

# 고속철도 연속 PSC Box 교량에 적용한 설계기준의 현장계측에 의한 검증

## Verification of bridges Design criteria for Continuous PSC Box Bridge of High Speed Railway Using Field Test

강 기 동<sup>1)</sup>

*Kang, Kee Dong*

**요 약**: 본 논문은 경부고속철도 구간에 건설된 교량 중 연속 PSC Box 교량에서의 현장계측 및 동적설계 기준에 대한 검증을 수행함으로써 대상교량의 동적안정성 확보 여부를 확인하였다. 연구결과 고속선 구간의 대표적인 2연속 PSC Box 교량은 고속주행 열차하중 하에서의 동적거동에 대해 안정적인 것으로 나타났으며 교량설계시 적용한 설계기준들은 적합한 것으로 실험적으로 검토되었다. 또한 향후 고속철도 교량설계 시 연속교 교량을 채택하는 것에 대한 합리성을 입증할 수 있었다. 또한 고유진동수를 감안한 열차속도 조정 및 교량 경간장 조정 등을 반영한다면 보다 경제적이고 최적화된 고속철도 교량 설계가 가능하리라 판단된다. 아울러 교량의 동적거동에 대한 안정성을 지속적으로 관리하기 위해 측정자료를 누적 관리하고 이를 체계적으로 분석한다면 본 연구결과는 유지관리 측면에서 고속철도 교량의 안정성 평가에 중요한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

**ABSTRACT**: The aim of this paper is to verify the dynamics stability of the continuous PSC Box bridges on the high-speed Kyoung-bu railway when a high-speed train runs through it. An experimental study was carried out to investigate the dynamic behaviors of the PSC Box railway bridge, which had been designed based on dynamic design criteria. As a result, it was determined that PSC Box railway bridges possess enough dynamics stability for use by high-speed trains. According to the result of a field test (dynamics measuring analysis) that was conducted, an application of the natural frequency of train speed and the adjustment of the bridge's span length will allow one to come up with a more economical and suitable bridge design. Furthermore, it was found that the continuous control of the bridge's dynamic behavior and the bridge's maintenance require the recording of data.

The results of this study are very important in evaluating the structural stability of high-speed line bridges.

**핵심용어**: 고속철도, 교량설계, 교량동적거동

**KEYWORDS**: High Speed Railway, Bridge design, Bridge dynamics behavior

### 1. 서론

현행 국내 고속철도의 설계방식은 대부분 정적하중에 동적 확대계수(충격계수)를 적용하여 기존 구조물에 대한 강성을 증가시키는 개념으로 설계되었다. 그러나 실제 고속철도 교량은 250km/h로 열차가 고속주행할 경우 공진 현상이 발생할 가능성이 있으며 따라서 충격력만이 아닌 진동에 의한 동적 안정성에 대한 문제가 심각하게 대두되었다. 이에 프랑스 고속철도 설계전문회사인 SYSTRA社(Dynamic Analysis

of Bridges Under High Speed Live Loads)와 미국의 CEC(Joseph Penzien 교수)에 의해 이와 같은 진동에 의한 동적 안정성 검토가 시행되었고[1] 검토결과, 동적 안정성을 확보하기 위하여 설계단계에서 교량의 처짐, 상판가속도, 단부격임각, 비틀림 등 교량의 동적거동에 영향을 미치는 인자에 따른 설계기준이 제시되었으며 여러 가지 교량 형식 중 PSC Box교량이 가장 적절하다는 평가에 따라 하부구조에 관계없이 상부구조를 PSC Box교량으로 건설하게 되었다.[2][3] 본 고에서는 고속철도 시험선 구간의 열차시운전이

1) 교신저자. 정회원, (주)삼성물산 고문, 공학박사  
(Tel : 02-2145-5070, Fax : 02-2145-5920, E-mail : keedong.kang@samsung.com)

본 논문에 대한 토의를 2006년 8월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

성공적으로 수행된 시점에서 대표성 있는 PSC Box교량 (2@40)을 대상으로 열차의 고속주행에 따른 동적 거동의 영향으로 고려된 각 설계 Parameter에 대하여 실측, 분석하여 완공된 PSC Box 교량구조물의 동적 안정성검토 및 설계기준을 검증하는 연구를 수행하였다.

