

상시 계측결과를 이용한 경부고속철도 교량의 동적거동 분석

A analysis on dyanmic movements of Bridge status using High Rail monitoring systems

정재민*, 한상철**, 최일윤***, 이준식****, 서형렬*****
Jae-Min Chung, Sang-Chul Han, Il-Yoon Choi, Jun-Seok Lee, Hyeong-Lye Seo

ABSTRACT

The Korea high-speed rail, based on the French design. It also implements new concept to increase the strength of bridge deck by adding an impact factor (dynamic intensity factor) in static load. In order to assure the dynamic stability, SYSTRA and Joseph Penzien, a professor in CEC (the US) conducted a dynamic stability review on design phase. Analyzing the review results, they developed design criteria for dynamic behavior.

This study deal with operating PSC box GIRDER equipped with measurement equipment or measured data of Seoul ~ Taejeon, P.S.C BOX GIRDER bridge and steel comsition bridge equipped with measurement equipment based on strucual knowledge about configuration of measuring sensor, response analysis of structure when train runs was performed by using measured data of PSC box girder to directly compare with design criteria. moreover, the dynamic stability with comparison of high-speed rail construction criteria was reviewed and analyzed based on historical records.

1. 서론

우리나라의 경부고속철도 고속철도 교량의 대부분 정적하중에 충격계수(동적확대계수)를 적용하여 기존 구조물에 강성을 키우는 개념으로 설계되었으나, 고속철도는 시속 250km/h 이상의 속도로 고속주행하기 때문에 여러 동적, 정적현상들이 나타난다. 이에 프랑스 고속철도 설계전문회사인 SYSTRA社와 미국의 CEC(Joseph Penzien 교수)에 의해 동적 안정성 검토가 시행되었고 검토결과 동적 안정성을 확보하기 위하여 설계단계에서 교량의 처짐, 상관가속도, 단부 적임각, 비틀림 등 동적 거동영향에 따른 설계기준이 제시되었고 교량의 여러 형식 중 P.S.C BOX GIRDER 교량이 안정하다는 평가에 의해 대부분의 교량상판은 하부구조에 관계없이 상부구조가 P.S.C BOX GIRDER교량으로 건설되었다.

따라서 고속철도가 개통된 현 시점에서 실제 계측기가 설치되어 관리되고 있거나, 시험운행 중 계측을 시행한 고속철도 서울 ~ 대전구간의 P.S.C BOX GIRDER 교량 및 강합성교를 대상으로 계측시스템을 통해 획득 가능한 많은 자료 중 설계기준과 직접 비교가 가능한 항목을 고속철도 설계기준, 기존 해석자료 및 재하시험자료 등과 비교를 통해 교량의 동적거동을 분석함으로써 보다 경제적이고 최적화된 고속철도 교량설계가 되는데 일조 하고자 하였다.

* 서울산업대 철도전문대학원 석사과정
** 서울산업대학교 교수
*** 한국철도기술연구원
**** 한국철도기술연구원
***** 한국철도시설공단

2. 고속철도 교량의 설계기준

300Km/h 이상 속도를 내는 고속열차를 지지하는 교량 구조물에 대하여 구조물의 공진 발생유무를 검토하고 최고 운행속도를 넘는 한계속도를 대상으로 구조물을 보강하는 것은 비현실적이며 비경제적이다. 어느 정도의 공진은 피할 수 없으므로 열차주행을 지지하는 구조물의 동적 응답은 동적 해석으로부터 결정되어야 하고 허용기준을 만족시켜야 한다. 경부고속철도 구조물은 프랑스 TGV선을 모델로 프랑스 국철(SNCF)의 이론적 근거와 경험에 근거하여 정의한 동적 허용 요구조건(표1)을 근거로 건설되었다.

표 1 P.S.C. BOX GIRDER 교량 설계기준

| 구 분 | 적용기준 | 비 고 |
|--|--|---|
| 하 중 | UIC/TGV | |
| 교각변위 | 최대 10mm 이내 | ◦ 시동 및 제동하중 작용 시 허용강도에 만족하고 상대 변위도 허용치 이내이어야 함 |
| 교량상판길이한도 | 최대 80m 이내 | ◦ 프랑스 TGV 규정 적용 - 레일신축이음을 두지 않을 경우 교량의 고정점간 거리 |
| 속도영향 - 처짐한도 - 단부 적임각 - 비틀림 - 상판수직가속도 | 실차 0~350km/h 1/1700 $\leq 500 \times 10^{-6}$ radian 0.4mm/3m/m 0.35g | ◦ 프랑스 TGV 규정 적용 |

