

철도 판형교의 동적응답 주파수 특성에 대한 분석

Analysis of the Characteristics of Dynamic Frequency Responses in Railway Plate Girder Bridges

오지택* 최진유** 김현민***
Ji-Taek, Oh Jin-You, Choi Hyun-Min, Kim

ABSTRACT

Railway plate girder bridges have characteristics that are not show dominant frequency in dynamic response frequencies like obtained vertical acceleration on the bridge during the train passing because the train loading relatively bigger than the bridge self-weight. This paper experimentally confirmed in FFT result has various frequencies due to inherent characteristic of railway train loading. To establish classification of dynamic frequency range in railway bridge acceleration during the train passing, vibration frequencies result from experimental test are analyzed concerning actuation vibration factors. Factors are train velocity, train type, mass ratio of vehicle/bridge, stiffness of bridge, bridge/track and vehicle/track. From the result, it is proposed that the frequency classification table with corresponding factors. Using the proposed table to develop rehabilitation technique of the plate girder bridge, to expect vibration reduction and comfort enhancement of the railway plate girder bridge.

1. 서 론

본 연구에서는 실제 철도 판형교상에서 측정된 진동가속도결과를 이용하여 동적응답에 대한 주파수 대역별 특성을 분석하였다. 판형교는 구조적 특성상 매우 높은 고유진동수를 갖는 다는 것은 이미 선행연구결과()로부터 확인되었다. 그러나, 실제 판형교를 주행하는 열차에 의해 발생하는 동적응답은 매우 복잡한 양상을 나타내며, 실제 분석 및 평가에 임하는 기술자의 판단에 어려움을 가중시키는 것이 현실이라 할 수 있다. 본 연구에서는 판형교의 비재하 고유진동수와 열차 재하시의 휨진동수에 대한 수치적 및 실험적 비교분석을 수행하였다. 분석대상으로는 L-22로 설계된 경간길이 18m의 용접형 판형교(A교량)를 선택하였다. 분석은 각 교량을 통과하는 열차 유형별로 측정된 주행의 진동가속도, 열차의 주행속도에 따른 가진주파수대역 및 유한요소해석으로 산출한 고유진동수와 정적재하시 휨진동수대역을 고려하여 수행하였다.

* 한국철도기술연구원 철도토목연구팀 팀장, 공학박사, 정회원, 031-461-8531 (교281), jttoh@krri.re.kr

** 한국철도기술연구원 철도토목연구팀 선임연구원, 공학박사, 정회원, 031-461-8531 (교284) jychoi@krri.re.kr

***한국철도기술연구원 철도토목연구팀 연구원, 공학석사, 비회원, 031-461-8531 (교282)

2. FFT분석을 통한 진동주파수 특성 분석

본 절에서는 A교량(용접형, 18m)에 대한 수치적 고유진동수와 FFT분석결과와의 비교를 수행하였다. A교량의 경우는 휨에 대한 1차 고유진동수(판형, 침목 및 레일의 질량을 고려함)가 12.95Hz이다. 프랑스의 경우는 철도교량의 동적안정성(dynamic stability)을 확보하기 위하여 20~150Hz 대역의 진동주파수가 교량의 주부재 및 부부재에서 발생하지 않도록 동적설계를 하고 있는 실정이다. 또한 철도교량의 주부재 및 부부재에서 절대 발생하지 않도록 하는 대역은 40~60Hz으로 설정하여 준수하고 있다. 이 절대회피 대역의 주파수는 교량상에 놓인 침목간격에 의해 교량에 가진되는 주파수 대역이 된다. 교량을 구성하는 각 부재의 경우 상기한 회피대역의 10~20% 미만의 값을 갖도록 설계시 주의를 기울인다. 그림 1은 판형교의 각 경간길이별 L-18(리벳형) 및 L-22(용접형) 표준단면에서의 고유진동수와 UIC의 고유진동수 권고기준 및 프랑스에서의 회피대역 주파수를 비교하여 나타낸 것이다. 그림 1로부터 실제 국내에 부설되어 있는 판형교는 경간길이가 6m인 매우 짧은 경우를 제외하고는 절대회피대역의 주파수를 회피하고 있는 것으로 나타났으나, 9m 및 12m의 판형교에서는 회피대역과 고유진동수가 겹치는 것을 알 수 있다.