## 2. 대상교량 제원 및 센서설치

분석대상교량은 PSC Box 형식으로서 경간장 40m의 2연속 교량구조물이며 형고는 3.9m이다. 또한 열차의 고속주행에 따른 동적 거동을 분석하기 위한 계측센서 설치는 단면별로 각각 다음 그림 1과 같이 배치하였다.

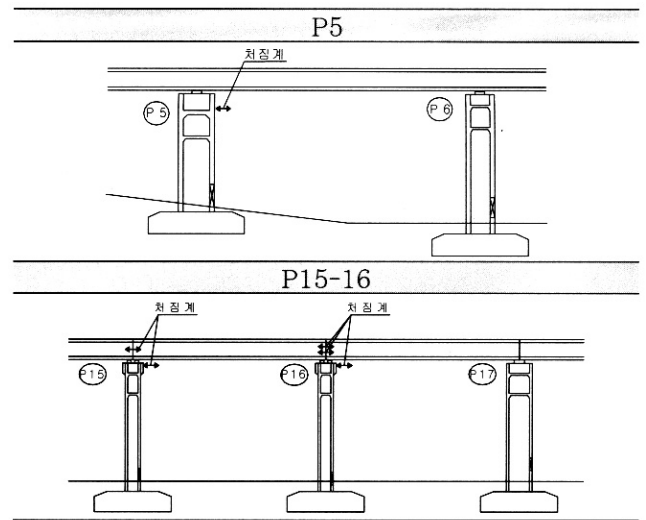
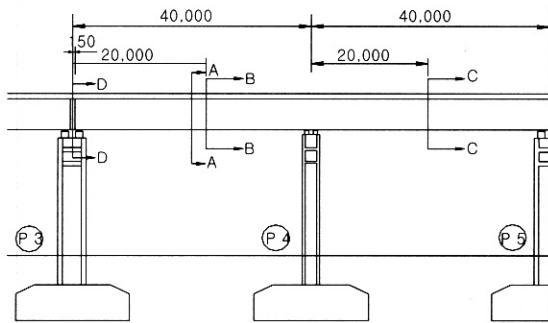


그림 1. Attachment of sensors for the measurement



Section A-A	Section B-B
Section C-C	Section D-D
표 기	내 용
▲ (1) ~ (7)	치 짐 계
◆ ① ~ ⑧	가 속 도 계

## 3. 고속철도 교량 설계기준

열차가 교량을 250km/h 이상의 속도로 고속주행시 교량의 고유진동수와 일정축거를 갖는 축중에 의한 반복 가진진동수가 근접할 때 교량에 공진현상이 발생되고, 이로 인해 교량의 진동가속도와 순간 수직처짐이 증가하면서 구조물의 안정성과 승차감을 급격히 저하시키므로 고속철도에서는 이러한 고속주행에 따른 동적거동의 영향을 고려하고자 교량설계시 다음과 같은 기준을 적용하였다. [1][4][5]

표 1. Application of Bridge design specification

구 분	당초설계	설계보완시 적용	비 고
하 중	UIC	UIC/TGV	
교각 수평 변위	-	최대 10mm 이내	- 교각단면증가 - 크립크플러설치
교량상판 길이한도	최대 120m 이내	최대 80m 이내	- 3@40을 2@40 또는 3@25로 변경
속도영향 - 처짐한도 - 단부 꺾임각 - 비틀림 - 상판수직가속도	충격계수할증 1/1800 1/370 1mm/m -	실차 0~350km/h 1/1700 1/4000 0.4mm/m 0.35g	PC BEAM을 PC BOX로 변경

## 4. Parameter의 측정 방법(1)

### 4.1 상판가속도

KTX열차 주행시 발생하는 상판의 최대 진동가속도는 경간 중앙부 상판하면에 부착한 가속도계를 통해 측정하였으며 이때 측정된 가속도 동적응답 특성치중 절대 최대치를 취하였다.