(1) 구조물 안전성 측면

현 경부고속철도 교량시방서에서 실제 충격계수는 다음과 같이 정의되며

$I_r = \max(U_d/U_s)$, $d = \text{Dynamic}$, $s = \text{Static}$: 이 충격계수가 아래와 같이 정의된 충격계수보다 클 경우에는 실제 충격계수를 사용하여 응력과 변위를 검토하여야 한다.

$$\text{모멘트 충격계수} : I_r = \frac{1.44}{\sqrt{L_c - 0.2}} - 0.18, \quad \text{전단 충격계수} : I_r = \frac{0.96}{\sqrt{L_c - 0.2}} - 0.12$$

여기서 L_c 는 교량의 형식 및 지간거리에 따라 정해지는 교량특성길이다.

(2) 열차운행의 안전성 측면

고속철도 차량 주행 시 구조물의 순간 가속도가 0.35g 이상 될 때 도상자같이 이완되며 자갈의 비산현상에 의해 열차와 주위 구조물의 안전에 위협하게 된다. 따라서 고속철도 차량 안전운행을 위한 교량의 거동기준은 교량상판에서 최대 수직가속도는 0.35g를 초과하지 않아야 하며 교량 접속부의 상대회전각은 50×10^{-5} radian을 넘지 말아야 한다. 또한 교량 바닥판의 단위길이 당 최대 비틀림 향은 교축방향 3m, 교축의 직각방향으로 1m당 0.4mm로 제한하는 것이 중요하다.

(3) 승차감 측면

열차주행 시 순간처짐은 순간가속도를 증가시켜 인체에 불쾌감을 주게된다. 따라서 인체가 감지하는 최저기준을 기준으로 경간에 대한 최대 수직처짐의 비는 1/1,700을 초과하지 말아야 하고 승객이 열차 안에서 느끼는 최대 수직가속도는 0.005g를 넘지 말아야 한다.

3. 대상구조물

경부고속철도 서울 ~ 대전구간의 교량 중 시설물의 안전성 확보 및 효과적인 유지관리를 위하여 대표적인 형식 및 특수한 형식의 구조물에 대해 현재 계측을 시행하고 있거나 시험운행 중 계측을 시행한 교량을 대상으로 하였으며 그 현황은 아래 표 2와 같다.

표 2 계측대상 고양원장

| 구분 | 고양대 | 연장(m) | 삼부 폭(m) | 계측대상 구조물 형식 | 준성년도 | 비고 |
|----|------|-------|---------|-------------------|---------|----|
| 1 | 반월교가 | 1.156 | 14.0 | 갈매성교, 28050 | 2002.12 | |
| 2 | 평택교가 | 6.247 | 14.0 | PSC Box, 33+50+33 | 2001. 9 | |
| 3 | 연제교 | 1.915 | 14.0 | PSC Box, 28840 | 1989.12 | |
| 4 | 오종점교 | 1.333 | 14.0 | PSC Box, 36825 | 1989.12 | |
| 5 | 공원교 | 1.156 | 14.0 | PSC Box, 1640 | 1999.12 | |

4. 계측 결과 분석 및 평가

4.1 반월교가(강활성교, 28050)

각 주행속도별 계측치와 해석치는 표 3에 정리하였으며, 계측결과와 해석치를 비교·분석한 결과 비교적 일치하는 것으로 판단된다. 또한 해석치에 대한 계측치의 비가 차질은 0.71 ~ 0.84 그리고 진동가속도는 0.47 ~ 0.86의 범위로서 전체적으로 해석치가 계측치에 비해 다소 크게 나타나며 가속상태는 양호한 것으로 판단된다. 또한 가속도계에 의하여 측정된 신호를 FFT(Fast Fourier Transform)분석을 수행하여 고유진동수를 산출하였다. 고유진동수의 경우, 계측치가 해석치에 비해 다소 크다는 것을 알 수 있으며, 계절의 경우에는 계측치가 해석치보다 크게 계측되었다. 따라서 구조물의 실제 품질성이 해석모델에 적용된 품질설보다 큰 것으로 판단된다.

