# 연직 지진하중을 받는 고속철도 특수교량의 주행안정성 평가

# Dynamic Stability Evaluation of Special Bridge for High Speed Railroad under Vertical Ground Motion

김동석† 김성일*

**Dong-Seok Kim** **Sung-Il Kim**

**ABSTRACT**

**In this paper, the dynamic stability evaluation of special bridge for high speed railway under ground excitation is performed. The mass, damping, stiffness matrices of bridge are derived from the modal frequencies and mode shape vectors which can be obtained by commercial program. And the high speed train is modeled as multi-single d.o.f models for the sake of vehicle-bridge interaction analysis. In the vehicle-bridge interaction analysis, the vertical directional interaction is only considered. As a numerical example, the 3 span Extradosed bridge which is expected to be installed in Ho-Nam high speed railroad is considered. The analysis results show that the example bridge satisfies the criteria of dynamic stability.**

## 1. 서론

2단계까지 완료되는 경부고속철도의 경우 우리나라의 지형적인 특성과 효율적인 국토활용을 위하여 총 412km 중 27%에 해당하는 112km가 교량 구조물로 이루어지게 된다. 우리나라 최초의 고속철도 건설이라는 점과 국내 기술력의 불확실성으로 인하여 고속철도의 교량은 프랑스 SYSTRA사의 지문으로 얻어진 BRDM(Bridge Design Method)을 기준으로 설계 시공 되었다. 이 BRDM에서 동적 안정성이 높은 교량의 상부구조 형식으로 PSC 박스거더를 제안함에 따라 경부고속철도에는 특수한 개소 한 두 곳을 제외하고 모두 PSC 박스거더 교량으로 건설되었다. 그러나 이는 동적안정성에 대한 기술력 미비로 지나치게 안전하게 설계되어 과다설계라는 지적을 받고 있다. 따라서 최근 건설되고 있는 호남고속철도에는 다른 형식의 교량이 시도되고 있으며 특수교량인 Extradosed 교량 또한 시공예정에 있다.

이에 이 연구에서는 지진이나 바람과 같은 환경하중 하에서 특수교량인 Extradosed 교량에 고속열차가 지나갈 때 교량의 동적안정성 및 승차감을 평가해보고자 한다. 연구의 첫 단계로서 이 논문에서는 연직 지진하중을 받는 Extradosed 교량에 대해 열차-구조물 상호작용해석을 수행하여 교량의 동적 안정성과 열차의 승차감을 평가하였다.

## 2. 지진하중 시 열차-구조물 상호작용해석

열차는 가장 간단한 이동집중하중 모델에서 차체, 대차, 바퀴가 모두 고려되는 복잡한 3차원 모델에 이르기까지 여러 가지로 모델링 될 수 있다. 그러나 열차의 축간격에 의한 반복하중으로 교량의 공진 등을 알아보기 위해서는 반복 축하중을 표현할 수 있는 모델이어야 하며, 열차의 가속도로 표현될 수 있는 승차감을 알

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 박사후 연구원
E-mail : kds430@krri.re.kr
TEL : (031)460-5349 FAX : (031)460-5359
* 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

기 위해서는 강성과, 질량을 갖는 1자유도 모델이상이어야 한다. 따라서 이 논문에서는 이를 만족하는 가장 간단한 모델로 그림 1과 같이 특정간격으로 연속된 1자유도 모델로 열차를 모델링하였다. 열차는 1자유도 모델의 반복이므로 1자유도 모델 하나를 이용해 운동방정식을 유도하고자 한다.

