

고속철도 강교량의 진동특성 분석

Dynamic characteristics of a high-speed railway steel bridge

이정휘†·김성일*·곽종원**·이필구***·윤태양****

Jungwhee Lee, Sung-Il Kim, Jong-Won Kwark, Pil-Goo and Tae-Yang Yoon

Key Words : high-speed train(고속철도), dynamic behavior(동적거동), steel bridge(강교량), vibration(진동)

ABSTRACT

The dynamic behavior of a steel bridge crossed by the Korean High Speed Train(KHST) has been investigated experimentally and numerically. The bridge is a 2-girder simply supported steel bridge which has 40m of span length. A set of experimental tests were performed during operation of KHST, and 13 accelerometers and 6 LVDTs were utilized for measurement of dynamic responses. Numerical analyses considering bridge-structure interaction were performed for validation of experimental results.

Since structural type and dynamic characteristics of the bridge differ from those of the representative concrete box bridge, dynamic behavior of the concerning steel bridge shows differences, but dynamic performances are all satisfying specification requirements.

며, 이를 수치해석결과와 비교하여 그 타당성을 확인하였다.

1. 서 론

2004년 3월 개통된 경부고속철도는 대부분의 교량구간에 경간장 40m의 2경간 연속 콘크리트 상자형 교량이 설치되어 있고, 그 이외의 구간에는 40m 또는 50m 경간장의 2주형 합성형 교량 또는 아치교가 설치되어 있다.

고속철도 교량은 열차가 최대 350km/h 이상의 속도로 주행하므로, 동적거동이 매우 중요하며, 또한, 열차와 같이 일정한 간격으로 운행하는 축하중이 지나가는 경우에는 공진의 가능성도 높아지게 된다.⁽¹⁾

따라서, 경부고속철도 교량의 대표적인 형식인 40m 2경간 연속 콘크리트 상자형 교량의 동적 거동에 관한 이론 및 실험적 연구가 이루어져 왔으며, 최근에는 과도한 진동의 저감을 위한 연구도 이루어지고 있다.^{(1),(2),(3)}

이 논문에서는 경부고속철도의 2주형 합성형 교량인 이원고가교에 대한 동특성 및 동적거동의 측정을 수행하였

2. 대상 교량

본 연구의 대상교량은 경부고속철도 대전-김천구간 174km 지점에 위치한 이원고가교 중 P59와 A2 사이의 40m 단경간 교량이다. 교량의 형식은 그림1과 그림2에 나타난 바와 같은 2주형 합성형 교량이며, 형고는 약 3m, 주형 사이의 거리는 6.5m, 총 교폭은 14.0m 이다.



그림1. 대상교량 전경

† RIST 강구조연구소 토목구조연구실 선임연구원
E-mail : jwhee2@rist.re.kr
Tel : (031) 370-9592, Fax : (031) 370-9599

* 한국철도기술연구원 선임연구원

** 한국건설기술연구원 수석연구원

*** RIST 강구조연구소 토목구조연구실 선임연구원

**** RIST 강구조연구소 토목구조연구실 수석연구원

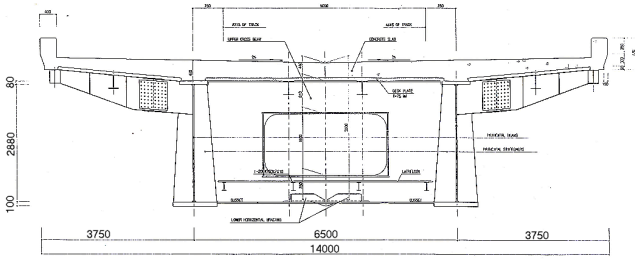


그림2. 이원고가 단면도

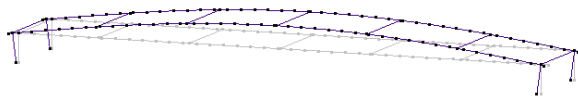
2.1 대상교량의 수치모델링

이원고가교의 수치모델링을 위하여 2절점 3차원 뼈대요소와 4절점 판요소를 사용하였으며, 주거더는 보요소로, 콘크리트 바닥판은 판요소로 모델링하고, 주거더와 바닥판은 강결시켰다. 또한, 지점부의 offset을 고려하여 실 교량의 거동을 더욱 유사하게 모사할 수 있도록 하였다.

