

현장계측자료를 이용한 고속철도교량의 동적거동특성 Dynamic Behavior of KTX Bridges Using Field Test Data

임명재*
Yim, Myoung-Jae

최일윤**
Choi, Il-Yoon

이준석***
Lee, Jun S

이현석*
Lee, Hyun-Suk

ABSTRACT

High-speed railway bridges subject to effect of dynamic loads by interaction between vehicle load which run specially fast and behavior of bridges. Such dynamic load effects result in fluctuations and fatigues to each elements as well as whole conduct of bridges, and is influenced in life of bridges. For these reason, Analysis and estimation of data about dynamic behavior of bridges occupies important factor in that estimate the remaining life of bridges and select the maintenance, repair and retrofit. In this paper, Analysis for the dynamic behavior of bridges using displacement and acceleration data that is actuality measure data to the bridges of Seoul-Busan high speed railroad test section has been made.

1. 서론

경부고속철도사업은 core system을 기반으로 하여 차량 계통은 프랑스의 기술을 도입하고, 노반, 궤도, 구조물 등의 기반시설은 국내의 기술을 바탕으로 설계 및 시공하였으며, 2004년 일부구간에 대한 우선 개통을 예정으로 고속철도열차(KTX) 차량이 시운전을 행하고 있다. 1992년 고속철도사업이 시작된 이래로 고속철도교량은 주행차량에 의한 동적거동 해석방법에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있으나(최창근, 2000; 김만철, 2003 등), 실제 주행하는 KTX와 고속철도교량의 상호작용으로 인한 거동특성에 대한 국내의 자료가 미흡한 면이 있었다. 이에 고속철도구조물의 실제 설계의도와 안전성 확보를 위한 유지관리 방안마련을 위한 구조물의 거동자료의 확보를 위하여 경부고속철도 시험선 구간에 교량 구조물에 상시자동계측시스템을 구축하여 원격모니터링을 수행함으로써(이준석, 1998~2003) 다소의 실제 계측 자료를 확보할 수 있게 되었다.

철도교량은 주행차량에 의해서 동적인 효과를 받게 되는데, 이러한 효과는 교량 각 부재에 충격과 피로를 유발하고, 교량의 잔존수명에 영향을 미치게 된다. 특히, 중량의 열차가 고속으로 교량상을 주행하는 경우에는 도로교 및 기존 재래선의 일반열차와는 상이한 진동 특성을 보여줄 것이다. 따라서 고속철도교량의 구조적 안전성 및 주행안전성을 확보하기 위해서는 차량/궤도/교량의 상호작용에 의한 고속철도 주행에 따른 교량의 정확한 동적거동특성을 분석하는 것이 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 고속철도구조물의 설계 및 시공의 검증과 유지관리 방안마련을 위한 구조물 거동자료의 확보를 위한 고속철도열차의 속도별 주행에 따른 교량의 변위 및 가속도 현장계측 Data를 이용하여 고속철도구조물의 고유진동수 및 충격계수 등의 동적거동특성을 분석하고자 한다.

* 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

** 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

2. 현장계측자료

2.1 대상교량 및 열차

현장제하 시험은 여객 및 화물하중을 제외한 KTX 실 열차하중을 이용하여 의사정적 및 동적 주행시험을 실시하여, 고속열차의 주행에 따른 고속철도교량의 동적거동 자료를 확보하였다. 측정대상교량은 경부고속철도 시험선 구간의 연제교(2@40m, PSC BOX교)와 오송정차장(3@25m, PSC BOX교)를 선정하였으며, 실제 KTX의 주행거동특성을 얻기 위하여 측정방법은 최대처짐 및 진동이 발생할 것으로 예상되는 부위를 측정지점으로 선택하여 A-A단면과 B-B단면에 처짐 및 가속도 센서 등을 그림 1 및 그림 2와 같이 부착하였다. KTX의 주행속도별 동적거동 특성을 규명하기 위하여 KTX를 의사정적재하시험(5km/h)에서 부터 300km/h까지 속도를 증가시켜 주행하고 응답을 측정하였다.

