

무도상 판형교의 동적거동특성 분석을 위한 실험적 연구

Field Test to Investigate Dynamic Characteristics of Steel Plate Girder Railway Bridges without Ballast

최진유*, 오지택**, 김현민***, 이상배****
Choi, Jin-Yu Oh, Ji-Taek Kim, Hyun-Min Lee, Sang-Bae

Abstract

Field measurements were conducted to analysis dynamic characteristics of existing steel plate girder railway bridges without ballast. Three bridges which have 9m, 12m, 18m span length in Kyoung-Bu and Ho-Nam Line were selected for test. According to the each bridge, dynamic vertical deflections and vertical and horizontal accelerations were measured. Natural frequencies, vertical deflections and accelerations obtained from field tests were compared with the limit value specified in the UIC, Japanese and Korean railway bridge specification.

1. 서론

판형교는 철도교량의 초기 형태 중의 하나로서 도상이 없이 거더에 침목이 직결되는 형태로 차량의 주행하중이 교량에 직접 전달되는 특성을 가지고 있어 교량에 가해지는 충격이 크고, 소음도 크게 발생하게 된다. 판형교는 유도상 교량과는 달리 상부구조가 차량의 중량에 비해 매우 가볍기 때문에 차량의 종류나 주행특성에 따라 동적응답이 민감하게 변화하고 교량에 놓인 레일이나 침목, 보조레일, 교축보도, 기타 부착물 등도 교량의 진동특성에 적지 않은 영향을 미치게 되므로 유도상 교량에 비하여 복잡한 동적응답 특성을 보인다. 또한 레일 이음매의 위치와 상태, 교량진출입부의 강성차이, 케도틀립 등도 판형교의 동적응답에 민감한 요소로 작용하므로 현장측정을 통한 정확한 동특성의 파악이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 판형교의 동적거동특성을 알아보기 위한 현장계측을 수행하였다. 판형교는 경간길이와 강성비에 따라 동적응답특성이 민감하게 변화하기 때문에 현재 공용중인 판형교 중에서 가장 많은 비율을 차지하는 9m, 12m, 18m의 교량을 우선적으로 선정하였다. 계측항목은 동적수직처짐, 수직·수평 진동가속도를 계측하였으며, 계측된 자료를 분석하여 교량별로 고유진동수와 동적수직처짐 그리고 진동가속도를 유럽과 일본, 그리고 한국의 설계기준에서 제시되어 있는 한계치들과 비교분석하였다.

* 한국철도기술연구원, 철도토목연구팀, 선임연구원, 공학박사, 031)461-8531(284), jychoi@krri.re.kr

** 한국철도기술연구원, 철도토목연구팀, 팀장, 공학박사, 031)461-8531(281), jtoh@krri.re.kr

*** 한국철도기술연구원, 철도토목연구팀, 연구원, 공학석사, 031)461-8531(282), hmkim@krri.re.kr

**** 철도청, 고속철도운영본부, 시설과, 도목주사, 공학사, 02)3149-3557, kvictor@hanmail.net

2. 현장 계측

주행열차에 의한 진동 및 처짐특성을 분석하기 위하여 교량중앙부에서의 좌·우측 거더의 수직 처짐 및 수직·수평 진동가속도를 측정하였으며, 주행열차에 의해 교량에 가해지는 실제 하중을 파악하기 위한 윤중과 횡압을 측정하였다. 측정대상교량에 대한 기본적인 사항은 표1에 나타난 바와 같으며, 각 측정항목에 대한 센서 부착위치는 표2와 같다. 측정 방법은 1개소 측정시작 후 18시간~24시간 동안 통과하는 모든 열차에 대하여 신호를 수집하였다. 원칙적으로는 시험열차운행을 통하여 각각의 차량종류별로 속도대역을 변화시켜가면서 계측을 수행하여야 하지만 현장여건상 시험열차운행은 하지 못하였기 때문에 우선적으로 실제 주행열차가 미치는 영향을 파악하기 위하여 운행열차들에 대한 응답을 계측하였다. 각 교량별로 계측한 열차의 종류별 통과횟수 및 통과속도는 표3과 같다. 그림 1~그림 6은 각 교량별로 PMC 새마을호 열차의 수직변위의 시간이력과 수직방향의 가속도의 FFT(Fast Fourier Transform)를 통한 주파수이력의 일례를 나타낸 것이다.

