

경부고속철도 교량의 현장재하시험 방법 개선

The Modification of Field Load Test for
Gyeongbu High-speed Railroad Bridges



이 채 규^{1)*}

Lee, Chae Gue



정 시 옥²⁾

Jung, Si Youk



김 대 호³⁾

Kim, Dae Ho



남 진 우⁴⁾

Nam, Jin Woo



황 규 산⁵⁾

Hwang, Kyu San

1. 개요

『시설물의 안전관리에 관한 특별법』에 의거 철도교량의 공용내하력을 산정하기 위한 현장재하시험을 실시함에 있어 철도 특성상 유지보수 및 각종 검측이 야간이 발생되어 최소 1개월 전에 시험일정 통보하여야 하며 일단 결정된 재하시험일정은 변경이 곤란할 뿐만 아니라 시험 당일 기후 악조건(장마 등)시에는 계측데이터에 예상치 않은 오차가 포함될 수밖에 없으며 1일 시험시간이 3시간 내에 제한되어 시험 중 계측 게이지에 문제 발생 시 대처할 수 없는 실정이다. 특히 고속철도는 일반철도에 비해 상기의 현장재하시험 조건이 더욱 더 까다로운 상태이다.

또한 주기적인 정밀안전진단시만 현장재하시험을 실시하는 경우에는 정밀안전진단 주기에만 과학적 유지관리가 가능하여 구조물의 기능저하, 보강 확인 등의 평상시 과학적 유지관리가 필요한 경우에는 상시운행열차의 유지관리 기준값이 없으므로 소요경비 및 시간이 과다하게 필요한 특정계획(일정통보, 열차수배)에 의한 재하시험을 실시할 수밖에 없는 실정이다.

고속철도 교량은 도로교 혹은 일반철도에 비해 거의 동일한 크기의 하중이 정해진 레일을 주행하는 조건이므로 하중의 작용조건이 명확하다. 이러한 이점을 적극 활용하기 위하여 『정밀안전진단 세부지침서』에 제시된 재하시험열차를 이용한 표준 현장재하시험 방법보다 상시운행열차를 이용한 개선된 현장재하시험의 적용 가능성을 파악해볼 필요가 있다.

여기에서는 기존에 실시하였던 재하시험열차에 의한 계측결과와 상시운행열차에 의한 계측결과를 분석하여 상시운행열차에 의한 현장재하

1) (주)한국구조물안전연구원 대표이사

2) (주)한국구조물안전연구원 이사

3) (주)한국구조물안전연구원 이사

4) 한국철도공사 오송고속철도시설사무소 소장

5) 한국철도공사 오송고속철도시설사무소 대리

* E-mail : chaegue@chol.com

시험 가능성에 대해 분석하여 보았다.

2. 현장 재하시험의 목적

교량의 역학적 거동을 해석할 수 있는 방법은 크게 이론적 방법과 실험적 방법이 있다. 이론적인 방법은 교량 구조계를 역학공식 또는 경험식으로 이상화하고 구조해석 단계를 거쳐 작용하중에 의한 교량의 거동을 해석하는 방법이다. 그러나 이론적인 방법은 교량거동 해석에 다음과 같은 사유로 한계가 있다.

- (1) 이론적인 방법으로 교량의 거동을 해석하기 위해서는 많은 가정을 하여야 하기 때문에, 가정이 성립하지 않는다면 교량의 실제거동은 이론적인 방법으로 해석한 역학적 거동과 상이할 수 있다.
- (2) 교량을 구성하는 재료의 특성 및 부재들의 역학적 특성이 시간의 경과에 따라 변할 수 있으며, 교량의 시공품질 등 현재 상태를 구조해석에 정확하게 반영하는 것은 거의 불가능하다.

따라서 이론적인 해석방법의 한계를 최소화하기 위하여 『건설기술관리법』에 의한 초기점검과 시설물안전관리에관한특별법에 의한 정밀안전진단시에는 실험적 해석방법인 현장재하시험을 실시하고 있다.

건설기술관리법에 의한 초기점검시에 실시하는 현장재하시험은 교량의 초기데이터 확보하여 시험적인 방법으로 교량의 거동을 해석하므로써 실제 교량이 설계기준에 적합한가를 평가하고, 평가시설물의 점검·진단 시 현구조물의 상태를 준공시의 초기값과 비교하여 구조물의 건전성을 평가하기 위해 실시한다.

