

# 열차주행속도를 고려한 고속철도교량의 수직변위에 대한 진동사용성 한계(기준) 연구

## Deflection Limit on Vibration Serviceability of High-speed Railway Bridges Considering the Effect of Train Speed

전 법 규\* · 김 남 식\*\* · 김 성 일\*\*\*

Jeon, Bub-Gyu · Kim, Nam-Sik · Kim, Sung-Il

### 요 약

본 논문에서는 열차와 교량의 상호작용과 주행속도에 의해 결정되어지는 진동지속시간과 차체연직가속도 증폭효과를 고려하여 철도교량의 진동사용성 허용치짐을 제시하고자 하였다. 열차가 교량을 통과할 때의 처짐 형상을 사인파로 가정하고 열차와 교량의 상호작용을 진동전달함수로 표현하여 철도교량의 진동사용성 허용치짐을 유도하였다. 그리고 진동지속시간을 고려하기 위해 연직가속도 허용기준으로서 진동지속시간을 고려한 교량구조물의 진동사용성기준을 사용하였다. 매개변수연구를 통하여 열차 주행속도의 증가에 비례하여 차체연직가속도는 증가하지만 교량최대변위의 변화는 미미함이 확인됨으로 인하여 차체연직가속도 증가와 동반하여 연직가속도 허용기준역시 증가하는 것을 보정할 필요가 있을 것으로 판단하였다. 따라서 전개된 철도교량의 진동사용성 허용치짐식에 매개변수연구를 통하여 가정한 가속도 증폭계수를 적용하여 열차의 증속에 의한 가속도증폭효과를 고려하였다.

**keywords** : 진동사용성, 철도교량, 허용치짐, 차체연직가속도

### 1. 서 론

구조물의 구조적 안정성보다 사용성 측면이 강조되는 것이 추세이며 철도교량의 진동사용성에 관한 연구는 유럽과 일본에서 진행되어 적용되고 있다. 국내의 경우 철도교량의 진동사용성 문제는 시작단계의 연구이며 기준으로서 명확하게 제시되어있지 않다. 호남고속철도교량의 경우 Eurocode의 진동사용성 허용치짐기준을 도입하여 설계되었다(한국철도시설공단, 1976; ERRI, 1999). 최근 국내에서도 열차가 교량을 통과할 때의 처짐 형상을 사인파(sine wave)로 가정하고 열차와 교량의 상호작용을 진동전달함수로 표현하여 철도교량의 진동사용성 허용치짐을 유도하기 위한 연구가 진행되었으나 열차의 증속으로 인한 차체연직가속도 증폭효과를 고려하고 있지 못하다(전법규 등, 2009). 따라서 차체가속도 증폭과 동반해 연직가속도 허용기준이 증폭되는 것을 보정할 필요가 있을 것으로 판단하였다. 본 논문에서는 진동지속시간을 고려한 철도교량의 진동사용성 허용치짐에 매개변수연구를 통하여 가정한 가속도 증폭계수를 적용하여 열차의 증속에 의한 차체연직가속도의 증폭효과를 고려하고자 하였다.

\* 비회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 bkjeon79@yahoo.co.kr

\*\* 비회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 교수 nskim@pusan.ac.kr

\*\*\* 한국철도기술연구원 선임연구원 sikim@krri.re.kr

## 2. 진동지속시간을 고려한 철도교량의 진동사용성 허용치집

교량구조물상을 통과하는 차량의 차체연직가속도의 진동수는 그 파형이 경간 길이를 1파로 하는 정현파 강제 가진에 가까운 경향이 되며  $f=v/L$ 로 표현할 수 있다. 교량의 처짐형상이 사인파이고 진동신호가 조화 운동(harmonic motion)이라고 가정할 경우, 진동전달함수  $H(f)$ 를 이용하여 열차의 최대연직가속도를 식(1)과 (2)로 전개할 수 있다. 열차의 최대연직가속도를 진동지속시간을 고려한 교량구조물의 진동사용성 평가기준(전법규 등, 2007)으로 치환하여 변위에 대해 재정리하면 식(3), (4)와 같은 진동지속시간을 고려한 철도교량의 진동사용성 허용치집을 유도할 수 있다. 여기서  $a_{comfort}$ 는 연직허용가속도,  $L$ 은 경간 길이,  $v_x$ 는 열차주행속도,  $H(f)$ 는 진동전달함수이다.