표 1. 계측대상 교량

구분	선별	연장(m)	경간 구성	설계 하중
9m 교량	호남선	39.94	9.14×4	L22
12m 교량	경부선	52.00	11.50×1+11.60×1+11.90×2	L22
18m 교량	경부선	38.26	17.75×2	L22

표 2. 위치별 부착센서

위 치		항목	센서 제원.
레일	내측	윤중	윤중게이지
	외측	윤중	
Plate Girder	좌측하부 Flange	수직방향진동가속도	5G 가속도계
		수평방향진동가속도	5G 가속도계
		수직변위	변위계(20mm)
	우측하부 Flange	수직방향진동가속도	5G 가속도계
		수평방향진동가속도	5G 가속도계
		수직변위	변위계(20mm)

표 3. 열차의 종류별 통과횟수 및 통과속도

교량	차량종류	통과횟수	통과속도(km/hr)
9m 교량	PMC새마을 16량 편성	-	110~123
	PMC새마을 8량 편성	3	
	디젤2량견인 무궁화	1	
	디젤1량견인 무궁화	16	84~136
	디젤1량 견인 화물	1	
	기타	2	63~112
계	23		
12m 교량	PMC새마을 16량 편성	8	52~72
	PMC새마을 8량 편성	13	
	디젤2량견인 무궁화	11	55~75
	디젤1량견인 무궁화	24	
	디젤1량 견인 화물	35	
	기타	3	35~59
계	94		
18m 교량	PMC새마을 16량 편성	10	68~118
	PMC새마을 8량 편성	14	
	디젤2량견인 무궁화	8	48~115
	디젤1량견인 무궁화	26	
	디젤1량 견인 화물	22	
	기타	5	26~89
계	85		

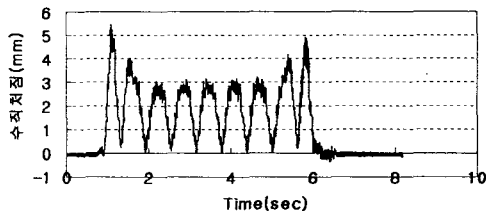


그림 1. 수직변위의 시간이력 (9m)

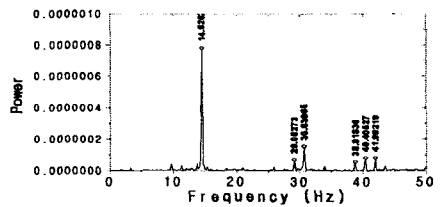


그림 2. 수직가속도의 주파수 이력 (9m)

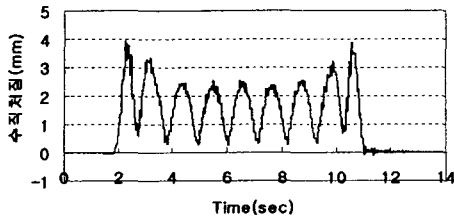


그림 3. 수직변위의 시간이력 (12m)

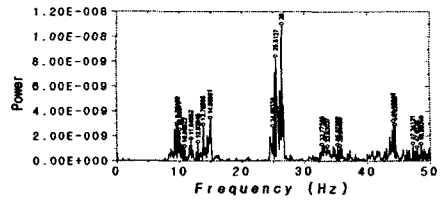


그림 4. 수직가속도의 주파수 이력 (12m)

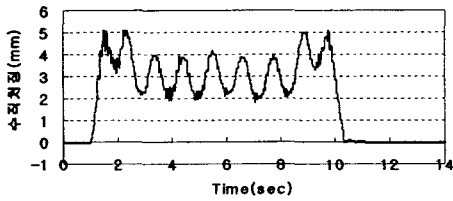


그림 5. 수직변위의 시간이력 (18m)

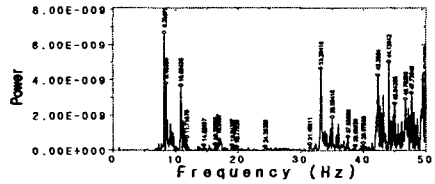


그림 6. 수직가속도의 주파수 이력 (18m)

3. 계측결과 분석

본 절에서는 현장계측의 결과를 분석하였다. 먼저 가속도 측정결과의 FFT분석을 통하여 교량의 고유진동수를 추정하여 UIC에서 제시하고 있는 한계진동수와 비교하였고, 각 교량별로 차량종류 별로 속도에 따른 수직방향의 최대치점과 최대진동가속도를 각 국의 설계기준과 비교하였다.