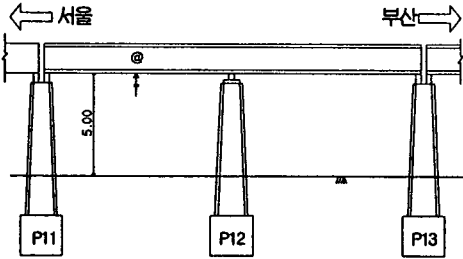


그림1. 연제교 센서부착위치

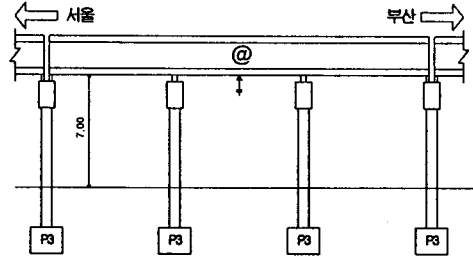


그림2. 오송정차장 센서부착위치

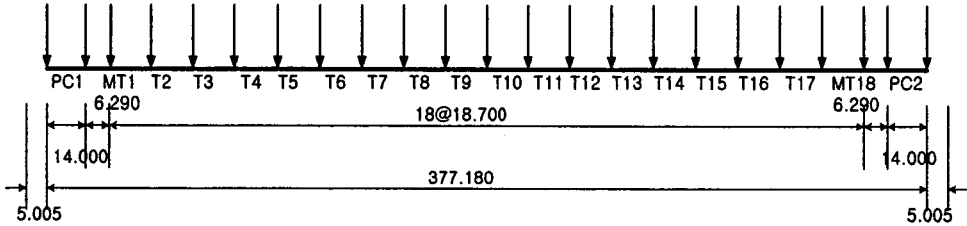


그림 3. KTX 활하중 모형

3. KTX 주행에 의한 고속철도 교량의 동적거동특성

3.1 속도별 동적거동 계측결과

KTX의 운행속도는 수치해석 및 기존 실험 결과를 바탕으로 하여 약 250km/h에서 실제 주행속도인 300km/h 사이에서의 동적효과를 자세히 조사하기 위해서 해당 속도대역에서는 약 10km/h 단위로 증가하면서 계측을 시행하였다. KTX의 속도별 주행에 따른 연제교와 오송정차장의 수직변위와 진동 가속도의 계측결과를 그림 4와 표 1에 나타내었다.

그림 4에서 알 수 있는 바와 같이, 2@40m 교량의 경우, KTX가 278km/h로 주행하는 경우에 연직 변위 및 연직 가속도가 크게 증가하고 있는데, 이는 공진(Resonance)현상에서 비롯된 것으로 판단된다. 수치해석결과에 의하면 1차모드의 고유진동수가 4.75Hz이었으나, 실제 계측결과에 의한 스펙트럼 분석결과에 의하면 4.22Hz로 나타났다. 수치해석시 도상자갈, 난간 및 전차선 등의 교량 상부의 사하중을 다소 과소평가하여 수치해석에 의한 1차 모드의 고유진동수가 다소 크게 산정되어 실제 계측치와는 다소의 차이를 갖는 것으로 판단된다.

주파수응답함수(Frequency Response Function, FRF)의 개념을 도입하여 해당 교량의 고유진동수를 조사하기 위하여, 열차 주행속도로부터 입력하중의 가진주파수를 계산하면, KTX의 관절형 대차간 거리(18.7m)와 주행속도의 관계식으로부터 278km/h 주행시 차량의 크로스링진동수(Crossing frequency)는

4.130Hz이다. 즉, 278km/h 주행시험에서 교량에서 발생한 응답의 스펙트럼 분석결과와 가진하중의 주파수가 비슷한 대역에 있으며, 이때에 공진현상에 의하여 응답이 크게 증가하였다. 즉, 최대 응답의 크기가 증가할 뿐만 아니라 열차통과 후에도 상당히 큰 여진동이 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 공진현상은 구조물의 수명을 단축시킬 우려가 있으며 또한 승차감의 저하를 유발할 수 있다. 다만, 해당 교량에서 KTX의 정상운행 속도가 300km/h이므로 278km/h 주행시 보다 FRF의 값이 감소되어 공진현상이 큰 문제가 되지 않으리라 판단된다. 그러나, 운행 속도를 줄여서 278km/h 근방의 속도로 감속운행하는 경우에는 해당 교량에 악영향을 줄 우려가 있다.

