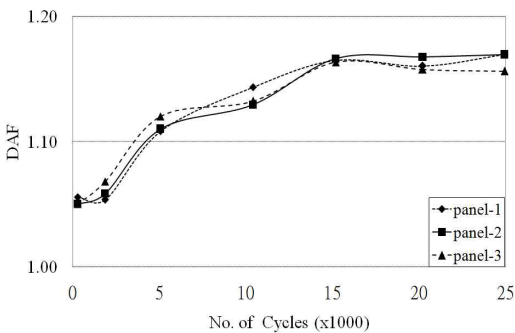


그림 5. 동적증폭계수(처짐)

그림 5에 동적증폭계수가 나타나 있다. 반복횟수 5000회 미만에서는 이동질량반복주행시의 처짐이 정적처짐을 최대 5.8% 상회하였으나, 5000회를 지나면서 최대 11% 상회하며 25000회 재하후 최대 동적증폭계수는 패널 2에서 1.16을 나타내게 된다. 이러한 동적증폭계수는 충격계수로 사용하는 1.30보다는 작은 값에 해당하나 추가적으로 연직 하방향 거동의 51.5%에서 58.2%에 이르는 연직상방향거동도 발생하므로 차량-교량간 상호작용이 발생하는 실제 차량주행조건을 고려하여 교량의 동적거동을 규명하는 경우, 연직하방향의 거동뿐만 아니라 추가적으로 연직상방향의 거동을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

2.3 균열도

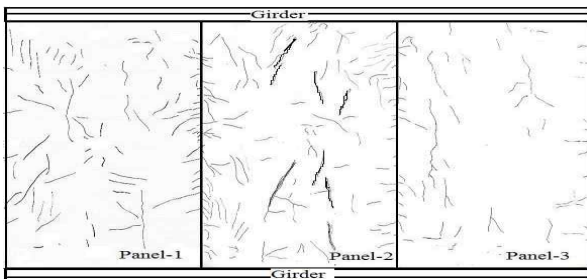


그림 6. 균열도(시편하부)

그림 6은 25000회의 운하중 반복 재하실험 이후

시편의 상,하부의 균열도이다. 차량-교량간 상호작용으로 인한 상반현상 및 반전현상으로 인하여 비교적 적은 반복 횟수에서 균열이 발생하며 또한 시편 하부의 균열뿐만 아니라 시편 상부에도 균열이 발생하였다.

3. 결과

3.1 실동차량주행가속도

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 전환후 1초까지의 범위에서는 전륜의 경우 연직하방향에 비해 최대 156%, 후륜의 경우 최대 80% 로 나타났다.

3.2 해석모델

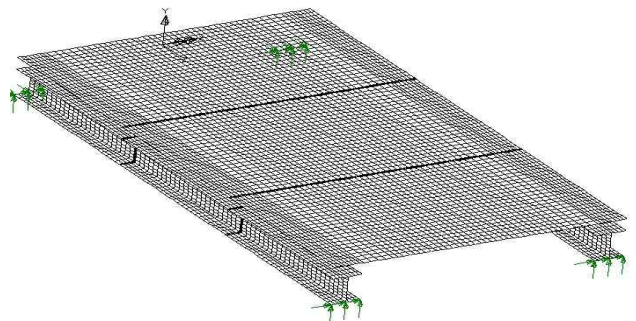


그림 7. 해석모델

본연구에서는 실동차량주행가속도를 적용한 범용해석과 이동질량이론을 적용한 해석을 수행하였다. 이동질량이론을 적용한 해석은 analysis 1로 표현하였고, 실동차량주행가속도를 적용한 해석은 analysis 2로 나타내었다. 그림 7에 해석에 사용된 모델이 나타나 있다. 범용 구조 해석 프로그램인 LUSAS를 사용하였다.

3.3 해석결과와 실험결과의 비교 - 시편의 처짐 및 가속도

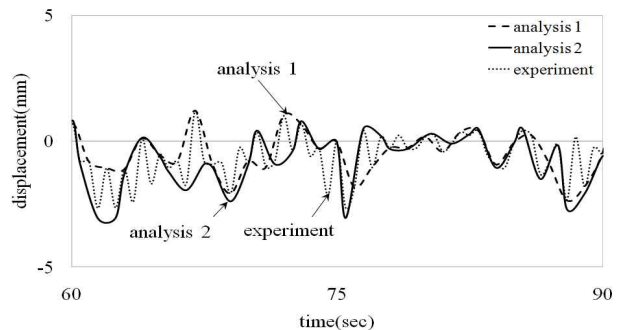


그림 8. 해석 및 실험결과 비교(중양부처짐)

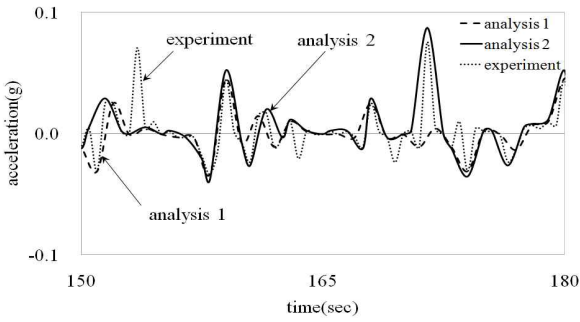


그림 9. 해석 및 실험결과 비교(중앙부가속도)

시편중앙부 처짐의 최대값 범위는 실험결과와 해석결과가 거의 일치하는 경향을 나타냈다. 가속도의 경우 그림 19에서와 같이 최대 약 2배의 차이를 보이는 구간이 나타났으나 이러한 특정부분이외의 경우 대체로 동일한 범위내에서의 해석결과와 실험결과가 잘 일치함을 알수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 차량-교량간 상호작용효과가 교량의 동적거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 차량주행 하중에 대한 실험적 및 이론적 연구를 수행하였다. 얻어진 실험차량주행 가속도를 범용 해석프로그램에 적용하여 차량 주행으로 인한 차량-교량 상호작용에 관한 해석을 수행하고 이를 이동질량이론을 적용한 해석결과 및 이동질량형 윤하중 실험결과와 비교, 분석하여 실험차량주행가속도의 합리성을 검증하였다. 이상의 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험차량주행가속도를 이용한 해석은 실제차량주행상황을 합리적으로 표현할 수 있다고 판단되었고 이를 향후 사용성판단의 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

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 전륜

의 경우 연직하방향 가속도의 56%를 상회하기도 하였다.

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

4. 본 연구에 사용된 실험차량주행가속도를 이용한 해석방법은 이동질량형 윤하중 실험기를 이용한 실험적 방법과 이동질량이론을 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.

5. 참고문헌

- [1] 김규춘(1994) 차량통행 및 제동으로 인한 도로교의 동적거동 해석, 박사학위논문, 고려대학교.
- [2] 김윤철, 박종진(2003) “루프조인트로 연결된 프리캐스트 바닥판의 윤하중 주행시험”, 대한토목학회 논문집, 제 23권 제5A호, 2003.9, pp.807-814
- [3] 김종현, 성익현, 김상철, 김승억 (2007) “윤하중 실험기를 이용한 이동질량 실험”, 대한토목학회 논문집, 제27권 제6A호, 2007.11, pp.789-795
- [4] Argyris, J. and Mlejnek, H-P. (1991) Dynamics of structures, Elsevier Science Publishing. pp. 562-565.
- [5] Fatmir Menkulasi (2002) Horizontal shear connectors for precastprestressed bridge deck panels, Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [6] Fryba, L. (1972) Vibration of solids and structures under moving loads. Noordhoff International Publishing