

고속철도 강교량의 진동특성 분석#

Dynamic Characteristics of High-speed Railway Steel Bridges

이정휘† · 김성일* ·곽종원** ·이필구*** ·윤태양***

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

(2007년 4월 3일 접수 ; 2007년 5월 4일 심사완료)

Key Words : High-speed Train(고속열차), Dynamic Behavior(동적거동), Steel Bridge(강교량), Vibration(진동)

ABSTRACT

The dynamic behavior of two steel bridges crossed by the Korean High Speed Train(KHST) has been investigated experimentally and the results are compared with the specification requirement of BRDM and other typical PSC Box bridge's responses. The investigated bridges are a 2-girder steel bridge of 1@40 m span length(E-Won Bridge), 2@50 m span length (Ji-Tan Bridge), and a PSC Box girder bridge of 2@40m span length (Yeon-Jae Bridge). A set of experimental tests were performed during operation of KHST, and a number of accelerometers, LVDTs and ring-type displacement transducers were utilized for measurement of three kinds of dynamic responses (acceleration, deflection, and end-rotation angle). Measured responses show that the vertical deflections and end-rotation angles of the three bridges are all satisfying the spec. requirement with large margin, but it was also found acceleration responses which are very close or exceed the limit value. Most of the excessive acceleration responses were found when the passing velocity of the KHST is close to the critical velocity (V_{cr}) which causes resonance. No noticeable differences of dynamic responses due to the different materials(steel or concrete) could be found within these experimental results.

1. 서 론

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

교가 설치되어 있다.

고속철도 교량은 열차가 최대 350 km/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 40 m 2경간 연속 콘크리트 상자형 교량의 동적 거동에 관한 이론 및 실험적 연구가 지속적으로 이루어져 왔으며, 최근에는 과도한 진동의 저감을 위한 연구도 이루어지고 있다^(1,2,3).

이 논문에서는 경부고속철도의 2주형 합성형 교량인 이원고가교 및 지탄교에 대한 동특성 및 동적거동의 측정을 수행하였으며, 이를 PSC box 교량인 연체교의 거동 및 BRDM(bridge design manual)⁽⁴⁾

† 교신저자 : 정희원, RIST 강구조연구소 토목구조연구실
E-mail : jwhee2@rist.re.kr

Tel : (031) 370-9592, Fax : (031) 370-9599

* 한국철도기술연구원

** 한국건설기술연구원

*** RIST 강구조연구소 토목구조연구실

이 논문은 2007 춘계 소음진동 학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

Table 2 Quantity of the measured data set

Bridge name	Date	Quantity of data set	
		North bound	South bound
E-Won Br.	2007.2.27	14	13
Ji-Tan Br.	2007.4.13	5	5
Yeon-Jae Br.	2007.4.11	22	20

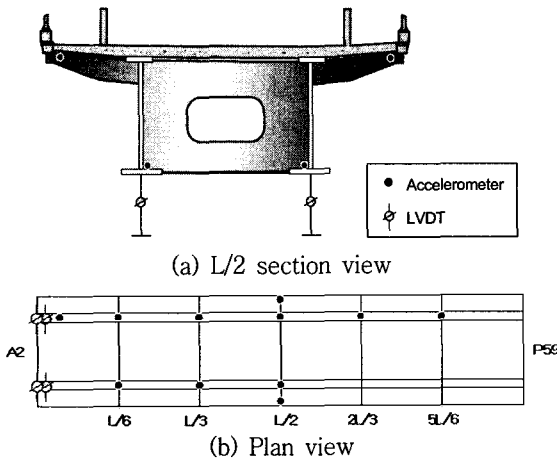


Fig. 4 Sensor disposition map(E-Won Bridge)

