

# 판형교의 고유진동수 특성에 관한 연구

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

오지택\*                      박문석\*\*                      최진유\*\*\*  
Ji-Taek, Oh      Moonsuk, Park      Jin-You, Choi

---

### ABSTRACT

Natural frequencies are studied for dynamic analysis of plate girder bridges which are made up about 34% in the existing railway bridges in Korea. In this study, standard plate girder bridges designed by L-22, a standard load type of the railway specification in Korea, are modeled for finite element method analysis. SAP2000n, a commercial finite element method analysis tool, is used for structural analyses and evaluations. Span lengths of plate girders have 7 types : 6m, 9m, 12m, 15m, 22m, 24m, and 30m. Natural frequencies are considered in mass ratios and span lengths and they are compared with a recommendation of UIC 776-1R for alterations, from now on, in train conditions of operation. For changes of natural frequencies in plate girders by damages of structures, parameter studies are accomplished.

---

### 1. 서 론

현재 국내의 기존선 교량중 약 34%를 차지하고있는 판형교는 선로의 등급에 따라 각각 L-18하중이나 L-22하중을 기준으로하여 설계 및 부설되어 있다. 기존의 교량설계기준은 내하력을 확보하기 위한 정적내하력을 안전하게 확보할 수 있도록 설정되어 있으나, 현 부설 철도교량은 점차 현행 운행속도의 향상 등과 같은 고속화 요구에 직면하고 있는 실정이다. 특히 판형교와 같이 강성대비 질량이 작은 교량형식은 진동에 매우 민감하게 반응할 수 있는 특성을 지니고 있다. 본 연구에서는 향후 열차속도향상에 대비한 판형교의 동적안정성 평가를 위하여 선행되어야 할 고유진동수 특성에 대한 수치적 분석을 수행하였다. 판형교의 고유진동수에 끼치는 구성요소의 질량비율 및 경간길이에 따른 변화량을 고찰하였다. 분석 대상은 L-22 표준하중으로 설계된 경간 길이 6m, 9m, 12m, 15m, 22m, 24m, 그리고 30m의 총 7개 단순지지 판형교로 정교한 3차원 유한요소해석모델을 구성하였다. 해석결과로

---

\* 한국철도기술연구원 철도구조물연구팀 팀장, 공학박사, 정회원, 031-461-8531 (교281), jtoh@krri.re.kr

\*\* 한국철도기술연구원 철도구조물연구팀 연구원, 정회원, 031-461-8531 (교287)

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

부터 판형교의 경간길이에 따른 고유진동수 범위와 실 운행열차하중인 새마을 PMC, 디젤기관차 견인 열차 및 국제철도연맹(UIC)에서 제시한 UIC 776-1R의 비재하 철도교량의 고유진동수 상한 및 하한 기준과 비교를 수행하였다.

## 2. 수치해석

본 연구의 수치해석을 위해 상용 유한요소프로그램으로는 SAP2000m을 사용하였고, L-22하중에 대한 철도교 표준단면을 사용하여 6m, 9m, 12m, 15m, 22m, 24m 그리고 30m의 경간길이를 갖는 7개 판형교를 유한요소로 모델링하였다. 그림 1은 7개 판형교에 대한 유한요소모델을 나타낸다.

