

# 도시형 자기부상열차 하중을 고려한 철도교량 동적해석

## Dynamic Analysis for Railway Bridge Considering Urban Maglev Train

김정훈\* · 차경렬\*\* · 이응희\*\*\* · 강영종\*\*\*\*

Kim, Jung-Hun · Cha, Kyung-Ryul · Lee, Ung-Hee · Kang, Young-Jong

### 요약

최근 철도는 미래의 핵심교통수단이자 저탄소 녹색성장을 대표하는 교통수단으로 주목받고 있다. 그 중 자기부상열차는 바퀴 마찰에 따른 소음·진동·분진이 없는 차세대 교통수단이며, 이를 지지하는 구조물(교량)은 열차의 운행 안정성(동적거동)을 고려한 설계가 필요하다. 또한, 상부 구조물은 자기부상열차의 연행이동등분포하중을 지지하며, 이러한 하중조건을 갖는 차량이 운행할 때 상부 구조물은 설계기준사항들을 만족해야 한다. 도시형 자기부상철도 토목구조물 설계기준에 의하면 도시형 자기부상철도의 운행 안정성(동적거동)을 평가하기 위한 항목들로 대상 구조물의 고유진동수, 승차감을 고려한 연직처짐 등이 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 자기부상열차의 실 열차하중을 고려하여 연행이동등분포하중으로 철도교량의 동적거동을 검토하였으며, 설계기준을 적용하여 대상 철도교량의 운행 안정성을 평가하였다.

**keywords** : 운행 안정성(동적거동), 자기부상열차, 연행이동등분포하중

### 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, 고속철도와 국철 외에도 우리나라와 세계는 다양한 형태의 철도 운송 산업이 활발히 개발되고 있다. 그 중의 대표적인 것이 지하철, 경전철, 모노레일 그리고 자기부상열차 등일 것이다. 특히, 자기부상열차는 바퀴 대신 전자석의 힘으로 떠서 달리기 때문에 바퀴 마찰에 따른 소음·진동·분진이 없는 차세대 교통수단이다. 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 철도 구조물의 설계가 필요하다. 본 연구에서는 도시형 자기부상열차 하중을 지지하는 철도교량의 동적해석을 수행하여 운행 안정성(동적거동)을 검토 및 분석하였으며, 도시형 자기부상열차의 실 열차하중을 고려하여 연행이동등분포

\* 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정 zamsin97@korea.ac.kr

\*\* (주)현대건설 토목환경사업본부 차장 chacha@hdec.co.kr

\*\*\* (주)삼안 철도구조부 이사 whlee@samaneng.com

\*\*\*\* 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수 yjkang@korea.ac.kr

하중을 적용하였다. 또한, 설계기준에 따라 교량의 고유진동수, 승차감을 고려한 연직 처짐 그리고 수직가속도 등을 평가하였다.

## 2. 교량 동적거동 검토방법 및 기준

### 2.1. 교량 동적거동 검토방법

교량의 동적거동 검토 및 평가는 도시형 자기부상철도 토목구조물 설계기준 및 호남고속철도 설계기준을 적용하였으며, 도시형 자기부상열차의 실 열차하중을 고려하여 연행이동등분포하중으로 구조물의 동적거동을 검토하였다. 적용속도는 최고 설계속도 110km/h 까지의 속도를 적용하였으며, 연행이동등분포하중에 의한 동적응답을 산출하여 운행 안정성 여부를 판단하였다.

### 2.2. 교량 동적거동 검토기준

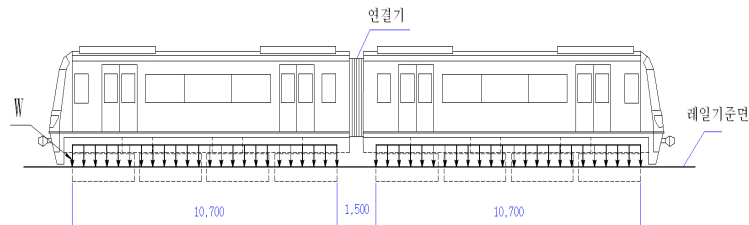
도시형 자기부상철도 토목구조물 설계기준에 의하면 도시형 자기부상철도의 운행 안정성(동적거동)을 평가하기 위한 항목들로 대상 교량의 고유진동수, 승차감을 고려한 연직처짐 등이 요구되며, 수직가속도는 호남고속철도 설계기준을 적용하여 추가적으로 검토하였다.