표 3 반월교가의 각 주행속도별 계측치와 해석치

| 구 분 | 자질 (mm) | 관통가속도 (g) | 고유진동수(Hz) | 비 고 |
|----------|----------------|----------------|-----------|---------------------------|
| 100km/hr | 계측치 1.53(0.77) | (0.0084)(0.79) | 3.08 | 이론 고유진동수 : 2.57(Ga) |
| | 해석치 1.98 | 0.0107 | - | |
| 200km/hr | 계측치 1.43(0.71) | 0.0204(0.86) | 3.03 | |
| | 해석치 2.02 | 0.0237 | - | |
| 255km/hr | 계측치 1.68(0.84) | -0.0177(0.47) | 3.13 | |
| | 해석치 1.99 | -0.0176 | - | |

※ ()안의 수치는 해석치에 대한 계측치의 비

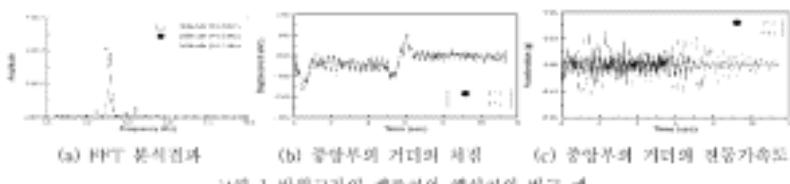


그림 1 반월교가의 계측치와 해석치의 비교 예

4.2 평택교가(PSC Box, 33+50+33)

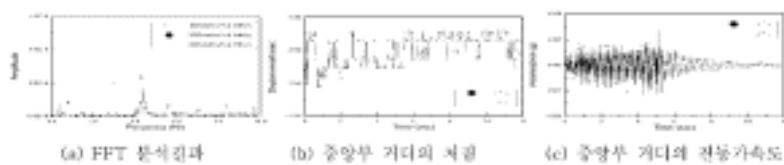
각 주행속도별 계측치와 해석치는 표 4에 정리하여 나타내었으며, 해석치에 대한 계측치의 비가 차질은 0.82 ~ 0.99, 진동가속도는 1.41 ~ 3.11의 범위로서 상호간 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 단, 진동가속도에 대한 계측결과가 해석치에 비해 크다는 것을 알 수 있는데, 진동가속도 계측치의 최대크기가 0.0278g로서 고속철도 설계기준인 0.35g보다 매우 작고 해석에 있어서 구조물과 열차의 동의 상호작용이 고려되지 않았다는 점을 감안하면 구조적으로 문제가 없을 것으로 판단된다. 또한 기본 고유진동수의 경우 FFT 분석결과가

해석치에 의해 다소 크다는 것을 알 수 있는데, 이는 구조물의 실제 흔강성이 해석모델에 적용된 휘장성보다 큼 것으로 추정된다.

표 4 텅백고가의 차 주행속도별 계측치와 해석치

| 구 분 | 사질 (mm) | 진동가속도 (g) | 고유전동수 (Hz) | 비교 |
|----------|---------|------------|--------------|------|
| 100km/hr | 계측치 | 1.16(0.92) | 0.014063.111 | 4.39 |
| | 해석치 | 1.26 | 0.0045 | - |
| 200km/hr | 계측치 | 1.29(0.99) | 0.013811.941 | 4.30 |
| | 해석치 | 1.30 | 0.0071 | - |
| 300km/hr | 계측치 | 1.14(0.82) | 0.027801.481 | 4.38 |
| | 해석치 | 1.39 | -0.0197 | - |

* ()안의 수치는 해석치에 대한 계측치의 비



(a) FFT 분석결과

(b) 중앙부 거더의 사질

(c) 중앙부 거더의 진동가속도

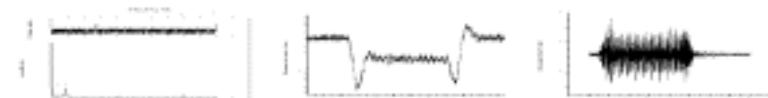
그림 4 텅백고가의 계측치와 해석치의 비교 예

4.3 연계교(PSC Box, 28400)

연계교에 설치된 계측센서 중 사질 및 진동가속도 계측 값을 표 5에 정리하여 나타내었으며, 결과값을 분석하면 300km/h는 속도에서 0.744mm, 0.896mm의 최대 사질값을 나타내었으며, 진동가속도의 최대치는 0.027g, 0.011g, 0.017g, 0.013g로 계측되었다. 이들 진동가속도 및 사질 값은 고속 철도 선 계기준 이용치인 0.35g 및 23.5mm보다 매우 안정적인 값으로 계측되었으며, 기속도계에 의하여 측정된 신호에 대하여 FFT 분석 방법에 의해 기준 고유전동수를 산출한 결과 고유전동수는 4.3844Hz(방위)로 판단되었다. 또한, 차체 시점으로 물린 KTX 열차 주행 시 발생하는 차 질을 5km/h를 정적화중으로 놓고 차대치감 값과 비교하는 방법으로 구한 차대 풍적판매수는 상행 시 1.165, 하행 시 1.369가 구해졌다.

