

# 장경간 현수교의 고속열차 주행 시 운행한계기준 검토

## Running Safety of a Long Span Suspension Bridge under the Passage of a High Speed Train

김 성 일\* · 김 현 민\*\*

Kim, Sung-II · Kim, Hyun-Min

### 요 약

장경간 케이블 교량은 과도한 변위 발생 등의 이유로 엄격한 안전성 및 사용성이 요구되는 철도교량에서는 제한적으로 적용되고 있다. 즉, 철도교량으로서 요구되는 주행안전성과 승차감을 만족하기 위해서는 면밀한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 교량/열차 상호작용 해석을 수행하여 열차에서의 응답을 통해 교량 상을 주행하는 열차의 주행안전성 및 승차감을 직접적으로 평가하고자 하였다. 즉, 중앙경간 300m의 현수교를 주행하는 KTX 열차에 대하여 열차 내부의 가속도와 운중감소율을 구해 평가하는 방법을 취하였다. 또한, 이동 열차하중과 지진하중이 동시에 작용할 경우를 고려한 교량/열차/지진 상호작용해석을 수행하여 지진 시의 응답을 평가하였다.

**keywords** : moving load analysiss, bridge/train interaction, suspension bridge

### 1. 서 론

열차가 교량 위를 주행할 때 주행안전성(traffic safety) 및 승차감(passenger comfort)에 대한 평가는 철도교량 고유의 문제이며 이에 대해 Eurocode, 신간선 설계기준 및 호남고속철도 설계지침 등에 이에 대한 기준이 수록되어 있다. 평가 항목은 교량의 연직변위, 연직가속도, 면틀림 등 교량의 응답이며, 원칙적으로는 열차의 응답을 통한 직접적인 평가가 이루어져야 하나 교량 설계자의 편의를 위한 간접적인 평가 방법으로 볼 수 있다. 주행안전성은 횡압과 운중감소에 의한 탈선계수로 평가되는 것이 일반적이다. 교량 설계자를 위해 일반적으로 탈선계수가 0.8~1.2를 넘지 않도록 구조물의 연직변위를 제한해 왔다. 일본의 경우에는 횡압 48kN, 운중감소율 28.1%의 한계값이 탈선계수 0.8에 근거하여 정해져왔다. 승차감에 대하여는 열차 내부에서 발생하는 가속도로 평가하는 것이 직접적 방법이며, 이에 대해 Eurocode에서는 “매우 좋은” 승차감에 대해 0.10g 이하의 값을 만족하도록 하고 있다.

교량을 주행하는 차량하중에 의한 동적거동 분석은 철도교량 특유의 열차로 인한 공진발생 가능성 등으로 인하여 더욱 중요성이 인식되었다. 현재 이 분야에서 가장 많은 연구성과를 발표하고 있는 대만 대북대학의 Yang과 담강대학의 Yau 등은 지진 하중의 작용에 의해 진동하는 교량을 주행하는 열차의 동적안정성을 연구하였으며(Yang, 2002; Yau 2009), 일본은 철도총합연구소(RTRI)를 중심으로 이 분야의 연구가 활발히 수행되고 있다(Sogabe, 2006).

현재 국내에 존재하는 경간 120m 이상의 장대교량 중 인천공항철도 구간의 현수교인 영종대교에 대하여

\* 한국철도기술연구원 선임연구원 sikim@krri.re.kr

\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원 hmkim@krri.re.kr

이와 같은 교량/열차 상호작용해석을 적용하였으며, KTX의 운행을 가정하였다.

## 2. 교량/열차 상호작용의 정식화

이 연구에서는 해석 효율성을 위해 교량부분은 특정개수의 모드만을 사용하는 모드중첩법으로 해석을 수행한다. 이때 고려되는 모드의 수는 응답의 신뢰성을 감안해 해석 교량에 따라 적절히 정해져야 한다. 이와 같은 방법은 교량의 질량, 감쇠, 강성행렬을 직접적으로 알 필요가 없으며, 고려하고자 하는 모드의 진동수와 모드형상만 알면 교량의 질량, 감쇠, 강성행렬을 구성할 수 있다. 따라서 상호작용 해석에서 정밀한 교량의 해석모del을 따로 만들 필요가 없으며 기존의 MIDAS, SAP2000, ABAQUS와 같은 교량 전용 해석 프로그램에서 추출한 모드 진동수와 형상을 그대로 이용할 수 있는 장점이 있다.

