

경량전철의 하중체계에 따른 교량의 동적거동에 관한 연구 Dynamic Behavior of Bridge considering Various Light Weight Rail Vehicles

김상수 †, 박용걸*, 김만철**

Sang-Su Kim[†], Yong-Gul Park^{*}, Man-Cheol Kim^{**}

Abstract The purpose of this paper is to establish the design load criteria of light rail vehicles by comparing and analyzing the dynamic behavior of bridges according to vehicle specifications and design load. In this study, readily constructed U Shape PSC Girder(Below Type) bridge was chosen and various commercial light weight vehicles were considered with increasing vehicle speeds. Modal properties were extracted and moving load analyses were performed using mode superposition method. The results were then compared against dynamic guidelines. It is anticipated that comparisons done by this study will be a reference to the design guidelines and design load.

Keywords : light weight train, load, dynamic behavior, moving load analysis, natural frequency

초 록 본 논문의 목적은 경량전철의 설계하중 기준정립을 위하여 차량제원과 설계하중에 따른 철도교량의 동적거동을 비교, 분석하는 것이다. 본 연구에서는 경량전철 하중체계에 따른 교량의 동적거동을 분석하기 위해서 국내 적용사례 중 비교적 슬림한 단면으로 판단되는 의정부 경량전철의 U-형 PSC 하로교를 대상으로 구조물의 동특성을 분석하였다. 또한 국내에 적용된 다양한 경전철 차량하중을 고려한 이동하중 해석을 수행하여 동적거동을 모사하고 차량특성에 따른 상부교량의 동적 안정성을 상호 비교, 분석하였다. 본 연구결과는 향후 경량전철 관련 설계기준 및 하중표준화 시에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 경량전철, 하중, 동적거동, 이동하중해석, 고유진동수

1. 서 론

경량전철은 고가교 형태로 도심지를 통과하는 교통시스템으로 최적의 슬림한 교량형식이 선정되어 도심지 미관 및 보행자의 시야를 확보하여야 한다. 그러나 현재는 경량전철 상부구조를 설계함에 있어 차량제조사에서 제공하는 차량제원과 하중이 상이하고 설계하중에 대한 기준이 정립이 되어 있지 않아 최적설계에 어려움이 있다.

† 교신저자: 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도시스템학과 석사과정
(daebak@kolon.com)

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수 공학박사,

** 한국철도기술연구원 책임연구원 공학박사

본 연구에서는 경량전철 하중체계에 따른 교량의 동적거동을 분석하기 위해서 국내 적용 사례 중 비교적 슬림한 단면으로 판단되는 의정부 경량전철의 U-형 PSC 하로교를 대상으로 구조물의 동특성을 분석하였다. 또한 국내에 적용된 다양한 경전철 차량하중을 고려한 이동하중 해석을 수행하여 동적거동을 모사하고 차량특성에 따른 상부교량의 동적 안정성을 상호 비교 분석하였다. 본 연구에서는 대상교량 및 경량전철 하중체계에 대해 먼저 기술한다. 또한 고려대상 교량의 유한요소 모델링과 열차하중을 고려한 이동하중 해석법에 대해서 다룬다. 마지막으로 임계속도 분석 및 이동하중해석 결과에 근거하여 철도설계기준(2011)에 의거 동적안정성을 평가한다.

2. 경량전철 교량모델 및 하중

경량전철 고가구조물은 도심지를 통과하는 구조물로 도심지의 미관을 고려한 슬림한 구조물의 설계가 요구된다. 본 연구에서는 국내 적용 사례 중 비교적 슬림한 단면으로 판단되는 경간장 30m U-형 PSC 하로교를 대상교량으로 선정하였다. 그림 1은 대상교량의 단면이다.