### 4.2 중앙부 처짐

상부구조 형식인 PSC Box 중앙부의 처짐을 측정하기 위해 경간 중앙부 하면에 처짐계를 설치하여 KTX열차 주행시 발생하는 최대 처짐을 측정하였다.

### 4.3 상판의 면틀림

PSC Box 중앙부와 단부의 종방향 면틀림과 중앙부 좌·우측의 횡방향 면틀림을 측정하기 위해 경간중앙 하면 좌·우측에 처짐계를 설치하여 KTX열차 주행시 발생하는 상대변위량을 측정하였다. 종방향으로 20m, 횡방향으로 5m 떨어진 곳에 설치한 각각의 센서들에 의해 측정된 상대변위량을 종방향 3m, 횡방향 1m로 환산하여 교량설계기준(≤0.4mm/m(횡)/3m(종))과 비교가 가능하도록 측정하였다.

### 4.4 고유진동수

열차가 교량을 통과한 후, 교량의 진동이 조화적으로 감소하는 변위응답 이력곡선이 얻어지면 시험 대상교량의 고유진동수는 자유진동 상태의 시간영역(time domain) 상에서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f = \frac{n}{t} \text{ (Hz)} \quad (1)$$

여기서,  $f$  : 교량의 기본고유진동수

$n$  : 시간  $t$  동안에 일어나는 사이클수

### 4.5 교각변위(7)

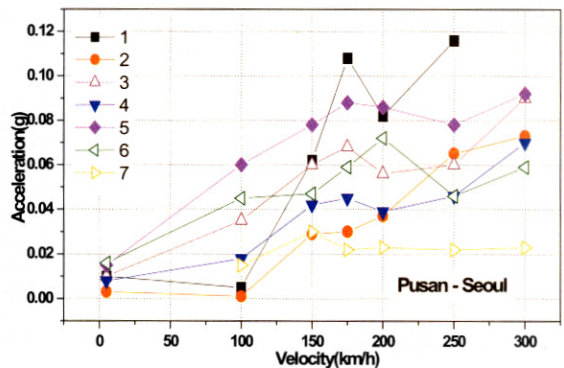
교량상부구조의 수평상대변위를 측정하기 위하여 상판과 상판사이의 상대변위를 계측하였으며 상판과 교각사이의 상대변위를 측정하였다. 또한 교각 자체의 절대변위를 측정하기 위하여 크레인을 이용하여 크레인과 교각의 상대변위를 계측하

였다.

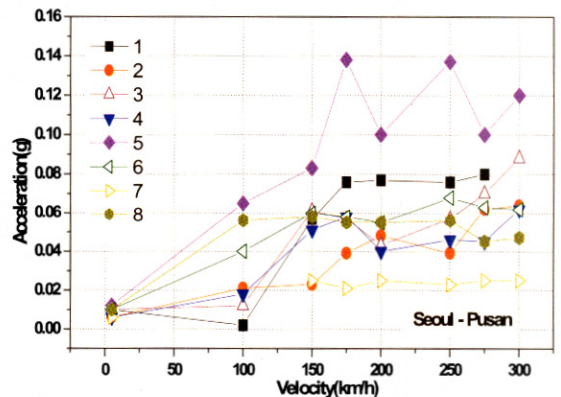
## 5. 측정결과 분석

### 5.1 상판가속도

대상교량 경간중앙부 상판하면에 부착된 가속도계에 의해 측정된 데이터를 분석한 결과 진동가속도 최대값은 그림 2에서와 같이 상, 하행선 주행시 교량 중앙부 및 교각부 각각에서의 최대 진동가속도가 0.112g와 0.138g로 철도교량설계기준인 0.35g보다 매우 안정적인 값으로 나타났으며 속도변화에 따른 진동가속도의 변화 검토결과, 속도증가에 따라 진동가속도가 증가하는 것으로 나타났다.