시설물안전관리특별법에 의한 현장재하시험은 초기에 확보된 데이터의 변화여부를 파악하여

Table 1 관련 법령별 현장재하시험의 목적

건설기술관리법	시설물안전관리특별법
<ul style="list-style-type: none"> · 교량의 실제 정적·동적거동 · 처짐, 진동 등의 사용성 검토 · 새로운 해석방법 및 설계기법의 검증 · 교량 결함원인의 분석 및 규명 · 교량의 동특성(진동수, 진동 모드, 감쇠비) 평가 	<ul style="list-style-type: none"> · 이론내하력에 실제거동을 반영한 공용내하력 결정 · 보수·보강 효과 확인 · 설계도서 및 보수이력자료가 미비한 교량의 내하력 평가

구조물 거동상태를 평가하고 교량의 실제 내하력을 정량화시키기 위해 이론적인 교량의 내하력을 보완할 목적으로 실시한다.

3. 현장재하시험 방법 및 활용

3.1 현장재하시험방법의 종류

정밀안전진단 세부지침서에서는 현장재하시험의 종류로 정적재하시험, 동적재하시험, 의사정적재하시험 방법을 제시하고 있다.

정적재하시험은 재하차량 이외에 일반차량이 완전히 통제된 상태에서 실시하되 전면 교통통제에 따른 차량지체가 예상되고, 교통사고의 가능성이 높은 경우에는 재하횟수를 합리적으로 줄일 수 있으며, 재하차량을 차선별로 주행시켜 시험하는 의사정적 재하시험을 수행할 수 있도록 하고 있다.

동적재하시험은 재하차량 이외에 일반차량이 완전히 통제된 상태에서 시험차량의 주행속도를 상행차선과 하행차선에서 각각 최저 10km/h에서부터 현장여건상 가능한 최대 주행속도까지 10km/h 간격으로 속도를 증가시키면서 교량의 동적응답신호를 측정하도록 하고 있다.

의사정적재하시험은 현장재하시험 대상 교량에서 정상적인 정적재하시험을 실시할 수 없는 경우에 실시할 수 있도록 하고 있다. 의사정적재하시험은 동적재하시험과 마찬가지로 주행시험

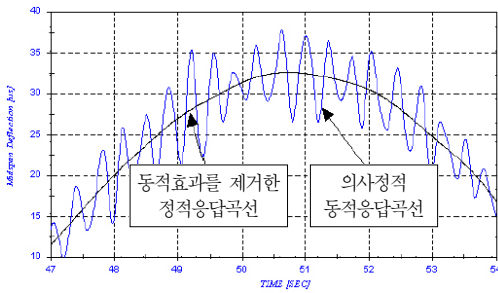


Fig. 1 필터링에 의한 정적효과

을 실시하여 계측된 응답파형으로부터 정적응답을 간접적으로 유추하는 재하시험방법이다. 즉, 저속(10km/h)의 속도로 시험 경간을 주행하여 계측한 응력 파형상의 동적응답 곡선을 Low Pass Filter에 의해서 필터링한 최대 정적응답 곡선을 기준으로 동적효과를 제거하여 정적효과를 구하는 시험방법이다.

3.2 현장재하시험 결과 활용

시설물안전관리특별법에 의한 현장재하시험은 교량 거동을 대표하는 데이터의 변화여부와 교량의 실제 내하력을 정량화시키기 위해 이론적 방법으로 평가된 교량의 기본내하력을 보완하여 공용내하력을 산정하기 위한 것이 가장 큰 목적으로 하고 있다.