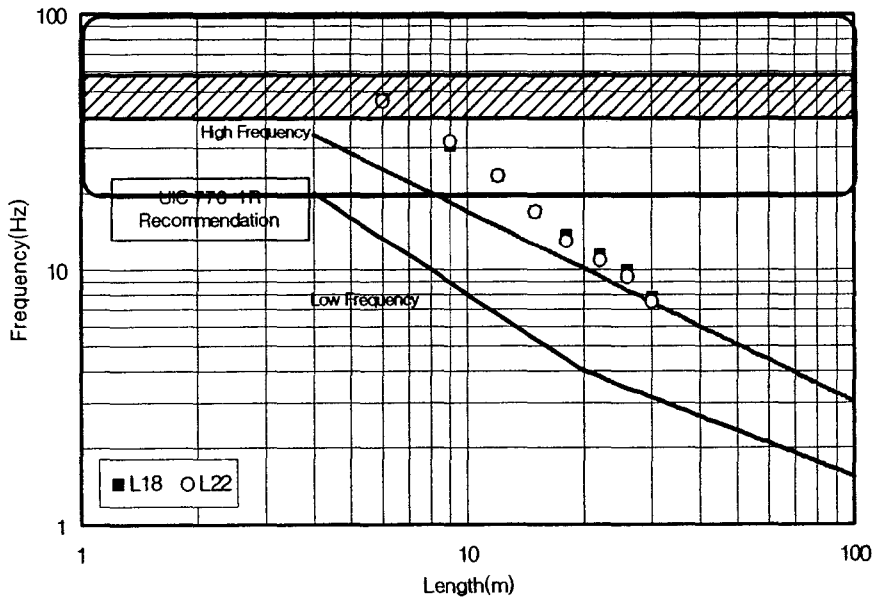


그림 1. 판형교의 고유진동수와 회피진동수 대역의 비교

본 연구에서 정적재하시 열차의 질량을 고려한 휨진동수를 산출한 배경은 판형교의 중량에 비하여 재하되는 열차의 중량이 상대적으로 월등하기 때문에 실제 수치적으로 산출한 비재하시의 고유진동수 특성이 열차가 재하된 상태에서 관찰되지 않는다는 가정에서 출발하였다. 실제 A교량과 같은 L-22 용접형, 18m 판형교의 표준중량은 22.08톤이다. 18m 판형교에 재하될 수 있는 최대 열차하중은 디젤기관차 2량 견인되는 열차편성의 경우 약 138톤이 된다. 이는 L-22 용접형으로 설계된 18m 판형교에서는 교량중량에 비하여 열차하중의 크기가 6.25배 큰 비율을 갖는다. 이

는 통상적인 도로교량에서의 교량중량대비 하중비율과는 정반대의 현상으로 진동응답에 대한 FFT분석결과에 대한 해석시 일반적인 경향으로 판단하는 것이 잘못된 평가를 내릴 수 있는 가능성이 매우 높다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서 관형교의 진동응답에 대한 분석시 질량비율에 대한 영향을 파악하기 위하여 통상적인 FFT분석결과와 수치적인 고유진동수, 재하시 1차 휨진동수의 대역 및 열차에 의한 가진주파수 대역을 비교·분석하였다.

A교량을 통과한 열차유형별 가진주파수 대역, 고유진동수 및 실측진동가속도에 대한 FFT분석결과와 수직변위에 대한 비교결과를 그림 2부터 11에 나타내었다. FFT분석에 사용한 진동가속도는 주행방향의 좌측주형에서 측정된 결과를 사용하였다.

① 디젤기관차 1량 견인 무궁화열차(V=111.78km/h)

디젤기관차 편성의 열차속도에 따른 가진주파수 대역은 2.0~4.5Hz 및 13.5Hz이며, 열차의 이동에 따른 각각의 하중재하 경우에 대한 정적재하시 1차 휨진동수의 대역은 5.6~8.5Hz이다.

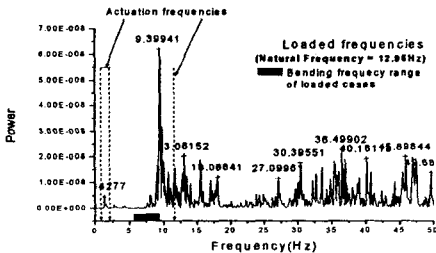


그림 2 A교량 디젤 1량 견인 무궁화 열차 통과시 FFT분석(V=111.78km/h)