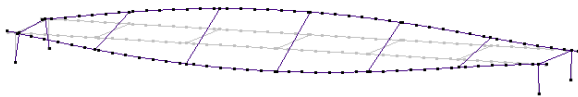
대상교량의 고유진동해석의 결과를 다음의 표1 및 그림3에 정리하였다.

표1. 대상교량의 고유진동수 해석결과

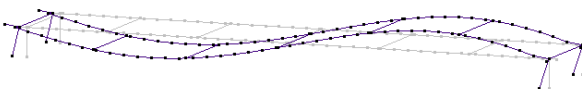
모드번호	모드형상	고유진동수(Hz)
1	1차 휨	3.870
2	1차 비틀	10.288
3	2차 휨	13.027



(a) 1차 모드 (3.870Hz)



(b) 2차 모드 (10.288Hz)



(c) 3차 모드 (13.027Hz)

그림3. 대상교량의 모드형상

3. 현장 주행시험

3.1 측정항목의 선정 및 센서 배치

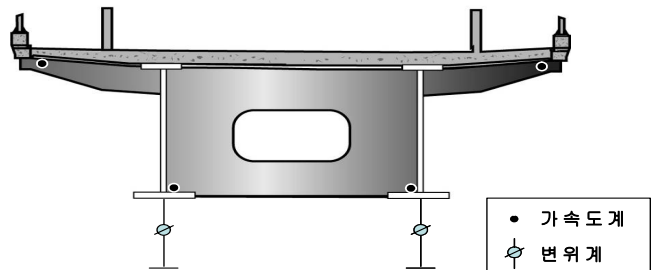
고속철도 교량의 동적성능 기준은 BRDM (Bridge design manual)에 규정되어 있으며, 최대처짐, 거더의 가속도 및 단부회전각 등으로 구성되어 있다.

대상교량의 동적성능이 이러한 규정을 만족하는지 여부를 실측을 통하여 확인하기 위해 중앙경간의 가속도 및 변위, 그리고 단부 회전각을 측정하였으며, 단부 회전각은 50cm 간격으로 배치된 두 개의 LVDT를 사용하여 측정된 한 쌍의 수직변위로부터 산출하였다. 또한, 대상교량의 동적 특성치(고유진동수 및 모드형상)를 확인하기 위해 교축방향으로 가속도계를 배치하였다.

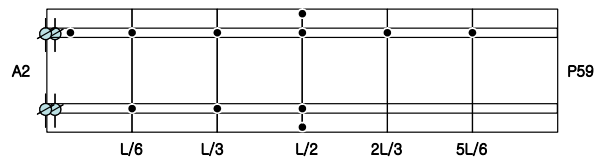
다음의 표2 및 그림4에 사용된 센서의 목록 및 위치를 정리하였다.

표2. 사용 센서목록

센서종류	수량	위치	측정항목
가속도계	11	지점부, L/6, L/3, L/2, 2L/3, 5L/6	고유진동수 모드형상 최대가속도
변위계 (LVDT)	2	L/2	최대변위
	4	지점부	단부회전각



(a) L/2 단면내 배치



(b) 평면 배치

그림4. 센서 배치도

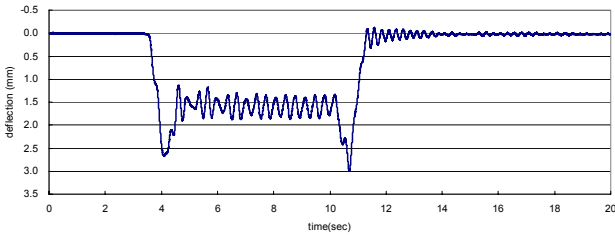
3.2 동적응답 측정

2007년 2월 26일~27일간 대상교량의 동적응답 측정을 수행하였으며, 설치된 센서와 동적 데이터 수집장비(DAQ)를 사용하여, 운행 중인 고속철도 차량이 통과하는 동안의

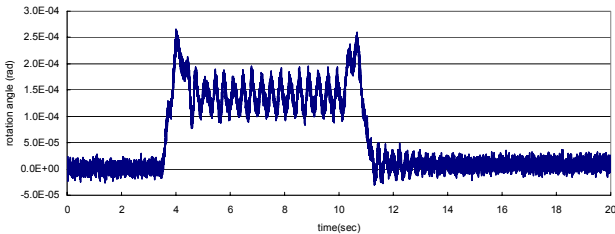
동적응답을 상, 하행 각각 12회씩 측정하였다.