교량의 공용내하력은 다음과 같이 산정하도록 하고 있다.

$$\text{공용내하력}(P) = K_s \times RF \times Pr \quad \text{식 (1)}$$

$$K_s = \frac{\text{계산치짐}}{\text{실측치짐}} \times \frac{1 + i_{\text{계산}}}{1 + i_{\text{실측}}}$$

.....
정적응답비 동적응답비

K_s : 응답보정계수
 RF : 기본내하율

Pr : 설계활하중
 (DB-24 or L-22 or HL-25)
 계산치짐 : 구조해석을 통해 산정된 최대치짐
 실측치짐 : 정적재하시험을 통한 최대치짐
 (=의사정적재하시험)
 $i_{\text{계산}}$: 표준시방서에 의한 충격계수
 $i_{\text{실측}}$: 동적재하시험으로부터 평가된 최대 충격계수

3.3 응답비 산정을 위한 실측값 획득 방법

정밀안전진단 세부지침서에서는 정적응답비 산정을 위한 실측 치짐 획득 방법으로 다음과 같은 방법을 소개하고 있다.

㉠ 방법1 : 정적 재하시험 결과를 이용하는 방법
 시험차량 시동을 끈 후 응답시간을 고려한 측정대기 시간을 가진 후 획득한 계측값을 이용하는 방법

㉢ 방법2 : 의사정적 재하시험 결과를 이용하는 방법

저속(10km/h)의 속도로 시험 경간을 주행하여 계측한 동적응답곡선(Dynamic response)을 Low Pass Filter에 의해서 동적효과를 제거하여 정적효과(Filtered response)를 구한 결과를 이용하는 방법

정밀안전진단 세부지침서에서는 동적응답비 산정을 위한 실측 충격계수산정을 위한 데이터 획득 방법으로 다음과 같은 방법을 소개하고 있다.

㉠ 방법 1 : 정적시험과 동적시험의 계측 결과를 비교하는 방법
 ㉢ 방법 2 : 의사정적 시험의 동적응답곡선(Dynamic response)에서 동적효과를 제거한 정적효과(Filtered response)와 동

적시험의 계측 결과를 비교하는 방법

- ㉔ 방법 3 : 동적재하시험의 동적응답곡선(Dynamic response)에서 충격효과를 제거한 곡선(Filtered response)과 동적계측 값을 비교하는 방법

동적재하시험에서 데이터 획득방법 중 방법 1은 주행시험에서 운전자의 습관에 따라 주행경로의 오차로 인하여 오차 발생하고, 방법 2는 노면의 요철 등으로 오차 발생한다. 반면 방법 3에 의한 방법은 계측된 동적 파형에서 직접적으로 산출하므로 안정적인 실측충격계수 분석을 제공하는 것으로 제시되고 있다.

4. 표준 현장재하시험 방법의 대안 방법

4.1 개요

정밀안전진단 세부지침서에 제시되어 있는 표준 현장 재하시험 방법은 현장재하시험을 실시하기 위한 일정 계획 수립이 곤란하고 소요경비가 과다하게 필요로 할뿐만 아니라 전문인력에 의해 재하시험을 실시하여야 하므로 과학적인 유지관리에 적용은 묘연한 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 상시 운행중인 열차에 의한 계측 데이터를 이용하여 표준 현장재하시험에 준하는 신뢰성 있는 데이터를 확보할 수 있다 것을 검증할 수 있다면 상기의 현장 재하시험의 걸림돌을 제거할 수 있을 것이다.

4.2 대안 방법에 대한 신뢰성 검증 조건

시특법에 의한 정밀안전진단에서 현장재하시험은 식 (1)에서 보는 바와 같이 정적응답비와 동적응답비로 구성된 응답보정계수 K_s 를 산정하여 이론적인 기본내하력을 보정하므로써 교량

Table 2 표준 현장재하시험 방법과 대안 현장재하시험 방법

	표준 현장재하시험	대안 현장재하시험
시험방법	<ul style="list-style-type: none"> · 세부지침서 방법 적용 · 시험열차하중 이용 · 열차 운행 종료 후 실시 (AM 02:00 ~ 04:00) · 정적거동 계측 (10km/h 의사정적시험) · 동적거동을 계측 (50, 90, 150, 170, 200, 230, 270, 300km/h) 	<ul style="list-style-type: none"> · 상시운행열차하중 이용 · 평상시와 출퇴근시간대 실시 · 평상시 운행 속도로 주행 · 동적 거동만을 계측 <ul style="list-style-type: none"> - 170km/h (매일 운행 전 시험열차) - 250~300km/h (상시 주행)

