강합성 철도교량의 주행안전성 및 승차감 평가
Evaluation for the Running Safety and Ride Comfort of Steel Composite Railway Bridge

김정훈† 강영종* 김대혁** 한상윤*** 차경렬****
Jung-Hun Kim Young-Jong Kang Dea-Hyeok Kim Sang-Yun Han Kyung-Ryul Cha

ABSTRACT

Railway bridge, contact of vehicle needs to design considering the running safety about the running train load of the railway bridge, ride comfort and dynamic safety. Also, upper structure of the railway bridge has to satisfy design standard about moving load(train). So, the railway bridge has to satisfy the requirement for vertical acceleration of the bridge deck, vertical displacement of the bridge and face distortion, which is suggested railway design standard in Korea(2011.5.). In this study, it was investigated and evaluated to the running safety about the running train load of the railway bridge, ride comfort and dynamic safety with railway design standard for steel composite(Steel Box Girder) railway bridge considering KTX, freight train and standard train load.

1. 서론

도로에 비하여 매우 열악한 발전을 해온 철도는 고속철도가 국토의 반나절 생활권을 이루고, 남북철도, 시베리아 철도 등이 세계로 진출하기 위한 물류운송수단으로 계획되면서 미래의 핵심교통수단으로 주목받고 있으며, 최근 저탄소 녹색성장을 대표하는 교통수단으로써 철도의 필요성은 더욱 더 증대되고 있다. 또한, 현재 국내에서는 2단계 고속철도 사업이 진행 중에 있으며, 교량의 경우 일반 판형교 뿐만 아니라 다양한 형식의 교량으로 설계 및 시공 중에 있다. 이러한 철도 기술은 크게 안전성, 사용성, 경제성 그리고 환경성이 요구되며, 이 중 철도 기술의 안전성 및 사용성을 만족시키지 못하면 대형참사를 초래할 수 있을 뿐만 아니라 승차감이 저하됨에 따라 승객들의 불안감을 조성할 수 있어 많은 민원이 야기될 수 있다. 따라서, 안전성 및 사용성에 대한 검토 및 평가는 매우 중요하다고 할 수 있으며, 이를 고려한 구조물의 설계가 필요하다. 본 연구에서는 고속열차(KTX)와 화물열차를 지지하는 강합성(Steel Box Girder) 철도교량의 동적해석 및 표준열차하중을 적용한 정적해석을 수행하여 주행안전성(동적 안전성) 및 승차감(진동 사용성)을 검토 및 분석하였다. KTX 및 화물열차의 경우 실 열차하중을 고려하여 연행이동집중하중을 적용하였으며, 표준열차하중의 경우 철도설계기준(2011.5.)에서 제시하는 표준열차하중을 적용하였다. 또한, 철도설계기준에 따라 교량 상판의 연직가속도, 교량의 연직처짐 그리고 면틀림 등을 평가하였다.

2. 철도교량 주행안전성 및 승차감 검토방법 및 기준

2.1 철도교량 주행안전성 및 승차감 검토방법

철도교량의 주행안전성 및 승차감 검토 및 평가는 고속·일반 철도 모두를 포함하여 새로 개정된 철도

† 교신저자, 고려대학교, 건축·사회환경공학부
E-mail : zamsin97@korea.ac.kr
* 고려대학교, 건축·사회환경공학부
** 고려대학교, 건축·사회환경공학부
*** 고려대학교, 공학기술연구소
**** (주)현대건설 토목환경사업본부

설계기준(2011.5.)을 적용하였다. 검토항목은 상판의 연직가속도, 교량의 연직처짐, 상판의 면틀림이다. 연직처짐과 면틀림의 경우엔 충격계수를 고려한 표준열차하중 단선 및 복선 재하에 의한 응답과 실 운행열차에 의한 동적응답을 비교하여 불리한 측을 철도설계기준과 비교하여 주행안전성 및 승차감을 평가하였다. 실 열차하중 속도별 동적해석의 경우 철도설계기준에 준하여 연행이동집중하중의 단선재하를 적용하였다. 그리고 고유진동수에 따른 동적거동, 차량의 등속운동 및 교량의 감쇠에 따른 동적응답을 검토하였다.