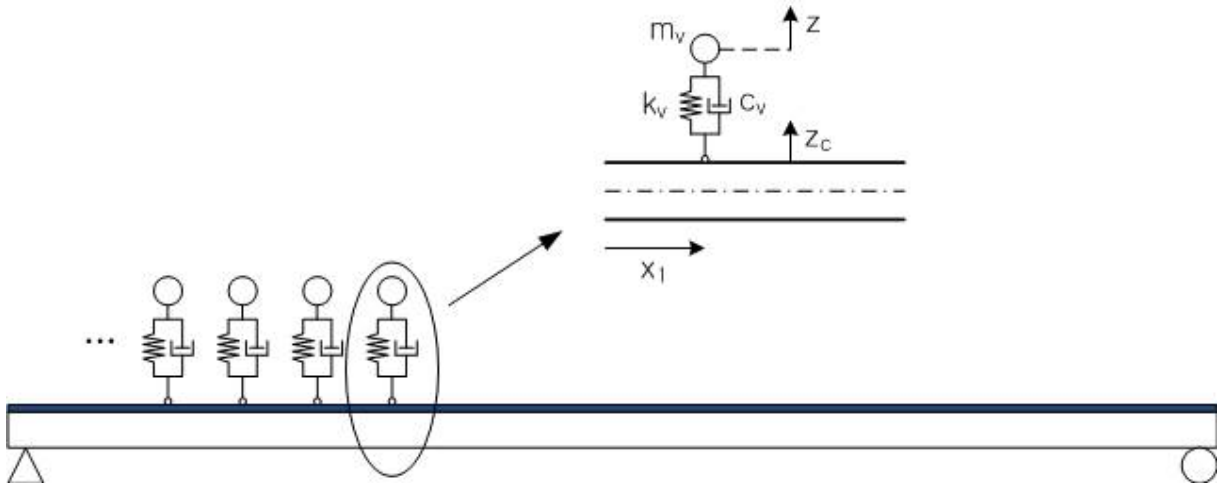


그림 1. 열차와 교량의 상호작용 모델

열차부분의 자유도 $z$와 열차와 교량의 접촉면의 자유도 $z_c$에 대한 운동방정식은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} m_v & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{z} \\ \ddot{z}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_v & -c_v \\ -c_v & c_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{z} \\ \dot{z}_c \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_v & -k_v \\ -k_v & k_v \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} z \\ z_c \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f_c \end{bmatrix} \tag{1}$$

여기서, $m_v$, $c_v$, $k_v$는 각각 열차의 질량, 감쇠, 강성을 나타나며, $f_c$는 교량과 열차 접촉면에서의 힘을 나타낸다. 한편, 교량의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[m_b]\{\ddot{u}_b\} + [c_b]\{\dot{u}_b\} + [k_b]\{u_b\} = -\{N_c\} m_v g - \{N_c\} f_c \tag{2}$$

여기서, $[m_b]$, $[m_b]$, $[m_b]$는 각각 교량의 질량, 감쇠, 강성행렬이다. $\{N_c\}$는 거리 $x_1$떨어진 곳에 힘이 작용할 때 이를 교량의 각 절점의 자유도로 연결시켜주는 벡터이다.

이 때, 교량과 열차 접촉면의 roughness를 고려하지 않고 교량과 열차는 항상 접촉되어 있다고 가정하면 접촉면의 자유도 $z_c$는 교량의 $x_1$위치에서의 변위와 같으므로 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. $\{N_c\}$는 $x_1$에 대한 함수이며, $x_1$은 열차의 속도 $v$와 시간에 대한 함수이므로 $z_c$의 시간에 대한 미분 $\dot{z}_c$는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$z_c = \{N_c\}^T \{u_b\} \tag{3}$$

$$\dot{z}_c = \{N_c\}^T \{\dot{u}_b\} + v\{N_c\}_{,x}^T \{u_b\} \tag{4}$$

식(3)과 식(4)을 식(1)과 식(2)에 대입하여 $f_c$를 소거하여 정리하면 최종적으로 식 (5)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix}[m_b] & 0 \\ 0 & m_v\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{\{u_b\}} \\ \ddot{z}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}[c_b]+\{N_c\}c_v\{N_c\}^T & -\{N_c\}c_v \\ -c_v\{N_c\}^T & c_v\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{\{u_b\}} \\ \dot{z}\end{Bmatrix} \\ +\begin{bmatrix}[k_b]+\{N_c\}(k_v\{N_c\}^T+vc_v\{N_c\}_{,x}^T) & -\{N_c\}k_v \\ -(vc_v\{N_c\}^T+k_v\{N_c\}^T) & c_v\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{u_b\} \\ z\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}-\{N_c\}m_vg \\ 0\end{bmatrix} \tag{5}$$