Table 3 고속철도 교량의 재하시험 결과 분석 항목

기준	평가내용	검토목적
진단 조건 검토	<ul style="list-style-type: none"> · 공용내하력 산정 <ul style="list-style-type: none"> - 정적 응답비 (정적 변위 및 변형률 활용) - 동적 응답비 산정 (동적 충격계수 활용) · 측정 고유진동수를 이용한 해석모델 검토 · 활하중 횡분배 효과 분석 · 중립축위치 분석으로 보-슬래브 합성작용확인 	공용내하력 안전성평가
	정밀안전진단 세부지침(2012.12) 『한국시설안전공단』	
설계 조건 검토	<ul style="list-style-type: none"> · 주행안전성 및 승차감검토 <ul style="list-style-type: none"> - 공진가능성 평가 - 상판 연직기속도 제한 조건 검토 - 교량 연직처짐 검토 - 교량상판 단부회전각, 종방향변위 검토 	운행을 위한 한계조건 평가
	철도설계기준(2011) 『한국철도시설공단』 고속철도설계기준(2005) 『한국철도시설공단』	

의 실제 내하력인 공용내하력을 산정하기 위해 실시한다. 만약 세부지침서상에 제시되어 있는 표준 현장재하시험에 의한 계측데이터를 이용하지 않고 대안으로 상시운행열차에 의한 계측데이터를 이용하여 응답보정계수를 산정하고자 한다면, K_s 를 구성하는 정적응답비와 동적응답비의 실측값에 대한 신뢰도가 세부지침서의 표준 현장재하시험 수준과 동일 수준의 신뢰성이 확보되어야 한다.

만약 응답수정계수 K_s 를 상시운행열차의 계측데이터를 이용하여 산정하고자 한다면 식 (1)의 실측값에 대해 다음 사항의 검증을 하여야 할 것이다.

Table 4 재하시험열차와 상시운행열차의 축중량

구 분	재하시험 열차	상시 열차		
		170km/h (일일 운행 전 시험열차)	250~300km/h (상시운행열차)	
적용열차		- KTX열차(20량) 		
열차무게	PC (동력차)	축중량 170kN	축중량 170kN	축중량 170kN
	MT,IT (객차)	축중량 170kN	축중량 170kN	축중량 170kN + 승객하중
재하시험 결과				

첫째, 정적응답비는 재하하중에 의한 실측치짐과 구조해석에 의한 계산치짐의 비로 산정되므로 계산치짐을 산정하기 위해서는 작용하는 축하중 크기를 파악하여야 한다. 즉, 상시운행열차에 의한 재하시험을 실시하고자 하는 경우에는 열차 승객에 의한 축하중의 변화를 파악하여야 한다.

둘째, 정적재하시험을 대체하기 위한 의사정적재하시험으로 상시운행열차의 동적계측값을 활용하고자 한다면 상시운행열차의 계측값을 Low Pass Filter에 의해서 동적효과를 제거하여 구한 정적치짐의 신뢰성이 확보되어야 한다.

세째, 동적응답의 산정에 사용하는 충격계수는 주행속도별 측정한 충격계수 중 가장 큰 값을 적용하여야 하므로 상시운행열차에 의해 발생하는 충격계수가 항상 최대 충격계수인가를 확인하여야 한다.

넷째, 상시운행열차하중에 의해 산정된 공용내

하력이 기존 재하열차에 의해 산정된 공용내하력과 비교하여 신뢰성이 확보되어야 한다.

4.3 재하시험열차와 상시 열차의 축중량 영향 여부

현재 운행되고 있는 KTX 열차(20량)의 객차부는 56좌석에 모두 승객이 탑승했을 경우 상시운행열차가 재하시험열차에 비해 약 10% 하중이 증가한다. 그러나 KTX 열차에서 최대변위를 유발하는 PC(동력차)에 영향을 미칠 수 있는 승객은 소수이므로 축중량에 거의 영향을 주지 않는다.

즉, 정적응답변위를 산정하기 위한 계측값은 PC(동력차)에 의한 계측값을 적용하므로 승객 탑승에 의한 영향은 없다고 할 수 있다.

특히, 상시운행열차 중 영업운행에 앞서 170km/h로 1일 1회 운행(상·하선)하는 상시 시험주행

열차에는 승객이 탑승하지 않아 재하시험 열차와 동일한 축중량 상태이므로 축중량의 변화에 의한 계측값의 영향은 무시할 수 있을 정도이다.