2.2 교량 동적거동 검토기준

철도설계기준에 의하면 주행열차하중에 대한 주행안전성은 교량의 연직가속도, 연직처짐 및 면틀림에 대한 검토를 수행하며, 승차감(진동 사용성)은 연직처짐에 대한 검토를 수행하여 이를 평가한다.

교량 상판 연직가속도의 과도한 발생을 방지하여 철도교량의 안전성(궤도의 불안정성, 차륜/레일 접촉력의 감소, 교좌장치의 들림 방지)을 확보하기 위하여 상판 연직가속도를 제한하고 있으며, 검토기준은 자갈궤도의 경우는 0.35g, 콘크리트궤도의 경우는 0.50g이다.

열차하중에 의한 연직처짐 검토의 하중조합은 주행안전성 및 승차감 평가에 대해 도표 1과 같이 적용한다.

도표 1. 연직처짐 검토를 위한 하중조합

주행안전성	표준열차하중 + 충격계수(복선 이상 재하)
승차감	1. 표준열차하중 + 충격계수(단선재하) 2. 실 열차하중 속도별 동적해석(단선재하) → 승차감에 대한 연직변위는 1과 2 중 불리한 값을 적용한다.

주행안전성에 대한 연직처짐 검토는 충격계수가 고려된 표준열차하중이 가장 불리하게 재하된 상태(복선재하 포함)에서 다음 식(1)의 값으로 제한하고 있다.

$$\frac{f}{L} \leq \frac{1}{600} \qquad (1)$$

여기서, f : 교량 상판의 최대 처짐

L : 지간길이

승객의 승차감 만족을 위한 실 운행 열차하중 동적해석에 의한 최대 연직처짐은 도표 2의 규정을 적용하여 제한한다. 승차감의 경우, 교량/열차의 상호작용을 수행해야만 얻을 수 있으므로, 이를 대체할 수 있도록 교량 경간길이, 열차속도, 경간 수, 지지형식의 함수로 구성하여 교량의 연직처짐으로 평가하고 있다. 실 열차하중에 의한 속도별 동적해석 응답의 최대값과 충격계수를 고려한 표준열차하중 단선재하에 의한 최대값 중 불리한 값을 적용한다. 이와 같이 철도교량의 연직처짐에 대한 검토 및 평가는 주행안전성에 대한 연직처짐과 승차감 검토를 위한 연직처짐, 두 가지 모두에 대한 검토를 수행한다.

마지막으로 차륜과 레일의 접촉에 대한 안전을 확보하여 탈선 위험을 최소화하기 위하여 면틀림을 제한하고 있으며, 검토기준은 1.5 mm/3m (3 m 기준 면틀림 변화량)이다.

도표 2. 최대 연직처짐 제한 (승차감='매우양호')

설계속도 (V)(km/h)	거더 또는 부재의 경간(m)										
	0~20	25	30	35	40	45	50	55	60~75	80~95	100~120
270<V≤350	L /1500	L /1500	L /1600	L /1750	L /1900	L /2100	L /2200	L /2350	L /2500	L /2200	L /1900
200<V≤270	L /1300	L /1400	L /1500	L /1600	L /1700	L /1900	L /2000	L /2100	L /2000	L /1700	L /1400
V≤200	L /1100	L /1200	L /1300	L /1500	L /1500	L /1400	L /1300	L /1200	L /1100	L /800	L /600

3. 철도교량 주행안전성 및 승차감 검토

3.1 해석 방법 및 모델

대상 철도교량의 연직처짐과 면틀림의 경우엔 충격계수를 고려한 표준열차하중 단선 및 복선 재하에 의한 응답을 검토해야한다. 따라서, 본 교량은 설계속도가 150 km/h이므로 그림 1과 같이 철도설계기준에서 제시하는 시속 200 km/h이하 표준열차하중인 L-22하중을 교량에 적용하여 정적 해석을 수행하였다. 그리고 충격계수를 고려한 표준열차하중 단선 및 복선 재하에 의한 최대값 중 불리한 값을 적용하여 검토 및 평가하였다.