한편, KTX 열차는 총 20개의 본체와 23개의 대차, 46개의 윤축으로 구성되어 있다. KTX 열차가 일반 열차와 가장 대별되는 점은 각 객차마다 독립적인 대차시스템을 갖고 있는 일반 열차와 달리 관절형 시스템이라는 점이다. 이러한 특성에 따라 수치모델링 시 열차 전체시스템의 모델링이 요구된다. 이 연구에서는 그림 1과 같이 하나의 대차를 기본으로 하는 객차모델과 동력객차모델을 사용하며 각 객차는 독립적인 것으로 가정하여 하나의 모델을 반복 사용할 수 있도록 하였다. 그리고 관절형 대차를 가지고 있지 않은 동력차의 경우는 기존의 3차원 모델(김성일, 2000)을 사용하였다.

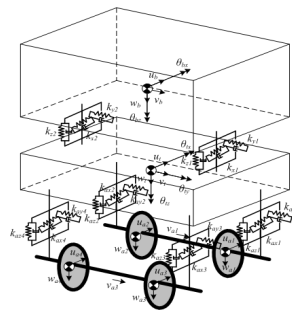


그림 1 KTX 대차 베이스 객차모델

교량의 운동방정식과 열차의 운동방정식은 접촉점의 자유도  $z_c$ 와 그 때의 상호작용력  $f_c$ 을 통해 서로 연결되어 있다. KTX 대차 베이스 모델의 경우 최종적인 운동방정식은 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M_{bb} & 0 \\ 0 & M_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_i \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{bb} & C_{bv} \\ C_{vb} & C_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{q}_i \\ \dot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{bb} & K_{bv} \\ K_{vb} & K_{vv} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_i \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_b \\ F_v \end{Bmatrix} \quad (1)$$

열차-교량 상호작용해석을 하면서 동시에 지진하중을 고려하고자 하는 경우에는 위 식 (1)의 오른쪽 하중항에 아래의 지진하중을 추가하면 된다.

$$\begin{Bmatrix} F_{eqb} \\ F_{eqv} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -M_{bb}\Phi_n\{1\}\ddot{u}_g \\ -M_{11}\{1\}\ddot{u}_g \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $\ddot{u}_g$ 는 지진가속도이다. 동일한 지진가속도를 사용할 때 연직방향의 경우는 수평방향 지진가속도의 30%만 사용한다.

### 3. 장경간 현수교의 운행한계 분석

#### 3.1 해석 대상 교량

이 연구에서 대상 교량으로 선정된 교량은 그림 2와 같은 주경간 300m의 현수교이다.

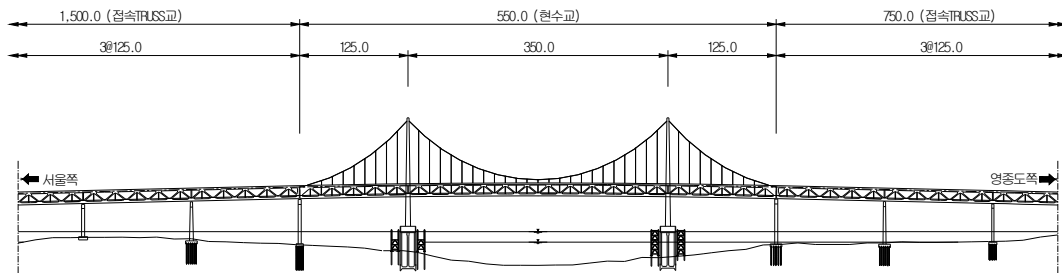


그림 2 해석에 적용된 장경간 현수교

장경간 교량의 특성 상 매우 낮은 대역에서 첫 번째 횡 고유진동수가 발생하고 있으며, 약 0.50Hz로 나타나고 있다. 참고로 2006년도 영종대교에 대한 안전진단 점검용역시 산출된 실험값은 0.491Hz로 나타났으므로, 상기 해석결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

#### 3.2 운행한계 분석

그림 3은 현수교 중앙경간 중앙부 교량의 속도별 최대 연직처짐, 연직가속도와 열차의 응답인 운중감소율과 열차 내 연직가속도를 나타낸다. 지진하중은 공통적으로 El Centro 가속도를 적용하였다.

Eurocode는 경간 120m까지에 대해서만 승차감 확보를 위한 연직변위 기준을 제시하고 있기 때문에 대상 교량의 경우 중앙경간 300m에 대해서는 적합한 기준이 없다고 볼 수 있으나, 우선적으로 승차감 확보를 위한 교량 연직변위에 대해  $L/1700$  기준을 대입하면 176.47mm의 제한값이 나온다. 결과에서 알 수 있듯이, 주행속도 350km/h까지 최대 53mm 이하로 나타나고 있어, 교량의 연직변위에 대하여 충분한 사용성을 확보하고 있다고 판단된다.

교량의 연직가속도는 주행안전성 확보를 위해 자갈도상에 대해 0.35g, 콘크리트궤도에 대해 0.50g 이하를 확보하여야 한다. 지진 발생 시에는 평상 시에 비해 증가하고 있으나 중앙경간 0.06g 이하로서 교량 연직가속도에 대해 충분한 주행안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 장경간에 따른 질량효과 증대에 따른 것으로 판단된다.