4.4 정적응답비 산정을 위한 정적처짐의 신뢰성

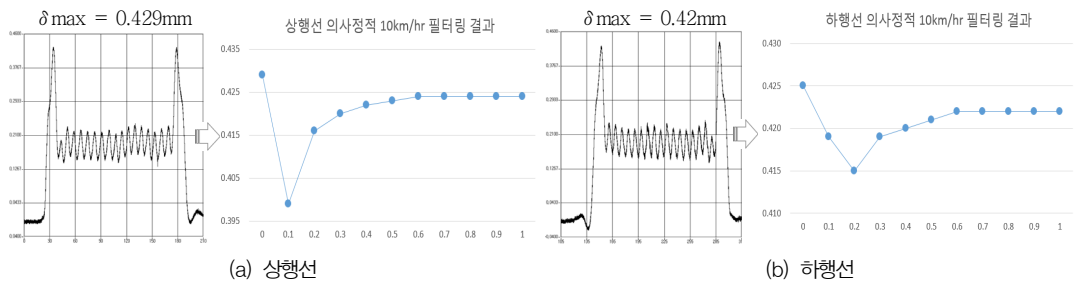
상시운행열차의 계측 데이터를 이용하여 Low Pass Filtering에 의한 정적효과의 신뢰도를 파악하기 위하여 우선적으로 2011년 현장재하시험을 실시하였던 교량 중 F.M.S.공법에 의하여 가설된 3경간 연속교인 왕림교에 대해 재하시험 열차와 상시운행열차에 의한 계측 데이터 값을 비교·분석하여 보았다. 현장재하시험의 계측 데이터는 교량 관리주체에서 제공한 Law Data를 이용하였다.

왕림교는 정적재하시험으로 10km/h의 의사정적 재하시험을 실시하였으므로 10km/h의 동적응답곡선을 0.0~1.0Hz범위에 대해 Low Pass Filtering한 결과 Fig. 2에서와 같이 0.6Hz 이상부터는 필터링된 계측값이 안정적인 값으로 수렴되는 것으로 나타나 0.6Hz 이상으로 Filtering한 값을 정적처짐으로 결정하였다.

상시운행열차에 의한 동적응답곡선에 대해 Low

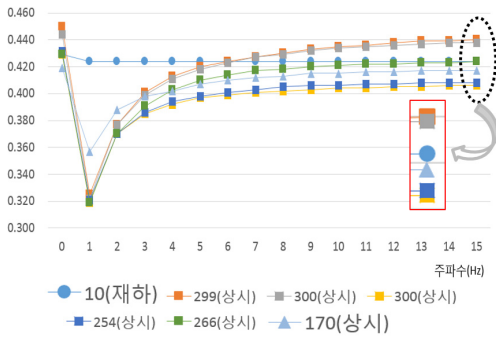
Pass Filtering한 결과 10km/h의 속도로 주행한 의사정적시험의 Low Pass Filtering의 결과와는 상이하게 Fig. 3과 Fig. 4에서 보는 바와 같이 10Hz 이상부터 일정한 값으로 수렴하며 15Hz부터 전체적으로 가장 안정적으로 나타났다. 따라서 상시 주행열차에 대해서는 15.0Hz에 의한 Low Pass Filtering 결과값을 정적처짐으로 결정하였다.

왕림교에 대해 정밀안전진단 세부지침서에 제시된 10km/hr의 의사정적시험에 의한 동적응답곡선을 Filtering하여 수렴된 정적처짐을 기준으로 상시 매일 최초 영업열차에 앞서 전구간을 170 km/h정도로 주행하고 있는 시험주행열차에 대한 동적응답곡선을 Filtering하여 수렴된 정적처짐의 상대오차를 산정한 결과 상행선은 1.7%, 하행선은 2.8%의 상대오차가 발생하는 것으로 나타나 신뢰성 있는 정적효과를 구할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 250~300 km/h로 주행하는 상시운행열차에 의한 동적응답곡선을 Filtering하여 수렴된 정적처짐(15Hz로 Filtering한 정적처짐)의 상대오차를 산정한 결과는 최대 4.2%, 하행선은 최대 6.2%의 상대오차가 다소 크게 발생하는 것으로 나타났다.

