

Preflex 철도교량의 실 운행열차하중에 대한 동적응답 분석 A Dynamic Response Analysis about Real Train Loads of the Preflex Railway Bridge

오지택* 김현민** 최은수*** 이태균****
Oh, Ji-Taek Kim, Hyun-Min Choi, Eun-Soo Lee, Tae-Gyun

ABSTRACT

This research analyzed dynamic responses of the preflex railroad bridge. Vertical deflection and acceleration induced by operating train loads and test train loads were measured. Deflection of bridge by train traveling satisfies deflection limitation regulation ($L/800$) about the concrete bridge, but compare with UIC standard, vibration acceleration happened fairly greatly. Also test result show that acceleration receives greatly effect about the speed than deflection. It must discuss about vibration acceleration problems for speed elevation hereafter.

1. 서 론

기존선 철도교량의 경간은 대부분 12m에서 22m사이의 단경간 단순지지로 구성되어 있다. 이러한 단경간 교량에 비하여 22m이상 40m미만의 철도교량은 건설비의 절감과 미관상 장점이 있으며, 선계자의 선계자유도를 넓혀주는 형식이라 할 수 있다. 본 연구에서는 중경간인 경간길이 33.9m이며 프리플렉스(Preflex) 6련에 의해 건설되어진 복선철도교량에 대한 동적해석실험결과를 분석하였다. 동적해석실험은 1량의 니켈기관차에 의해 속도대역별로 수행되었으며, 실험결과와의 비교를 위하여 교량 상을 통과하는 임의열차에 대하여 병행실험을 수행하였다. 시험열차와 임의열차 주행에 따라 교량으로부터 얻은 동적응답은 현행 철도설계기준(철도교편)의 콘크리트교량에 대한 치밀제한규정 ($L/800$)을 만족시키나 국내 기준에 없는 진동가속도의 수준은 비교적 크게 발생하였음을 확인하였다. 뿐만 아니라 증속에 따라 진동가속도가 꾸준히 증가하는 것으로 나타나 철도교량의 공용연수를 고려할 때, 현행 기준을 충족하는 교량일지라도 향후 고속열차가 주행하게 된다면 과도한 진동가속도는 차량의 기존선고속화 장애요소로 작용할 것으로 판단된다.

* 한국철도기술연구원 구조물동특성연구그룹 선임연구원, 정희원

** 한국철도기술연구원 구조물동특성연구그룹 주임연구원, 정희원

*** 한국철도기술연구원 구조물동특성연구그룹 선임연구원, 정희원

**** 철도시설공단 토목실제1의 부장

2. 현장 실험

2.1 대상교량

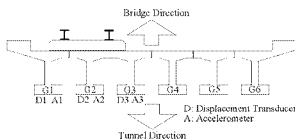
대상교량은 전라선에 위치한 33.9m의 단순지지 프리플렉스 합성형교로 교량 현황은 표1과 같다. 복선궤도의 교량이지만 그림 2(a)와 같이 현재 운행되는 선로는 단선으로 G1, G2, G3에 대해 계측하였으며 변위계 및 가속도계 설치 위치는 그림 2와 같다. 원칙적으로 최대응답이 발생하는 지점인 강간의 중앙에 센서가 부착되어야 하나 현장조각상 G1, G2, G3에 대한 센서 부착위치에 다소 차이를 두었다.

표 1. 측정대상교량 일반현황

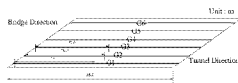
선별	전라선
역구간	관촌-임실
행경구역	전북 임실군 관촌면 용산리
궤도	복선궤도
적목선	적선
준공년	1996년 6월 30일
적사면	사각 135°
선계하중	L-22
경간 및 연수	31.9×1+33.9×1+18.55×1+18.29×17