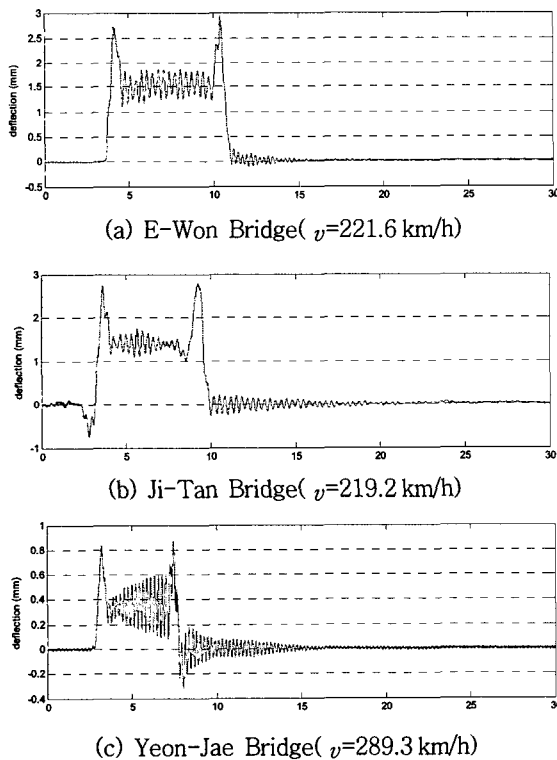


Fig. 5 Vertical displacement of mid-span section

3.2 동적응답 측정

2007년 2월27일, 4월10일 그리고 4월13일에 대상교량의 동적응답 측정을 수행하였으며, 설치된 센서와 동적 데이터 수집장비(DAQ)를 사용하여, 운행 중인 고속철도 차량이 통과하는 동안의 동적응답을 측정하였다. 각 교량에 대하여 측정된 데이터의 수량을 다음의 Table 2에 정리하였다.

(1) 시간영역 데이터

다음의 Fig. 5 ~ Fig. 7에는 각 교량에서 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 분석에 문제가 되지는 않을 것으로 판단된다.

신호의 측정빈도(sampling rate)와 저역통과필터(low-pass filter)는 기존 연구와의 일관성을 유지하기 위하여 각각 1,000 Hz와 200 Hz로 설정하였다.