(1) 시간영역 데이터

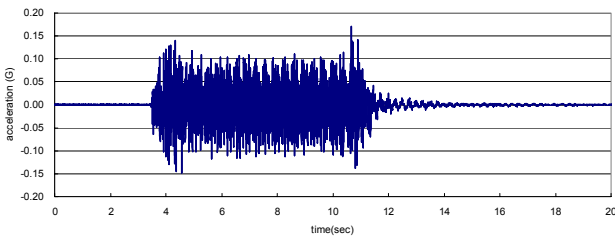
다음의 그림5에는 상행선 운행시 측정된 데이터의 예를 나타내었다. 단부 회전각의 경우는 지점부에 설치된 두 개의 변위계로부터 산출된 값을 도시하였으며, 다른 측정치에 비하여 S/N 특성이 좋지 않으나, 교량의 동적거동 특성에 문제가 되지 않는 것으로 판단된다.



(a) 중앙경간 수직변위



(b) 단부 회전각



(c) 중앙경간 연직가속도

그림5. 고속열차 주행 중 동적응답 실측자료 예

(2) 고유진동수 및 모드형상

열차가 교량 위에 위치한 상태에서는 교량과 열차의 상호작용 및 열차의 질량추가 효과로 인하여 교량의 독립적인 고유진동수를 파악하기 어려우므로, 열차가 교량을 빠져나간 이후의 데이터 부분만을 취하여 교량의 고유진동수 및 모드형상을 추출하였다.

다음 그림6에는 거더 하부에 설치된 9개의 가속도계로부터 얻어진 신호의 스펙트럼을 나타내었으며, 그림7에는 이로부터 추출한 모드형상을 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 고속열차의 주행에 의하여 1차 모드를 제외한 다른 모드의 가진이 거의 이루어지지 않음을 알 수 있으며, 1차 고유진동수는 약 4.0Hz로 수치해석의 결과와 근접함을 확인

할 수 있다.

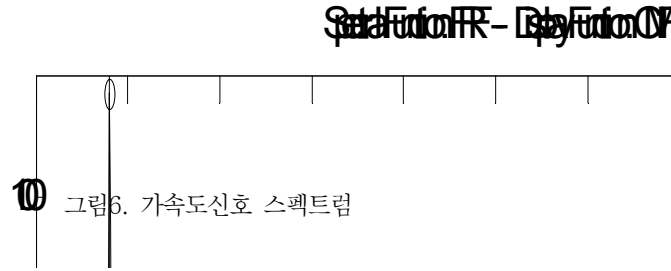


그림6. 가속도신호 스펙트럼

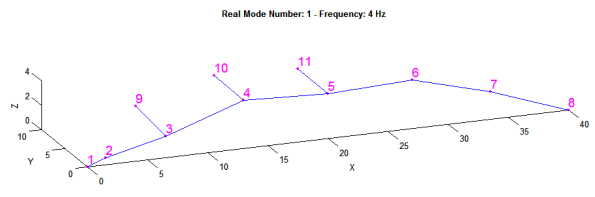


그림7. 1차 모드형상

4. 동적거동 분석

4.1 동적성능 기준

우리나라 고속철도 교량의 동적성능 기준은 BRDM (Bridge Design Manual)에 규정되어있으며, 가속도, 처짐 및 단부 회전각에 대하여 다음의 표3과 같은 제한값을 제시하고 있다.

표3. 고속철도 교량 동적성능 기준

항목	제한값
가속도	0.35g
처짐	1/1700
단부 회전각	5×10^{-4} rad

4.2 동적성능 측정치 분석

(1) 최대 처짐

다음의 그림8에는 상행선 및 하행선 운행시 측정된 중앙경간의 변위 시간이력으로부터 추출한 최대 변위를 나타내었다.

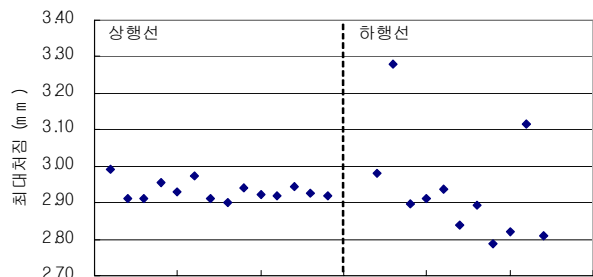


그림8. 최대처짐 측정치

그림에 보인바와 같이 하행선 운행시 변위의 변동폭이 상행선의 경우에 비하여 크게 나타나고 있으나, 기준치인 $L/1700(=23.5\text{mm})$ 와 비교할 때 매우 안전측의 값을 보이고 있다.