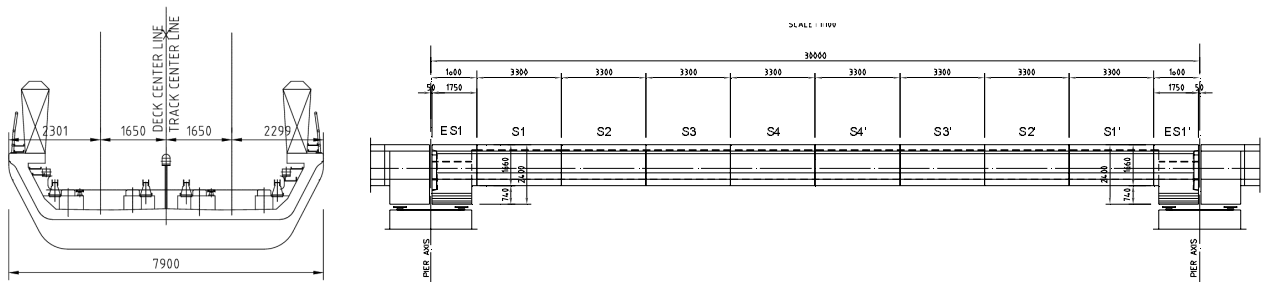


Fig. 1 Cross section and front view of the considered bridge

일반철도는 거더, 슬래브와 침목을 포함한 도상구조물, 실제하중이 전달되는 레일 등으로 구분할 수 있으나, 대상 경량전철 교량의 상부구조물은 U-형 PSC 하로거더와 차량이 주행하는 콘크리트 주행로로 구성되어 있다. 이러한 대상 구조물의 동적 거동을 분석하기 위해서는 실제 거동을 모사할 수 있는 유한요소의 선정이 중요하다. 수치해석을 위해서 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(version 6.71)(ABAQUS, 2007)를 적용하였다.

교량의 거더는 3차원 효과를 고려하기 위해 4절점 쉘요소(ABAQUS S4R5)를 사용하여 이상화하였다. 고무차륜이 주행하는 부분은 2절점 Bernoulli 보요소 (ABAQUS B33)로 모델링하였다. 독립적으로 모델링된 요소를 일체화하기 위해서 거더, 상판을 Rigid Link를 이용하여 일체화하였다. 이는 각기 다른 요소의 절점에 운동학적인 구속을 가하여 변환 행렬을 이용하여 각 자유도의 상관관계를 결정하는 방법이다. 그림 2는 본 연구에서 구현된 유한요소해석 모델이다.

본 연구에서는 표 1과 같이 3개의 경량전철 하중을 고려하였다. 첫번째는 사상~명지 경전철에 적용된 K-AGT 3량 1편성이고 두번째는 의정부 경전철에 적용된 VAL208 2량 1편성이며, 마지막은 용인경전철의 Bombardier 1량 1편성이다.

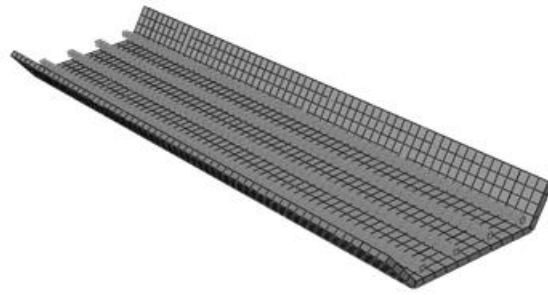

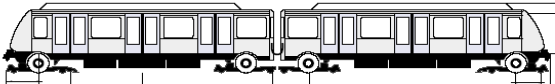
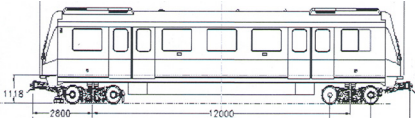


Fig. 2 Finite element modeling locations

Table 1 Considered vehicles of light weight rail

Light weight vehicle	Axle load under full capacity (kN) (Single car weight under full capacity)	Vehicle configuration
K-AGT (3량 1편성)	90 (180)	
VAL208 (2량 1편성)	115.5 (231)	
Bombardier (1량 1편성)	105 (419)	