그림 1. 재하시험 정경



(a) 설치거더 단면



(b) 설치 위치

그림 2. 변위계 및 가속도계 설치 위치

2.2 열차하중

본 실험은 재하시험(디젤 기관차)을 이용한 중속 실험 및 선세 다양한 편성으로 운행되는 랜턴차량(실 운행열차)에 대한 측정을 병행하였다. 재하시험에 의한 중속 실험은 속도 변화에 따른 응답의 특성을 명확하게 분석할 수 있지만 다양한 편성에 따른 운중의 차이에 대한 영향을 검토하기 어렵고 또한 중경간 철도교량의 경우 가장 불리한 하중 재하 조건은 중속시험에 사용되는 재하시험(디젤 기관차)이 아닌 다량 편성 열차의 열결기 좌우측 대차하중이 재하될 때 발생되기 때문에 실 운행차량에 대한 병행 측정은 필수적이다. 열행하중의 측중 및 속도에 따라 다른 특성을 보이는 객차와 화차의 특성을 고려하기 위하여 표 2와 같이 운행하중에 대해 3가지로 분류하여 영향을 검토하였다. 운행하중-A는 일반적인 여객운송시 편성되는 디젤기관차 1량 + 장대화 무궁화 객차 7량 편성으로 측중은 크지 않지만 중·고속으로 운행되는 특성을 가진다. 운행하중-B는 소수 편성된 화물차로 5~10편성 화차가 열행하중으로 구성되며 비교적 고속으로 운행되며 객차보다 큰 측중이 작용되나 만차된 화차보다는 비교적 가벼운 상태로 운행된다. 운행하중-C는 만차되어 다수 편성된 화물차로 지속적으로 운행되나 측중이 가장 큰 유형이다. 그림 4는 분류된 각 열차 유형의 운중의 시간이력의 예이다.

표 2. 원차하중의 분류

구분	측정회수	속도대역 (km/hr)	원상 형태	특징
재하하중	11	5~100	디젤기관차 1량 (시험차량)	단편성, 증속시범용
운행하중-A	20	77~104	디젤기관차 1량 + 여객차 7량	중·고속, 저 중량
운행하중-B	17	65~104	디젤기관차 1량 + 화차 5~9량	중·고속, 중 중량
운행하중-C	30	52~79	디젤기관차 1량 + 화차 10~20량	저·중속, 고 중량

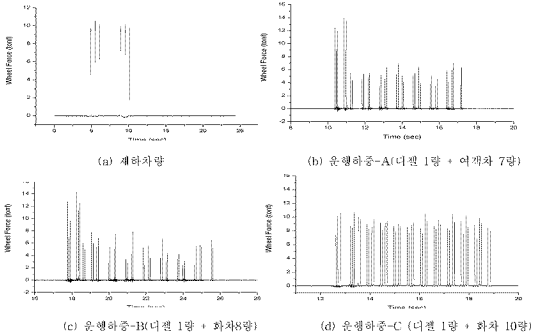


그림 3. 열차 유형별 운행의 시간이력 예

3. 증속에 따른 교량의 응답특성

변위와 가속도 응답의 속도 증가에 따른 응답특성을 분석하기 위하여 재하 차량에 의한 증속시험의 계속결과로부터 동적증폭계수를 산출하였다. 또한 속도에 대한 응답증가의 민감도를 응답별로 비교하기 위하여 동적증폭계수-속도의 관계에 대한 회귀분석을 수행하였다.

3.1 동적변위

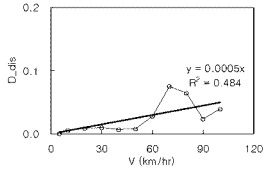
먼저 실험결과로부터 각 주행에서 측정된 최대수직변위를 표 3에 나타내었다. 또한 증속에 따른 수직변위의 변화를 분석하기 위해 변위에 대한 동적증폭계수(D_{dis})를 식(1)과 같이 산출하였다. 여기서 동적증폭계수는 정적하중에 의해 발생하는 수직변위에 대한 동적하중에 의해 발생하는 수직변위의 증가분을 무차원화한 것이다. 여기서는 정적하중대신 재하차량이 5km/hr로 주행할 때의 하중(유사정적하중)을 기준으로 하였다. 각 주행별로 계산된 동적증폭계수를 회귀분석 결과와 함께 그림 4에 표시하였다.

$$D_{dis} = \frac{d_{dynamic} - d_{static}}{d_{static}} \quad (1)$$

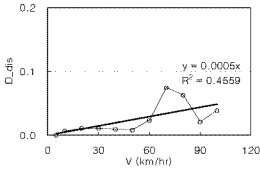
여기서, $d_{dynamic}$: 증속에 따른 동적변위, d_{static} : 정적변위(유사정적변위-5km/hr주행시)

표 3. 재하차량에 의한 최대수직변위

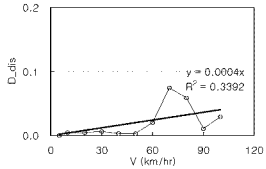
속도	진행방향	G1 (mm)	G2 (mm)	G3 (mm)
5	터널방향	7.25	6.45	4.30
10	교량방향	7.29	6.49	4.32
20	터널방향	7.31	6.52	4.32
30	교량방향	7.32	6.52	4.33
40	터널방향	7.30	6.51	4.31
50	교량방향	7.30	6.50	4.31
60	터널방향	7.45	6.60	4.39
70	교량방향	7.49	6.63	4.62
80	교량방향	7.72	6.86	4.55
90	터널방향	7.42	6.58	4.35
100	교량방향	7.53	6.70	4.43



