

경부고속철도 교량의 진동문제

Dynamic problems in Korea high-speed railway

곽종원¹⁾ · 진원종²⁾ · 최은석³⁾ · 강제윤⁴⁾ · 김병석⁵⁾

Kwark, Jong Won · Chin, Won Jong · Choi, Eun Suk · Kang, Jae Yoon · Kim Byung Suk

ABSTRACT

A study has been performed to investigate on the dynamic behavior of bridges crossed by the KTX(Korea Train eXpress). The investigated bridge is a 2-span continuous concrete box bridge with spans of 40 m length named Yeon-Jae bridge. We have performed many field tests on the dynamic behaviors of a real bridge for KTX using various sensors. For this study, various sensors have been installed on the Yeon-Jae bridge located in the experimental section of the KHSR(Korea High-Speed Railway) track and tests have been performed. Through this study, it is known that effects of local modes and sleepers in the box-girder bridge for the KTX on the dynamic responses is remarkable. Therefore, in the investigation on the accelerations of the box-girder bridge, three dimensional model should be adopted in numerical analysis including the effects of sleepers. The effect of temperature on the accelerations of the bridge should be investigated in the further studies to determine the reason of excessive acceleration.

1. 서 론

경부고속철도는 1990년대 초반에 설계와 건설하기 시작하여 2004년 4월 1일부터 서울과 부산 간의 상용운영에 들어갔다. 경부고속철도를 주행하는 KTX는 일반적인 열차형식인 독일의 ICE나 일본의 신칸센과 달리 프랑스의 TGV와 같은 시스템을 갖고 있다. 경부고속철도는 전체구간의 약 30%가 교량으로 이루어져 있으며, 이러한 교량은 상부선로의 레일신축길이의 제한과 교량 동적 거동의 안정성 때문에 대부분 2@40 m나 3@25 m의 콘크리트 박스거더 교량으로 건설되었으나, 일부 구간에서는 2개의 강재 I형 주형을 갖는 합성형교량 또는 라멘형식의 콘크리트교량이 건설되었다.

고속철도 교량은 도로교량의 경우와 다르게 구조물의 안전성이 아니라 차량의 주행 안전성이 지배적인 설계조건이 되며, 경부고속철도 교량의 건설에서는 처짐, 단부회전각, 비틀림각, 그리고 가속도를 유럽의 UIC규정을 단간으로 하여 작성된 BRDM(bridge design manual)을 통하여 제한하

1 한국건설기술연구원, 선임연구원, 공학박사, 정회원

2 한국건설기술연구원, 연구원, 공학석사, 정회원

3 한국건설기술연구원, 연구원, 공학석사, 정회원

4 한국건설기술연구원, 선임연구원, 공학석사, 비회원

5 한국건설기술연구원, 연구위원, 공학박사, 비회원

고있다. 연속적인 열차의 차륜이 교량위를 통과할 때, 차륜의 반복적인 타격과 교량의 고유진동수가 근접하게 되면 공진이 발생하게 되며 이러한 공진 시에는 구조물의 응답이 매우 커지게 된다. 최근들어 교량과 도상의 동적거동에 관한 연구가 유럽의 독일, 이태리, 프랑스와 아시아의 대한민국, 일본, 중국과 같은 고속열차를 운영하거나 건설 중에 있는 국가에서 이론적인 연구를 중심으로 활발하게 수행되고 있다. 국내에서는 1990년대 초반에 경부고속철도의 설계가 시작된 무렵부터 연구가 시작되었다. 장 등은 관철형 대차를 갖는 열차의 주행에 의한 교량의 동적거동에 관한 이론적인 연구를 2차원 모델을 적용하여 수행하였다(Chang et al 1998). 그들은 도상을 탄성지반위에 보이분을 적용하여 고려하였다. 2000년 대에 들어서, 안 등은 김 등과 같이 교량의 경간장과 열차의 구성에 따른 공진소멸 현상에 대해서 연구하였으며(Ahn et al 2000, Kim 2000), 2003년에 박 등은 고속열차 주행에 의한 콘크리트 박스기더 교량의 동적거동에 관한 실험적인 연구를 수행하였다(Kwark et al 2003).

