

# 실 고속열차하중을 고려한 이중 리브 아치 교량의 동적해석

## Dynamic Analysis for a Double-Rib Arch Railway Bridge Considering Real High Speed Train Loads

강영종†  
Young-Jong Kang

김정훈\*  
Jung-Hun Kim

신주환\*\*  
Ju-Hwan Shin

이명섭\*\*\*  
Myeong-Sup Lee

### ABSTRACT

High speed railway structure, contact of vehicle needs to design considering the running stability(dynamic behavior). Also, upper structure has to satisfy design standard about moving load, high speed train(KTX). So, the high speed railway structure has to satisfy the requirement of natural frequency, vertical acceleration on deck, face distortion and vertical displacement considering ride comfort, which is suggested Ho-nam high speed railway design standard. In this study, it was investigated and evaluated to the dynamic behavior for a double-rib arch railway bridge subjected to moving load considering real high speed train loads.

### 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 관형교 뿐만 아니라 다양한 형식의 교량으로 설계 및 시공 중에 있다. 이러한 철도 기술은 크게 안전성, 사용성 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)를 지지하는 이중 리브 아치 교량의 동적해석을 수행하여 운행 안정성(동적거동)을 검토 및 분석하였으며, KTX의 실 열차하중을 고려하여 연행이동집중하중을 적용하였다. 또한, 호남고속철도 설계지침에 따라 교량의 고유진동수, 상판 수직가속도, 면틀림 그리고 승차감을 고려한 연직처짐 등을 평가하였다.

### 2. 교량 동적거동 검토방법 및 기준

#### 2.1 교량 동적거동 검토방법

교량의 동적거동 검토 및 평가는 호남고속철도 설계지침을 적용하였으며, KTX의 실 열차하중을 고려하여 연행이동집중하중으로 구조물의 동적거동을 검토하였다. 적용속도는 설계속도(350km/h)의 1.2배인 420km/h 까지의 속도를 적용하였으며, 연행이동집중하중에 의한 동적응답을 산출하여 운행 안정성 여부

† 책임저자 : 정회원, 건축사회환경공학과, 교수  
E-mail : yjkang@korea.ac.kr  
TEL : (02)3290-3317 FAX : (02)921-5166  
\* 정회원, 고려대학교, 건축사회환경공학과, 박사과정  
\*\* 정회원, 한국종합기술, 구조부, 이사  
\*\*\* 정회원, 삼성물산, 건설부문 토목ENG, 부장

를 판단하였다. 동적 하중의 경우 호남고속철도 설계지침에 준하여 연행이동집중하중의 단선재하를 적용하였다.

## 2.2 교량 동적거동 검토기준

호남고속철도 설계지침에 의하면 고속열차(KTX)의 운행 안정성(동적거동)을 평가하기 위한 항목들로 대상 교량의 고유진동수, 상판 수직가속도, 면틀림 그리고 승차감을 고려한 연직처짐 등이 요구된다.

교량의 과도한 유연성을 방지하여 안전성 및 사용성을 확보하기 위하여 고유진동수를 제한하고 있으며, 검토기준은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \cdot 1차 \text{ 횡고유진동수 하한치} : n_0 &= 80/L & L &= 4.0 \sim 20.0m \\ &= 23.58 \times L^{-0.592} & L &= 20.0 \sim 100.0m \end{aligned}$$

교량 상판 수직가속도의 과도한 발생을 방지하여 철도교량의 안전성(궤도의 불안정성, 차륜/레일 접촉력의 감소, 교좌장치의 들림 방지)을 확보하기 위하여 상판 수직가속도를 제한하고 있으며, 검토기준은 콘크리트궤도의 경우,  $5.0m/s^2$ 이다.

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

승차감의 기준은 교량/열차의 상호작용을 수행해야만 얻을 수 있으므로, 이를 대체할 수 있도록 교량 경간길이, 열차속도, 경간 수, 지지형식의 함수로 구성하여 교량의 연직처짐으로 평가하고 있으며, 승차감을 고려한 연직처짐( $L/\delta$ ) 규정은 다음 도표 1과 같다.