3.1 고유진동수 분석

진동가속도 측정결과의 FFT분석을 통하여 각 교량의 고유진동수를 구하여 UIC 및 일본에서 제시하고 있는 고유진동수의 제한기준과 비교하여 보았다. 표4와 그림7에서도 알 수 있듯이 실측 결과가 UIC[1]와 일본[2]의 제한치를 매우 크게 상회하고 있음을 알 수 있다.

표 4. 계측대상 교량의 고유진동수 비교

구 분	측정치 (Hz)	UIC(Hz)		일본(Hz)
		상한기준	하한기준	하한기준
9m 교량	31	18.3	8.8	11.1
12m 교량	25	14.8	6.7	8.3
18m 교량	13	10.9	4.4	5.6

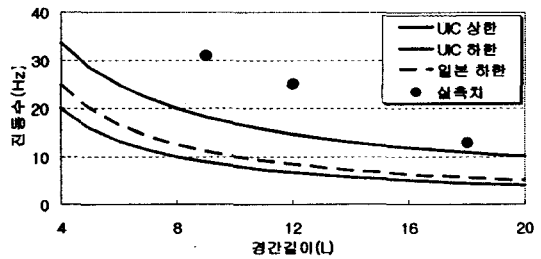


그림 7. 계측대상 교량의 고유진동수 비교

3.2 동적 수직변위 분석

측정된 동적수직처짐과 동적증폭의 영향을 차량 종류별 최대값을 철도교 설계기준의 한계치와 비교하여 보았다. 표5는 각 경간길이별로 발생하는 최대수직변위를 나타낸 것인데, 모든 경우에 있어서 철도교 설계기준[3]의 한계치 보다는 작은 수직처짐이 발생되고 있음을 알 수 있다. 9m 교량의 경우에는 설계기준의 약70%정도의 처짐이 발생되고 있으며, 12m 교량의 경우에는 약 56%, 18m 교량의 경우에는 약 43%로 매우 작은 변위가 발생되고 있어 현재의 주행환경하에서는 과도한 수직변위에 의한 문제는 발생하지 않고 있다는 것을 알 수 있다. 차량종류별 처짐의 발생량을 보면, 디젤기관차에 의해 견인된 경우가 가장 큰 변위를 발생시키고 있는데, 이는 PMC차량보다 디젤기관차의 축중이 더 크기 때문으로 보이며, 경간길이에 따라 1개 경간에 재하될 수 있는 차량의 대수가 차이가 있기 때문에 경간길이가 긴 경우에는 디젤2량 견인일 경우에 최대처짐이 발생되고 있다. 이는 정적인 해석결과와도 거의 유사한 경향을 보이고 있다[4]. 이러한 경향은 경간길이별-운행속도별-차량종류별 동적수직변위의 분포를 나타낸 그림8~그림10에서도 볼 수 있는데, 차량의 종류별로 속도의 증가에 따른 수직변위의 차이가 크게 나타나지 않는다. 즉, 현재의 운행환경하에서는 차량과 구조물의 공진현상을 발생되지 않기 때문에 동적수직변위가 속도의 변화에 따른 동적증폭효과 보다는 통과하는 차량의 중량에 의해 지배됨을 알 수 있다.

표 5. 계측 대상 교량의 수직 변위 최대치

경간길이	수직변위		설계기준 (mm)	비율 (계측치/ 설계기준)
	계측치 (mm)	발생경우		
9m	7.499	디젤1 편성 무궁화 130.25km/h	11	0.682
12m	8.362	디젤2 편성 무궁화 66.6km/h	15	0.557
18m	9.837	디젤2 편성 무궁화 101.29km/h	23	0.428