(2) 고유진동수, 모드형상 및 감쇠비

열차가 교량 위에 위치한 상태에서는 교량과 열차의 상호작용 및 열차의 질량추가 효과로 인하여

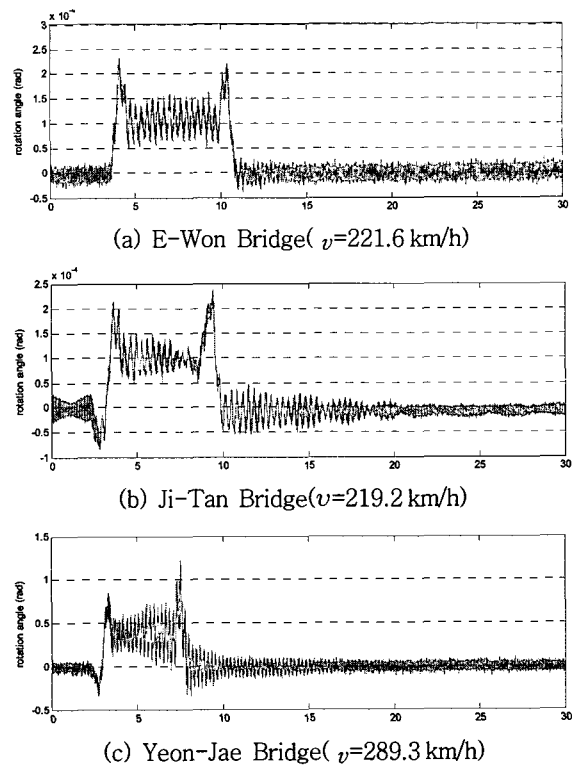


Fig. 6 End-rotation angle

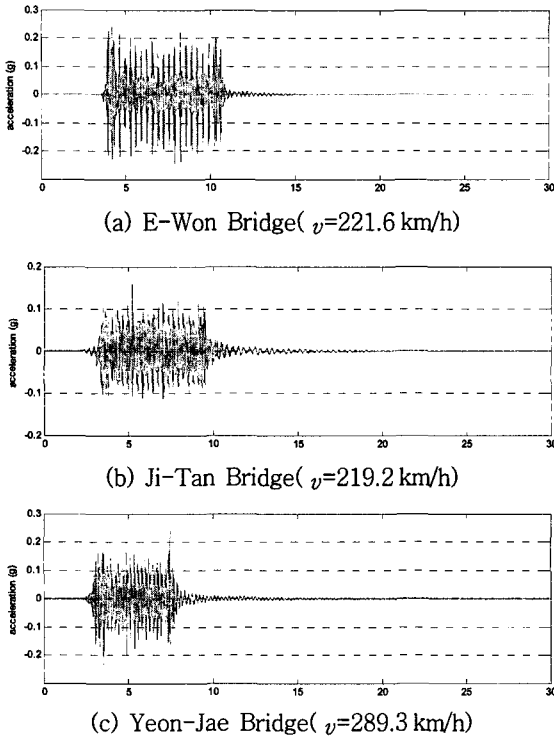


Fig. 7 Vertical acceleration of mid-span section

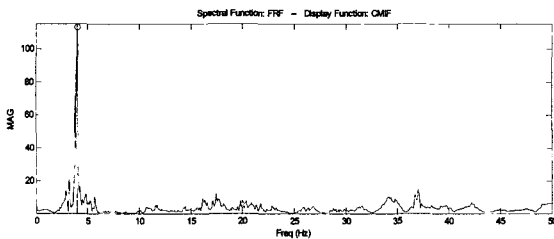


Fig. 8 Acceleration spectrum of E-Won Bridge

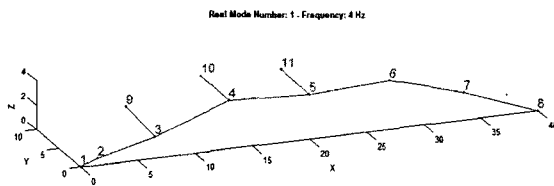


Fig. 9 1st vibration mode shape of E-Won Bridge

교량의 독립적인 고유진동수를 파악하기 어려우므로 (5), 전체 측정 가속도 신호 중 열차가 교량을 빠져나간 이후의 부분만을 취하여 교량의 고유진동수 및 모드형상을 추출하였다.

Fig. 8에는 이원교가교의 거더 하부에 설치된 9개의

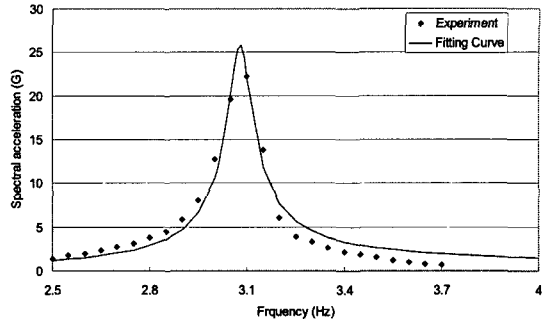


Fig. 10 1st mode curve fitting of Ji-Tan Bridge

Table 3 Dynamic characteristics of the target bridges

Bridge name	1st Natural frequency (Hz)	Damping ratio(%)	Comment
E-Won Br.	4.0	2.4	
Ji-Tan Br.	3.08	1.2	
Yeon-Jae Br.	4.35	2.4	Reference (3)

Table 4 Spec. requirements of dynamic performances

Response	Reference value
Acceleration	0.35 g
Deflection	L/1700
End-rotation	5×10^{-4} rad

가속도계로부터 얻어진 신호의 스펙트럼을 나타내었으며, Fig. 9에는 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 4.0 Hz로 나타났다.

대상교량의 감쇠비를 추출하기 위해 자유진동 응답의 FFT 스펙트럼 중 해당 모드의 진동수 영역을 취하여 단자유도계 이론식을 사용한 curve fitting을 최소사승법을 사용하여 수행하였다. 다음 식 (1)에 단자유도계의 주파수응답함수의 이론식을 나타내었다.

$$\frac{A(\omega/\omega_n)^2}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left\{2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right\}^2}} \quad (1)$$

여기서, ω_n 은 고유진동수, ξ 는 감쇠비이며, A 는 비례상수이다.

Fig. 10에는 지탄교의 1차 모드에 대한 curve

fitting 결과를 나타내었으며, 고유진동수 3.08 Hz, 감쇠비 1.2%로 분석되었다. Table 3에 각 교량에 대한 동적특성치를 정리하였다.

4. 동적거동 분석

4.1 동적성능 기준

우리나라 고속철도 교량의 동적성능 기준은 BRDM(bridge design manual)에 규정되어있으며, 가속도, 처짐 및 단부 회전각에 대하여 Table 4와 같은 제한값을 제시하고 있다.