주행안전성을 직접적으로 평가하는 지표인 운중감소율은 지진 발생 시에도 약 270km/h까지는 소요의 주행안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로 볼 때 대상 교량은 KTX 250km/h까지는 주행안전성을 확보하고 있으나, 250km/h 이상 속도 주행 시에는 운중감소율에 대한 제한 기준을 만족하지 못할 수 있으므로 주의가 필요하다고 판단된다.

승차감의 직접적 평가지표인 열차 내 가속도 응답은 지진 발생 시에는 전체적인 속도대역에서 승차감이 평상 시에 비하여 많이 감소되는 것으로 나타나고 있으나, 대부분의 속도구간에서 “매우 좋은” 혹은 “양호”

의 기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

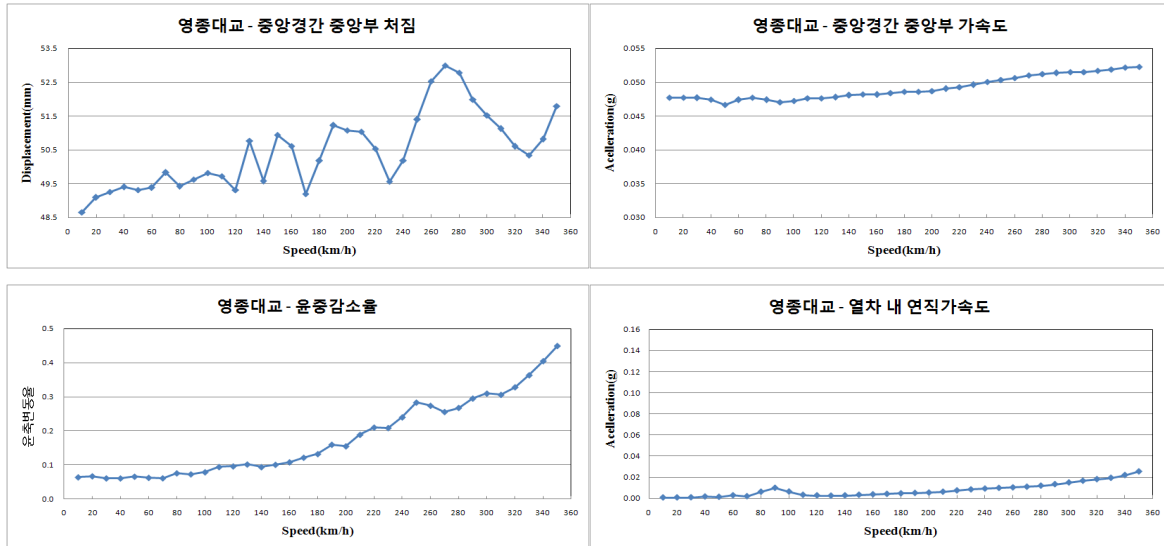


그림 3 현수교 중앙부 교량/열차 속도별 최대응답

#### 4. 결론

분석 결과 교량의 응답만으로는 모든 속도대역에서 동적안정성에 대한 설계기준을 만족하는 경우에도 정밀한 교량/열차 상호작용해석에 의한 주행안전성 및 승차감에 대한 직접적인 판단결과 속도대역에 제한사항이 나타날 수 있음이 입증되었다. 따라서, 이와 같은 장경간 철도교량의 경우 교량의 응답에 의한 판단만이 아닌 보다 면밀한 열차응답에 대한 판단이 필요함을 알 수 있다

#### 감사의 글

이 연구는 국토해양부 미래철도기술사업의 연구비지원(한국형 차세대 고속철도(HEMU) 기술개발 사업)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Y.B. Yang & Y.S. Wu (2002), Dynamic Stability of Trains Moving over Bridges Shaken by Earthquakes, *Journal of Sound & Vibration* Vol. 258(1), p.65-94
- J.D. Yau (2009), Dynamic Response Analysis of Suspended Beams subjected to Moving Vehicles and Multiple Support Excitations, *Journal of Sound & Vibration*, Vol.325, p907-922
- M. Sogabe, M. Ikeda & Y. Yanagisawa (2006), A Study on Train-Running Quality during Earthquake and its Improvement for Railway Long Span Bridge, *RTRI Report*, Vol.20, No.11, p.47-51
- 김성일 (2000), 고속철도 교량의 교량-열차 상호작용 해석, *서울대학교 박사학위 논문*
- Korea Railroad Research Institute (2010), Dynamic Stability Investigation of Special Bridges on Airport Railway, *Korea Railroad Technical Corporation*