

# 철도 무도상판형교의 고유진동특성에 대한 연구

## A Study on the Characteristic of Natural Frequencies of Railway Open Deck Plate Girder Bridges

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

---

### ABSTRACT

A railway open deck plate girder bridge without ballast should support relatively heavier vehicle loads compared with its self-weight. For such a reason, actual dynamic response of the bridge is considerably differing with normal prediction because additional masses added from vehicle to a bridge have an effect on the dynamic characteristics of the bridge. These differences affect to the estimation of a natural frequency change that adopted for one of the evaluation technique of strength decrease, and these make trouble to the analysis of a natural frequency from the field test data that measured at the bridge subjected to a running vehicle. In this study, classification of mass participation ratio for each component of open deck plate girder bridge without ballast and the comparison according to the change of vibration characteristics for the case of subjected to a running vehicle were accomplished.

---

### 1. 서      론

국내 철도에서 무도상 상로판형교는 단일 형식으로 가장 많은 수량이 부설되어 있는 교량이다. 이러한 판형교는 현행 표준열차하중인 L-하중<sup>(1)</sup>을 충분히 수용할 수 있는 구조적 내하력을 가지고 있다. 기존의 철도교량에 대한 설계는 단순히 정적인 내하력을 확보하기 위한 개념에서 하중이 설정되어 있으며, 동적효과에 대해서는 실험적인 결과에 기초한 충격계수로서 반영을 하고 있는 실정이다. 그러나 국내 판형교와 같이 중량이 가벼우며 고강성을 갖는 구조형식에 있어서는 콘크리트 철도교량이나 도로교량과는 판이하게 다른 동적응답거동을 나타낸다는 것을 기존의 연구성과<sup>(2,3)</sup> 등에서 확인하였다. 본 연구에서는 판형교의 비재하 고유진동수 특성을 판형교의 경간길이 별로 산출한뒤 UIC의 철도교량 고유진동수한계에 대한 권고기준<sup>(4)</sup>과 비교하였으며, 실제 판형교상을 열차하중이 통과할 때 부가되는 열차질량에 의한 효과를 반영한 재하 휨진동수의 변화경향을 정량적으로 분석하였다. 이러한 시도

---

\* 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)

는 향후 판형교의 진동가속도와 같은 동적응답의 FFT분석결과를 이해하고 분석하는데 열차하중의 질량기여수준을 파악하는데 유용하리라 판단하였다. 분석 대상은 L-22 표준하중으로 설계된 경간 길이 6m, 9m, 12m, 15m, 22m, 24m, 그리고 30m의 총 7개 단순지지 판형교로 정교한 3차원 유한요소 해석모델을 구성하였다. 해석결과로부터 판형교의 경간길이에 따른 고유진동수 범위와 실 운행열차하중인 새마을 PMC, 디젤기관차 견인 열차의 재하에 따른 휨진동수 및 국제철도연맹(UIC)에서 제시한 UIC 776-1R의 비재하 철도교량의 고유진동수 상한 및 하한 기준과 비교를 수행하였다. 실제 교량상을 통과하는 열차하중의 질량효과로 인하여 판형교의 고유진동수가 상당부분 낮아지는 수치적인 결과를 얻었으며, 이로부터 판형교의 동적응답 추정을 위한 새로운 도표를 제안하였다. 제안된 도표는 향후 동적재하실험을 통하여 그 적절성을 검증 및 보완한다면 동적거동에 대한 효율적인 예측에 기여하리라 판단된다.

## 2. 고유진동수

본 연구의 수치해석을 위해 상용 유한요소프로그램으로는 SAP2000n을 사용하였고, L-22하중에 대한 철도교 표준단면을 사용하여 6m, 9m, 12m, 15m, 22m, 24m 그리고 30m의 경간길이를 갖는 7개 판형교를 유한요소로 모델링하였다. 그림 1은 7개 판형교 유한요소모델 중 2개 모델을 나타낸다.