- 1차 휨고유진동수 하한치 = 5 Hz
- 연직처짐 상한치 : 최고 설계속도 구간 =  $L/3000$ , 일반 설계속도 구간 =  $L/2000$   
→ 자기부상열차의 승차감을 더욱 확보하기 위하여 모든 구간에서  $L/3000$ 으로 평가함.
- 수직가속도 상한치 : 콘크리트궤도 =  $5.0\text{m/s}^2$  (호남고속철도 설계기준 참조)

## 3. 교량 동적해석(운행 안정성) 및 검토

### 3.1. 동적 해석 방법 및 모델

교량의 동적 해석 방법으로는 자기부상열차의 실 열차하중(moving load)을 고려하여 연행이동등분포하중으로 구조물의 동적거동을 검토하였다. 자기부상열차의 실 열차하중을 적용한 속도의 범위는 최고 설계속도 110km/h 까지의 속도를 적용하였으며, 동해석 소요시간과 검토할 속도대역에서의 동적영향을 충분히 반영하기 위하여 속도를 10km/h씩 증가시켜 10~110km/h(10, 20 ~ 100, 110)까지 총 11개의 속도에서 동적거동 및 최대 변위, 가속도에 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 사용하였다.



· 열차하중: 26 kN/m, · 총 열차하중:  $26 \times 26 \times 8 = 540.8 \text{ kN}$ , · 총 길이: 22.9 m

그림 1. 자기부상열차의 실 열차하중 (도시형 자기부상철도 토목구조물 설계기준)

동적 재하하중은 자기부상열차의 실 열차하중인 그림 1과 같으며, 검토 대상 교량은 그림 2와 같은 PSC-U형 거터단면의 철도교량이며, 지간이 30m인 단순교이다. 이에 대한 해석모델은 그림 3과 같이 모두 쉘요소(shell element)를 사용하여 모델링하였다.

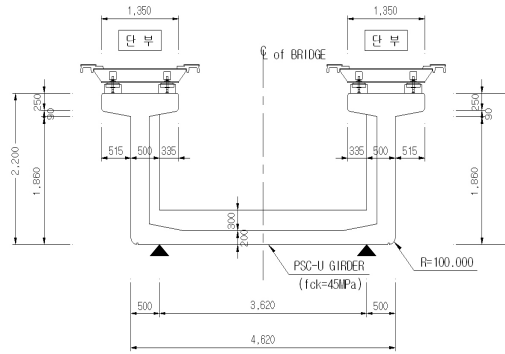


그림 2. 해석 교량: PSC-U형 거터단면 철도교량 1@30, 횡단면도-단부

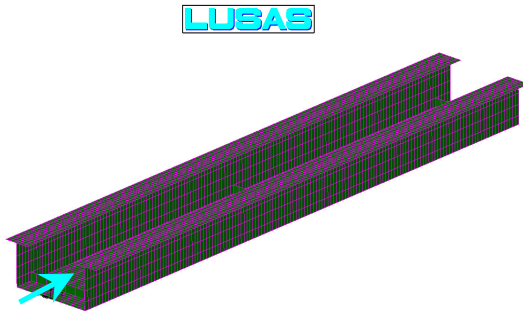


그림 3. 해석 모델 (단순지지)

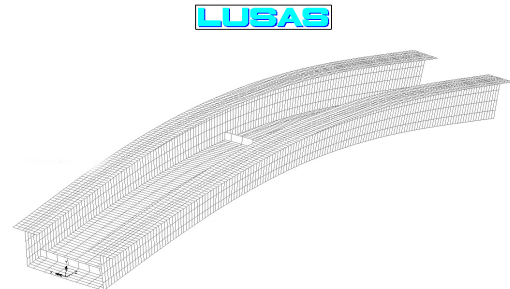


그림 4. 1차 휨고유 진동모드 형상

### 3.2. 동적 해석 및 검토

대상 자기부상열차 철도교량의 고유치 해석을 수행한 결과, 고유 진동모드 형상은 그림 4와 같은 형태의 형상으로 나타났으며, 1차 휨고유진동수는 5.022 Hz로 1차 휨고유진동수의 하한치인 5 Hz 보다 크므로 설계기준을 만족하였다. 그리고 자기부상열차의 실 열차하중(moving load)을 적용한 동적해석을 수행한 결과, 동적 응답이 가장 크게 발생한 교축방향 중앙의 연행이동등분하중 재하 위치에서 속도별 최대 연직처짐 및 상판 수직가속도 그리고 최대 응답발생 속도 및 최대 속도에 대한 시간 이력을 검토하여 운행 안정성(동적거동)을 평가하였다. 승차감을 고려한 연직처짐( $L/\delta$ )의 경우, 속도별 최대 연직처짐은 그림 5와 같으며, 최대 연직처짐 발생 속도에 대한 시간 이력은 그림 6과 같다. 최대 연직처짐은 5.556 mm로 최대 연직처짐 상한치인 10.00 mm( $L/3000$ ) 보다 작으므로 설계지침을 만족하였다. 상판 수직가속도의 경우, 속도별 최대 수직가속도는 그림 7과 같으며, 최대 가속도 발생 속도에 대한 시간 이력은 그림 8과 같다. 최대 상판 수직가속도는  $0.119 \text{ m/s}^2$  으로 상판 수직가속도의 상한치인  $5.0 \text{ m/s}^2$ 보다 작으므로 설계지침을 만족하였다.

