

신형식 PSC 철도교량의 동적성능 평가

Dynamic Performance Evaluation of New Type PSC Railroad Bridges

최 상 현[†]

Choi, Sanghyun

Abstract After the commercial opening of the KTX in 2005, the high speed railroad has been rapidly emerged as the major transportation means due to its high energy efficiency. Recently, the government has announced its plan to build the future transportation system around the high speed railroad. Based on this policy, the existing lines as well as the lines under construction or design are planning to increase design speed. In this paper, the suitability of the mid-span PSC girder bridges for the high speed railroad is evaluated via dynamic analysis. IT, Precom, and WPC girder bridges are considered for the purpose of this study and, for comparison, the identical modeling method and the analysis technique are utilized. The performance indices used for dynamic performance evaluation are the natural frequency, the vertical displacement, the end axial displacement, track irregularity, etc. The KTX train is utilized as a dynamic load, and the dynamic analysis is performed up to the train speed of 420km/hr with the increment of 10km/hr.

Keywords PSC Girder, Dynamic Safety, IT, Precom, WPC

요 지 2005년 KTX 개통이후 고속철도는 친환경적, 고효율 교통 수단으로 급부상하고 있으며, 최근 정부에서도 KTX를 중심으로 미래 교통망을 구축할 것을 계획하고 있다. 이러한 분위기에 부응하여 건설 또는 설계중인 구조물들도 증속에 대비하고 있으며, 기존선의 경우도 개량을 계획하고 있다. 이 연구에서는 최근 개발된 중경간 PSC 거더 교량의 동적안전성 검토를 통하여 고속철도 운행에 따른 적합성을 평가하였다. 연구에 적용된 교량은 IT, Precom, WPC 거더교이며, 동등 비교를 위하여 동일한 모델링 및 해석 기법을 적용하였다. 동적성능 평가에 적용된 지표는 고유진동수, 연직 및 단부 처짐, 단부 축방향 변형, 궤도틀림 등이며, 적용된 하중은 KTX 이동하중이다. 동적해석은 최고속도 420km/hr까지 10km/hr 간격으로 증속하여 수행하였다.

핵심어 PSC거더, 동적안전성, IT, Precom, WPC

[†] 교신저자 : 정회원, 한국철도대학 철도시설토목과 부교수
E-mail : schoi@krc.ac.kr
TEL : (070)8855-1654 FAX : (031)469-2944

1. 서론

2004년 고속철도의 개통과 함께 고속화에 따른 철도의 효율성에 대한 인식 제고 및 기후변화에 따른 고효율 친환경 운송수단에 대한 관심, 에너지 가격의 불안정과 맞물려 철도는 도로 교통을 대체할 새로운 교통수단으로 다시 각광받고 있다. 특히 철도에 대한 전세계적인 관심이 증폭되며 세계 철도시장 규모도 연평균 190조원으로 증가하였으며, 국내 철도 투자 규모도 연평균 6조 원 규모로 상향된 바 있다. 이러한 추세에 부응하여 최근 국토해양부는 고속철도망 구축계획을 통해 전국 주요도시를 90분대로 묶는 철도 중심의 교통망 구축계획을 발표한 바 있다. 이에 따라 기 운영 중인 노선 뿐아니라 설계 중이거나 건설 중인 노선의 교량 및 터널 등의 구조물에 대한 성능 개선의 필요성도 부각되고 있다.

현재 기존 일반철도에 시공되어 있는 철도교량은 대부분 경간 18m 이하의 관형교가 차지하고 있으며, RC 슬래브교 및 T형보교와 같은 콘크리트 교량 역시 대부분 25m 이하의 단지간 교량인 상황이다(한국철도기술연구원, 2006a). 그러나 교량의 설계 및 시공 기술의 발전에 따라 교량은 날로 장경간화하고 있으며, 기존선의 교체 및 신선 구간에는 경간 25m의 PSC(Prestressed Concrete) beam교 및 30m 이상의 Preflex 교량 등이 적용되는 등 교량의 장경간화가 진행되고 있다. 도로의 경우 이러한 장경간화 기술의 중심에는 Precom, WPC, IT 등의 신형식거더가 있다(현대건설주식회사, 2008). 이들 신형식 교량(한국철도기술연구원, 2005a; 2005b; 2006a; 2006b; 2006c; 2007; 2008)들은 주로 PSC기술을 응용한 것으로 도로교에는 이미 50 ~ 60m 지간까지 적용되고 있다. 그러나 철도교의 경우 새로운 형식의 교량을 적용하기 위해서는 진동 특성 및 처짐, 가속도 등의 동적응답과 공진 가능성에 대한 검토가 반드시 필요하다(한국철도기술연구원, 2006a).