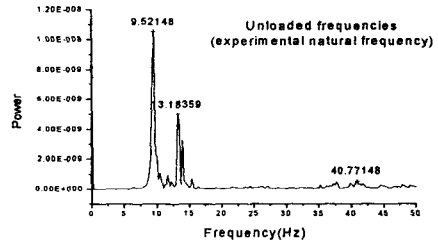


그림 3 A교량 디젤 1량 견인 무궁화 열차 통과 후 여진에 대한 FFT분석(V=111.78km/h)

실제 수치적으로 산출한 고유진동수가 12.95Hz이나 열차 통과 후 진동가속도의 여진성분에 대한 FFT분석결과 주파수 성분이 크게 두 가지가 발생하였다. 분석된 주파수 중 하나는 9.52Hz이며 다른 하나는 13.18Hz이다. 여진에 의한 분석결과를 식 (1)과 같은 방식으로 강성변화를 평가한다. 단, 관형교의 질량은 수치적으로 산출한 값이 적정하다고 가정하였다,

$$\omega_{수치} : \omega_{실측} = \sqrt{\frac{k_{수치}}{m_{수치}}} : \sqrt{\frac{k_{실측}}{m_{수치}}} \quad (1)$$

수치적으로 산출한 강성대비 실측강성의 비율은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\text{강성비율}(\%) = \frac{k_{실측}}{k_{수치}} \times 100 = \left(\frac{\omega_{실측}}{\omega_{수치}} \right)^2 \times 100 \quad (2)$$

그림 3과 같은 주파수와 식 (2)를 이용하면 $(9.52/12.95)^2 \times 100$ 으로 강성비율이 약 54% 또는 $(13.18/12.95)^2 \times 100$ 으로 약 104% 발생함을 알 수 있다. 실제로 A교량의 경우 설계도면의 강성이 100% 보전되어 있는 수치해석모델에서의 동적변위 결과와 실측변위 결과의 비교를 그림 4에

나타내었다. 수치해석에 사용한 디젤 1량 견인 무궁화 열차는 표준축중을 갖는 하중선도를 활용하였으나, 실제 주행한 디젤 1량 무궁화열차는 마지막 차량이 수치해석에 사용한 표준열차하중선도와 다른 것이 주행하였다. 여진에 의한 고유진동수와 수치해석상의 고유진동수는 각각 54%와 104%의 차이를 나타내었다. 또한, 실 열차주행동안 측정된 진동가속도의 FFT인 그림 2에서는 뚜렷한 진동가속도 성분이 나타나질 않고 가진주파수성분 1개와 고유진동수와 인접한 주파수가 대역을 갖고 발생함을 확인하였다. 무도상 판형교와 같이 철재차륜, 레일, 목침목 그리고 판형으로 하중이 전달되는 교량시스템에 있어서는 통상 도로교량 및 콘크리트 교량에서 발생하지 않는 20Hz이상의 상대적으로 높은 주파수 성분이 골고루 발생함을 나타내었다.

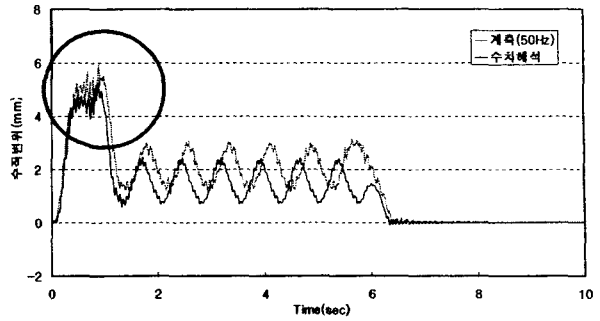


그림 4. 디젤 1량 견인 무궁화 열차에 대한 해석 및 실측 결과의 비교

② PMC 8량 편성의 새마을열차 (V=107.29km/h)

새마을 PMC 8량 1편성의 열차속도에 따른 가진주파수 대역은 2.0~4.0Hz 및 12.5Hz이며, 열차의 이동에 따른 각각의 하중재하 경우에 대한 정적재하시 1차 휨진동수의 대역은 7.0~8.5Hz이다.