(2) 최대 연직가속도

다음 그림9에는 최대 연직가속도 측정치를 나타내었다. 상행선 주행시 및 하행선 주행시에 공통적으로 0.15~0.25g 범위의 가속도 최대치가 관측되었으며, 이는 기준값인 0.35g의 43%~71% 수준이다.

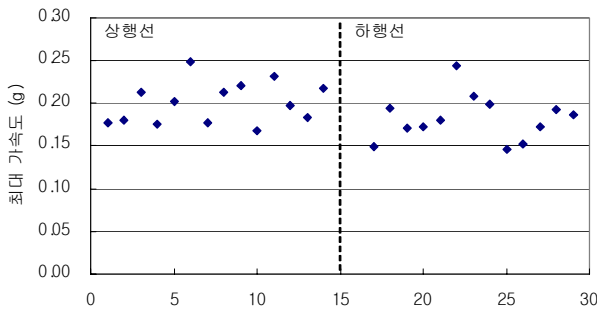


그림9. 최대 연직가속도 측정치

(3) 단부회전각

다음 그림10에는 단부회전각 최대치를 나타내었다. 상행선 운행경우에 비하여 하행선 운행경우에 더 큰 단부회전각이 측정되고 있으며, 평균 약 3.9×10^{-4} rad으로 기준치의 78% 수준에서 응답이 관찰되고 있다.

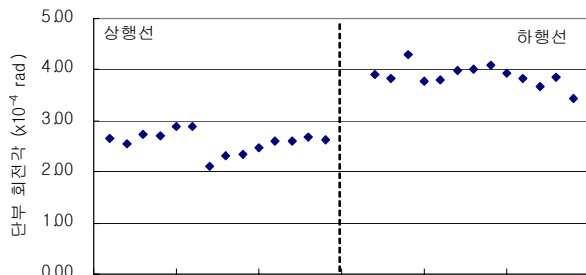


그림10. 최대 단부회전각 측정치

4. 결론

이 논문에서는 경부고속철도 대전~김천 구간에 설치된 2주형 합성형 교량중 하나인 이원고가교 40m 단순지지 구간에 대한 고속철도 운행중 동적측정 및 측정결과와 동적성능 기준치의 비교 분석을 수행하였다.

교량의 동적성능을 나타내는 최대가속도, 최대변위, 및 단부 회전각에 대한 측정 및 분석을 수행하였으며, 모든 측

정치는 BRDM에서 규정한 기준치 범위 내에 드는 것을 확인할 수 있었다.

상행선 주행의 경우와 하행선 주행의 경우 응답특성이 상이한 패턴을 보이는 것이 확인되었으며, 이는 상, 하행선 동행 열차의 하중패턴이 다르기 때문인 것으로 생각된다.

본 논문에서 분석한 동적응답은 해당 구간을 통과하는 열차의 속도가 일정 범위 내에만 제한적으로 분포하는 조건 하에서 얻어진 것이므로, 속도 변화에 의한 공진의 영향은 추가적인 수치해석을 통하여 분석 할 계획이다.

참 고 문 헌

- (1) 곽종원, 진원중, 김영진, 김병석, 2003, “경부고속철도 주행에 의한 콘크리트 상자형 교량의 동적거동”, 대한토목학회 논문집, 23(1A), pp. 27~36.
- (2) 최은석, 진원중, 이정우, 곽종원, 강재운, 김병석, 2006, “고속철도 교량의 진동저감”, 한국철도학회 논문집, 9(1), pp. 125~130.
- (3) 최은석, 진원중, 곽종원, 박성용, 강재운, 김영진, 김병석, 2001, “고속전철 교량 감쇠 연구”, 한국철도학회 논문집, 4(1), pp. 23~30.
- (4) Chang, S.P., Kwark, J.W. and Kim, S.I., 1998, “Vibration of Steel Composite Railway Bridges subjected to High Speed Train”, *Journal of Korean Society for Steel Construction*, 10(4), pp.577~587.