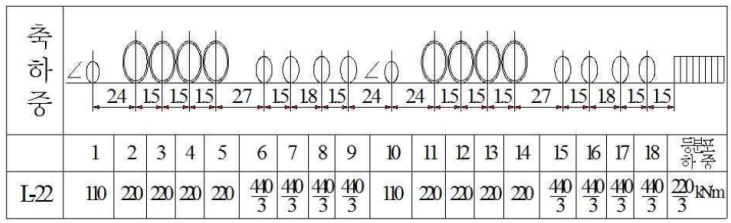
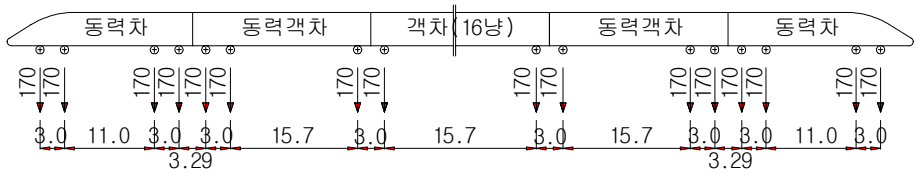


그림 1. 시속 200km/h이하의 표준열차하중

실 운행열차 하중에 의한 동적해석은 연행이동집중하중으로 구조물의 동적거동을 검토하였으며, 속도의 범위는 기준에서 제시하는 설계속도의 1.1배까지 10 km/h 간격으로 수행해야하므로 적용속도의 범위는 화물열차의 경우, 열차충격계수를 고려한 속도(설계속도(150 km/h)의 1.1배)인 170 km/h까지 적용하였으며, 동해석 소요시간과 검토할 속도대역에서의 동적영향을 충분히 반영하기 위하여 속도를 10 km/h씩 증가시켜 10~170 km/h(10, 20, 30 ~ 150, 160, 170) 속도에서 그리고 KTX의 경우, 대상교량의 운행속도는 아니지만 고속철도에서의 열차충격계수를 고려한 속도(설계속도(350 km/h)의 1.1배)인 390 km/h까지 적용하였으며, 속도를 10 km/h씩 증가시켜 10~390 km/h(10, 20, 30 ~ 370, 380, 390) 속도에서 동적거동에 의한 속도별 최대응답을 검토 및 평가하였다.

교량의 동적 해석 프로그램으로 LUSAS Version 14.0를 사용하였으며, 열차가 구조물 위에서 속도를 가지고 주행할 때 각 속도에 따른 구조물의 동적 응답을 구하기 위하여 LUSAS IMDPlus를 이용하여 이동하중해석(moving load)을 수행하였다. 해석 절차는 모델링 후 정적해석을 통해 모델에 대해 검증을 수행하고, 고유치 해석 후 이동하중에 대해 해석을 수행하게 된다. 고유치 해석 시 먼저 Eigenvalue Controls을 정의하고 해석을 수행한 후 결과를 출력하여 고유진동수 및 진동모드 형상을 도시하게 된다. 그리고 이동하중 해석 시 하중이동 경로를 먼저 설정한 후 이동하중을 위한 Modal Force History를 생성하고, 이동하중의 Parameter를 정의한 후 결과를 출력하여 상판의 연직가속도, 교량의 연직처짐 그리고 면틀림을 검토하였다.



·열차하중: 170 kN/EA, ·총 열차하중: 170 × 46 = 7820 kN, ·총 길이: 388 m

그림 2. KTX의 실 열차하중

동적 재하하중은 KTX 및 화물열차의 실 열차하중인 그림 2, 3과 같으며, 검토 대상 교량은 설계속도 150 km/h인 그림 4와 같은 강합성(Steel Box Girder) 철도교량이며, 지간이 40 m인 단순교이다. 이에 대한 해석모델은 그림 5와 같이 강박스(Steel) 및 열차가 통과하는 상부 구조물(concrete), 모두 쉘요소를 사용하여 모델링하였다.