$$a_{z,max,sin} = \pi^2 \left( \frac{v_x}{L} \right)^2 H \left( \frac{v_x}{L} \right) \delta_b = \pi^2 (f)^2 H(f) \delta_b \quad (1)$$

$$a_{z,max,con} = 2\pi^2 \left( \frac{v_x}{L} \right)^2 H \left( \frac{v_x}{L} \right) \delta_b = 2\pi^2 (f)^2 H(f) \delta_b \quad (2)$$

$$\delta_{comfort,sin} = \frac{a_{comfort} L^2}{v_x^2 \pi^2 H(f)} \quad (3)$$

$$\delta_{comfort,sin} = \frac{a_{comfort} L^2}{2v_x^2 \pi^2 H(f)} \quad (4)$$

## 3. 가속도증폭효과를 고려한 고속철도교량의 진동사용성 허용치집 유도

ERRI(European Rail Research Institute)의 보고에 의하면 열차의 주행속도가 200km/h를 초과할 경우 교량에서의 가속도응답은 크게 증폭하는 경향이 있다. 그리고 열차의 주행속도가 증가할 경우, 경간 중앙과 차량의 연직가속도는 증가한다.(ERRI, 1999; Nan Zhang, 2007). 식(3)과 (4)의 진동지속시간을 고려한 철도교량의 진동사용성 허용치집은 열차의 주행속도가 증가함에 따라 차체연직가속도응답이 증폭되는 현상을 고려하지 못하고 있으며 차체연직가속도와 연직허용가속도가 동반하여 증폭되어 진동사용성 허용치집이 지나치게 관대해질 우려가 있다. 식(5), (6)과 같이 연직허용가속도를 증폭되는 차체연직가속도에 비례하여 감소시켜 차체연직가속도와 동반하여 증폭되지 않도록 보정해 줄 수 있을 것이다. 따라서 열차의 고속화에 의한 가속도증폭의 영향을 고려할 수 있는 가속도 증폭계수의 설정이 필요할 것으로 판단된다. 여기서  $\alpha$ 는 가속도증폭계수이다.

$$\delta_{comfort,sin} = \frac{(a_{comfort}/\alpha) L^2}{v_x^2 \pi^2 H(f)} \quad (5)$$

$$\delta_{comfort,sin} = \frac{(a_{comfort}/\alpha) L^2}{2v_x^2 \pi^2 H(f)} \quad (6)$$

본 연구에서는 3차원으로 모델링된 정교한 KTX의 객차모델을 이용하여 열차-교량 상호작용해석을 수행하였다.(김성일, 2000). 열차의 주행속도 및 교량의 감쇠비(damping ratio), 고유진동수(natural frequency), 형식 등을 매개변수로 하였으며 경간 길이는 40m로 고정하였다. 교량의 고유진동수는 4~12Hz, 감쇠비는 1~3%, 열차의 주행속도는 20~420km/h를 사용하였다.

그림 1은 단경간(single span) 교량과 연속경간(continuous span) 교량의 매개변수에 따른 열차-교량 상호 작용해석을 통해 구해진 차체연직가속도응답의 최대값과 교량의 최대처짐을 정규화(normalization)하여 도식화 한 것이다. 교량의 변위는 저속과 고속의 차이가 크지 않으나 차체연직가속도응답은 단경간 교량과 연속경간 교량 모두 주행속도가 증가할수록 선형으로 증가하며 250km/h이후는 일정수준에서 수렴하는 경향이 나타난다. 그리고 교량의 감쇠비(damping ratio)에 의한 객차와 교량의 응답변화는 크지 않은 것으로 판단된다. 단, 교량의 설계 시 주행안정성 및 교량의 수명 등을 고려할 경우 차량-교량 상호작용에 의한 공진은 배제하는 것이 타당하다고 판단하여 공진의 경우는 제외하였다. 증속에 따른 차체연직가속도응답의 최대값을 그림 1에서와 같이 선으로 표시하면 단경간 교량과 연속경간 교량 모두에 대하여 식(7)과 같은 동일한 가속도증폭계수  $\alpha$ 를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} 0 < v \leq 225 \text{ km/h} & \quad \alpha = 0.04v \\ v > 225 \text{ km/h} & \quad \alpha = 9 \end{aligned} \quad (7)$$

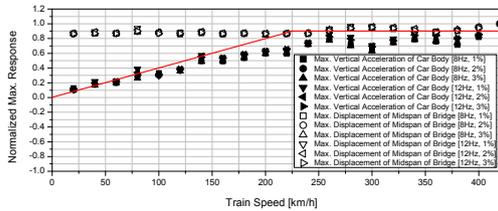


그림 1. 단경간 교량

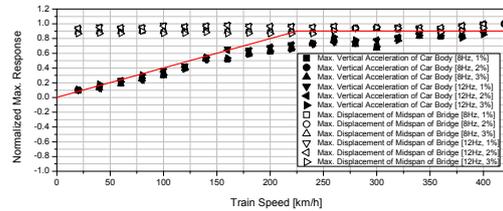
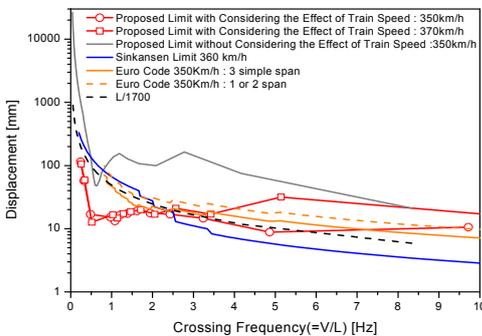