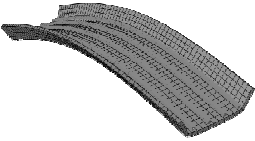
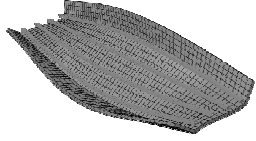
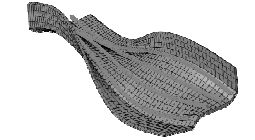
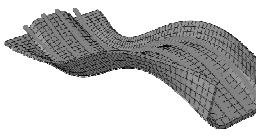
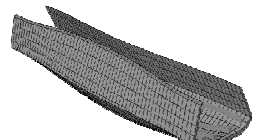
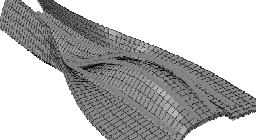
3. 모드해석 및 임계속도 산정

본 연구에서는 Lanczos 알고리즘을 이용하여 자유진동해석을 수행하였다. 자유진동해석 결과, 고차 휨모드 및 비틀모드를 포함한 10차 모드까지의 고유치를 구하였으며, 여기서 얻어진 고유치는 구조물의 고유진동수, 즉, 구조물에 외력과 감쇠가 존재하지 않을 때의 진동수이다. 또한 각 고유치에 대응하는 고유 벡터는 구조물의 진동 모드이다.

표 2는 대상교량의 고유진동수와 이에 대응하는 모드형상을 나타낸 것이다. 첫 번째 휨모드의 고유진동수는 공진에 의한 임계속도를 예측할 수 있으므로 분석이 필요하다. 대상교량은 비교적 슬림한 구조이므로 1차 휨모드는 2.44Hz로 산정되었다.

일부 규정(SYSTRA, 1995)에서는 구조물이 지나치게 슬림해지는 것을 방지하기 위해서 경간장을 함수로 하는 고유진동수 범위를 제시하고 있다. 이를 반영하여 현행 철도설계기준에서는 설계속도 200km/h이하의 일반철도 교량에 대해서 교량의 첫 번째 휨 고유진동수가 3.0Hz이하일 경우에는 동적거동에 대한 검토를 수행하도록 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 대상교량의 설계속도인 80km/h를 상회하는 100km/h까지 열차속도를 10km/h씩 증속해 가며 이동하중해석에 의한 동적안정성 검토를 수행하였다.

Table 2 Results of modal analysis

Mode	Natural frequency (Hz)	Natural mode	Mode	Natural frequency (Hz)	Natural mode
1	2.44		2	2.90	
3	7.58		4	8.30	
5	9.47		6	11.02	

교량의 임의 지점에 대해 열차가 일정한 속도로 주행하는 경우 일정한 타격주기로 교량을 가진다면 주행하중에 의한 공진이 발생할 수 있다. 이때의 열차속도는 임계속도로 유효타격거리(d_{eff})와 구조물의 1차 휨고유진동수(ω_o)로부터 산정할 수 있다.

$$v_{cr} = 3.6\omega_o d_{eff} \quad (1)$$

부임계속도는 임계속도의 정수비로부터 다음과 같이 계산된다.

$$v_2 = \frac{v_{cr}}{i}, \quad i=1, 2, \dots \quad (2)$$

이를 근거로 K-AGT와 VAL208가 일정한 유효타격거리로 주행할 때의 임계속도를 산정하면 표 3과 같다. 밤바르디아 차량은 1량으로 유효타격거리는 존재하지 않는다.

Table 3 Critical speed of each vehicles

Vehicle	ω_o (Hz)	d_{eff} (m)	Critical speed (km/h)		
			Critical speed	1st sub-critical speed	2nd sub-critical speed
K-AGT	2.44	9.64	85	43	28
VAL208		13.27	117	59	39
Bombardier		-	-	-	-