(a) G1



(b) G2



(c) G3

그림 4. 증속에 따른 수직변위의 동적증폭계수와 회귀분석결과

3.2 진동가속도

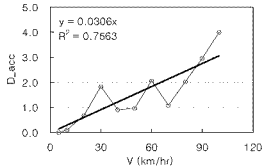
각 주형에서 측정된 최대수직진동가속도를 표 3에 나타내었다. 또한 증속에 대한 수직진동가속도의 응답의 변화를 분석하기 위해 가속도 응답에 대한 동적증폭계수를 식(2)과 같이 산출하여 각 주형별로 그림 5에 나타내었다. 또한 이에 대한 회귀분석 결과를 병행 표기하였다.

$$D_{acc} = \frac{a_{dynamic} - a_{static}}{a_{static}} \quad (2)$$

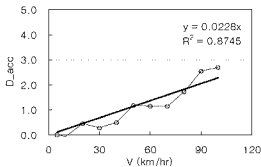
여기서, $a_{dynamic}$: 증속에 따른 진동가속도, a_{static} : 최소속도에 대한 진동가속도

표 4. 재하차량에 의한 최대 수직진동가속도

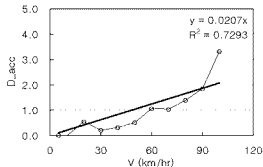
속도	진행방향	G1 (g)	G2 (g)	G3 (g)
5	터널방향	0.056	0.063	0.057
10	교량방향	0.061	0.058	0.055
20	터널방향	0.093	0.091	0.088
30	교량방향	0.157	0.080	0.068
40	터널방향	0.106	0.094	0.074
50	교량방향	0.109	0.137	0.085
60	터널방향	0.170	0.135	0.117
70	교량방향	0.116	0.134	0.115
80	교량방향	0.168	0.171	0.135
90	터널방향	0.220	0.223	0.161
100	교량방향	0.278	0.232	0.245



(a) G1



(b) G2



(c) G3

그림 5. 풍속에 따른 진동가속도의 동적증폭계수와 회귀분석결과

3.3 동적증폭계수 비교

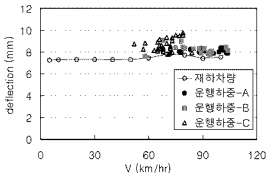
표 5는 식(1)과 (2)로부터 산출된 각 응답별 동적증폭계수를 나타낸 것이다. 빈위와 가속도에 대한 단순한 동적증폭계수의 비교는 큰 의미가 없으므로 속도에 따른 증폭계수의 증가율을 회귀분석결과로부터 비교하는 것이 타당하다. 여기서 회귀식의 기울기는 속도증가에 따른 각 응답의 민감도를 나타낸다고 할 수 있다. 그림 4에 나타낸 빈위에 대한 동적증폭계수에 대한 회귀식의 기울기는 0.004~0.005, 그림 5에 표시된 가속도의 회귀식의 기울기 0.0207~0.0306로 산출되어 빈위에 비해 가속도의 증가율이 4~7배정도 큰 것으로 나타났다. 따라서 향후 속도항상이 예상되는 구간에서 과도한 처짐의 증가로 발생되는 문제보다는 진동의 문제가 더 심도 있게 논의되어야 할 것이다.

표 5. 각 응답별 동적증폭계수 비교

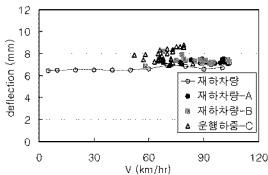
속도	수직변위에 대한 동적증폭계수			진동가속도에 대한 동적증폭계수		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3
5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.005	0.007	0.004	0.103	-0.072	-0.025
20	0.009	0.011	0.004	0.678	0.451	0.542
30	0.010	0.011	0.006	1.827	0.271	0.202
40	0.006	0.009	0.003	0.903	0.492	0.303
50	0.008	0.008	0.003	0.968	1.173	0.501
60	0.028	0.023	0.020	2.061	1.146	1.051
70	0.075	0.074	0.074	1.079	1.135	1.027
80	0.064	0.063	0.059	2.023	1.720	1.385
90	0.023	0.021	0.011	2.957	2.544	1.842
100	0.039	0.039	0.029	3.996	2.694	3.311

4. 선 운행열차하중에 의한 교량응답

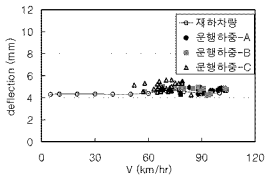
그림 6은 G1, G2, G3에서 재측된 열차유형에 따른 최대처짐값을 비교한 것이다. 앞서 분류된 실 운행열차에서 중·저속으로 운행되나 가장 큰 속증을 갖는 운행하중-C에서 가장 큰 처짐이 발생되는 것을 알 수 있다. 이로부터 동적변위는 속도에 대한 영향보다는 속증의 크기에 지배권을 유지할 수 있다. 또한, 모든 경우에 있어서 현행 철도설계기준(L/800)의 처짐제한값 43.75mm 이내로 만족하고 있다.