여기서 교량 부분은 모드중첩법에 의한 방법으로 풀기 위해 변위 $u_b$를 아래와 같이 모드형상과 일반화된 변위 $q_i$로 나타낼 수 있다.

$$u_b=\sum_{i=1}^{n}\Phi_i q_i \tag{6}$$

모드의 직교성 등을 이용하여 교량부분을 모드에 대한 식으로 변환하면 식(7)과 같이 정리할 수 있다. 정리과정에서 나타나는 $\{N_c\}^T\Phi_n$는 $x_1$위치에서의 모드형상 값이 되며 $\Phi_{cn}$으로 표시하도록 한다. $x_1$이 교량의 절점과 절점 사이에 올 경우 Hermitian interpolation을 사용하였다.

$$\begin{bmatrix}[1] & 0 \\ 0 & m_v\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{\{q_n\}} \\ \ddot{z}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}[2\zeta_n\omega_n]+\{\Phi_{cn}\}c_v\{\Phi_{cn}\}^T & -\{\Phi_{cn}\}c_v \\ -c_v\{\Phi_{cn}\}^T & c_v\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\dot{\{q_n\}} \\ \dot{z}\end{Bmatrix} \\ +\begin{bmatrix}[\omega_n^2]+\{\Phi_{cn}\}(k_v\{\Phi_{cn}\}^T+vc_v\{\Phi_{cn}\}_{,x}^T) & -\{\Phi_{cn}\}k_v \\ -(vc_v\{\Phi_{cn}\}^T+k_v\{\Phi_{cn}\}^T) & k_v\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{q_n\} \\ z\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}-\{\Phi_{cn}\}m_vg \\ 0\end{bmatrix} \tag{7}$$

1자유도 모델이 여러 개 있는 경우는 식(7)에서 $z$을 $\{z_i\}$로 확장하면 된다. 또한 연직 지진하중이 작용하는 경우는 식(7)의 오른쪽 항에 아래와 같은 벡터를 추가하면 된다.

$$\begin{Bmatrix}-\{\Phi_n\}^T\{1\}\ddot{u}_g \\ -\{m_{vi}\}\ddot{u}_g\end{Bmatrix} \tag{8}$$

여기서 $\{m_{vi}\}$는 차량을 구성하는 연속된 1자유도 모델의 질량벡터, $\{1\}$은 연직방향 자유도만 1이고 나머지는 0인 벡터, $\ddot{u}_g$는 지진 가속도이다.

식 (7)과 같이 구성된 운동방정식은 Newmark-$\beta$방법을 사용하여 동해석을 수행한다. 열차의 응답은 바로 구할 수 있으나 구조물의 응답은 모드별 응답이므로 식(6)을 사용하여 변환해서 구한다.

이와 같이 모드중첩법을 이용하는 열차-구조물 상호작용해석 방법은 구조물의 질량, 강성행렬을 직접적으로 알 필요가 없으며 상위 중요한 모드만으로 해석을 수행할 수 있으므로 행렬의 크기를 줄여 해석시간을 줄일 수 있는 이점이 있다.

## 3. 수치해석예제

호남고속철도에는 케이블 장대교량인 Extradosed 교량이 2개소에 설계 적용되었다. 이 중 2-3공구의 정지고가에 대해 이 연구에서 수치예제로 사용하였다. 그림 2에 보이는 정지고가는 경간장 50+80+50으로 구성되어 있으며 하부구조와 상부구조 사이는 탄성받침으로 되어 있다. Midas에서 수행된 모드해석으로부터 상위 40개 모드의 진동수와 모드형상을 이용해 교량의 질량, 감쇠, 강성행렬을 구성하였으며 감쇠행렬을 구성할 때 사용된 모드 감쇠비는 0.01을 사용하였다. 고려한 열차는 KTX로서 앞에서 설명한 것과 같이 일정한 축간격을 가지는 46개의 연속된 1자유도 모델로 구성하였다. 열차의 속도는 10km/h부터 420km/h까지 10km/h 간격으로 해석을 수행하였다.