4.2 동적성능 측정치 분석

(1) 최대 처짐

다음의 Fig. 11에는 3개 교량에서 측정된 최대 변위를 기준치에 대한 비율로 나타내었다. 기준치는 Table 4의 기준에 따라 이원고가와 연제교의 경우 23.5 mm, 지탄교의 경우 29.4 mm 이다.

그림에 보인바와 같이 각 교량의 최대처짐은 이원고가>지탄교>연제교 순으로 나타났으며, 세 교량 모두 기준치에 비해 충분히 안전측의 응답을 나타내고 있다.

(2) 최대 연직가속도

Fig. 12에는 최대 연직가속도 측정치를 나타내었다. 연제교의 경우 기준치를 초과하는 응답이 발생하고 있으며, 이는 참고문헌 (2)에서도 언급된 바와

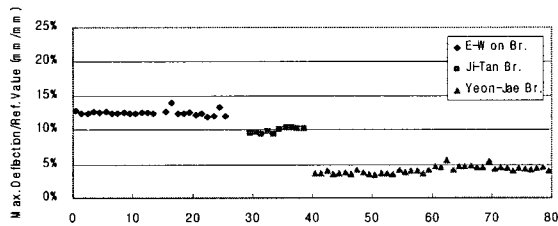


Fig. 11 Measured maximum deflections

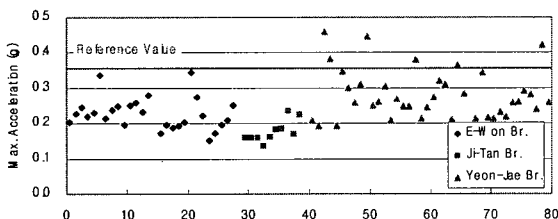


Fig. 12 Measured maximum accelerations

같다. 이원고가교의 경우는 지탄교에 비해 비교적 높은 수준의 가속도 응답을 보이고 있으나 기준치를 초과하는 응답은 측정되지 않았다.

(3) 단부회전각

Fig. 13에는 단부회전각 최대치를 나타내었다. 이원고가교의 경우 상행선 운행시에 비하여 하행선 운행시에 더 큰 단부회전각이 측정되고 있으며, 이러한 경향은 연제교의 경우에도 비슷하게 나타나고 있다. 이는 상행선과 하행선 열차의 운행특성 또는 승객분포와 관련이 있는 것으로 생각된다. 단부회전각은 변위응답과 마찬가지로 이원고가>지탄교>연제교의 순으로 나타나고 있으며, 모두 기준치 내에 분포하고 있다.

4.3 열차 주행속도에 따른 공진발생

철도교량의 경우 일정한 간격으로 반복되는 축하중의 재하 주기가 교량의 고유진동수와 일치할 경우 공진이 발생될 수 있으며, 공진을 유발하는 차량의 통과속도 즉 임계속도(critical speed, v_{cr})는 다음

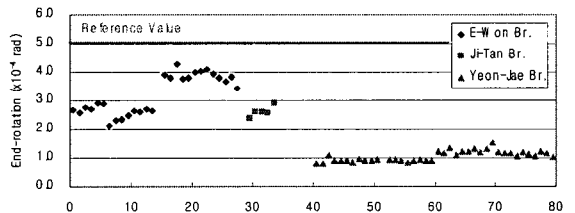


Fig. 13 Measured maximum end-rotation angles

Table 5 Critical speeds of target bridges

Bridge name	Critical speed(km/hr)
E-Won Br.	269.3
Ji-Tan Br.	207.3
Yeon-Jae Br.	292.8

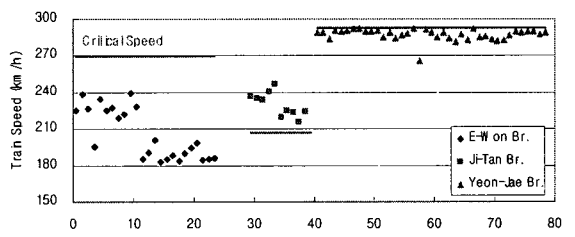


Fig. 14 Critical speeds and train-passing speeds

식 (2)에 의해 계산될 수 있다.

$$v_{cr} = \omega_1 \times S_{eff} \quad (2)$$

여기서, v_{cr} 은 열차의 임계속도이며, S_{eff} 는 열차의 유효타격간격(고속철도의 경우 18.7 m), 그리고 ω_1 은 교량의 첫 번째 고유진동수를 나타낸다⁽⁶⁾.