(a) G1



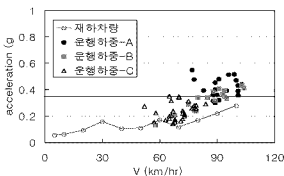
(b) G2



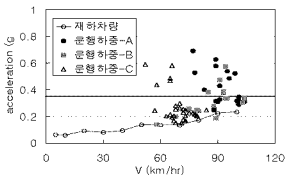
(c) G3

그림 6. 열차 유형별 수직치짐의 최대응답 비교

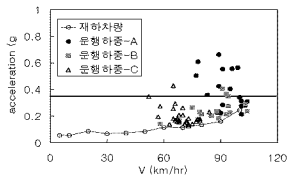
그림 7은 G1, G2, G3에서 계속된 열차유형에 따른 순간최대진동가속도를 비교한 것이다. 진동가속도의 경우 축중이 가장 큰 운행하중-C보다 비교적 고속대역으로 운행되는 운행하중-A와 운행하중-B의 진동가속도 수준이 큰 것으로 나타났다. 이것은 진동가속도에 미치는 열차속도의 영향에 대한 단적으로 보여주는 예라 할 수 있다. 유럽에서 장대레일 유도상 철도교량에서 열차속도가 200km/h 이상일 경우 적용하는 순간최대진동가속도 허용값인 $0.35g$ 를 초과하는 경우가 상당수 존재하는 것으로 나타나 향후 기존선 고속화시 동적 사용성에 문제가 발생할 가능성은 내포한다 할 수 있다.



(a) G1



(b) G2



(c) G3

그림 7. 열차 유형별 수직진동가속도의 최대응답 비교

5. 결론

본 연구의 실험 및 분석결과로부터 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) 제하차량에 의한 증속실험으로부터 증속에 따른 변위 응답의 증가보다 가속도의 증가가 더 큰 것으로 나타나 속도 향상 계획에 있어 교량에서 발생하는 진동가속도의 검토가 반드시 필요한 것으로 판단된다.
- 2) 실 운행하중에 대한 계측 결과, 변위는 속도에 대한 영향보다는 철도차량의 하중에 더 크게 영향을 받으며 가속도는 속도에 대한 영향이 더 큰 것으로 나타났다.
- 3) 철도교량의 동적성능을 평가하는 지표로서 순간최대진동가속도 측면에서, 본 연구의 실험대상인 교량은 저속도 대역인 60km/h~70km/h에서조차 0.35g를 초과하는 경우가 있으며, 속도의 증가에 따라 초과하는 경우가 대부분을 차지한다는 것을 확인하였다.
- 4) 철도교량의 공용연수(50년~100년)를 감안할 경우 현재 및 향후 건설될 철도교량은 현 운행속도이상으로 주행하는 열차를 안전하게 지지할 수 있는 성능을 갖추기 위해서는 현행 철도설계기준(철도교편)의 보완이 필요하다고 판단됨.

현행 국유철도건설규칙의 1급선과 2급선은 LS-22로 설계하여 각각 열차최고속도 200km/h와 150km/h를 수용할 수 있도록 규정하고 있으나, 철도설계기준(철도교편)의 설계기준을 만족하는 교량임지라도 향후 열차속도가 증속되어 200km/h에 근접하는 경우는 동적안정성(stability)과 사용성(serviceability)에 문제가 발생할 가능성이 높다 할 수 있다. 특히, 유도상 철도교량상의 장대래일 상층에 대한 안정성과 여객열차의 승차감에 대한 사용성 측면에서 현행 철도설계기준(철도교편)의 보완이 시급하다 판단된다.

참고문헌

1. 오지택 외 (2002) 대륙간 철도연결에 대비한 표준열차하중 비교,분석, 건설기술혁신사업 1차년도 연차보고서, pp.55~82.
2. 철도청 (2000), 국유철도건설규칙
3. 철도청 (1999), 철도설계기준(철도교편)
4. ERRI D 190 (1995) Permissible Deflection of Steel and Composite Bridges for Velocities $V>160\text{km}$: RP 5 Parametric Study Studies-Summary and Recommendations Final Report.
5. ERRI D214 (1999) Rail Bridges for Speeds $>200\text{km/h}$, RP 9 Final Report