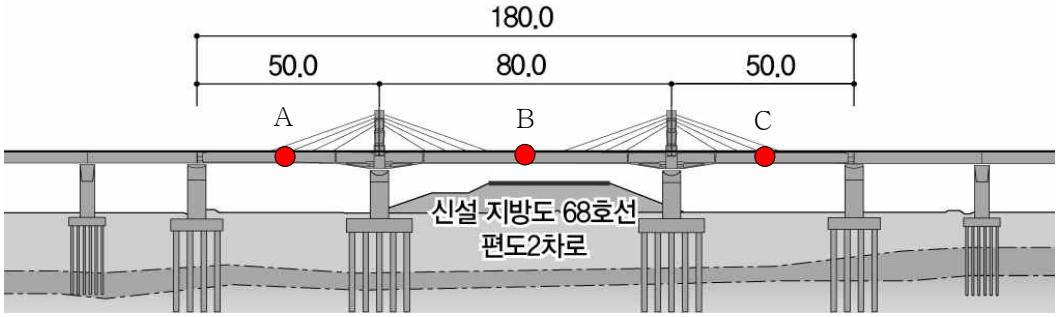


그림 2. 정지고가

정지고가의 1차 모드는 그림 3과 같이 y축에 대한 회전인 휨모드이며 고유진동수는 1.2868Hz로 나타났다. 이를 통해 계산된 공진은 열차 속도가 약 87km/h에서 발생하는 것으로 계산되었으나 그 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

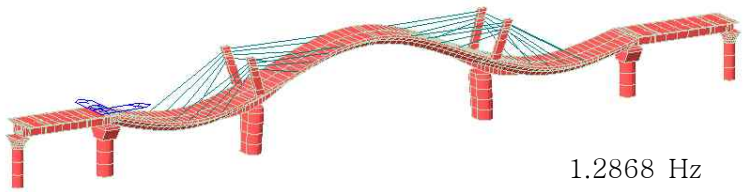


그림 3. 정지고가의 1차 모드형상

열차 주행시 교량의 안정성을 평가하기 위해 그림 2에서와 같이 각 경간의 중앙부근에서 수직 처짐과 연직가속도를 검토하였으며, 승차감으로 차량의 연직가속도를 검토하였다. 그림 4에서 그림 6은 지진하중이 작용하지 않을 때 각 경간의 중앙에서 처짐과 가속도 그리고 열차 가속도의 최대값을 속도별로 나타낸 것이다.