(a) 중앙부



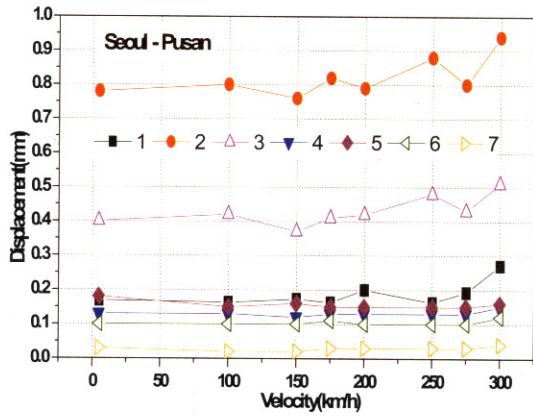
(b) 교각부

그림 2. Max. Acceleration on the bridge

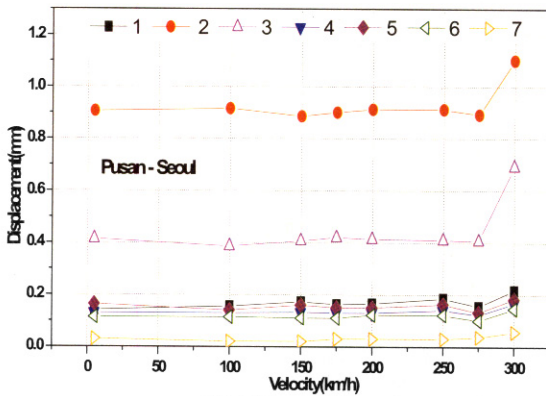
### 5.2 중앙부 처짐

처짐계를 교량 상판 중간 및 교각위 Box Girder 외부 플랜지 하부에 부착하여 KTX열차주행시의 동적 처짐을 측정하였다. 측정결과 시속 300km 일때 중앙부 처짐계에서 상, 하행선 각각 0.929mm, 1.091mm의 최대 처짐값이 계측되었다. 이 값은 교량설계기준 23.5mm보다 대단히 작은 값으로 교량

의 동적거동에 의한 승차감 저하는 거의 없을 정도로 안정된 주행이 되고 있음을 알 수 있다. 그림 3에서 알 수 있듯이 속도의 증가에 따른 처짐 증가 현상은 나타나지 않으나 250km/h 이상의 속도에서 수직 처짐값이 커짐을 알 수 있으며 이는 고속주행 열차하중에 따른 교량의 공진현상에서 기인한 것으로 판단된다.



(a) 서울 → 부산



(b) 부산 → 서울

그림 3. Max. Vertical Displacement on the bridge

### 5.3 상판의 면틀림

KTX열차 주행시 발생하는 상판의 면틀림을 측정하기 위해 경간 중앙부 하면에 처짐계를 설치하여 상대 변위량을 측정하였으며 측정된 상대 변위량을 각각 종방향 3m, 횡방향 1m에 대한 상판의 면틀림으로 환산한 결과 최대값은 0.104mm(부산→서울, 191km/h)로 교량설계기준치( $\leq 0.4\text{mm/m}$ (횡)/3m(종))보다 작은 것으로 확인되었다. 2경간 연속구간의 각 센서별 최대 면틀림과 이때 발생하는 면틀림 이력곡선의 일례는 그림 4와 같다.