그림 2. 연속경간 교량

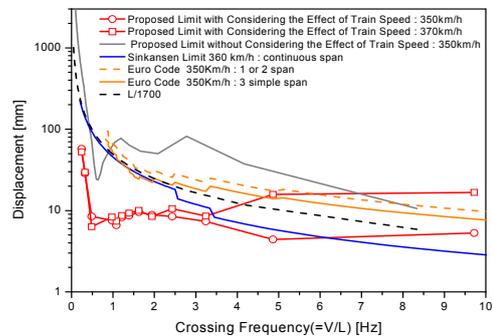
그림 1 교량의 증속에 따른 열차의 최대연직가속도응답의 증가

#### 4. 가속도증폭효과를 고려한 고속철도교량의 진동사용성 허용처짐과 기존 기준들의 비교

그림 2는 단경간 교량과 연속경간 교량에 대하여 식(3)과 (4)의 진동지속시간을 고려한 고속철도교량의 진동사용성 허용처짐과 식(5), (6)의 가속도증폭효과를 고려한 진동사용성 허용처짐, 그리고 유럽과 일본에서 사용되고 있는 진동사용성 허용처짐을 비교한 것이다.



(a) 단경간 교량의 진동사용성 허용처짐 비교



(b) 연속경간 교량 진동사용성 허용처짐 비교

그림 3 교량의 가속도증폭효과를 고려한 진동사용성 허용처짐과 기존 기준들의 비교

그림 3의 (a), (b)에서 단경간과 연속경간 교량 모두 열차의 증속에 의한 가속도증폭효과가 고려되지 않았을 경우 식(3), (4)로 전개된 단경간과 연속경간 교량의 진동사용성 허용치짐은 지나치게 관대한 경향이 나타났다. 하지만 식(5), (6)을 이용하여  $\alpha$ 를 이용하여 열차주행속도에 따른 가속도증폭효과를 고려하면 열차의 주행속도가 350km/h인 경우, 단경간 교량은 2Hz, 연속경간 교량의 경우 3Hz이상의 짧은 경간에서 기존의 기준들과 유사한 경향이 나타났다. 단경간 교량과 연속경간 교량 모두 장경간(long span) 영역의 저주파수 구간에서 기존의 기준들에 비하여 진동사용성 허용치짐이 상당히 엄격한 것을 알 수 있다. 열차의 주행속도가 370km/h일 경우 단경간 교량과 연속경간 교량 모두 저주파수 구간에서는 엄격하며 고주파수 구간인 단경간(short span) 영역에서는 관대해지는 경향이 나타났다. 열차의 주행속도와 관계없이 저주파수 구간에서 전개된 허용치짐이 엄격해지는 것은 0.5~1Hz구간에서 최대값을 가지는 KTX열차와 교량의 진동전달함수(전법규 등, 2009)의 영향 때문으로 판단된다. 비교대상인 Sinkansen(Masamichi Sogabe, 2006)과 Eurocode의 경우 350~360km/h의 주행속도를 대상으로 하고 있으므로 370km/h의 경우와 비교했을 때 정답이라고 정의할 수 없을 것이다.

#### 4. 결론

본 논문에서 전개된 진동사용성 허용치짐은 주행속도가 350km/h일 때 고주파수 구간에서는 유럽과 일본에서 사용중인 진동사용성 치짐기준들과 그 경향이 유사하나 저주파수 구간에서는 엄격하며 370km/h의 경우 저주파수 구간에서는 엄격하고 고주파수 구간에서 관대한 경향이 나타났다. 저주파수구간, 특히 0.5~1Hz 구간에서 전개된 허용치짐이 기존의 기준들과 비교하여 엄격한 결과가 얻어졌다. 이는 식(5), (6)의 분모에 위치하고 있는 0.5~1Hz 구간에서 최대값을 가지는 진동전달함수  $H(f)$ 의 영향으로 판단된다.

추가적으로 다양한 매개변수 연구 및 가속도증폭계수와 진동전달함수에 대한 검증이 이루어진다면 열차주행속도를 고려한 고속철도교량의 진동사용성 허용치짐을 수식으로서 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 한국철도시설공단, 2007, 호남고속철도설계지침(노반편), 한국철도시설공단.
- European Rail Research Institute (1999) ERRI D 214/RP 9 : Rail Bridges for Speed > 200 km/h Final report, *European Rail Research Institute*.
- 전법규, 김남식, 김성일 (2009) 열차-교량 진동전달특성을 이용한 철도교량의 진동사용성 평가기법, **한국철도학회춘계학술대회 특별세미나·특별/일반세션 논문집**, pp.357-366.
- 전법규, 김남식 (2007) 교량구조물의 진동사용성분석, **한국소음진동공학회논문집**, 17(10), pp. 923-935.
- Nan Zhang (2007) Vehicle-bridge Interaction Analysis under High-speed Trains, *Journal of Sound and Vibration*, 309(3-5), pp.407-425.
- 김성일, 2000, 고속철도 교량의 교량-열차 상호작용해석, **서울대학교**.
- Masamichi Sogabe (2006) 열차의 고속화에 대응한 콘크리트철도교의 동적설계법에 관한 연구, *Railway Technical Research Institute*.