2. 대상 교량

본 연구의 대상교량은 경부고속철도 시험선로에 위치한 연제교로서 2경간 연속 콘크리트 박스기더 교량이며 각 경간장이 40 m이다. 이 형식은 25 m 경간장을 갖는 3경간 연속 콘크리트 교량과 더불어 경부고속철도 교량의 대표적인 형식이다. 2001년부터 고속전철이 개통하기 전까지 KTX의 시험주행과 함께 시험선 구간의 교량인 연제교에 각종 센서를 설치하고 현장 주행실험을 통한 교량의 동적거동에 관한 실험적 연구가 진행되었으며, 2004년 부터는 현장에 보다 정밀하고 장기적인 계측을 위해서 계측스테이션을 설치하고 개통이후에도 지속적인 현장계측이 이루어졌다.

KTX의 주행에 의한 경부고속전철 시험선로에 위치한 연제교의 동적인 처짐, 가속도, 단부회전각을 2001년부터 지속적으로 측정하였다. 측정에는 다수의 다양한 센서와 1kHz의 고속 데이터로거가 사용되었다. 교량의 가속도 측정을 위한 가속도계로는 K-beam형식과 압전방식(piezo type)이 사용되었으며, 수직처짐과 단부회전각 측정을 위해서 변위계를 피아노선을 이용해서 교량에 연결하고 바람에 영향을 배제하기 위한 방풍장치를 설치하였다. 그림 1은 현장의 계측 스테이션과 설치된 센서들을 보여주고 있다.

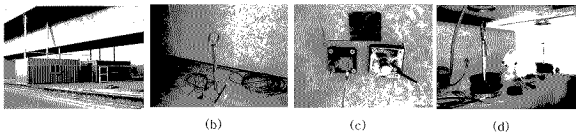


그림 1. 현장 계측장비 (a)계측스테이션, (b) 변위계, (c) 가속도계 (d) 단부회전각 측정장치

3. 대상 열차

일반적으로 열차는 궤일 상부의 차체와 이를 지지하는 대차로 한개 량이 구성된다. 객차 간에 거동이 독립적인 일반적인 열차와 달리 KTX는 객차 사이에 대차가 위치하여 객차간의 상호작용이 존재하게 된다. 이러한 구조는 비록 열차의 편성에 있어서 제약이 따르는 단점이 있기는 하지만, 일반적인 열차에 비하여 주행성과 승차감에 있어서 장점을 갖고 있다고 알려져 있다. KTX의 경우에 기관차에는 이러한 굴절형 대차 구조가 적용되지 않아 2개의 대차로 지지되고 있다. KTX의 표준 열차편성에서는 열차의 선두와 선미에 기관차가 위치하고 객차와 기관차 사이에 동력력

차가 위치하게 되는데 여기에는 기관차 방향으로 독립적인 대차로 지지되나 객차 방향으로는 관결형 대차 형식이 적용되어 있다. 본 연구에서 대상 열차는 총 20량 편성의 열차로서 선두와 선미에 기관차와 동력객차가 각각 쌍으로 위치하고 그 사이에 16량의 객차가 위치한다. 즉 2P+18TP + MT + T + T + T + MT + P의 편성으로 총 길이가 380.15 m에 달한다. 여기서, P, MT 그리고 T는 각각 기관차, 동력객차 그리고 객차를 의미한다. 차체를 지지하는 대차는 2개의 윤축을 갖고 있어서 열차 전체에는 23개의 대차와 46개의 윤축이 있다. 그림 2는 KTX와 대차의 형상을 보여 주고 있다.

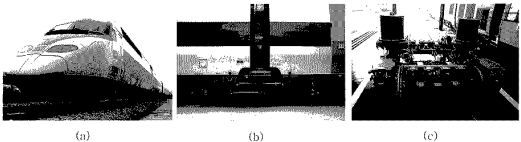


그림 2. KTX와 그 대차의 형상 (a) KTX의 기관차 (b) 대차의 연결 상태 (c) 관결형 대차 형상

4. 고속철도 교량의 동적 응답

4.1 단부회전각

KTX가 연제교를 통과할 때 교량 단부의 회전각은 열차의 주행 안전성에 매우 중요한 설계조건 중에 하나이다. 정적인 회전을 측정하는 센서는 다양하게 있으나, 동적인 회전각을 높은 정밀도에서 측정하는 센서는 전무하므로 본 연구에서는 이러한 동적 단부 회전각을 측정하기 위하여 2개의 동적 변위계를 교량 단부에 종방향으로 일렬로 설치하고 두 센서사이의 거리로부터 이를 계산하였다. BRDM에 따르면 이러한 단부회전각은 5×10^{-4} radian이하를 유지하여야 한다. 그림 3은 변위를 측정하여 계산된 단부회전각의 속도에 따른 최대값 분포를 도시하고 있다.