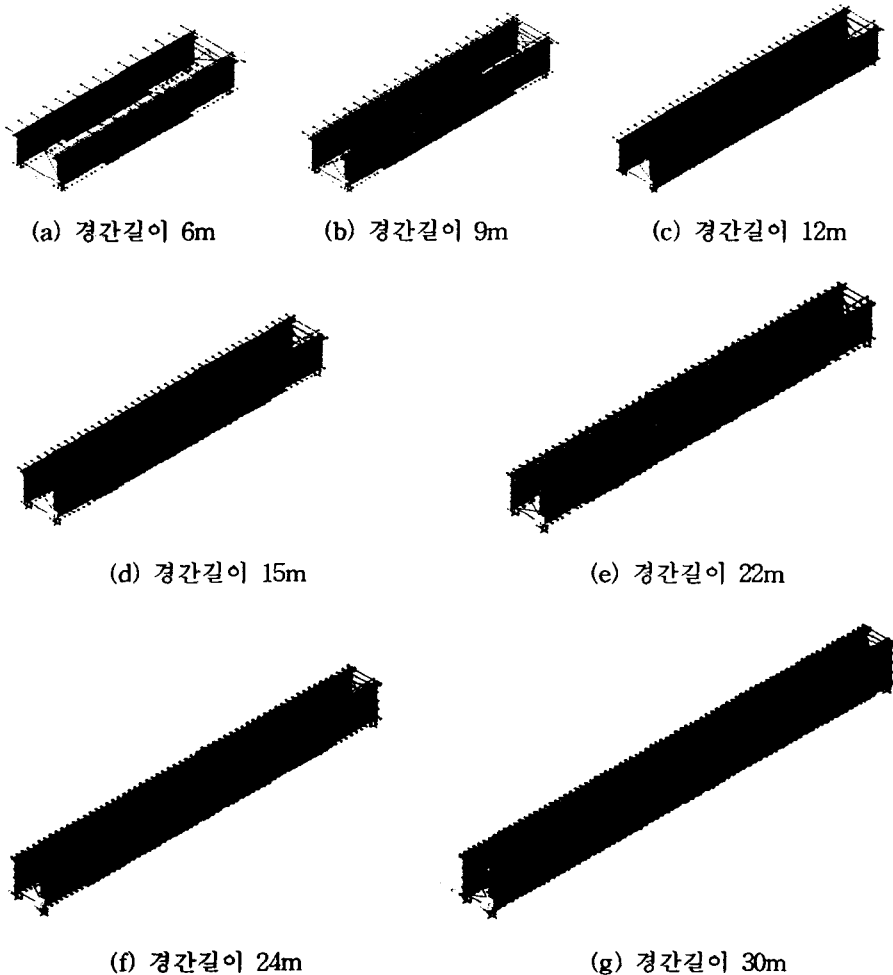
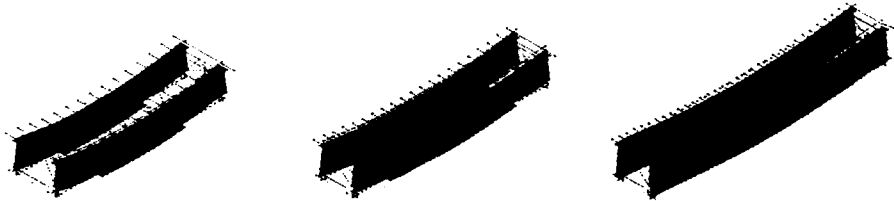


그림 1. 판형교의 유한요소해석 모델

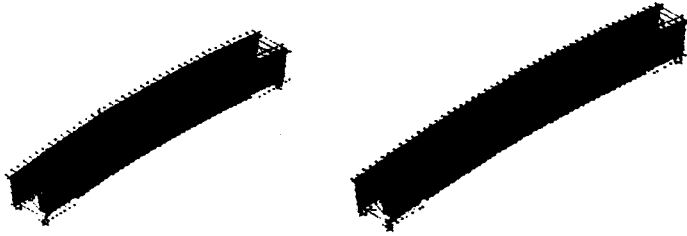
각각의 교량 모델링에서 복부판과 상하부 플랜지는 각각 Shell요소로 모델링을 하였으며 레일, 침목, 그리고 수직 및 수평 브레이싱은 각각 Frame요소로 모델링 하였다. 레일의 궤간은 표준궤간인 1.435m를 적용하였고, 침목은 10m당 약25개 설치간격의 목침목으로 배치하였다.