4. 이동하중해석 결과분석

그림 3은 고려대상 경량전철 하중의 이동하중해석 결과로 경간중앙부의 수직처짐, 경간중앙부의 수직가속도, 그리고 면틀림 결과이다. 철도설계기준에서는 설계속도가 200Km/h미만인 대상교량의 최대 허용 수직처짐을 $L/1,300$ 으로 규정하고 있으며 이는 23.08mm이다. 철도설계기준에서는 실제 열차하중에 의해 발생하는 교량 상판의 최대 연직가속도는 콘크리트도상 궤도에서 $5.0m/s^2$ (0.5g)를 자갈도상 궤도에서는 $3.50m/s^2$ (0.35g)를 초과해서는 안 된다고 규정하고 있다. 면틀림은 탈선 위험을 최소화하기 위한 것으로 교량의 교축직각방향 회전에 의한 비틀림 각변화를 제한한 규정으로 허용치는 1.2mm이다. 수치해석 결과 최대 수직처짐, 가속도, 면틀림이 모든 차량에 대해 허용치를 만족하는 것으로 분석되었다.

그림 3은 속도대역 별로 처짐, 가속도, 면틀림의 최대치를 나타낸 것이다. 처짐은 3량 1편성을 고려한 K-AGT가 처짐이 가장 컸으며, VAL208 2편성은 Bombardier 1편성보다 총중량은 약간 무거우나 교량에 하중이 분산되는 효과로 인해 가장 작은 처짐이 발생하였다. 속도대역별 처짐은 K-AGT가 40km/h에서 다소 응답이 큰 것을 알 수 있는데 이는 부임계속도와 비슷한 대역이기 때문으로 판단된다. VAL208과 Bombardier는 90-100km/h 대역에서 처짐증가를 보이는데 이는 임계속도의 영향으로 분석된다. 그러나 이 속도대역은 설계속도를 상회하는 속도대역이며, 설계속도인 80km/h 이하에서는 특징있는 동적응답을 보이지 않았다. 가속도 응답은 모든 차량에서 50-60km/h, 90-100 km/h 대역에서 다소 큰 응답을 보였으며 이는 임계속도와 부임계속도대에 일부 포함되기 때문이다. 면틀림은 K-AGT 차량 주행 시에 50km/h에서 응답이 다소 증가하였으나 허용치에는 57% 정도의 수준으로 안전한 결과이다.

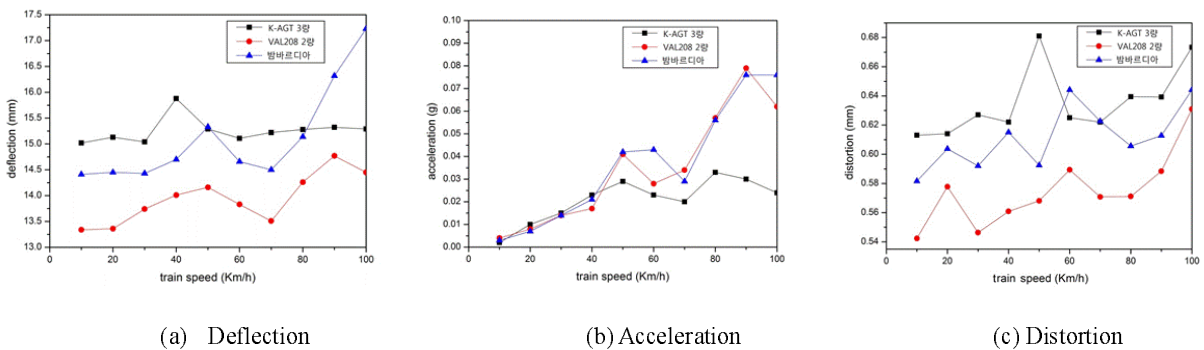


Fig. 3 Results of moving load analysis

그림 4와 그림 5는 VAL208과 K-AGT 차량의 시간대역의 응답을 나타낸 것으로 앞서 언급한 바와 같이 설계속도 이상의 대역에서 다소 공진형태의 응답을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이상에서 분석한 바와 같이 고려대상 교량은 고유진동수가 낮은 슬립한 구조임에도 현재 상용화된 경량전철 차량들에서 동적안정성을 충분히 만족하는 것으로 나타났다.