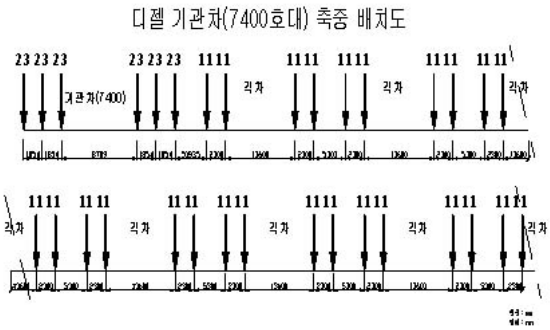


그림 3. 화물열차의 실 열차하중

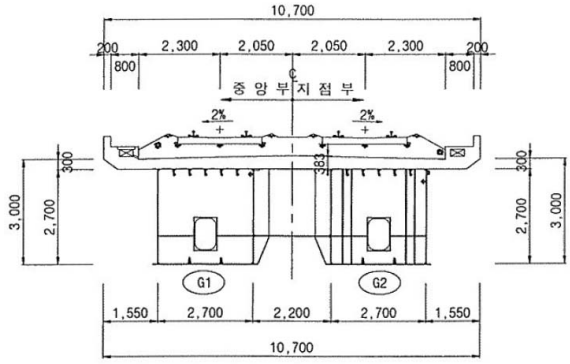


그림 4. 해석 교량: 강합성 철도교량 1@40, 횡단면도

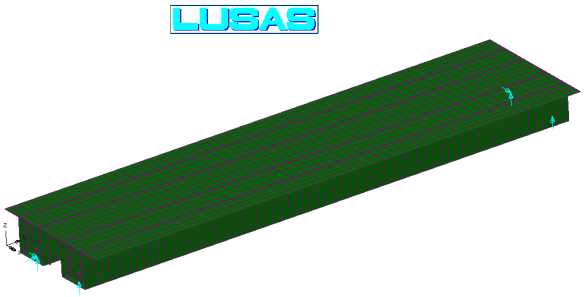


그림 5. 해석 모델 (단순지지)

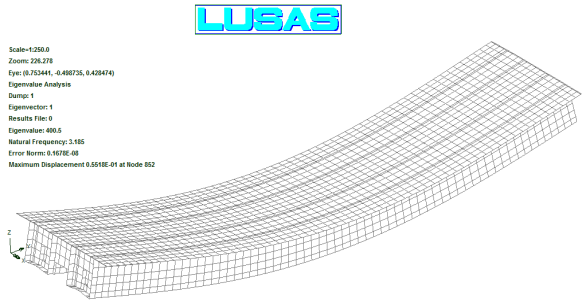


그림 6. 1차 휨고유 진동모드 형상

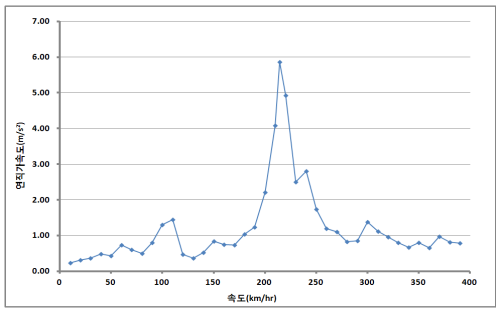
3.2 해석 결과 및 평가

대상 강합성 철도교량의 고유치 해석을 수행한 결과, 고유 진동모드 형상은 그림 6과 같은 형상으로 나타났으며, 1차 휨고유진동수는 3.18 Hz로 나타났다. 철도설계기준에 의하면 설계속도 200 km/h이하의 일반철도 교량에 대해 고유진동수가 3.0 Hz이하일 경우에는 동적거동에 대한 검토를 수행한다. 이는 화물열차의 경우는 최대운행속도 150 km/h이하로 운행할 경우에 해당된다. 그러나 대상 강합성 철도교량의 경우 대부분의 운행열차가 화물열차이며, 설계속도가 150 km/h인 점을 고려하여 동적거동에 대한 검토 및 평가를 수행할 필요가 있다고 판단된다.

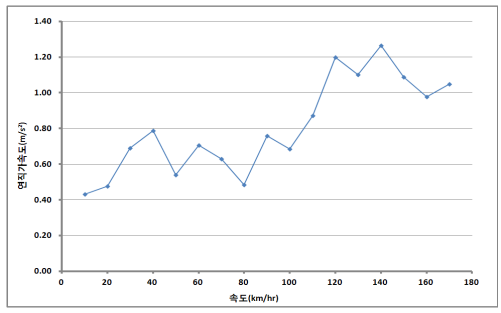
3.2.1 교량 상판의 연직가속도

KTX 및 화물열차 실 열차하중(moving load)을 적용한 동적해석을 수행한 결과, 동적 응답이 가장 크게 발생한 교축방향 중앙의 연행이동집중하중 재하 위치에서 속도별 최대 상판 연직가속도를 검토하여