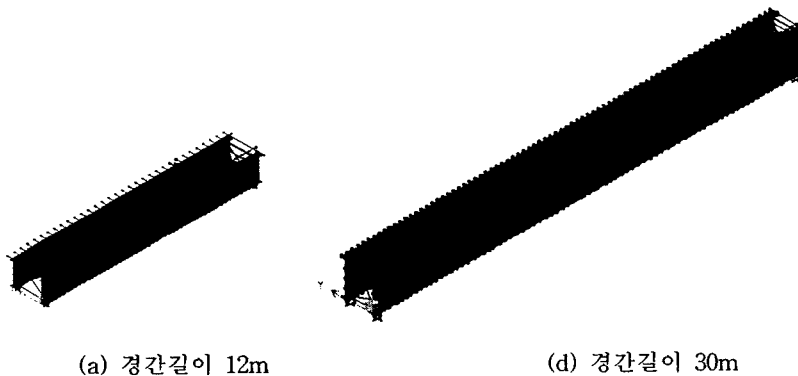


그림 1. 판형교의 유한요소해석 모델

각각의 교량 모델링에서 복부판과 상하부 플랜지는 각각 Shell요소로 모델링을 하였으며 레일, 침목, 그리고 수직 및 수평 브레이싱은 각각 Frame요소로 모델링 하였다. 레일의 궤간은 표준궤간인 1.435m를 적용하였고, 침목은 10m당 약25개 설치간격의 목침목으로 배치하였다.

수치해석을 통하여 산출한 7개 판형교의 고유진동수는 표 1과 같다. 진동수 값은 휨 1차 모드가 발생한 교량의 거더, 브레이싱, 침목 그리고 레일을 모두 고려한 교량의 고유 진동수이다. 전체 모델에서 휨 1차모드 발생시 축방향 모드가 같이 발생하였으며 판형교의 고강성, 저질량의 특성이 높은 1차 고유진동수를 유발시킨다는 것을 확인할 수 있었다. 목 침목의 질량효과를 고려하지 않을 경우 전체질량을 고려했을 경우보다 최소 71.3%에서 최소 17.5% 큰 고유진동수를 나타내었다. 판형교와 같이 경량인 교량에서의 동적해석시 목침목 등과 같은 구성요소의 질량효과는 경간이 짧을수록 매우 크게 영향을 끼친다는 것을 확인하였다.

표 1. Bending에 의한 1차 모드의 고유진동수 (단위 : Hz)

경간길이 (m)	6	9	12	15	22	24	30
Part*	65.30	42.48	25.46	21.35	15.90	14.26	11.60
All**	38.12	28.85	21.03	18.17	13.07	11.92	9.86
Part/All*100(%)	171.3	147.2	121.1	117.5	121.7	119.6	117.7

\* Part : 거더 + 레일

\*\* All : 거더 + 레일 + 브레이싱 + 목침목

표 2는 각각의 경간길이에 따른 침목, 레일 그리고 거더와 브레이싱이 전체 질량에서 차지하는 비율을 나타낸 것이다. 각각의 단위는 질량단위인  $kg_m$  이고 전체에서 차지하는 비율은 %비율로 나타내었다. 경간길이가 6m인 경우는 전체 질량에서 차지하는 침목과 레일의 비율은 최대 46%에 달함을 알 수 있다.

표 2. 경간 길이에 따른 판형교의 구성요소별 질량비율

구분 길이	목 침목		레일		Girder & Bracing		전체질량 및 중량	
	$kg_m$	%	$kg_m$	%	$kg_m$	%	$kg_m$	tonr
6m	162.67	32.35	71.90	14.30	268.28	53.35	502.86	4.933
9m	227.73	27.91	104.16	12.77	483.98	59.32	815.87	8.004
12m	357.87	21.07	138.16	8.13	1,202.54	70.80	1,698.56	16.663
22m	553.07	17.70	235.23	7.53	2,335.54	74.77	3,123.84	30.645
24m	661.51	16.55	267.48	6.69	3,068.26	76.76	3,997.26	39.213
30m	878.40	14.14	326.65	5.26	5,007.14	80.60	6,212.20	60.942

그림 3은 7개 판형교 모델에서 산출한 고유진동수와 국제철도연맹(UIC)에서 제정한 UIC 776-1R “비재하 철도교량의 고유진동수 상한 및 하한기준”의 값을 비교하여 나타낸 것이다. UIC기준은 현재 유럽의 각 철도관련 기관에서 기존선 및 고속선의 설계시 일반적으로 사용하고 있는 기준이다.