### 3. 결 과

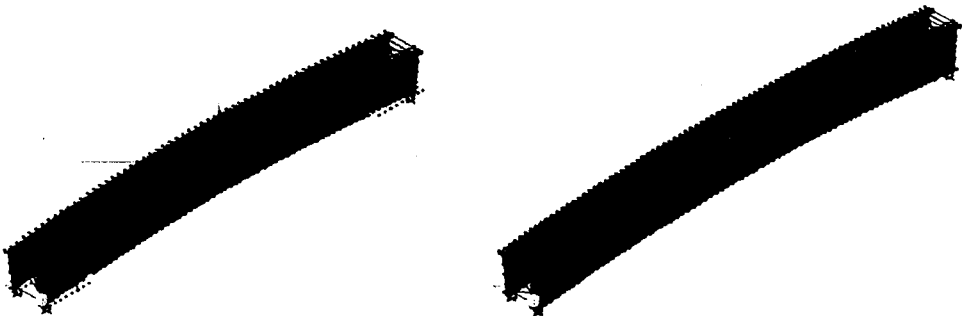
수치해석을 통하여 산출한 7개 판형교의 고유진동수는 다음과 같다. 그림 2는 각각의 교량모델에서 휨에 의한 1차모드를 진동수 값과 같이 나타낸 것이다. 진동수 값은 휨 1차 모드가 발생한 교량의 거더, 브레이싱, 침목 그리고 레일을 모두 고려한 교량의 고유 진동수이다. 전체 모델에서 휨 1차모드 발생시 축방향 모드가 같이 발생하였으며 특히 12m와 30m 모델에서는 비틀림 모드도 발생하였다.



(a) 경간길이 6m (39.47Hz) (b) 경간길이 9m (29.01Hz) (c) 경간길이 12m (23.78Hz)



(d) 경간길이 15m (17.33Hz) (e) 경간길이 22m (12.63Hz)



(f) 경간길이 24m (11.55Hz) (g) 경간길이 30m (8.43Hz)

그림 2. Bending에 관한 1차모드와 고유진동수

다음의 표 1은 거더와 레일의 중량만을 고려한 경우와 침목 및 브레이싱의 중량까지 고려한 경우에 있어서 휨에 의한 1차 모드가 발생한 고유진동수를 경간길이 별로 나타낸 것이다. 판형교의 고강성, 저질량의 특성이 높은 1차 고유진동수를 유발시킨다는 것을 확인할 수 있으며, 목 침목의 질량효과를 고려하지 않을 경우 전체질량을 고려했을 경우보다 최대 71.3%에서 최소 17.5% 큰 고유진동수를 나타내었다. 이는 판형교와 같이 경량인 교량에서의 동적해석시 목 침목 등과 같은 구성요소의 질량효과

는 경간이 짧을수록 매우 크게 영향을 끼침을 의미한다.

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 + 침목

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. 현재 L-22하중으로 설계되어 부설되어 있는 판형교의 경우 UIC에서 제시하고 있는 고유진동수의 상한기준을 초과하는 것으로 나타났으며, 이는 향후 운행열차의 고속화시 동적인 불안정상태가 될 수 있음을 의미한다. 그림 4와 그림 5는 판형교에서 산출한 고유진동수와 새마을 PMC 및 디젤기관차전인 열차에 의한 가진주파수를 나타낸 것이다. 특히 고유진동수는 교량강성이 설계상의 상태를 유지하고 있는 손상도 0%로부터 절반으로 강성저하가 일어난 손상도 50%수준에 대한 고유진동수 변화를 표시하였다. 새마을 PMC 및 디젤기관차전인 열차의 가진주파수 성분은 크게 동일 대차내의 차축간격과 각 대차간의 중심거리 등에 의해 발생하는 것을 고려하였다.