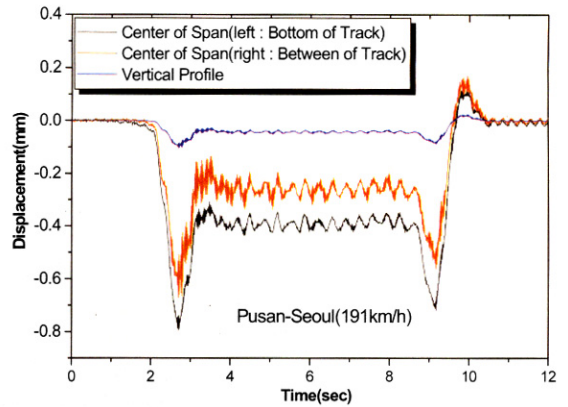
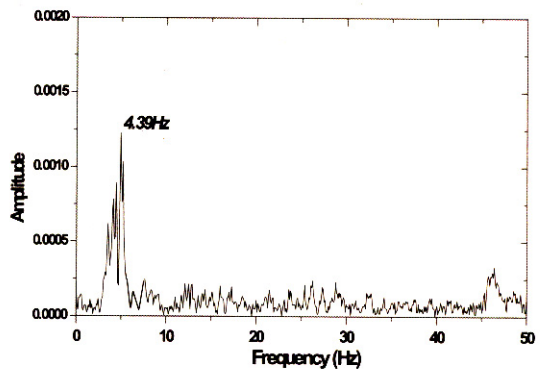


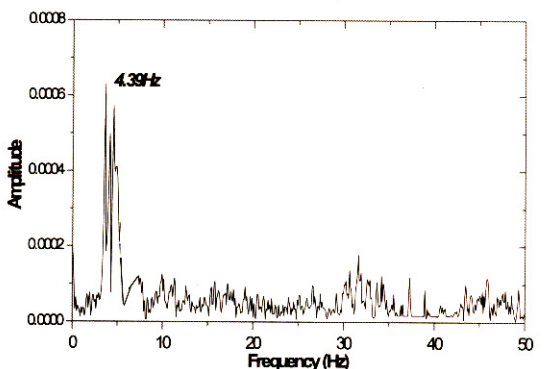
그림 4. The history curve of Max. Surface Displacement:

### 5.4 고유진동수

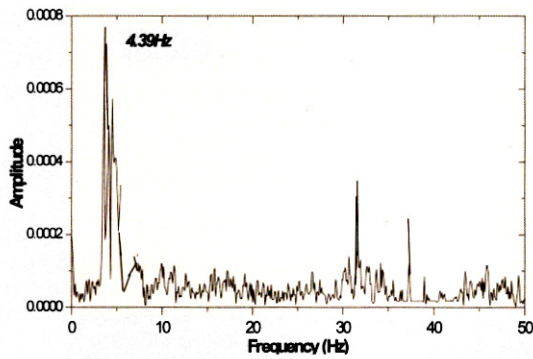
2경간 연속구간에서 획득한 진동가속도 이력곡선으로부터 교량의 고유진동수를 산출하기 위하여 주파수 분석을 실시하였으며, 분석결과는 그림 5와 같다. 그림 5의 (a)와 (b)는 각각 박스내부에서 측정된 가속도와 처짐 이력곡선에 대한 스펙트럼 분석결과이고 (c)는 박스하부에서 측정한 처짐이력곡선의 스펙트럼 분석결과이다. 이러한 실측 가속도 및 처짐에 대한 주파수분석 결과 대상구간의 고유진동수는 열차속도 250km/h에서 약 4.39Hz인 것으로 판단된다.



(a) Accelerations of Inner Box Girder



(b) Displacements of Inner Box Girder



(c) Displacements of the Bottom Box Girder

그림 5. The Results of spectrum analysis

5.5 교각변위(7)

교량 상부구조물 및 교각의 변위에 대한 계측결과를 살펴보면, A1에서의 상대수평변위의 경우, 허용치 10mm 보다 매우 작은 0.25mm 이하의 값이 계측되었으며 P15에서의 상대수평변위 계측결과는 최대 1.63mm로써 허용치 25mm 보다 매우 작게 나타나고 있어 관련 규정을 만족하고 있음을 알 수 있다.

또한, 교대 A1의 경우 허용치 1.2mm의 약 21% 수준의 상대수평변위가 발생하였으며 교각 P15의 경우에도 허용치 5.5mm의 약 30% 수준의 매우 작은 상대수평변위가 계측되었다.