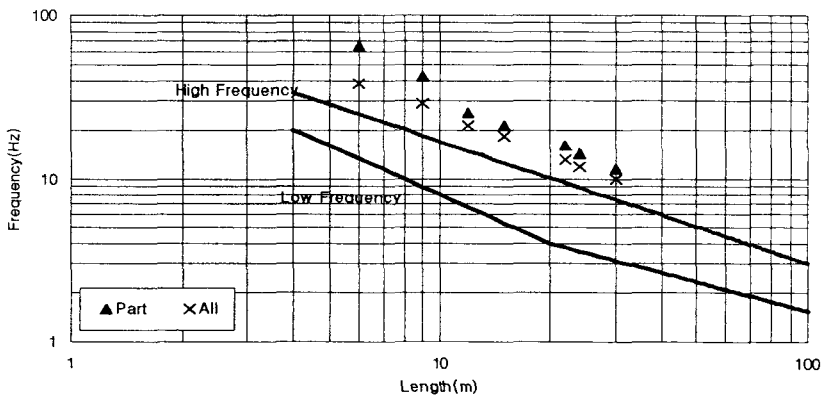


그림 2. UIC 776-1R의 비재하 철도교량의 고유진동수 적정범위

### 3. 재하 횡진동수

그림 3부터 6은 판형교상에 열차가 재하되었을 경우, 차량편성 및 차량재하위치에 따른 최대 및 최소 1차 횡진동수를 나타낸 것이다. 철도교량의 경우는 일반 도로교량과 달리 하중의 크기 및 하중의 재하시간이 상대적으로 크기 때문에 차량에 의한 동적가진 효과가 도로교에 비하여 크게 기여한다. 특히 판형교의 경우는 교량 중량에 비하여 강성이 매우 크고, 무도상이기 때문에 교량진동가속도의 주파수성분이 매우 복잡하게 나타나게 된다. 판형교에서의 동적응답을 이용한 동특성평가와 건전도 평가 기술의 전개를 위해서는 차량중량의 부가질량효과와 무도상 특성을 고려한 진동가속도 분석이 선행되어야 할 필요가 있다. 그림 3과 4는 디젤동력차(7100~7300, 7500호대) 1량 및 중련에 의해 전인되는 무궁화 열차가 판형교상을 통과할 때, 그림 5와 6은 각각 PMC 8량 1편성, 16량 1편성일 경우에 대한 재하 판형교에서의 1차 횡진동수를 나타낸 것이다.