자기부상열차의 실 열차하중(moving load)을 적용한 동적해석 결과, 110 km/h 속도대역에서 값이 크게 증가하는 것을 볼 수 있는데 이는 다른 속도대역보다 진동이 크게 유발될 가능성이 높다. 하지만 이처럼 최고 설계속도 110 km/h 속도대역에서도 설계기준을 충분히 만족하므로 동적 안전성 및 사용성에는 문제가 없다고 판단된다.

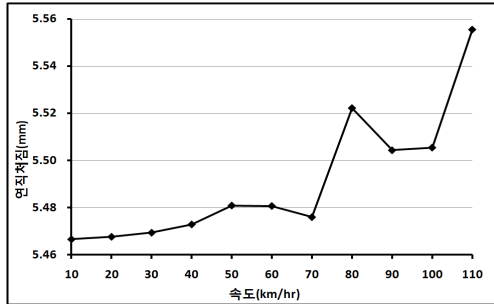


그림 5. 속도별 최대 연직처짐

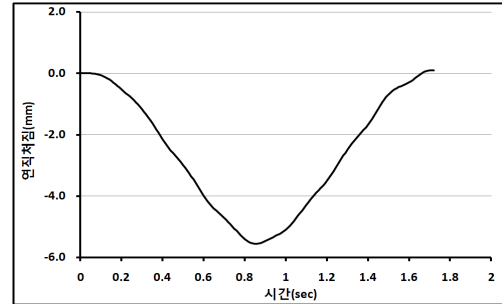


그림 6. 최대 연직처짐 발생 속도에 대한 시간이력

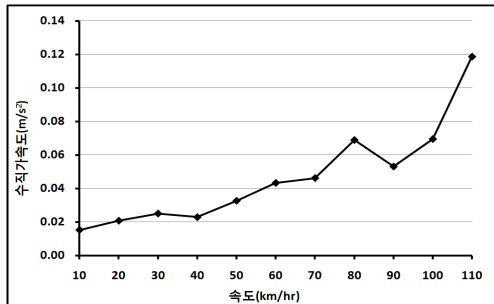


그림 7. 속도별 최대 수직가속도

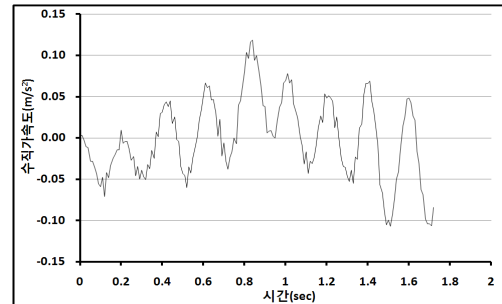


그림 8. 최대 가속도 발생 속도에 대한 시간이력

#### 4. 결론

본 연구에서는 도시형 자기부상열차의 실 열차하중을 고려하여 연행이동등분포하중으로 교량의 동적거동을 검토하였으며, 도시형 자기부상철도 토목구조물 설계기준 및 호남고속철도 설계기준을 적용하여 대상 자기부상열차 철도교량의 운행 안정성을 평가하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 자기부상열차 실 열차하중을 고려한 철도교량의 동적 해석 및 검토 방법을 정립하였다.
- 2) 도시형 자기부상열차의 운행 안정성(동적거동)을 평가하기 위한 항목인 대상 교량의 고유진동수, 승차감을 고려한 연직처짐 그리고 상판 수직가속도 등은 기준치를 충분히 만족하였다.
- 3) 대상 교량의 모든 동적 응답을 검토한 결과, 동적거동에 의한 도시형 자기부상열차의 운행 안정성(동적거동)에는 문제가 없다고 판단된다.
- 4) 대상 교량에서 자기부상열차를 운행할 때 최고 설계속도 110 km/h 속도대역에서는 다른 속도대역보다 진동이 크게 유발될 가능성이 높지만, 이 속도 대역에서도 설계기준을 충분히 만족하므로 동적 안전성 및 사용성에는 문제가 없다고 판단된다.

#### 참고문헌

- 도시형 자기부상열차 실용화 사업단 (2008) 도시형 자기부상철도 토목구조물 설계기준  
 현대로템 (2009) 자기부상열차 상부궤도 설계 요구조건, 1단계 보고서, p.108~146  
 한국철도시설공단 (2007) 호남고속철도 설계기준(노반편)  
 LUSAS Version 14.0 (2007) Finite Element Analysis(FEA) software