이 연구에서는 수치해석을 통하여 Precom, WPC, IT 등 PSC 거더교량의 열차 주행에 따른 동적성능을 검토하고 철도교량에의 적합성을 비교 검토하였다. 수치해석은 먼저 자유진동해석(free vibration analysis)을 통하여 고유진동수 및 진동 모드를 산정하고 열차 주행에 따른 동적응답은 모드중첩법(mode superposition)을 이용한 동적해석을 통하여 수행하였다. 모드중첩법 해석은 10차 모드까지 고려하여 수행하였으며, 검토 대상 교량의 경간은 40m로 1급선에 대한 표준단면을 이용하여 모델링하였다.

2. 동적성능 검토 사항

철도교량에서 동적성능이 매우 중요하게 다루어지는 이유는 철도교량의 경우 도로교와 달리 사하중에 대한 활하중의 비율이 매우 크며 다량의 객차 또는 화차가 일정한 간격으로 고속 주행하기 때문에 발생하는 구조물과 열차하중의 상호작용에 의한 영향이 구조물의 성능에 매우 큰 영향을 미치기 때문이다. 일반 철도교량의 동적성능과 관련된 국내 시방기준으로는 철도건설규칙(2009)과 철도설계기준(2004)이 있고, 고속철도와 관련된 BRDM(Bridge Design Manual)(SYSTRA, 1995), 고속철도설계기준(2005), 호남고속철도 설계지침(2007)이 있으며, 외국의 관련기준으로는 UIC Code 및 Eurocode, 프랑스 기준인 CTRL Technical Standard(1999) 등이 있다. 또한 ERRI(European Rail Research Institute) 보고서에 관련기준 및 설정 근거 등이 제시되어 있다(한국철도기술연구원, 2006a). 철도교량의 동적성능과 관련하여 이 연구에서 검토한 사항은 Table 1에 정리하였다.

3. 교량의 모델링 및 동적해석

3.1 교량 및 열차의 제원

검토 대상 교량 형식은 최근 고속선 적용이 검토되고 있는 Precom, WPC 및 IT거더교로 하였다. 모든 교량은 40m 경간의 1급선에 대한 표준단면으로 하였으며, 콘크리트 도상이 적용된 것으로 가정하였다. Fig. 1은 각 교량 형식의 표준단면이다. 각 교량의 재료 및 기하학적 제원은 Table 2에 요약하였다. 해석에 적용된 열차는 20량 편성 KTX로 축중 크기와 배치는 Fig. 2에 제시하였다.

Table 1. 동적성능 관련 기준 및 40m 경간에 대한 제한값

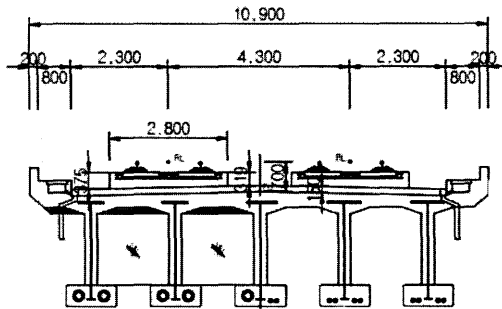
항 목	기 준	관련 근거	40m 경간 제한값
고유진동수	▶ 상한값 : $n_0 = \frac{94.756}{L^{-0.748}}$ ▶ 하한값 : - $4m \leq L \leq 20m$ 인 경우, $n_0 = \frac{80}{L}$ - $20m \leq L \leq 100m$ 인 경우, $n_0 = 23.58 \times L^{-0.592}$	호남고속철도설계지침(2007) UIC Code 776-1R(1994)	2.655Hz ~ 6.002Hz
연직처짐	▶ 주행안전성을 고려한 연직처짐 제한 : 충격계수를 포함한 표준활하중 재하시 $\delta/L = L/1900$ ▶ 승차감을 고려한 연직처짐 제한 : 설계시속 350km, 40m 경간 단순교의 경우 $\delta/L = L/1900$	호남고속철도설계지침(2007)	21.05mm
충격계수	▶ 철근콘크리트 및 PSC교량의 경우 $L \leq 18m$: $i(\%) = 45 - \frac{L^2}{45}$ $L > 18m$: $i(\%) = 24 + \frac{240}{(L-0.6)}$	철도교 설계기준(2004)	30.09%
연직가속도	▶ 주행안정성 검토시 콘크리트도상궤도에서 $5m/s^2$	호남고속철도설계지침(2007)	0.5g
단부교축변위	▶ 궤도/교량 상호작용을 고려한 경우: 8mm 이내 ▶ 궤도/교량 상호작용을 고려하지 않은 경우: 10mm 이내	철도설계편람(2010)	8mm
단부상대수직처짐	▶ 최대시속 160km 이하의 선로 : 3mm ▶ 최대시속 160km 초과인 선로 : 2mm	철도설계편람(2010)	2mm
면틀림	▶ 상판 면틀림의 3m 기준 변화량 : 1.5mm	호남고속철도설계지침(2007)	1.5mm/3m