표 1. 속도별 수직변위 및 진동가속도

구분		연 계 교				오 승 정 차 장			
		치침값 (mm)		진동가속도 (g)		치침값 (mm)		진동가속도 (g)	
		최대치	충격계수	최대값	최소값	최대치	충격계수	최대값	최소값
5km/h	부산→서울	0.8522	-	0.0023	-0.0054	0.2203	-	0.0105	-0.0004
	서울→부산					0.2279	-	0.0988	-0.0023
50km/h	부산→서울	0.8297	-	0.0089	-0.0101	0.2376	0.0785	0.0143	-0.0105
	서울→부산	0.8349	-	0.0085	-0.0109				
100km/h	부산→서울	0.8267	-	0.0120	-0.0136	0.2346	0.0649	0.0399	-0.0411
	서울→부산								
150km/h	부산→서울								
	서울→부산	0.8260	-	0.0372	-0.0333	0.2294	0.0066	0.0492	-0.0349
200km/h	부산→서울	0.8334	-	0.0364	-0.0415	0.2099	-	0.0593	-0.0523
	서울→부산								
250km/h	부산→서울								
	서울→부산	0.8822	-	0.0322	-0.0372	0.2174	-	0.0755	-0.0503
260km/h	부산→서울	0.9361	0.0985	0.0337	-0.0411	0.2353	0.0681	0.0550	-0.0608
	서울→부산								
270km/h	부산→서울	0.9721	0.1407	0.0314	-0.0395	0.2016	-	0.0461	-0.0562
	서울→부산	0.8657	-	0.0415	-0.0333	0.2391	0.0491	0.0593	-0.0542
278km/h	부산→서울	1.1917	0.3984	0.0438	-0.0496	0.2323	0.0545	0.0492	-0.0527
	서울→부산								
290km/h	부산→서울								
	서울→부산	0.9436	-	0.0415	-0.0504	0.2338	0.0259	0.0531	-0.0414
300km/h	부산→서울								
	서울→부산	0.8889	-	0.0376	-0.0492	0.1859	-	0.0534	-0.0383

3.2 충격계수의 검토

동적거동의 특성의 규명은 정적거동의 경우 보다 다소 복잡하므로, 설계에서는 충격계수를 이용하도록 시방서에 규정하고 있다. 본 논문에서는 속도별 측정 치침이력곡선으로부터 충격계수를 산정하고, 이를 고속철도시방서(고속철도사업기획단, 1991)와 비교하였다. 고속철도교량 설계 시방서에는 다음과 같이 충격계수를 구하도록 규정하고 있다.