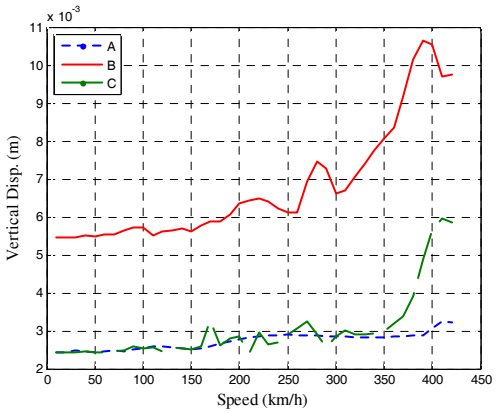


그림 4. 속도별 최대 수직 처짐

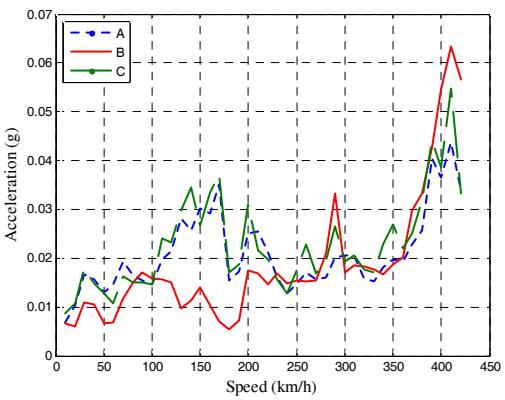


그림 5. 속도별 최대 연직가속도

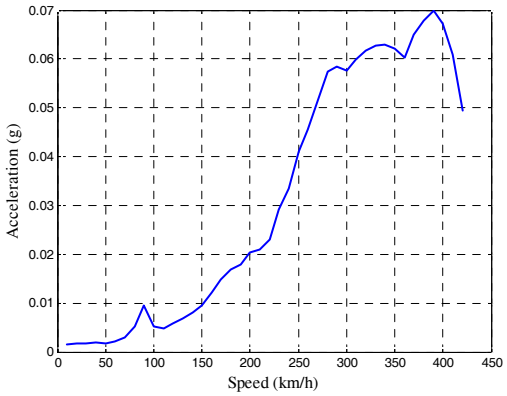


그림 6. 속도별 열차의 최대 연직가속도

교량의 처짐 규정은 그림 7에 있는 규정을 사용하였다. 그림 4에서 최대 수직처짐이 발생한 경우는 390km/h일 때 중앙경간에서 발생하였다. 경간장 80m를 대입하고 $L/\delta$를 3000을 고려한다고 해도 최대 처짐 기준은 26.7mm로 그림 4의 최대 처짐보다는 높다. 따라서 처짐에 대한 안정성은 충분히 확보하고 있다고 할 수 있다.

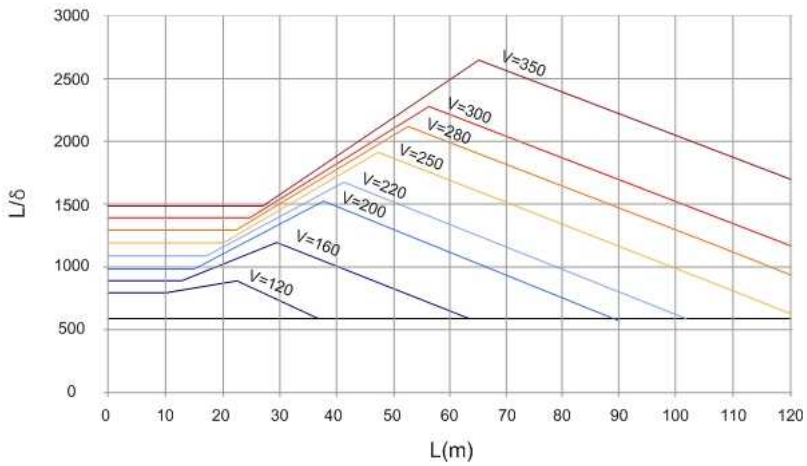


그림 7. 호남고속철도 설계지침(2007) : 최대 수직처짐 규정

상판의 연직가속도에 대한 규정은 무도상일 경우의 0.5g를 고려하였는데 그림 5에서 최대 연직가속도는 0.07g를 넘지 못하므로 연직가속도에 대해서도 충분한 안정성을 가지고 있다고 할 수 있다. 열차의 연직가속도는 그림 6에서 최대 0.07g로 나타났으나 이 또한 승차감의 규정인 0.1g를 만족하고 있으므로 승차감 또한 양호하다고 할 수 있다.

그림 8과 그림 9는 연직 지진하중이 작용했을 경우 각 경간 중앙에서의 수직 처짐과 상판의 연직가속도에 대해 속도별 최대값을 도시한 것이다. 지진시 승차감에 대한 평가는 무의미하므로 열차의 가속도는 도시하지 않았다. 연직방향의 지진가속도는 일반적으로 수평방향의 지진가속도에 비해 작으므로 수평방향 El centro 지진의 30%를 연직 지진하중으로 고려하였다. 지진하중이 작용할 경우 가속도는 절대가속도로 나타낸다.