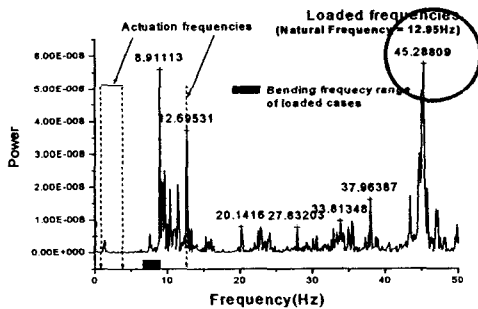


그림 5. A교량 PMC 8량 열차 통과시 FFT분석(V=107.29km/h)

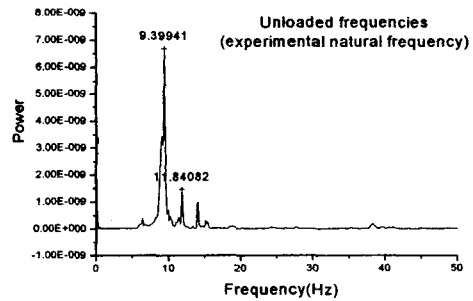


그림 6. A교량 PMC 8량 열차 통과후 여진에 대한 FFT분석

그림 5에서 12.695Hz는 대차내 차축간격에 의한 가진주파수와 매우 근접한 주파수성분이기도 하면서 수치해석상의 고유진동수와 매우 근접한 값을 나타낸다. 또한 약 2Hz 대에서 발생한 주파수 성분은 대차간 간격에 의한 가진주파수에 기인한 것으로 판단된다. 앞서 ①에서 분석한 결과와 유사한 FFT결과가 발생하였으며, 주파수대역 8.911Hz~12.695Hz는 열차통과시 열차자체 질량효과가 판형교의 휨진동수에 기여하여 발생한 것으로 판단된다. 원으로 둘러싸인 45.288Hz 주파수는 판형 교상에 배치된 침목에 차륜이 통과하며 발생하는 진동수로 평가되며 침목의 배치간격과 열차의 속도에 따라 변화하는 값으로 판단된다. 그림 6은 PMC 열차의 통과후 측정된 진동가속도의 비재하 여진가속도의 FFT분석으로 구한 진동수를 나타낸다. 그림 6에 분석된 여진에 의한 진동수로부터

터 식 (2)를 이용한 강성비율을 산출하면, $(9.40/12.95)^2 \times 100$ 과 $(11.84/12.95)^2 \times 100$ 으로 각각 52.7%와 83.6%가 됨을 알 수 있다. 그림 7은 A교량을 통과한 PMC 8량에 대한 표준하중선도를 이용한 3차원 유한요소해석모델의 동적해석결과와 실측결과와의 비교를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 수치해석 유한요소모델은 실제 판형교의 거동을 표현할 수 있도록 정교하게 구성되어 있음을 확인할 수 있다. PMC 8량의 경우 표준하중선도와 실제 주행하는 열차와의 편차가 매우 작기 때문에 수치해석의 결과가 실측결과와 거의 일치함을 보여주고 있다.

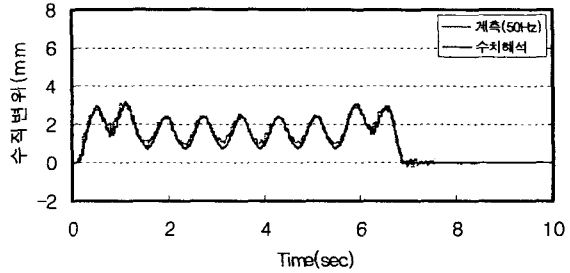


그림 7. PMC 8량 새마을열차에 대한 해석 및 실측 결과의 비교

3. FFT분석에 의한 주파수 성분별 평가

본 연구에서는 판형교와 같은 저질량/고강성의 구조형식에 열차하중이 동적재하 될 경우 동적응답의 분석결과가 일반적인 교량에서의 경향과 다를 수 있다는 가능성에 대하여 분석결과를 고찰하였다. FFT분석한 판형교의 진동특성에 대한 주파수성분별 비교고찰에서 크게 두가지의 현상을 도출할 수 있었다. 하나는 3차원으로 정교하게 구성한 유한요소해석모델로부터 산출한 고유진동수와 실제 판형교의 여진으로부터 산출한 고유진동수가 매우 큰 차이를 나타낸다는 것이다. 또 다른 하나는 유한요소해석모델로부터 구한 수직변위 이력과 실제 열차하중의 계측변위 이력이 매우 잘 일치한다는 것이다. 이는 유한요소해석모델에 대한 동적해석 결과가 실제 판형교의 동적거동을 열차유형별로 정확하게 예측할 수 있다는 것을 의미하였다. 그러나 유한요소해석모델로부터 산출한 고유진동수는 열차주행시 측정된 진동가속도의 주파수분석에서 뚜렷하게 나타나지 않는 현상이 있었다. 본 연구결과로부터 실 판형교에서의 동적응답 주파수 특성을 정리하였다.