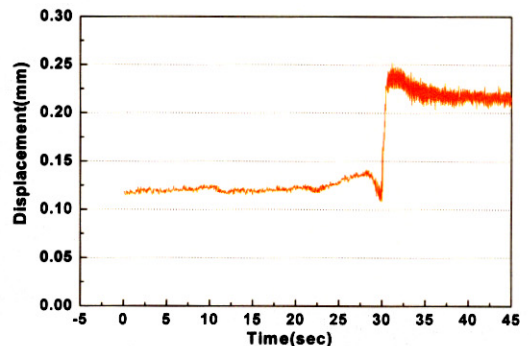
그림 6에서 상대적으로 비교적 상대수평변위가 큰 A1, P15 및 P16의 계측결과를 살펴보면, 제동 후 상대수평변위의 값이 제동시에 갑자기 증가하였다가 약간의 시간이 경과한 후 다시 원래의 값으로 회복되는 경향을 나타나고 있지만 완전히 초기 값으로는 회복되지는 않았다. 이는 수평력이 작용하여 상판사이의 간격이 다소 변화되었거나, 또는 수평력 분산장치에서 흡수한 수평변위로써 시간이 경과함에 따라 서서히 회복되는 변위 등의 원인에 의하여 발생한 것으로 사료된다.

결론적으로 표 2와 같이 수평력 분산장치에 대한 수평력 분산기능 확인을 위하여 상대수평변위를 계측한 결과에 따르면, 제동시험 및 300km/h 주행시, DTD(Deck to Deck)와 DTP(Deck to Pier) 크립커플러 설치개소 모두 수평변위가 관련 규정보다 작게 계측되어 관련 기준을 만족하고 있음을 알 수 있다.

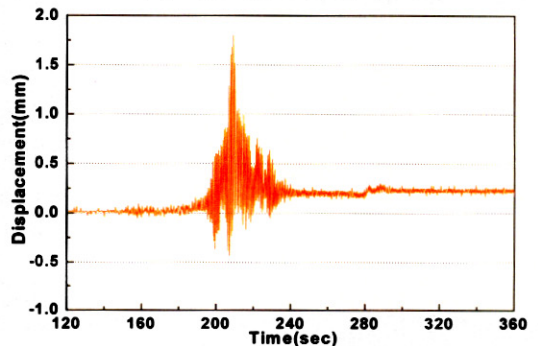
표 2. The recording results of horizontal displacement on bridge

시험방법	계측위치 (단위 : mm)				관련규정 비교결과
	A1	P5	P15	P16	
제동(1차)	0.236	-0.046	0.809	0.287	OK
제동(2차)	0.189	-0.037	1.627	0.453	OK
제동(3차)	-0.13	-0.045	-	-	OK
제동(4차)	0.25	-0.046	-	-	OK
300km/h주행	0.047	-0.037	0.818	0.628	OK

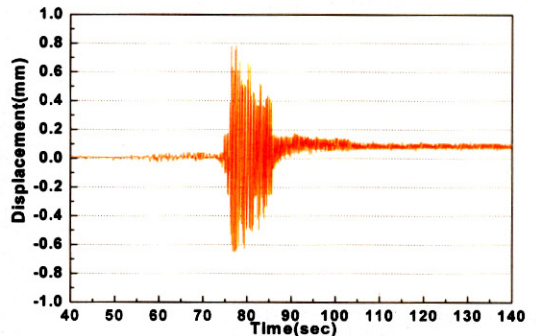
\* 주1) 수평변위 관련규정 : 1) 상대변위 10mm 이하, 2) 상대변위 25mm 이하 (Rail Expansion Joint)



(a) 대상교량 A1(제동1차)