도표 1. 최대 연직 처짐 제한 (승차감='매우양호')

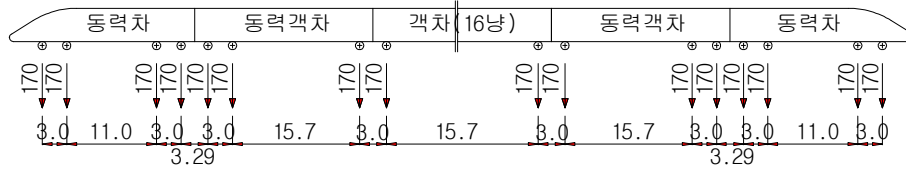
| 구 분    | 거더 또는 부재의 스패ん 길이 L(m) |        |        |        |        |        |        |
|--------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        | 3번이상<br>의<br>단순교      | 10     | 20     | 30     | 40     | 50     | 60     |
| L/1500 |                       | L/1600 | L/1900 | L/2200 | L/2500 | L/2700 |        |
| 70     |                       | 80     | 90     | 100    | 110    | 120    | 130    |
| L/2600 |                       | L/2400 | L/2300 | L/2100 | L/1900 | L/1700 | L/1500 |

## 3. 교량 동적해석(운행 안정성) 및 검토

### 3.1 동적 해석 방법 및 모델

교량의 동적 해석 방법으로는 KTX의 실 열차하중(moving load)을 고려하여 연행이동집중하중으로 구조물의 동적거동을 검토하였다. KTX의 실 열차하중을 적용한 속도의 범위는 충격계수를 고려한 속도(설계속도의 1.2배)인  $420km/h$ 까지 적용하였으며, 동해석 소요시간과 검토할 속도대역에서의 동적영향을 충분히 반영하기 위하여 속도를  $20km/h$ 씩 증가시켜  $20 \sim 420km/h$ ( $20, 40, 60 \sim 380, 400, 420$ )까지 총 21개의 속도에서 동적거동 및 최대 가속도, 면틀림 변위에 대한 시간 이력 해석을 수행하여 이를 분석하였다. 그리고 고유진동수에 따른 동적거동, 차량의 등속운동 및 교량의 감쇠에 따른 동적응답을 검토하였다.

교량의 동적 해석 프로그램으로 LUSAS Version 14.0를 사용하였으며, KTX가 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 수직 가속도, 면틀림 그리고 연직 처짐을 검토하였다.



·열차하중: 170 kN/EA, ·총 열차하중: 170 × 46 = 7820kN, ·총 길이: 388m  
 그림 1. KTX의 실 열차하중 (호남고속철도 설계지침)

동적 재하하중은 KTX의 실 열차하중인 그림 1과 같으며, 검토 대상 교량은 그림 2와 같은 이중 리브 아치교이며, 지간이 130m인 단순교이다. 이에 대한 해석모델은 그림 3과 같이 이중 리브 아치부분은 빔 요소(steel)를 사용하였으며, 고속열차가 통과하는 상부 구조물은 쉘요소(concrete)를 사용하여 모델링하였다.

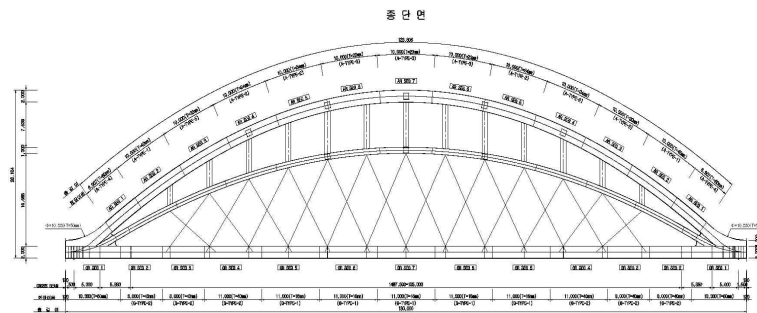


그림 2. 해석 교량: 이중 리브 아치교 1@130, 종단면도

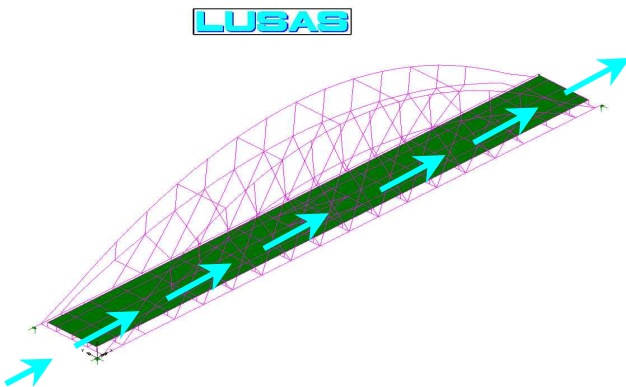


그림 3. 해석 모델 (단순지지)