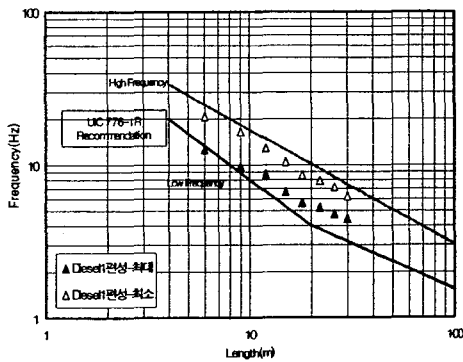


그림 3. 디젤1량 편성열차 재하시 1차 횡진동수의 최대-최소범위

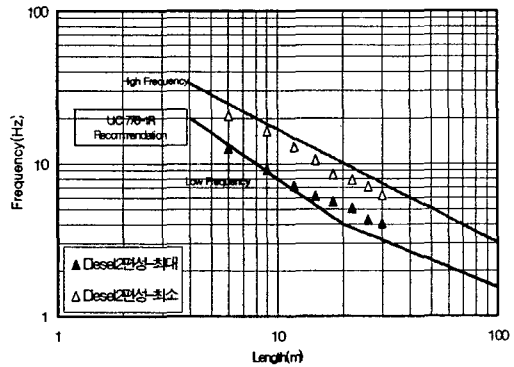


그림 4. 디젤2량 편성열차 재하시 1차 횡진동수의 최대-최소범위

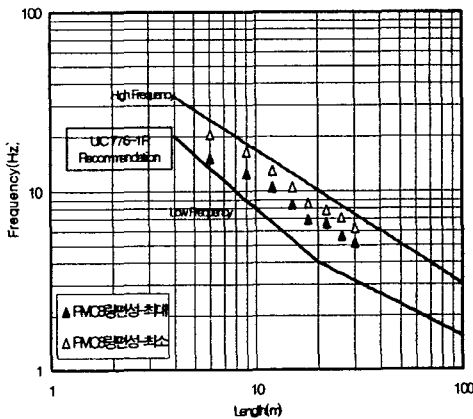


그림 5. PMC 8량 편성열차 재하시 1차 횡진동수의 최대-최소범위

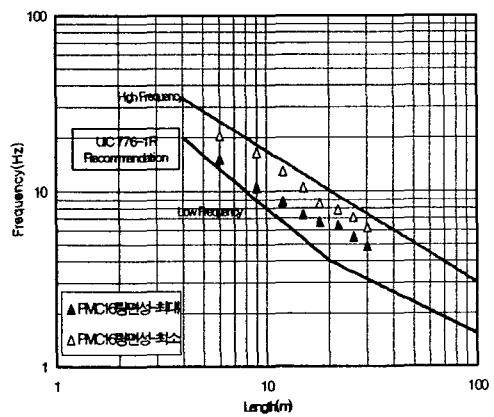


그림 6. PMC 16량 편성열차 재하시 1차 횡진동수의 최대-최소범위

최대의 경우는 차량이 최대하중효과를 야기 시킬 수 있는 위치에 재하 되었을 경우, 판형교의 재하 중량을 고려한 1차 휨진동수가 된다. 최대하중재하효과를 고려할 경우는 휨진동수가 UIC기준의 하한치에 근접하는 현상을 나타낸다. 반대로, 최소의 경우는 차량이 최소하중효과를 나타내는 위치에 재하 되었을 경우로서, 판형교의 재하 1차 휨진동수는 상한치에 근접하는 현상을 나타내었다.

#### 4. 판형교 진동수와 열차가진주파수의 비교

그림 7은 비재하 판형교에서 강성저하수준에 따라 산출한 고유진동수와 새마을 PMC 열차 편성에 의한 가진주파수를 비교한 것이다. 고유진동수는 교량강성이 설계상의 상태를 유지하고 있는 손상도 0%로부터 절반으로 강성저하가 일어난 손상도 50%수준에 대한 고유진동수 변화를 표시하였다. 새마을 PMC 및 디젤기관차인 열차의 가진주파수 성분은 크게 동일 대차내의 차축간격과 각 대차간의 중심거리 등에 의해 발생하는 것을 고려하였다. 그림 8은 동일한 판형교에서 열차하중이 통과할 때 열차의 질량을 고려하여 산출한 판형교의 1차 휨진동수대역을 그림 7과 동일하게 표현한 것이다.

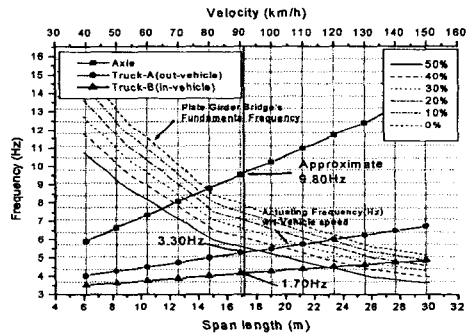
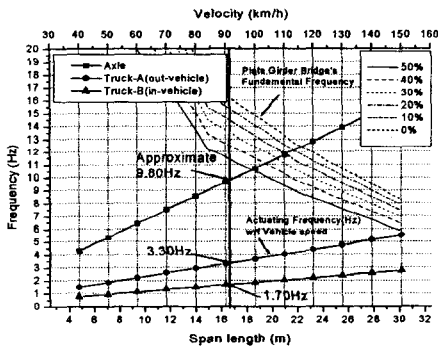


그림 7. 판형교 고유진동수 vs PMC 가진주파수      그림 8. 재하시 휨진동수 vs PMC 가진주파수

그림 7과 8에서 상부횡축은 가진주파수와 관련된 열차의 운행속도(km/h)를, 하부횡축은 판형교의 경간길이를 나타내며 종축은 주파수 대역을 의미한다. 그림 9는 판형교의 손상정도에 따른 고유진동수 변화대역과 차량의 주행속도에 따른 가진주파수 대역의 비교를 위하여 본 연구에서 제시한 그래프 형식에 대한 도해를 나타낸 것이다. 그림 7은 새마을 PMC가 약 92km/h로 주행할 때 발생하는 3개의 가진주파수성분을 손상도에 따른 비재하 판형교의 고유진동수 대역으로 비교하여 나타낸 것이다. 이는 판형교의 손상도 수준에 따른 고유진동수 대역과 차축배치와 속도에 의한 가진주파수를 비교한 것으로, 특정 운행속도로 PMC가 주행할