3.2 교량의 모델링

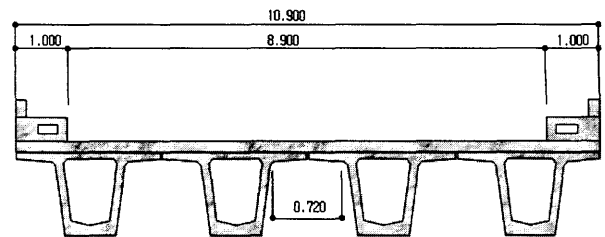
교량은 다양한 방법으로 모델링할 수 있으나, 비교를 위하여 바닥판은 판요소로 레일, 거더, 가로보는 공간보요소로 모델링하였다. 콘크리트 도상은 질량효과만을 고려하여 교량에 대한 모델링 시 포함시켰다. Fig. 3은 Precom거더교에 대한 모델이다. 타 교량형식도 유사한 방법으로 모델링하였으므로 생략하였다. 교량의 감쇠는 공진 발생 시 구조물의 응답에 매우 지배적인 영향을 끼치므로 감쇠비 선정에 신중하여야 한다. 콘크리트 교량의 경우 일반적으로 2% ~ 5%의 감쇠비를 사용하나, 호남고속철도 설계지침은 1%의 하한값을 제시하고 있다. EERI 보고서(1999)에서도 경간 20m 이상의 PSC 교량은 1%를 최소제한치로 규정하고 있다. 이 연구에서는 상기 기준을 참조하여 감쇠비의 최소값인 1%를 적용하였다.

Table 2. 교량의 재료 및 기하학적 제원

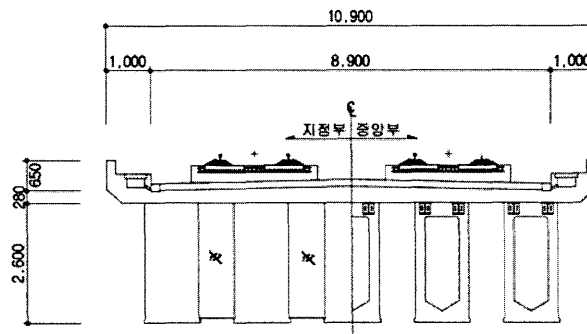
항 목		Precom	WPC	IT
설계지간(m)		38.85	39.90	39.90
형고(m)		2.6	2.5	2.6
거더 수		5	4	5
가로보 수		6	2	5
콘크리트 강도 (MPa)	바닥판	27	27	27
	거더	45	45	40
슬래브 두께 (mm)		280	280	280
단위중량 (kN/m ³)	콘크리트	25	25	25
	도상	23	23	23