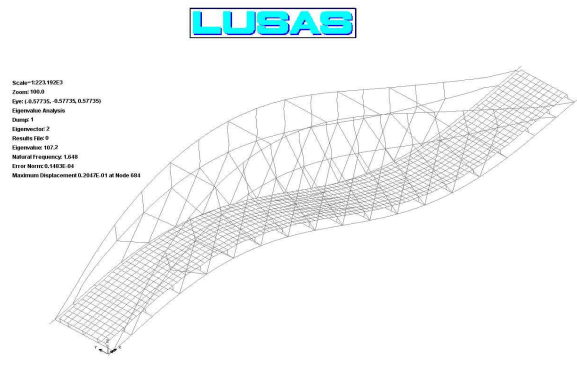


그림 4. 1차 휨고유 진동모드 형상

### 3.2 동적 해석 및 검토

대상 아치 교량의 고유치 해석을 수행한 결과, 고유 진동모드 형상은 그림 4와 같은 형태의 형상으로 나타났으며, 1차 휨고유진동수는 1.648 Hz로 1차 휨고유진동수의 하한치인 1.32 Hz ( $n_0 = 23.58 \times L^{-0.592}$ ,  $L = 130m$ ) 보다 크므로 호남고속철도 설계지침을 만족하였다. 그리고 KTX 실 열차하중(moving load)을 적용한 동적해석을 수행한 결과, 동적 응답이 가장 크게 발생한 교축방향 중앙의 연행이동집중 하중 재하 위치에서 속도별 최대 상관 수직가속도, 면틀림 그리고 연직처짐 및 최대 응답발생 속도 및 최대 속도에 대한 시간 이력을 검토하여 운행 안정성(동적거동)을 평가하였다. 상관 수직가속도의 경우, 속도별 최대 수직가속도는 그림 5와 같으며, 최대 가속도 발생 속도에 대한 시간 이력은 그림 6과 같다. 최대 상관 수직가속도는  $0.590 \text{ m/s}^2$  으로 상관 수직가속도의 상한치인  $5.0 \text{ m/s}^2$ 보다 작으므로 설계지침을 만족하였다. 면틀림의 경우, 속도별 최대 면틀림은 그림 7과 같으며, 최대 면틀림 발생 속도에 대한 시간 이력은 그림 8과 같다. 최대 면틀림은  $0.045 \text{ mm/3m}$ 로 면틀림 상한치인  $1.5 \text{ mm/3m}$ 보다 작으므로

설계지침을 만족하였다. 승차감을 고려한 연직처짐( $L/\delta$ )의 경우, 속도별 최대 연직처짐은 그림 9와 같으며, 최대 연직처짐 발생 속도에 대한 시간 이력은 그림 10과 같다. 최대 연직처짐은 6.87 mm로 최대 연직처짐 상한치인 86.67 mm( $L/1500$ ) 보다 작으므로 설계지침을 만족하였다.

KTX 실 열차하중(moving load)을 적용한 동적해석 결과, 180 km/h 속도대역에서 값이 크게 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 공진이 유발될 수 있는 속도인 임계속도 대역으로 판단되며, 다른 속도대역보다 진동이 크게 유발될 가능성이 높다. 하지만 임계속도 대역에서도 호남고속철도 설계지침을 충분히 만족하므로 동적 안전성 및 사용성에는 문제가 없다고 판단된다.