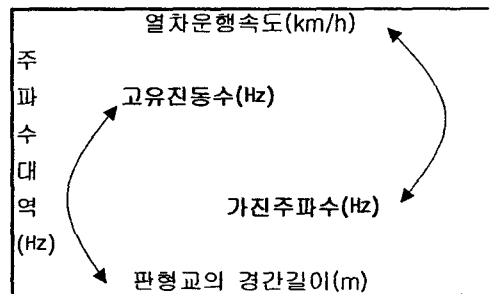


그림 9. 고유진동수 및 가진주파수 비교도해

경우 판형교의 동적응답에 대한 증폭가능성을 정성적으로 평가하기 위한 것이다. 그림 8은 그림 7의 경우와 동일한 조건에서 재하시 판형교의 휨진동수를 고려한 것으로서 경간길이 22m인 경우 손상정도에 따라 휨진동수는 대략 5.5~7.8 Hz 대역을 나타냄을 보이고 있다. 이는 판형교의 손상수준에 따라 시속 110~130 km/h 내에서 Truck-A, B에 의한 가진주파수가 공진현상을 야기시킬 가능성이 있다는 것을 추정할 수 있다. 즉, 열차의 통과 시간동안 만큼은 판형교상에 열차의 중량에 해당하는 부가질량이 가해진 상태를 고려하여 동적응답을 추정하는 것이 합리적 결과를 제공한다는 것을 의미한다. 그림 10은 경간길이 9m인 판형교에서 PMC 8량 1편성이 속도 123.99km/h로 통과할 때 중앙단면에서 측정된 연직진동가속도를 FFT분석한 결과를 나타낸다. 실제 비재하 고유진동수는 31.73Hz임에도 불구하고 열차가 통과할 경우에 발생하는 진동주파수대역은 그림 8과 같이 열차하중이 재하된 상태에서 산출한 휨진동수대역과 일치함을 확인할 수 있다. 즉, 판형교와 같이 하중대비 중량이 가벼운 교량형식에서는 발생하는 주파수대역은 교량자체의 고유진동수 특성보다는 통과열차의 질량효과가 부가되어 산출한 휨진동수특성이 탁월함을 의미한다.

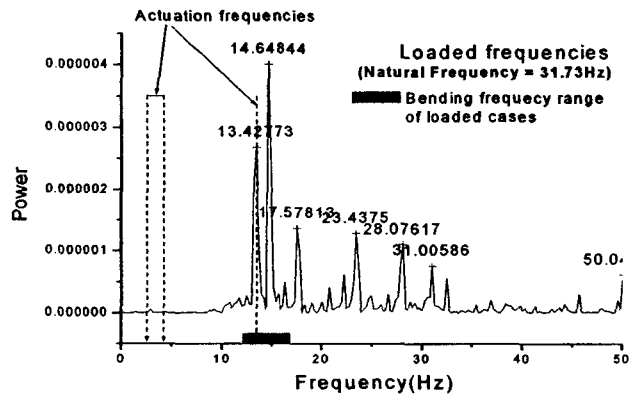


그림 10. 9m 판형교에 PMC 8량 1편성 통과시 FFT분석(V=123.99km/h)

#### 4. 결 론

판형교의 열차운행에 따른 동적응답은 비재하 고유진동수보다 재하 휨진동수와 매우 근접한 대역에서 발생함을 제한적이거나 실험적으로 확인하였다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 제안한 그림 9와 같은 도표와 재하휨진동수를 연계하여 활용한다면 효율적인 동적응답에 대한 정성적인 예측이 가능함을 확인하였다. 향후 지속적인 실험적 검증을 통하여 다양한 경우에 대한 신뢰도를 향상시킨다면 철도교량의 동적안정성평가에 매우 유용하리라 판단된다.

#### 참고문헌

1. 철도청(1999), 철도설계기준(철도교편)
2. 오지택(2001) 등, 강철도구조물의 건전도진단시스템분야, KRRI 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