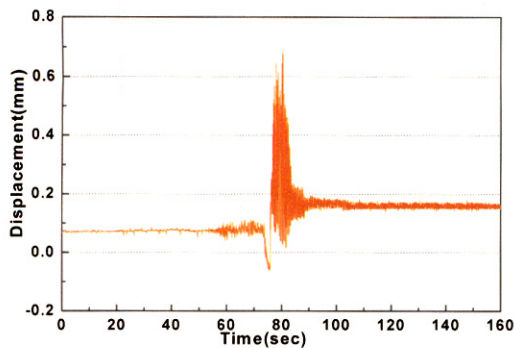


(b) 대상교량 P15(제동2차)



(c) 대상교량 P15(300km/h)





(d) 대상교량 P16(300km/h)

그림 6. Recording results of Relative horizontal displacement

## 6. 결론

본 연구에서는 경부고속철도 구간에 건설된 PSC Box 교량 중 가장 대표적인 2연속 교량(2@40)에 대하여 KTX 열차 통과시 발생하는 진동 및 변위 응답을 측정, 분석하고 이를 철도교량 설계기준과 비교함으로써 대상교량이 고속주행열차에 대해 충분한 동적 안정성을 확보하고 있는지 여부를 확인해 보았으며 본 연구로부터 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실측된 동적응답은 고속철도 설계기준을 충분히 만족시키므로, 현재 완공된 고속철도 PSC Box 교량은 이에 대한 적절한 동적 안정성을 확보하고 있음을 알 수 있다.
- (2) 설계시 사용된 기준들은 고속열차의 주행에 적합한 것으로 분석되었으며 이에 대상교량인 PSC Box 교량은 KTX 고속주행에 적합한 구조임을 확인하였다.
- (3) 고속선구간의 대표적인 2연속 PSC Box 교량은 동적 거동에 대해 안정된 형식의 교량형식이 증명되었다.
- (4) 대상 교량의 고유진동수는 4.39Hz로 선로기준은 만족하나 이론값인 5.2Hz 보다 약 18.5%가 부족한 것으로 측정되었다.
- (5) 수평변위 계측결과에 의하면, 대상교량 Critical Section 내 DTP 및 DTD 형식의 LTF 거동분석결과, 급제동,

급출발 및 300km/h 운행시 모두 관련규정을 만족하고 있으며, 따라서 수평력 분산장치(LFT)의 수평력 분산 기능이 정상적으로 이루어지고 있는 것으로 판단된다.

본 연구결과, 현재 완공된 경부고속철도상의 2연속 PSC Box 교량은 고속주행열차에 대해 충분한 동적 안정성을 확보하고 있는 것으로 판단되므로 향후, 고속철도 교량설계시 연속교 교량채택의 타당성을 제시하고 이에 대한 기초데이터를 확보할 수 있었다.

또한 교량의 고유진동수를 감안한 열차속도 조정 및 교량 경간장 조정 등을 반영한다면 보다 경제적이고 최적화된 고속철도 교량 설계가 가능하리라 판단된다.

아울러 교량의 동적거동에 대한 안정성을 지속적으로 관리하기 위하여 측정된 자료를 누적 관리하고 이를 체계적으로 분석한다면 향후 유지관리 측면에서 고속철도 교량의 건전성 평가에 중요한 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- 서울대학교공학연구소(1994), 경부고속철도 교량 및 고가구조물의 동적특성에 대한 안정성 검토보고서의 분석검토 및 지문.
- 한국고속철도건설공단(2001), 고속철도 기술 자료집.
- 한국철도기술연구원(2000), 시운전시 궤도, 노반 시설물의 성능 검증.
- 한국철도기술연구원(2000), 고속철도 선로구축물 성능확보를 위한 구조물 계측 및 평가 시스템 개발(Ⅲ).
- 한국철도기술연구원(2003), 배방교 수평력 분산장치 계측 보고서.
- SYSTRA(1997), Dynamic Analysis of Bridges under High Speed Live Loads. FINAL REPORT.
- International Civil Engineering Consultant(1994), Dynamic Response Analyses and Performance Evaluations of Elevated Structures and Bridges Designed for The Korea High Speed Rail Project.
- (접수일자 : 2005. 9. 15 / 심사일 2005. 10. 5 / 심사완료일 2006. 2. 10)