4.2 곡부모드의 영향

본 연구에서 대상으로 하는 2경간 연속 콘크리트 교량은 매우 큰 단일 박스이고 양쪽 단부의 내진보 부분도 매우 크다. 이러한 박스거더 교량의 상하부 플랜지와 내진보 부분은 동적하중을 받는 경우에 국부적인 거동을 일으키기 쉽다. 한편, BRDM에서 규정된 가속도는 전체 교량에 걸쳐서 최대값에 대한 규정이므로 국부적인 진동이 발생하여 가속도가 큰 경우에는 단면 전체에 걸친 가속도를 검토할 필요가 있다. 그림 4는 중앙 단면에서 가속도 최대값의 분포를 도시하고 있다.

4.3 침목의 영향

경부고속철도는 자갈이 포설된 도상을 가진 구조이며, 이 도상위에 놓인 레일은 0.6 m 등간격으로 배치된 PC침목에 의해서 지지된다. 이러한 침목은 자갈에 일부 묻혀있으면서 완전히 부착되어 일체거동을 하지 않기 때문에 열차가 통과할 때 침목은 도상에 충격을 가하게되고 이러한 충격은 일정간격으로 통과하는 차륜과 일정간격으로 배치된 침목으로 인하여 임의의 진동수로 교량을 가진하게 된다. 실험결과 침목의 충격에 의해서 교량의 가속도는 최대 40 %까지 증가하였다.

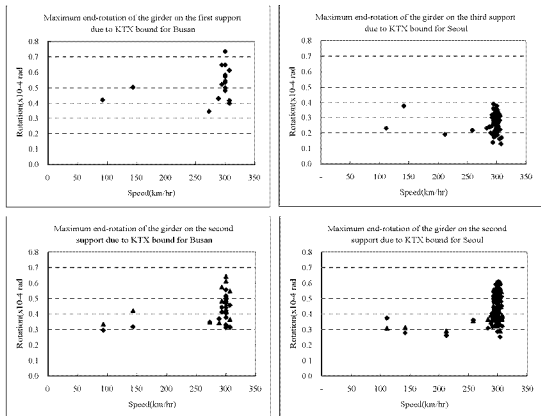


그림 3. KTX의 주행 속도에 따른 교량의 단부회전각

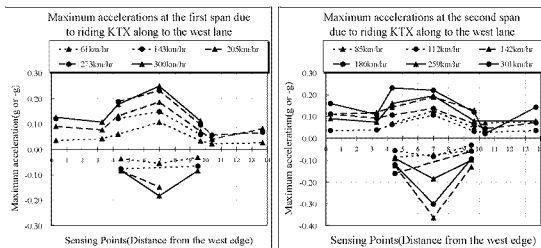


그림 4. 단면내 가속도 응답 최대값의 분포

그림 5(a)는 교량의 KTX가 여러 가지 속도로 주행할 때 교량에서 가속도 응답의 PSD를 도시하고 있는데 침목의 충격에 의한 에너지가 고진동수대에서 나타나고 있다. 그림 5(b)는 그러한 침목의 영향에 의한 고진동수영역 성분을 제거하기 전 후의 가속도 응답의 최대치를 도시하고 있다.