(a) Precom거더교



(b) WPC거더교



(c) IT거더교

Fig. 1. 교량의 표준단면

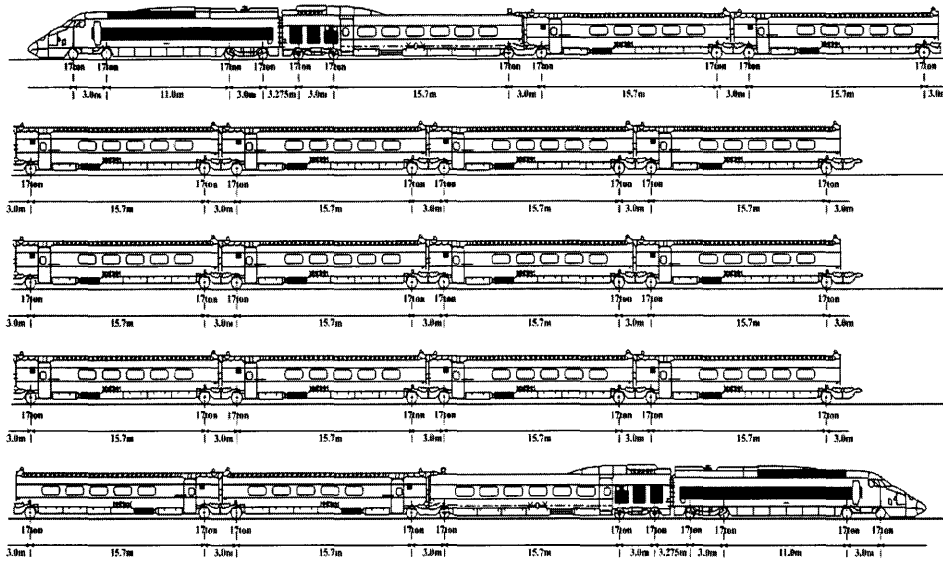


Fig. 2. KTX 축중 배치도

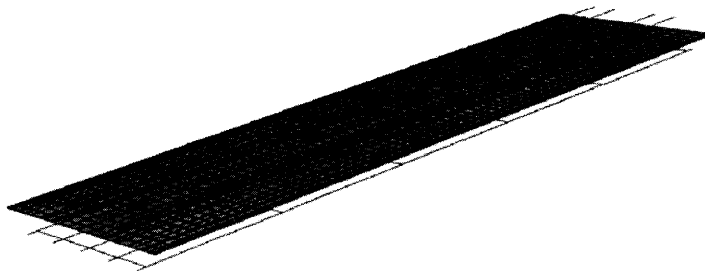


Fig. 3. Precom거터교 모델

3.3 동적해석

교량의 자유진동해석을 수행하여 첫 번째 휨 고유진동수를 구하면 특정 축 간격을 가진 열차하중에 대한 공진 및 공진소멸을 예상할 수 있는 열차 속도를 구할 수 있다. 자유진동해석에 적용되는 고유치해석 기법은 일반적으로 많이 쓰이는 *subspace iteration method*를 사용하였다. 자유진동해석을 통해 구한 고유진동수는 Table 3에 정리하였다. 이동하중해석은 자유진동해석 결과를 이용한 모드중첩법을 적용하였다.

연행하중에 의한 교량의 공진 및 공진 소멸현상을 적용하면 해당 교량과 주행 열차가 정해질 경우 최대응답이 발생할 것으로 예상되는 열차속도(임계속도)를 예상할 수 있으며, 공진소멸 현상이 발생할 수 있는지를 사전에 분석할 수 있다. 유효타격거리는 일반적으로 가장 영향이 큰 대차 중심 간의 거리로 정해지며 객차간의 거리 혹은 대차 내 축간 거리 등이 될 수도 있다. 그러나 기존의 연구결과(김성일 외 2005)에 따르면 공진 및 공진소멸과 직접적으로 관계되는 가장 지배적인 유효타격 간격은 객차간 거리이다. KTX의 유효타격 거리는 18.7m로 적용하였으며 공진소멸현상이 발생하는 경간은 28.05m, 46.75m 등이다.

동적검토는 설계시속 350km의 120%인 420km까지 10km/hr씩 증가시키며 수행하였다. KTX의 경우는 설계시속이 350km이므로 구조적으로 공진을 피하기 어려우며, 이를 피하기 위하여 설계할 경우 과대단면 등 비경제적인 설계가 될 수 있다. 교량의 임계속도는 Precom, WPC, IT거터교에 대하여 각각 188.5km/hr, 206.0km/hr 및 210.2km/hr이다. 임계속도 부근에서는 응답이 크게 증폭되므로 동등한 비교와 과다 해석을 방지하기 위하여 임계속도에서 5km/hr를 더한 속도에서 응답을 추출하였다.

Table 3. 교량의 고유진동수

모 드	Precom	WPC	IT
1	2.80 Hz	3.06 Hz	3.12 Hz
2	3.00 Hz	5.63 Hz	4.59 Hz
3	8.86 Hz	9.96 Hz	9.86 Hz
4	10.1 Hz	10.9 Hz	12.1 Hz

4. 결과분석

동적성능 검토 결과는 Table 4에 정리하였으며, 세 가지 형식 모두 비슷한 성능을 나타내는 것을 볼 수 있다. 공진으로 인한 충격계수의 경우 한계값을 훨씬 상회하는 값을 보이고 있으나, 충격계수 자체가 한계값이라기 보다는 동적효과를 설계에 적용하기 위한 값이므로 안전성 여부는 별도의 검토를 통하여 판단할 필요가 있다. 40m 교량의 경우 KTX 축중 170kN가 동시에 최대 7개 재하될 수 있어 총 1,190kN가 작용할 수 있으나, 설계에 적용되는 HL 표준활하중은 4개의 250kN 집중하중과 분포하중 80kN/m의 75% 및 충격계수 5.82%를 고려하면 총 3,192kN이므로 동적증폭효과는 3,192/1,190하면 268%까지 허용될 수 있다. 이러한 간략계산 결과를 고려할 때 현재의 충격계수값은 교량의 안전에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