경간 중앙의 최대 수직 처짐은 가운데 경간에서 발생하는데 지진하중이 작용하지 않는 경우와 달리 60km/h 부근에서 조금 크게 나타나는 현상이 있으며, 최대값은 10.2mm 정도로 역시 처짐 기준을 충분히 만족하고 있다. 상판의 연직가속도는 지진시에는 지점 부근이 더 높을 것으로 예상되어 왼쪽 지점과 왼쪽 주탑 그리고 가운데 경간의 중앙에서의 가속도를 나타내었다. 전체적으로 El centro 지진의 30%

에 해당하는 0.105g 부근을 중심으로 변화하고 있으며 경간 중앙보다는 왼쪽 지점부근에서 변동이 더 크게 나타났다. 그러나 역시 가속도 기준인 0.5g보다는 작으므로 충분한 안정성이 있다고 할 수 있다.

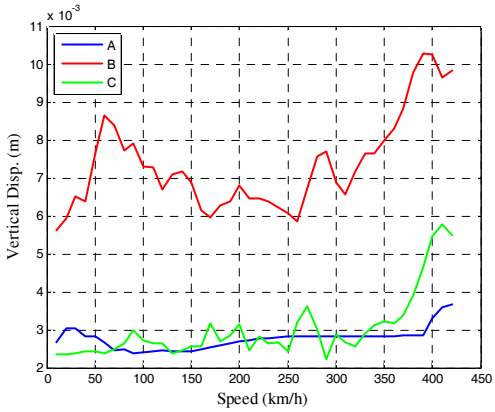


그림 8. 속도별 최대 수직 처짐(지진시)

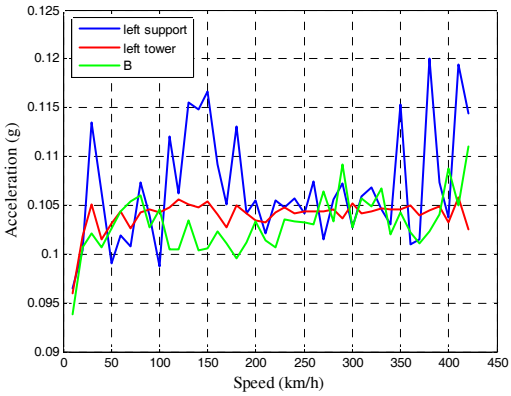


그림 9. 속도별 최대 연직가속도(지진시)

## 4. 결론

모드중첩법을 사용하는 열차-교량 상호작용해석 방법을 이용 Extradosed 교량인 정지고가에 대해 연직 지진하중이 작용하는 경우의 동적 안정성을 평가하였다. 해석 결과 지진하중이 작용하지 않을 경우 정지고가는 충분한 동적 안정성 및 승차감을 가지고 있었으며, 국내의 지진규모보다 큰 El centro 지진에 대해서도 동적 안정성 기준을 만족하고 있음을 알 수 있었다. 다만 장대교량의 경우 장주기 지진에 취약하므로 향후 장주기 지진에 대한 검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.


## 감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 “고속화를 위한 선로구축물 핵심기술개발” 연구과제의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.


## 참고문헌


1. “Bridge Design Manual (BRDM) Final Report”, Korea High Speed Rail Construction Authority(KHRC), Systra, 1995.
2. Y. B., Yang and B. H., Lin, "Vehicle-bridge interaction analysis by dynamic condensation method", Journal of Structural Engineering, Vol. 121, No. 11, pp. 1636-1643, 1995.
3. Y. B., Yang and Y. S., Wu, "Dynamic Stability of Trains Moving over Bridges Shaken by Earthquakes," Journal of Sound and Vibration, Vol. 258, No. 1, pp. 65-94, 2002.
4. 김성일, 곽종원, 장승필, “3차원 관절형 고속열차 모델을 이용한 교량/열차 상호작용해석”, 대한토목학회논문집, 제 19권, 4호, pp. 505-516, 1999.