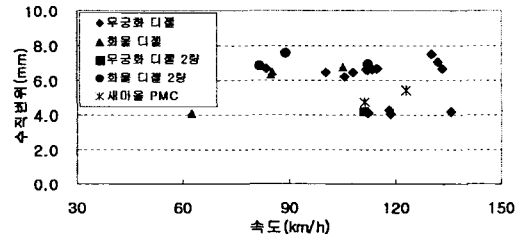


그림 8. 9m 교량의 동적수직변위 분포

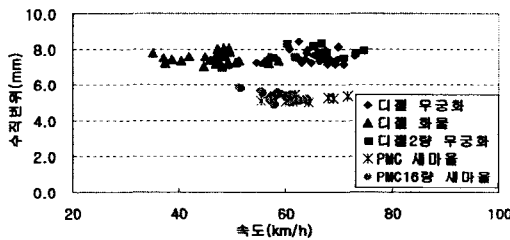


그림 9. 12m 교량의 동적수직변위 분포

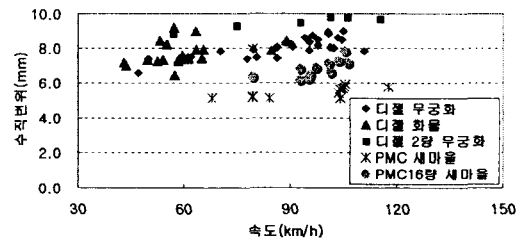


그림 10. 18m 교량의 동적수직변위 분포

3.3 진동가속도 분석

계측 대상 교량의 수직 및 수평진동가속도를 분석하여 보았다. 진동가속도가 크게 발생하게 되면 장기적으로 피로손상의 문제가 발생할 수 있을 뿐 만 아니라 차량의 주행안전성과 승차감에 영향을 미치게 된다. 표6은 각 교량별로 계측된 수직 및 수평 진동가속도를 나타내고 있는데, 진

동가속도의 경우에는 직접적인 비교 기준이 없기 때문에 절대적인 비교는 어렵다. 그러나, UIC[1] 나 고속철도용 교량의 설계기준[5]에는 비록 도상의 교란을 방지할 목적이지만 0.35g로 수직진동 가속도를 제한하고 있고 또 이에 따른 승차감을 확보하고 있다고 보았을 때 현재 판형교 상에서 발생하고 있는 진동가속도가 다른 형식의 교량 즉, 유도상 교량에서 발생하는 진동가속도보다는 상당히 큰 수준으로 발생함을 알 수 있다. 한편 측정대상 판형교에서 발생하는 수직과 수평진동가속도의 크기를 비교하여 보면 일반적인 콘크리트 유도상교량의 경우, 수평진동가속도가 수직진동가속도보다 훨씬 작게 발생하는 경우가 대부분인데 반해, 측정대상교량의 대부분에서 수직진동가속도와 수평진동가속도가 비슷한 크기로 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 직선교라도 차량 운중의 좌우편차와 거더간의 강성차이에 일차적인 원인이 있는 것으로 추정된다. 즉, 거더의 상대적인 손상으로 인해 거더간의 강성차이가 발생하고 이로 인해 상대적인 수직처짐이 유발되어 거더의 비틀림이 발생되고 이러한 비틀림거동에 차량 고유의 운중 편차의 효과가 더해지면서 횡진동이 크게 발생하는 것으로 추정된다. 그림11~그림16은 경간길이별-운행속도별-차량종류별로 수직 및 수평진동가속도의 분포를 나타낸 그림인데, 진동가속도의 크기 역시 수직처짐과 마찬가지로 차량의 종류별로 속도의 증가에 따른 진동가속도의 차이가 크게 나타나지 않음을 알 수 있다.

표 6. 수직 및 수평 진동가속도 최대치

경간길이	수직가속도		수평가속도	
	계측치 (G)	발생경우	계측치 (G)	발생경우
9m	1.53	디젤1편성 무궁화 130.25km/h	1.624	디젤1편성 무궁화 108.05km/h
12m	1.740	디젤2편성 무궁화 72.95km/h	1.713	디젤2편성 무궁화 61.67km/h
18m	0.681	디젤1편성 무궁화 104.94km/h	0.740	디젤1편성 무궁화 110.92km/h