Table 4. 동적성능 검토 결과

모 드	한계값	Precom	WPC	IT
고유진동수 (Hz)	2.655 ~ 6.002	2.80	3.06	3.12
연직처짐 (mm)	21.05	9.26	8.00	7.24
충격계수 (%)	30.09	69.0	126	126
연직가속도 (g)	0.5	0.16	0.19	0.18
단부교축변위 (mm)	8.0	1.56	1.54	1.44
단부상대수직처짐 (mm)	2.0	0.41	0.29	0.27
면틀림 (mm/3m)	1.5	0.19	0.12	0.17

5. 결론

이 연구에서는 주기적인 열차의 동적하중에 의한 Precom, WPC, IT거더 등 신형식 철도교량의 거동을 검토하여 동적성능 및 사용성 관련 기준 만족 여부를 확인하였다. 검토된 철도교의 경간은 40m 이며, 검토한 동적 성능검증 항목으로는 설계변수와 관련된 고유진동수, 주행안전성과 관련된 상판의 연직가속도, 단부교축변위, 상판의 면틀림, 그리고 승차감과 관련된 경간 중앙부 연직처짐이다. 열차하중에 의한 동적증폭 효과와 기타 동적 거동 특성을 확인하기 위해 20량 KTX 1편성을 단선 재하 하였으며, 열차의 속도는 10km/h씩 증속하여 420km/h까지 수행하였다.

신형식 PSC거더의 철도교 적용성을 검토한 결과 공진에 의한 응답 증폭효과는 있었으나 동적성능 검증 기준을 대부분 만족하

고 있는 것을 확인하였다. 공진으로 인한 동적증폭효과로 인하여 충격계수값이 크게 증폭되는 것으로 나타났으나, 간략한 검토를 통하여 안전성에는 지장이 없음을 확인하였다. 이상의 검토 결과를 고려할 때 Precom, WPC, IT거더교 등의 신형식 PSC거더교량은 경간 40m의 철도교량에 적용해도 동적 성능이 확보될 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Channel Tunnel Rail Link (CTRL) (1999). Technical Design Standard - Loading & Particular Criteria for CTRL Railway Bridges.
- [2] ERRI D 214 RP9(1999). Rail Bridges for Speeds $v > 200$ km/h. European Rail Research Institute.
- [3] SYSTRA (1995). Bridge Design Manual (BRDM). Final Report, Korea High Speed Rail Construction Authority(KHRC).
- [4] UIC Code 776-1R (1994). Loads to Be Considered in Railway Bridge Design. 4th edition, International Union of Railway.
- [5] 국토해양부 (2009). 철도건설규칙. 국토해양부령 제163호.
- [6] 대한토목학회 (2004). 철도설계기준.
- [7] 연세대학교 (2009). IT Girder의 정적 성능평가. 한국괴사.
- [8] 한국철도기술연구원 (2005a). Precom 거더 철도교량 동적거동 분석에 관한 연구.
- [9] 한국철도기술연구원 (2005b). SCP 교량 성능검증시험 및 동적거동 분석에 관한 연구.
- [10] 한국철도기술연구원 (2006a). IPC거더 동적거동 분석에 의한 철도교량 적용성에 관한 연구.
- [11] 한국철도기술연구원 (2006b). 신형식 강합성 거더 교량과 궤도와의 상호작용 및 적용성 검토.
- [12] 한국철도기술연구원 (2006c). PPC 교량의 동적 성능 검증 분석에 의한 철도교 적용성 연구.
- [13] 한국철도기술연구원 (2007). PSC e-beam 철도교량의 실물모형 시험 및 동적성능평가 연구.
- [14] 한국철도기술연구원 (2008). WPC 교량의 동적성능 검증 분석에 의한 철도교 적용성 연구.
- [15] 현대건설주식회사 (2008). 중지간 교량의 시공 및 구조 효율성 증진을 위한 신형식 상부구조 시스템 실용화. 국토해양부, 한국건설교통기술평가원.
- [16] 한국철도기술연구원 (2005a). Precom 거더 철도교량 동적거동 분석에 관한 연구.
- [17] 한국철도시설공단 (2005). 고속철도설계기준 (노반편).
- [18] 한국철도시설공단 (2007). 호남고속철도 설계지침 (노반편).
- [19] 한국철도시설공단 (2010). 철도설계편람 (궤도편), 노해출판사.

- ▶ 논문접수일 : 2011년 10월 13일
- ▶ 심사의뢰일 : 2011년 10월 14일
- ▶ 심사완료일 : 2011년 10월 28일