$$i_m = \frac{1.44}{\sqrt{L_c - 0.2}} - 0.18$$

여기서, L_c 는 충격계수를 산정할 때의 특정길이로써,

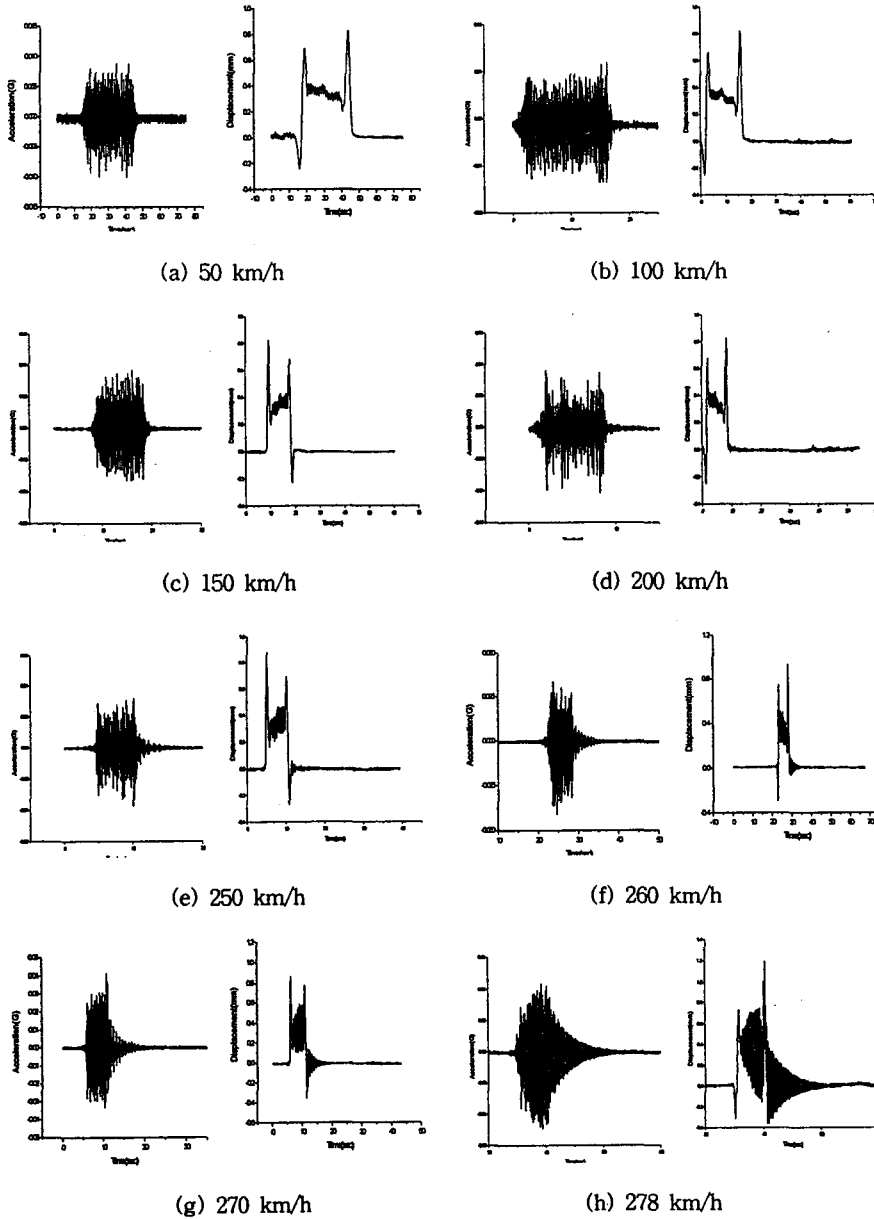
2경간 연속교의 경우; $L_c = 1.2 \times$ 지간길이

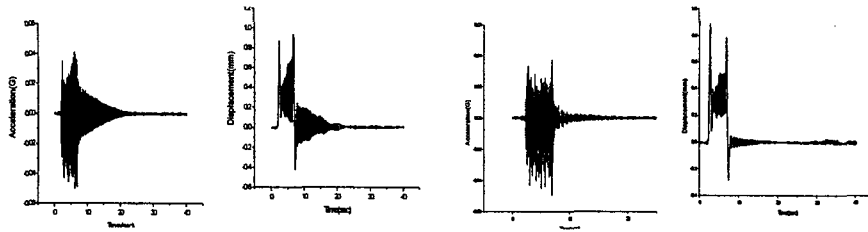
3경간 연속교의 경우; $L_c = 1.3 \times$ 지간길이

로 구한다. 연계교 및 오승정차장에 대해 윗식을 이용하여 충격계수를 구하면, 각각 0.035와 0.082

가 된다.

표 1에서 실측 충격계수는 연제교의 경우, 278km/h 주행속도대역에서 0.3984로써 설계충격계수보다 크게 나타났다. 즉, 설계시방규정은 충격계수를 다소 과소평가하고 있음을 알수 있다. 따라서, 이에 대해서는 향후 지속적인 연구와 검토가 필요할 것으로 판단된다.