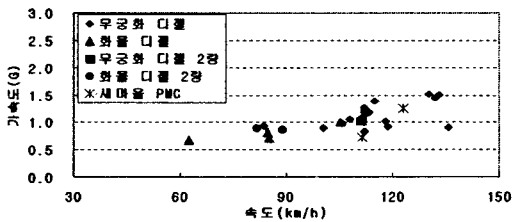


그림 11. 9m 교량의 수직진동가속도 분포

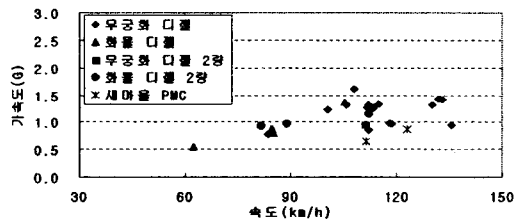


그림 12. 9m 교량의 수평진동가속도 분포

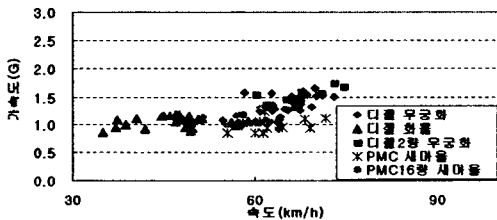


그림 13. 12m 교량의 수직진동가속도 분포

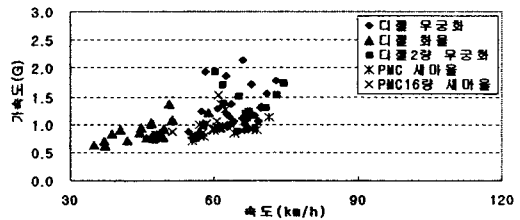


그림 14. 12m 교량의 수평진동가속도 분포

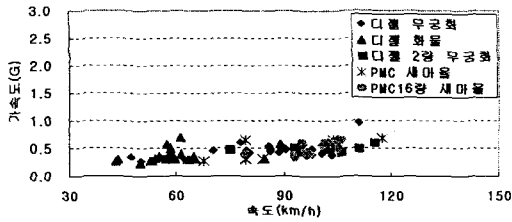


그림 15. 18m 교량의 수직진동가속도 분포

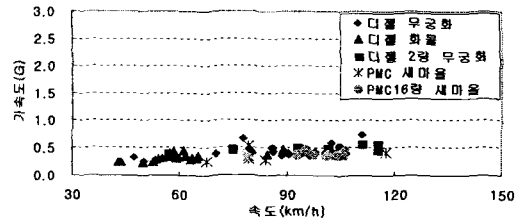


그림 16. 18m 교량의 수평진동가속도 분포

4. 결론

공용중인 판형교에 대한 동적수직처짐, 수직·수평 진동가속도의 현장측정을 수행하였고, 측정된 자료를 분석하여 교량별로 고유진동수와 동적수직처짐 그리고 진동가속도를 일본과 유럽, 그리고 한국의 설계기준에서 제시되어 있는 한계치들과 비교분석하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수가 있었다.

- 1) 진동가속도 측정자료의 FFT분석을 통하여 각 교량의 고유진동수를 추출해본 결과, 경간길이에 따라 정도의 차이는 있지만 고유진동수 대역이 UIC와 일본의 제한치에 비해 매우 높은 대역에 존재함을 할 수 있었다.
- 2) 동적 수직처짐의 분석 결과, 현재의 열차주행환경과 구조물 상태하에서는 차량의 속도에 따른 동적수직처짐의 증폭현상은 뚜렷하게 나타나지 않고 동력차의 중량에 의한 효과가 더 크게 영향을 미침을 알 수 있었다. 그리고 그 크기가 모든 경우에 대하여 설계기준상의 한계범위 내에 존재하여 양호한 결과를 보여주고 있었다.
- 3) 수직진동가속도를 분석한 결과, 현재 판형교 상에서 발생하고 있는 진동가속도가 상당히 큰 수준으로 발생됨을 알 수 있었고, 다른 형식의 교량들이 수평진동가속도가 수직진동가속도 보다 매우 작게 발생하는 비해 판형교의 경우에는 비슷한 크기로 발생하는 현상을 볼 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 철도청에서 지원한 철도기술개발과제의 일환으로 수행되었으며, 연구의 수행에 많은 도움을 주신 철도청 관계자 여러분께 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

1. ERRI, D190, Permissible Deflection of Steel and Composite Bridges for Velocities $V > 160 \text{ km/h}$, RP5 : Parametric Studies-Summary and Recommendations Final Report, December 1995
2. 日本土木學會, 國鐵建造物設計標準解説, 1983
3. 철도청, 철도설계기준(철도교편), 1999
4. 오지택 외, 열차유형에 따른 판형교의 정적거동에 대한 연구, 한국철도학회 추계학술대회, 2001
5. 고속전철사업기획단, 고속철도 강교량 및 합성형교량 설계표준시방서 해설(안), 1991,