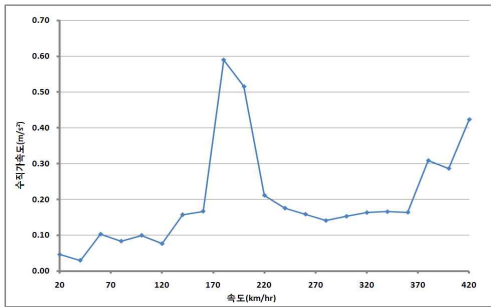


그림 5. 속도별 최대 수직가속도

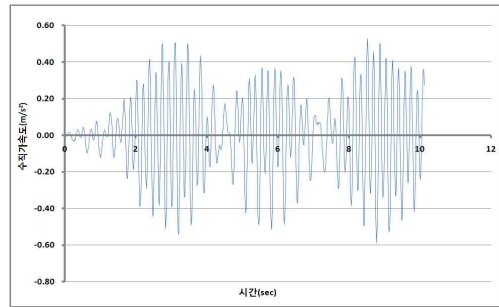


그림 6. 최대 가속도 발생 속도에 대한 시간 이력

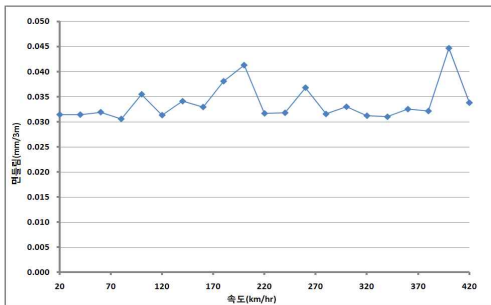


그림 7. 속도별 최대 면틀림

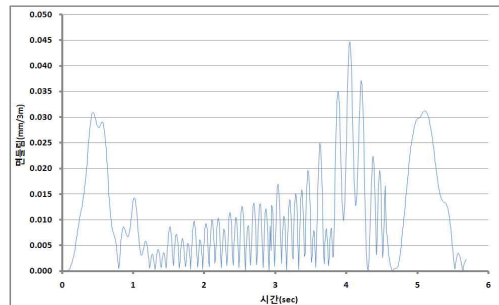


그림 8. 최대 면틀림 발생 속도에 대한 시간 이력

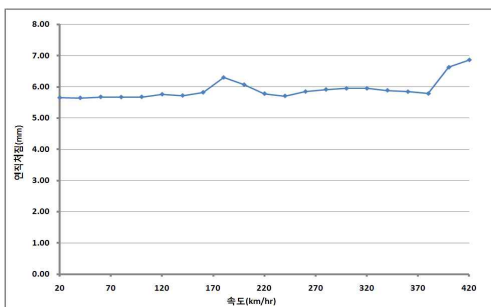


그림 9. 속도별 최대 연직처짐

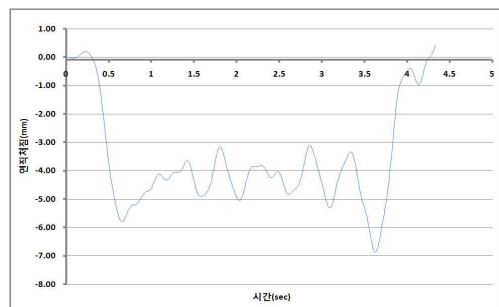


그림 10. 최대 연직처짐 발생 속도에 대한 시간 이력

#### 4. 결론

본 연구에서는 KTX의 실 열차하중을 고려하여 연행이동집중하중으로 교량의 동적거동을 검토하였으며, 호남고속철도 설계지침을 적용하여 대상 이중 리브 아치 교량의 운행 안정성을 평가하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이중 리브 아치 교량의 KTX 실 열차하중을 고려한 동적 해석 및 검토 방법을 정립하였다.
- 2) 고속열차(KTX)의 운행 안정성(동적거동)을 평가하기 위한 항목인 대상 구조물의 고유진동수, 상판 수직가속도, 면틀림 그리고 승차감을 고려한 연직처짐 등은 기준치를 충분히 만족하였다.

- 3) 대상 교량의 모든 동적 응답을 검토한 결과, 대상 아치 교량의 동적거동에 의한 고속열차(KTX) 운행 안정성(동적거동)에는 문제가 없다고 판단된다.
- 4) 대상 교량에서 고속열차를 운행할 때 임계속도로 판단되는 180 km/h 속도대역에서는 다른 속도대역보다 진동이 크게 유발될 가능성이 높지만, 이 속도 대역에서도 호남고속철도 설계지침을 충분히 만족하므로 동적 안전성 및 사용성에는 문제가 없다고 판단된다.

### 감사의 글

“이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R0A-2005-000-10119-0).”

### 참고문헌

1. “호남고속철도 설계지침[노반편]” (2007). 한국철도시설공단
2. “호남고속철도 설계지침[궤도편]” (2007). 한국철도시설공단
3. “고속철도설계기준(노반편)” (2005). 국토해양부
4. “철도설계기준(노반편)” (2004). 국토해양부
5. “철도설계기준(철도교편)” (2004). 국토해양부
6. “LUSAS Version 14.0” (2007). Finite Element Analysis(FEA) software