위 식에 의해 계산된 각 교량의 임계속도를 다음 Table 5에 나타내었으며, 주행시험 시 통과한 열차의 속도를 임계속도와 함께 Fig. 14에 나타내었다.

Fig. 14에 보인 바와 같이 연제교의 경우 열차의 주행속도가 임계속도와 매우 근접함을 확인할 수 있으며, 이는 Fig. 5(c)의 변위응답이 공진발생시의 양상을 보이고 있는 것과도 일치하는 결과이다. 또한 연제교의 가속도응답이 기준치를 초과하고 있는 것도 역시 공진의 영향인 것으로 생각할 수 있다. 한국건설기술연구원에서는 고속철도교량의 과도한 가속도응답을 제어하기 위한 진동저감 연구를 진행하고 있다⁽²⁾.

5. 결 론

이 논문에서는 경부고속철도 대전~김천 구간에 설치된 2주형 합성형 교량인 이원고가교 40m 단순 지지 구간과 지탄교에 대한 고속철도 운행중 동적측정을 수행하고, 그 결과를 BRDM의 동적성능 기준치 및 PSC box교량인 연제교의 응답과 비교 분석하였다.

교량의 동적성능을 나타내는 최대가속도, 최대변위, 및 단부 회전각에 대한 측정 및 분석을 수행하였으며, 대부분의 측정치는 BRDM에서 규정한 기준치 범위 내에 분포하지만, 연제교의 경우 일부 가속도응답은 기준치를 초과하는 것으로 나타났다.

강합성형 교량의 동적거동은 변위와 단부회전각의 경우 PSC box교량에 비해 높은 수준을 나타내지만, 가속도응답의 경우는 더 낮은 수준을 나타내고 있다. 이것은 강합성형 교량이 PSC box 교량에 비해 낮은 강성으로 설계되었음에도 열차 통과속도에 의한 공진이 발생하지 않기 때문인 것으로 생각할 수 있다.

따라서, 교량의 동적성능을 지배하는 인자는 교량

의 고유진동수와 열차의 통과속도에 의해 결정되는 공진발생의 여부이며, 강재와 콘크리트 소재의 차이에 의한 동적성능의 유의한 차이는 나타나지 않았다.

이 논문에서 분석한 동적응답은 해당 구간을 통과하는 열차의 속도가 일정 범위 내에만 제한적으로 분포하는 조건 하에서 얻어진 것이므로, 속도 변화에 의한 공진의 영향에 대하여 추가적인 수치해석을 통한 분석을 수행하고 있다.

참 고 문 헌

- (1) Kwark, J.-W., Chin, W.-J., Kim, Y.-J. and Kim, B.-S., 2003, "Dynamic Behavior of Concrete Box Girder Bridge due to Riding Korean High-speed train", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol. 23, No. 1A, pp. 27~36.
- (2) Choi, E.-S., Chin, W.-J., Lee, J.-W., Kwark, J.-W., Kang, J.-Y. and Kim, B.-S., 2006, "Diminution of Bridge Vibration for High-speed Trains", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 9, No. 1, pp. 125~130.
- (3) Choi, E.-S., Chin, W.-J., Kwark, J.-W., Park, S.-Y., Kang, J.-Y., Kim, Y.-J. and Kim, B.-S., 2001, "A Study on Damping Value of Bridge in High-speed Railway", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 4, No. 11, pp. 23~30.
- (4) SYSTRA, 1995, Bridge Design Manual (BRDM) Final Report, Korea High Speed Rail Construction Authority (KHRC).
- (5) Kwon, S.-D., Kim, C.-Y. and Chang, S.-P., 2003, "Variation of Modal Parameters of Bridges due to Vehicle-bridge Interaction", Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 420~423.
- (6) Kim, S.-I., Kwark, J.-W. and Chang, S.-P., 1999, "Resonance Phenomenon According to the Relationship between Span Length of the Bridge and Effective Beating Interval of High-speed Train", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 3, No. 2, pp. 67~75.