(i) 290 km/h (j) 300 km/h

그림 4. 속도 대역별 가속도파형 및 수직변위

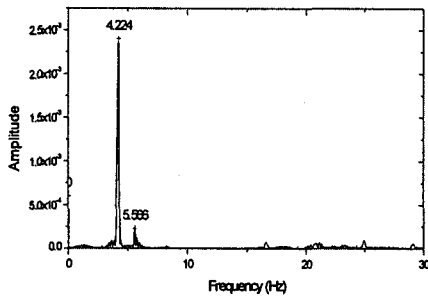
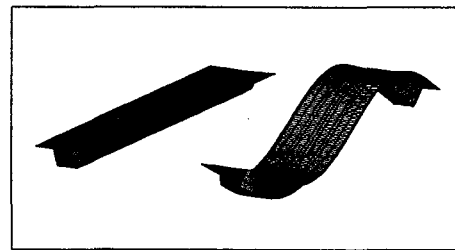


그림 6 스펙트럼분석결과(278 km/h)



고유진동수(4.75Hz)

그림 6. 해석 진동모드

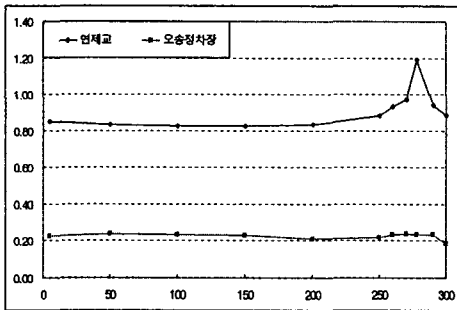


그림 7. 수직변위

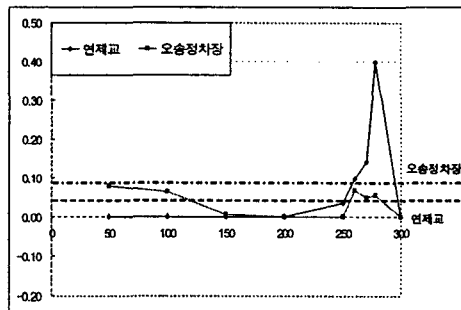


그림 8. 충격계수

4. 결론

이상과 같이 고속철도교량의 속도 대역별 KTX 주행시 동적 거동특성을 실제계측자료를 바탕으로 속도별 수직변위와 진동가속도, 충격계수의 값으로 나타내었다. 특정 속도 대역에서는 KTX의 주행에 따라 고속철도교량의 응답이 크게 증폭되고 여진동이 발생하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 지방서의 충격계수와 실제 측정충격계수와 비교하였다. 현장계측데이터를 바탕으로 고속철도교량의 동특성을 분석한 결과, 해당분야에 대한 향후의 지속적인 연구와 검토가 필요할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 김만철(2003), 고속철도 교량의 동특성 해석을 위한 준3차원 차량/궤도/교량 상호작용 해석기법 개발, 한국전산구조공학회 논문집, 제16권 제2호, pp141-151

2. 오지택 등(2001), 열차유형에 따른 판형교의 정적거동에 대한 연구, 한국철도학회 추계학술대회
3. 李俊錫, 崔一允 등(1998~2000), 고속철도 선로구조물 성능확보를 위한 구조물 계측 및 평가시스템 개발, 연구보고서, 한국철도기술연구원
4. 李俊錫, 崔一允 등(2002), 수동계측, 계측센서 및 설비점검 보고서, 연구보고서, 한국철도기술연구원
5. 최창근 등(2000), 고속철도차량(TGV)-교량 상호작용의 단순화된 3차원 해석모델, 한국전산구조공학회 논문집, 제13권 제2호, pp165-178
6. J. S. Bendat(1980) *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. JOHN WILEY & SONS
7. D. J. Ewins (1986), *Modal Testing : Theory and Practice*. JOHN WILEY & SONS