표 5 계측값의 최대치, 고유전동수 및 동적화중계수 값

| 번호 | 측정시기 | 사 질 | 진동가속도(g) | 고유전동수(Hz) | 주행속도 | 최대 속전률 | 동적화중계수 fr 차대치감 |
|----|----------|-------|----------|-----------|---------|---------|----------------------|
| 1 | 2003. 7 | 0.744 | 0.027 | 4.3457 | 5km/h | 0.787mm | 1.165 |
| 2 | - | - | 0.017 | 4.3457 | 300km/h | 0.929mm | |
| 3 | 2003. 11 | 0.896 | 0.011 | 4.4434 | 5km/h | 0.797mm | 1.369 |
| 4 | - | - | 0.013 | 4.4434 | 300km/h | 1.091mm | |



(a) 진동가속도 FFT분석

(b) 순간치정

(c) 진동가속도

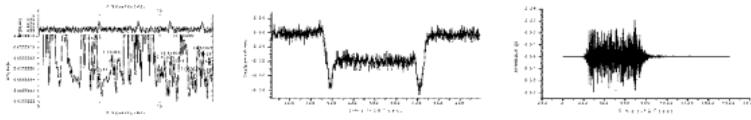
그림 5 계측치의 아래곡선 예

4.4 오송정차장(PSC Box, 3@25)

처짐 및 진동가속도 계측 값을 표 6에 정리하여 나타내었으며, 결과 값을 분석하면 300Km/h 속도에서 0.224mm, 0.217mm의 최대 처짐값을 나타내었다. 진동가속도도 이력곡선을 분석한 결과 값은 0.031g, 0.034g, 0.048g, 0.046g 등의 최대치로 고속철도 설계기준 허용치인 0.35g 및 14.7mm 보다 매우 안정적인 값으로 계측되었다. 가속도계에 의하여 측정된 신호에 대하여 FFT분석 방법에 의해 기본 고유진동수를 산출하였으며 교량의 고유진동수는 12.8Hz로 판단되었다.

표 6 계측값 및 고유진동수 값

| 번호 | 측정시기 | 처짐 | 진동가속도(g) | 고유진동수(Hz) | 비고 |
|----|----------|-------|----------|-----------|----|
| 1 | 2003. 7 | 0.224 | 0.031 | 12.8418 | |
| 2 | - | - | 0.034 | 12.8418 | |
| 3 | 2003. 11 | 0.217 | 0.048 | 12.8906 | |
| 4 | - | - | 0.046 | 12.9296 | |



(a) 진동가속도 FFT분석

(b) 순간처짐

(c) 진동가속도

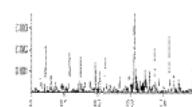
그림 4 계측치 이력곡선 예

4.5 궁현교(PSC Box, 1@40)

처짐 및 진동가속도 등 계측 값을 표 6에 정리하여 나타내었으며, 200Km/h, 300Km/h 속도에서 각 1.162mm, 1.194mm의 최대 처짐값을 나타내었다. 진동가속도 최대치는 교각지점 0.237g(하행 300Km/h) 및 중앙부 0.208g(하행300Km/h)로 계측되어 고속철도 설계기준 허용치인 0.35g 보다 작았으며, 속도별 진동가속도는 전체적으로 속도가 증가함에 따라 증가하였다. KTX 주행에 의한 동적학대계수는 상행 시 1.006, 하행 시 1.030으로 나타났다. 가속도 값을 FFT분석 방법에 의해 기본 고유진동수를 산출한 결과 대략 3.12 ~ 3.83Hz 정도의 주파수 값을 갖는 것으로 판단된다.