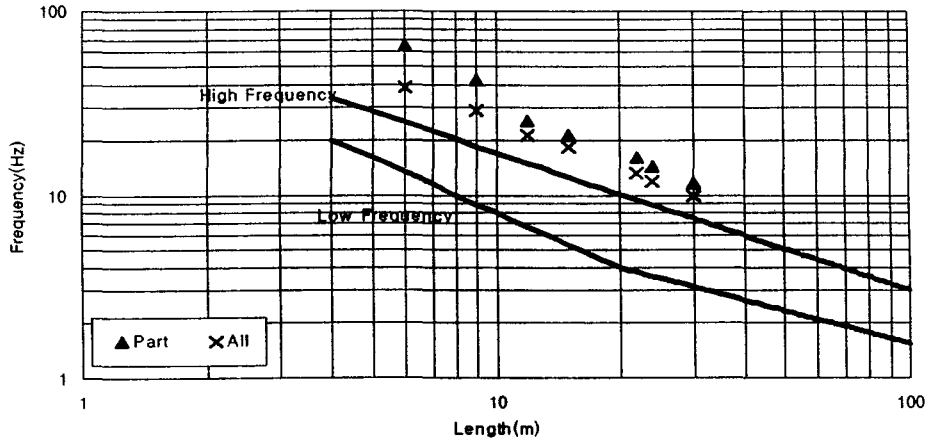


그림 3. UIC 776-1R의 비재하 철도교량의 고유진동수 적정범위

그림 4에서 새마을 PMC열차의 주행 속도에 따른 가진주파수(Hz)성분은 차축간격(Axle), 연결된 차체의 인접대차간의 중심간격(Truck-A) 및 동일차체내의 대차간 중심간격(Truck-B)을 고려하여 산출하였다. 그림 4에서 상부횡축은 가진주파수와 관련된 열차의 운행 속도(km/h)를, 하부횡축은 판형교의 경간길이를 나타내며 종축은 주파수대역을 의미한다.

그림 5는 디젤기관차에 의해 견인되는 열차에서의 가진주파수성분과 판형교의 고유진동수를 비교한 것이다. 디젤기관차는 대차에 차축이 3개인 Co-Co형이며, 일반적으로 차축이 2개인 Bo-Bo형과는 다른 축중 배치를 갖게 된다. 가진주파수성분은 차축간격(Axle-A; Co-Co형, Axle-B; Bo-Bo형)과 대차간 중심간격에 의해 발생한다. 아직까지 국내에서는 차축의 배치, 축중의 크기 및 교량의 재원(강성, 질량 및 길이)을 매개변수로 한 동적안정성 관련 연구가 수행된 사례를 찾아볼 수 없으며 향후 교량의 동적안정성을 보장

하는 설계를 위해서는 이러한 상관관계에 대한 정량적인 분석연구가 필요하다 판단된다. 그림 4 및 5와 같이 교량의 고유진동수와 열차의 가진주파수 대역을 표현하면 열차의 운행속도에 따른 교량에서의 동적거동을 정성적으로 파악하는데 유용하게 활용될 수 있다. 그림 6은 그림 4에서 새마을 PMC