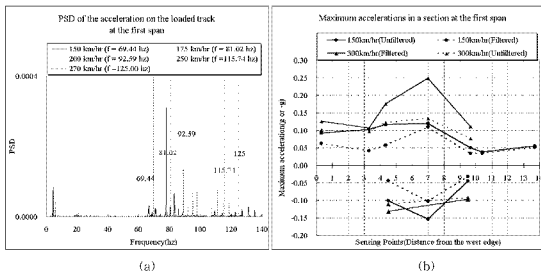


그림 5. (a) 열차 주행속 선로 교량상판에서 측정된 가속도의 PSD (b) 침목의 영향에 의한 가속도의 최대값

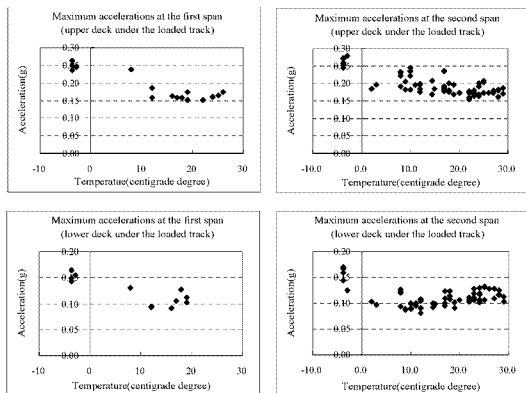


그림 6. 온도에 따른 최대 가속도의 분포

4.4 온도의 영향

주행하는 열차의 안전성확보를 위하여 도상을 가진 교량의 수직 가속도가 BRDM에 0.35 g로 제한되어 있다. 자갈이 포설되어 있는 자갈 도상의 경우에 열차가 그 위를 주행할 때 교량과 함께 진동하게 되며 이러한 진동이 중력가속도 1g를 상회할 정도에 이르게 되면 열차가 주행할 때 생

기는 바람과 같은 작은 움직임에도 비산할 수 있다. 이러한 자갈 도상의 비산은 열차의 주행 안전성을 위협할 수 있으므로 65 %의 안전율을 가지고 현재 0.35 g로 제한하고 있다. KTX의 주행에 의한 교량의 가속도는 대부분의 경우에 규정치를 만족하고 있으나, 불행하게도 그 값이 매우 크고 어떤 경우에는 규정치를 초과하기도 하였다. 좀더 자세한 조사를 위하여 지속적인 정기계측이 수행되고 있다. 그림 6은 2003년부터 2004년까지 현장계측을 통해서 측정된 결과를 보여주고 있다. 다행스럽게도, 0.35g를 초과하는 경우는 발생하지 않았으나, 따뜻한 계절보다 추운 계절일 겨울에 더 큰 응답을 보여주고 있다.

5. 결 론

경부고속철도 교량의 동적거동에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) KTX의 주행에 의한 경부고속철도 교량은 매우 작은 단부회전각을 보인다.
- (2) 박스거더 교량의 가속도는 국부모드의 영향으로 제1차측 선로보다 교량 단면의 중앙부, 즉 상부플랜지에서 더 크게 나타났으며, 따라서 대상 교량과 같은 단면이 큰 박스거더 교량의 동적 응답은 이러한 효과를 고려할 수 있는 방법으로 검토되어야 한다.
- (3) 도상을 갖고 있는 난면이 큰 박스거더 교량의 가속도 값도 시에는 국부모드의 영향과 더불어 침목의 충격에 의한 영향도 고려하여야 한다.
- (4) 침목의 충격에 의한 영향이 매우 크므로, 열차의 주행 안전성확보를 위하여 도상구조의 유지 관리가 매우 중요하다.
- (5) 가속도에 미치는 온도의 영향이 크게 나타났으므로, 그 원인규명과 이에 대한 해결 대책 마련을 위한 지속적인 연구가 요구된다.
- (6) 현재 BRDM에 규정된 가속도에 규정은 교량상의 응답값도 위치, 실속 신호의 처리방법, 그리고 진동의 지속시간 등에 대한 보완이 요구된다.
향후에는 침목의 영향, 국부모드의 영향, 그리고 온도의 영향에 대한 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부, 산업자원부, 그리고 과학기술부에서 지원한 G7과제로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Chang S.P., Kwark J.W., Kim S.I. (1998), "Vibration of steel composite railway bridges subjected to high speed train." *Journal of Korean Society for Steel Construction*, 10(4), 577-587.
2. Ahn Y.J., Kim S.J., Shin Y.S. (2000). "Dynamic Behavior of High-Speed Railway Bridges." *Journal of Korean Society for Steel Construction*, 20(3), 375-384.
3. Kim S.I. (2000), "Bridge-train interaction analysis of high-speed railway bridges." Ph.D. Thesis. Seoul National University, Korea.
4. Kwark J.W., Chin W.J., Kim Y.J., Kim B.S. (2003), "Dynamic Behavior of Concrete Box Girder Bridge due to Riding Korean High-Speed Train." *Journal of Korean Society for Steel Construction*, 23(1), p27-p36.
5. Kwark J.W. (1997), "Dynamic behavior of the bridges due to moving vehicles considering braking action." Ph.D. Thesis. Seoul National University, Korea.