표 9 계측치, 고유진동수 및 동적학대계수

| 번호 | 주행속도(Km/h) | 주행방향 | 처짐 | 진동가속도(g) | 고유진동수(Hz) | 주행속도 | 최대처짐값(mm) | 동적학대계수 | Ir | 최대값 |
|----|------------|-------|-------|----------|-----------|---------|-----------|--------|-------|-------|
| 1 | 5 | 서울→부산 | 1.183 | 0.010 | - | 5km/h | 1.183 | 1.030 | 1.030 | 1.030 |
| 2 | 100 | 서울→부산 | 1.138 | 0.054 | 3.71 | 150km/h | 1.218 | | | |
| 3 | 200 | 서울→부산 | 1.162 | 0.124 | 3.83 | 5km/h | 1.148 | | | |
| 4 | 300 | 서울→부산 | 1.194 | 0.237 | 3.12 | 175km/h | 1.155 | | | |



(a) 진동가속도 FFT분석

(b) 순간처짐

(c) 진동가속도

그림 5 계측치 이력곡선 예

5. 결 론

고속철도 건설경험이 없는 상태에서 프랑스의 설계기준을 도입해 건설된 고속철도 교량구조물의 동적 안전성을 검증하고 진동에 따른 동적거동을 예측할 수 있는 자료를 축적함으로서 향후 동적거동에 대해 최적화된 교량설계에 일조 하고자 이 분석을 수행하였으며, 계측은 경부고속철도 서울 ~ 대전구간에서 고속철도 교량구조물 설계에 주축을 이룬 구조형식을 대상으로 진동가속도 및 처짐계를 설치하고 시행하여 속도증가에 따른 교량의 동적 거동상태를 분석하고 설계기준 및 해석된 동적거동 결과와 비교하는 방법으로 분석하였다.

분석 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 실측된 동적거동 값은 고속철도 설계기준을 충분히 만족시켜 현재 완공된 고속철도 교량구조물은 동적안전성을 확보하고 있다.
- (2) 단경간 교량이 연속교 교량보다 동적거동 값이 크게 나타나 연속교가 동적거동에 대해 안정된 교량형식임을 보여준다.
- (3) 고유진동수가 연속교(PSC Box)에서 4.3 ~ 12.8Hz로 나타내고 있으며, 그동안 교량 중앙부의 진동 가속도 변화만 중요한 교량 동적안전성 검토대상으로 고려되었는데 교량 중앙부보다 교각부의 진동가속도가 큰 값이 계측되므로 교각부 편위의 관측도 중요함을 인식하게 됐다.

상기 분석결과에서 현재 완공된 경부고속철도 교량구조물은 충분히 동적으로 안정함을 알 수 있었으며, 향후 고속 철도 교량 설계 시 단경간보다 연속교 교량을 채택하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 또한, 실제 고속철도의 주행에 따른 교량구조를 거동 관련 계측데이터를 획득/분석을 수행하고, 분석결과를 피드백함으로써 보다 경제적이고 최적화된 고속철도 교량 설계가 가능하리라 판단된다.

참고문헌

1. 한국고속철도건설공단, "고속철도 콘크리트 구조물(RC 및 PC) 설계표준시방서," 1991.9
2. SYSTRA, "Bridge Design Críteria," 1994
3. SYSTRA, "Bridge Design Manual(BRDM) Final Report," 1994.12
4. 서울대학교공학연구소, "경부고속철도 교량 및 고가구조물의 동적특성에 대한 안정성 검토보고서의 분석검토 및 자문," 1994.12
5. 한국전산구조공학회, "구조동역학의 이론과 응용," 1995
6. 장승필 "열차의 고속주행에 따른 교량의 동적거동 검토 보고서," 1995
7. 김경호, "랜덤데이터의 스펙트럼 해석입문," 1996
8. 한국고속철도건설공단, "공사시방서," 1997
9. 한국건설기술연구원, 고속전철 교량기술개발(1차년도 연구 보고서), 1997
10. 한국고속철도건설공단, "선로건설기준 및 건설규칙(안)," 1998
11. 한국고속철도건설공단, "궁현1교 동적안전성 평가," 1998
12. 한국철도기술연구원, "시운전시 궤도, 노반 시설물의 성능검증," 2000. 12
13. 한국고속철도건설공단, "고속철도 기술 자료집," 2001. 8
14. 한국철도기술연구원, "시험선 구간 안전계측설비 상시계측보고서," 2002. 7
15. 한국철도기술연구원, "시험선 구간 안전계측설비 보고서," 2003. 7
16. 한국철도기술연구원, "시험선 구간 안전계측설비 상시계측보고서," 2003. 12
17. 주식회사 케이엠티엘, "경부고속철도 서울사무소 구간 구조물 유지관리 계측시스템 구축 준공 보고서," 2004