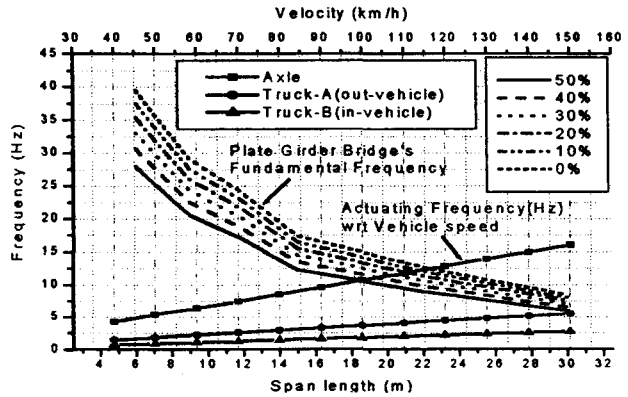


그림 4. 새마을 PMC의 가진주파수와 고유진동수 비교

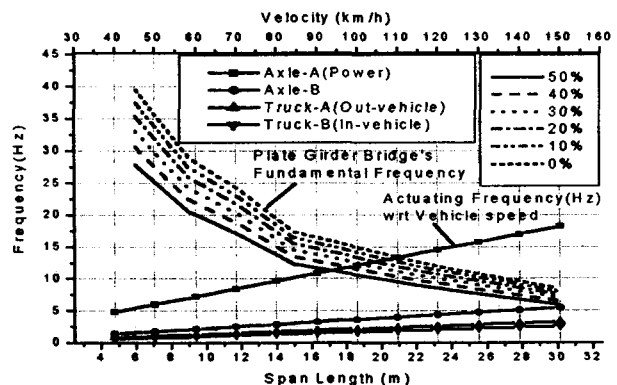


그림 5. 디젤견인 열차의 가진주파수와 고유진동수 비교

가 약 92km/h로 주행할 때 발생하는 3개의 가진주파수성분을 나타낸 것이다. 그림 7은 실제 궤도에서 92.5km/h로 주행하는 새마을 PMC의 열차하중을 측정 한 것 나타내며, 그림 8은 측정된 열차하중신호를 FFT분석하여 가진주파수성분을 추출한 것이다. 앞서 제시한 차축제원에 근거한 수치적 가진주파수산출 결과와 실제 측정된 하중신호의 가진주파수결과는 표 3과 같이 매우 근접함을 나타내고 있다.

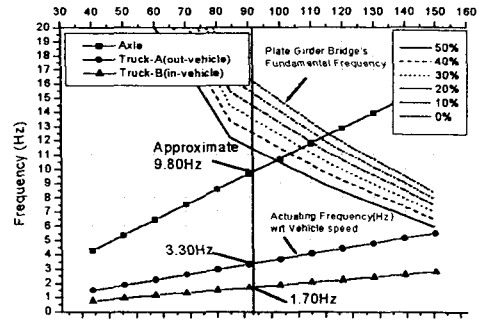


그림 6. PMC 92km/h속도대의 가진주파수

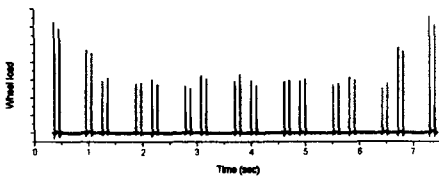


그림 7. PMC열차하중의 측정신호

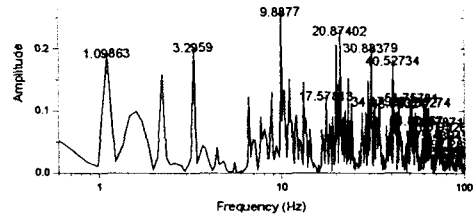


그림 8. 측정된 하중신호의 FFT분석결과

표 3. 가진주파수의 수치결과 vs 실험결과 비교

가진주파수성분(Hz)	Axle	Truck-A	Truck-B
수치적 근사값	9.80	3.30	1.70
실험적 분석값	9.89	3.30	1.10
수치적/실험적×100(%)	99.1	100.0	154.6

#### 4. 결 론

1. 판형교의 자유진동특성의 분석결과 6m, 9m와 같은 경간의 경우 휨모드에 측방항모드가, 12m, 15m 및 30m의 경우에는 휨모드에 비틀림성분이 함께 발생함을 확인하였다. 이는 경간길이가 길어짐에 따라 비틀림강성을 적절히 증가시키는 것이 비틀진동을 감소시킬 수 있음을 의미한다. 또한 국내에 건설되어 있는 판형교는 UIC 776-1R의 권고사항과 비교한 결과 상당히 고강성을 갖는 것으로 평가되며, 이러한 특성이 열차와 관련되어 교량의 동적거동에 끼치는 영향에 대해서는 향후 후속연구를 통하여 정립하여야 할 것이다.
2. 본 연구에서 시도한 교량의 고유진동수와 열차의 가진주파수를 비교한 그림은 열차에 의한 교량의 동적안정성을 평가하는데 정성적으로 활용할 수 있으리라 판단된다. 특히 수치적으로 산출한 가진주파수와 실측한 열차하중의 FFT분석결과가 상당히 근접함을 확인하였다.

열차의 가진주파수성분, 차량의 동특성 및 교량의 제원을 고려한 철도교량의 동적거동에 대한 매개변수 연구가 원천기술의 자립을 위해서는 지속적인 후속연구가 필요하다 판단된다.

#### 참고문헌

1. 철도청(1999), 철도설계기준(철도교편)
2. UIC Code 776-1R, Loads to be considered in railway bridge design