주행안전성을 평가하였다. 상판 연직가속도의 경우, 속도별 최대 연직가속도는 그림 7과 같으며, 최대 상판 연직가속도는 KTX의 경우, 임계속도 대역인 214 km/h에서 5.870 m/s^{2}이나, 대상 교량의 운행속도를 고려했을 때의 최대 연직가속도는 110 km/h에서 1.441 m/s^2 이다. 화물열차의 경우, 140 km/h에서 1.264 m/s^2 로 상판 연직가속도의 상한치(자갈궤도)인 3.5 m/s^{2}보다 작으므로 설계기준을 만족하였다. 하지만 본 교량에서 KTX 운행 시 210~230 km/h 속도는 임계속도 대역이며 주행안전성의 기준을 상회하는 구간이지만 대상 철도교량의 KTX 운행속도는 150 km/h 이하이므로 실제 주행안전성 및 사용성에는 문제가 없다고 판단된다.



KTX



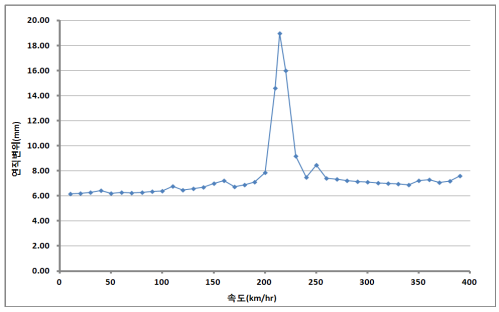
화물열차

그림 7. 속도별 최대 수직가속도

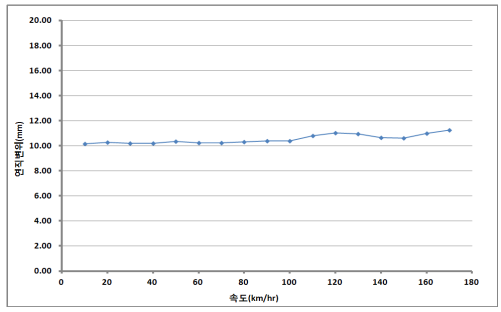
3.2.2 교량의 연직처짐

주행안전성에 대한 연직처짐 검토는 식(1)을 적용하였다. 표준열차하중에 의한 교량 상판의 최대 처짐은 단선일 경우 18.5 mm, 복선일 경우 32.0 mm로 나타났으며, 충격계수를 고려하면 단선일 경우 23.7 mm, 복선일 경우 41.0 mm로 나타났다. 이를 식(1)에 대입하여 평가하면 (41.0/40,000) ≤ (1/600) 으로 주행안전성 기준을 만족하였다.

승차감에 대한 연직처짐 검토는 도표 1과 2(L/1500 = 26.7 mm)를 적용하였다. 표준열차하중에 대한 단선 재하의 경우 최대 연직처짐은 23.7 mm로 승차감 기준을 만족하였다. KTX 및 화물열차 실 열차하중(moving load)을 적용한 동적해석을 수행한 결과, 속도별 최대 연직처짐은 그림 8과 같다. 최대 연직처짐은 KTX의 경우, 임계속도 대역인 214 km/h에서 18.968 mm이며, 화물열차의 경우, 120 km/h에서 11.013 mm로 상판 연직처짐의 상한치인 26.7 mm보다 모두 작으므로 설계기준을 만족하였다.