1) FFT분석결과에 의해

판형교와 같은 저질량/고강성 교량형식에 교량중량보다 월등하게 큰 동적하중이 재하될 경우 발생하는 진동가속도의 주파수 성분은 일반적인 주파수분석의 경향을 적용시킬 경우 실제 교량의 동특성을 예측하는데 실패할 수 있다. 이는 앞서 분석한 A교량의 결과를 통하여 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 판형교에서 발생하는 주파수의 성분별 특성을 그림 8과 같이 분류하여 분석하였다. 이러한 분류체계에 맞추어 판형교에 대한 FFT분석결과를 고찰하여 정리하면 다음과 같다.

- 열차주행시 진동가속도에 대한 FFT분석을 통하여 추출된 주요 주파수대역은 정적재하시 휨진동수대역과 수치적 고유진동수사이에 분포한다.
- A교량의 경우(경간길이 18m)는 FFT분석시 수치적 고유진동수가 주요 주파수 대역의 상한경계 부근에서 형성되었다.
- 여진에 의한 FFT분석결과 수치적으로 산출한 고유진동수와는 매우 큰 차이를 나타내어 실질적인 교량의 고유진동수라 간주하기에는 어려움이 있다. 이는 진동수에 의한 강성도 수준 평가시 변위에 대한 수치/계측비교를 통한 강성도 평가와 크게 상이한 불일치가 발생하기 때문이다.

각 대역별 주요 기여인자 및 성분의 특성						
열차속도	열차유형	차량/교량 질량비율	교량 질량/강성	교량/궤도	차량/궤도	
↓	↓	↓	↓	↓	↓	
P o w e r	가진 주파수 대역	정적 재하시 휨 주파수 대역	실 동적응답 주파수 대역 (주요 주파수 대역)	이론적 교량 고유 진동수	교량 부부재 및 부속설비 의 주파수 대역	차량/궤도 시스템 에의한 주파수 대역
	Frequency(Hz)					

그림 8. FFT분석결과와 주파수대역별 기여항목

그림 8은 실제 판형교에서 측정된 진동가속도의 FFT분석결과 도출된 주파수 대역별 주요 기여인자와 각 대역별 특성에 대하여 정리한 것이다. 주파수의 크기 순서대로 기술하면, 가진주파수대역은 열차의 차축배치와 주행속도에 따라 발생하는 주파수 성분을 의미하며, 정적재하시 휨주파수대역은 판형교와 같이 고강성/저질량 교량에서 열차하중의 재하지속시간에 따라 차량/교량 시스템의 전체 질량이 증가하는 현상을 검토하기 위하여 열차질량이 단지 부가질량으로 작용할 때의 교량 1차 휨진동수 대역을 나타낸다. 실 동적응답 주파수대역은 실제 열차의 주행시 측정된 진동가속도의 탁월주파수대역으로서 차량/교량의 동적상호작용에 의해 발생하는 진동주파수성분을 의미한다. 또한, 교량의 부부재 및 부속설비(궤도구성품)의 주파수 대역은 교량의 브레이싱, 목침목 간격, 궤도구성품의 이완에 의한 진동주파수 성분들을 의미한다. 마지막으로 차량/궤도시스템에 의한 주파수 대역은 구조물의 동적거동에 영향을 끼치지 않으나 체결구 및 침목고정장치등과 같은 궤도구성품에 영향을 끼치는 50Hz이상의 상대적으로 높은 주파수 대역을 나타낸다.

4. 결 론

본 연구에서는 철도 판형교에서 실 운행열차 주행에 의해 발생하는 진동가속도를 FFT분석하여 동적응답 주파수 특성을 고찰하였다. 매우 복잡한 주파수 대역이 혼재하여 발생하는 판형교의 동적응답을 특정 대역별로 분류하여 각각의 대역에 대한 진동원을 구분하여 분석하였다. 이러한 시도는 향후 판형교의 동적응답을 이용한 건전도의 평가 및 진동저감을 위한 개량기술에 원천적인 자료를 제공할 수 있으며, 향후 다양한 경우에 대한 진동특성분석이 수행된다면 진동원에 대한 상관관계를 합리적으로 수립할 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

1. 철도청(1999), 철도설계기준(철도교편)
2. 오지택(2001) 등, 강철도구조물의 건전도진단시스템분야, KRRRI 연구 01-56
3. 최진유(2001) 등, 판형교의 보수보강 및 유도상화 기술개발, 한국철도기술연구원, 철도청
4. UIC Code 776-1R, Loads to be considered in railway bridge design