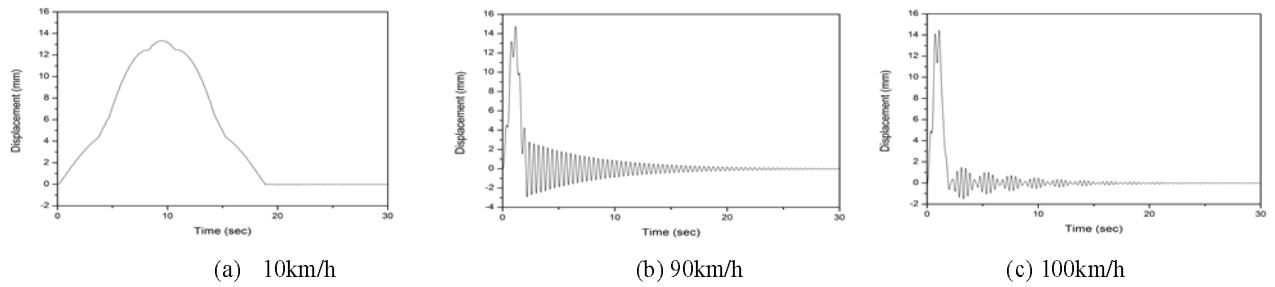


Fig. 4 Deflection time histories of VAL208

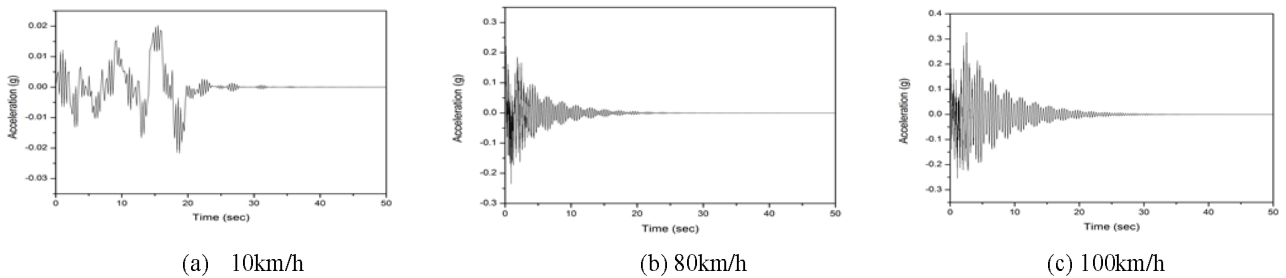


Fig. 5 Acceleration time histories of K-AGT

5. 결론

본 연구에서는 U-형 PSC 하로교 경량전철 교량을 대상으로 현재 상용화된 다양한 차량의 제원 및 하중을 고려하여 이동하중해석을 수행하고 동적안정성 검토결과를 상호비교하였다. 앞선 분석에서와 같이 고려대상 교량은 고유진동수가 낮은 슬림한 구조임에도 현재 상용화된 경량전철 차량에서 동적안정성을 충분히 만족하는 것으로 분석되는 바, 경량전철 교량구조의 추가적인 슬림화를 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구의 연구결과는 향후 경량전철 관련 설계기준 및 하중 표준화 시에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Korea Rail Network Authority (2011), "Design Guideline for Railway Infrastructure" .
- [2] ABAQUS/Standard User' s Manual - Version 6.71. (2007) ABAQUS, Inc., Pawtucket, R.I.
- [3] SYSTRA(1995), "Bridge Design Manual (BRDM) Final Report", Korea High Speed Rail Construction Authority(KHRC)
- [4] Y.B. Yang, J.D. Yau, and L.C. Hsu, "Vibration of Simple Beams due to Trains Moving at High Speeds" , Engineering Structures, Vol.19, No.11, 1997, pp.936 - 944.
- [5] 의정부 경전철 민간투자시설사업 실시설계보고서(2007.4) 제2권 기술자료
- [6] 용인경량전철 민간투자시설사업 토목설계보고서(2005.7.15)
- [7] 사상-명지간 경량전철 민간투자사업 CIVIL 분과보고서