KTX



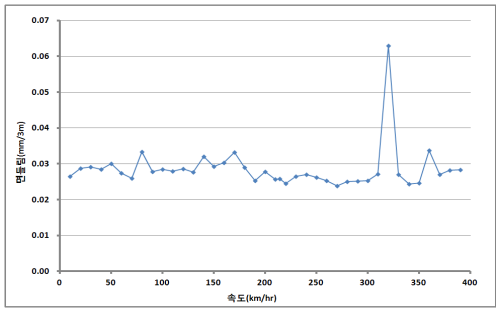
화물열차

그림 8. 속도별 최대 연직처짐

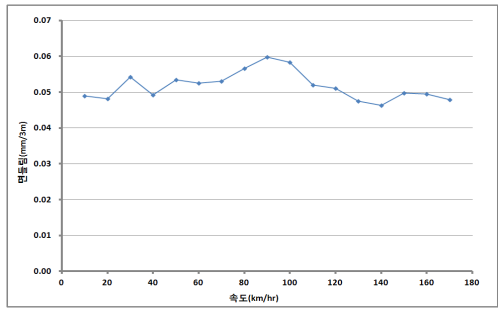
3.2.3 면틀림

면틀림에 대한 검토는 1.5 mm/3m (3m 기준 면틀림 변화량)를 적용하였다. 표준열차하중에 대한 단선 재하의 경우 최대 면틀림은 0.338 mm, 복선 재하의 경우 최대 면틀림은 0.085 mm로 면틀림 기준을 모두 만족하였다. KTX 및 화물열차 실 열차하중(moving load)을 적용한 동적해석을 수행한 결과, 속도별

최대 면틀림은 그림 9와 같다. 최대 면틀림은 KTX의 경우 320 km/h에서 0.063 mm이며, 화물열차의 경우 90 km/h에서 0.060 mm로 면틀림의 상한치인 1.5 mm 보다 모두 작으므로 설계기준을 만족하였다.



KTX



화물열차

그림 9. 속도별 최대 면틀림

표준열차하중과 KTX 및 화물열차의 실 열차하중(moving load)을 적용한 해석 결과, KTX의 경우 연직 가속도와 연직처짐이 210~220 km/h 속도대역에서 값이 크게 증가하여 기준을 상회하는 것을 볼 수 있으며 다른 속도대역보다 진동이 크게 유발될 가능성이 높다. 하지만 대상 철도교량의 KTX 운행속도는 150 km/h 이하이므로 실제 주행안전성 및 사용성에는 문제가 없다고 판단된다. 이를 제외한 모든 부분에서는 철도설계기준을 충분히 만족하므로 주행안전성 및 승차감에는 문제가 없다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 표준열차하중과 고속열차(KTX) 및 화물열차의 실 열차하중을 고려하여 연행이동집중하중으로 교량의 동적 거동을 검토하였으며, 철도설계기준(2011.5.)을 적용하여 대상 강합성(Steel Box Girder) 철도교량의 주행안전성 및 승차감(진동 사용성)을 평가하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 개정된 철도설계기준을 적용하여 강합성 철도교량의 표준열차하중과 고속열차(KTX) 및 화물열차의 실 열차하중을 고려한 동적 해석 및 검토 방법을 정립하였다.
2) 열차의 주행안전성을 평가하기 위한 항목인 대상 교량의 연직가속도, 연직처짐 및 면틀림 그리고 승차감을 평가하기 위한 항목인 연직처짐 등은 기준치를 충분히 만족하였다.
3) 교량의 모든 최대 응답을 검토한 결과, 대상 강합성 철도교량의 동적거동에 의한 열차(KTX 및 화물열차)의 주행안전성 및 승차감에는 문제가 없다고 판단된다.
4) KTX의 경우 연직 가속도와 연직처짐이 210~220 km/h 속도대역에서 값이 크게 증가하여 기준을 상회하는 것으로 나타났지만 대상 철도교량의 KTX 운행속도는 150 km/h 이하이므로 실제 주행안전성 및 사용성에는 문제가 없다고 판단된다.

감사의 글

“본 연구는 국토해양부 건설기술혁신 연구개발사업의 연구비지원(과제번호 10기술혁신E05)에 의해 수행되었습니다.”

참고문헌

1. “철도설계기준[노반편]” (2011). 국토해양부
2. “호남고속철도 설계기준[노반편]” (2007). 국토해양부
3. “호남고속철도 설계기준[궤도편]” (2007). 국토해양부
4. “고속철도설계기준(노반편)” (2005). 국토해양부
5. “철도설계기준(노반편)” (2004). 국토해양부
6. “철도설계기준(철도교편)” (2004). 국토해양부
7. “LUSAS Version 14.0″ (2007). Finite Element Analysis(FEA) software
8. 김정훈, “실 고속열차하중을 고려한 소수주형 철도교량의 동적해석”, 한국철도학회 2011년도 춘계학술발표대회논문집, pp.960-964, 2011.