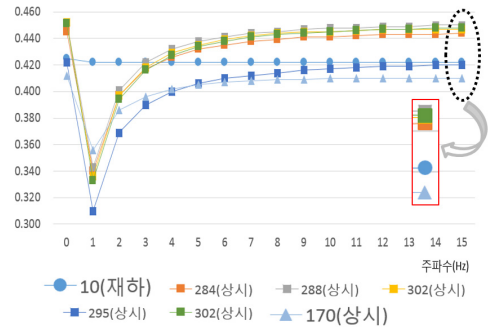


구 분	Low Pass Filter 범위 (Hz)											
	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
변위 (mm)	상행	0.429	0.399	0.416	0.420	0.422	0.423	0.424	0.424	0.424	0.424	0.424
	하행	0.425	0.419	0.415	0.419	0.420	0.421	0.422	0.422	0.422	0.422	0.422

Fig. 2 왕림교 10km/h 주행한 의사정적시험의 동적응답곡선의 Low Pass Filtering 결과



(a) Low Pass Filter Hz별 결과



(a) Low Pass Filter Hz별 결과

필터 (Hz)	상시운행열차 (km/h) 속도별 상대오차 (%)					
	170	299	300	300	254	266
1	15.8	23.3	24.1	24.8	24.3	24.8
2	8.5	11.1	11.1	12.7	12.7	12.7
3	6.1	5.4	5.9	9.2	9.0	7.8
4	5.2	2.6	3.1	7.5	7.1	5.0
5	4.0	0.9	1.4	6.4	6.1	3.3
6	3.3	0.0	0.2	5.9	5.4	2.4
7	2.8	-0.7	-0.7	5.4	5.0	1.7
8	2.6	-1.4	-1.2	5.2	4.5	1.4
9	2.1	-2.1	-1.9	5.0	4.2	0.9
10	2.1	-2.6	-2.4	4.7	4.2	0.7
11	1.9	-2.8	-2.6	4.7	4.0	0.5
12	1.9	-3.3	-2.8	4.5	4.0	0.5
13	1.7	-3.5	-3.1	4.5	3.8	0.2
14	1.7	-3.5	-3.3	4.2	3.8	0.2
15	1.7	-3.5	-3.3	4.2	3.8	0.2

(b) 상시운행열차 속도별 Filtering값과 재하시험열차 10km/hr 계측값의 Filtering값과의 상대오차

Fig. 3 왕림교 상행선 상시운행 열차의 Low Pass Filtering 결과

필터 (Hz)	상시운행열차 (km/h) 속도별 상대오차 (%)					
	170	299	300	300	254	266
1	15.6	19.4	18.7	20.4	26.5	21.1
2	8.5	5.9	5.0	5.9	12.6	6.6
3	6.2	1.2	0.0	0.9	7.6	1.4
4	4.7	-0.9	-2.4	-1.7	5.2	-1.2
5	4.0	-2.4	-3.8	-3.1	3.8	-2.8
6	3.6	-3.1	-4.5	-4.0	2.8	-3.8
7	3.3	-3.8	-5.2	-4.7	2.4	-4.5
8	3.1	-4.0	-5.5	-5.2	1.9	-5.0
9	3.1	-4.5	-5.9	-5.5	1.4	-5.2
10	2.8	-4.5	-6.2	-5.5	1.2	-5.5
11	2.8	-4.7	-6.2	-5.7	0.9	-5.7
12	2.8	-5.0	-6.4	-5.9	0.7	-5.9
13	2.8	-5.0	-6.4	-5.9	0.7	-5.9
14	2.8	-5.0	-6.6	-5.9	0.5	-6.2
15	2.8	-5.0	-6.6	-5.9	0.5	-6.2

(b) 상시운행열차 속도별 Filtering값과 재하시험열차 10km/hr 계측값의 Filtering값과의 상대오차

Fig. 4 왕림교 하행선 상시운행 열차의 Low Pass Filtering 결과

이를 바탕으로 2011년과 2012년에 걸쳐서 실시된 20개 교량 중에서 상부구조가 PSCB형 식이면서 신뢰성 있는 현장 재하시험의 Law Data를 구할 수 있는 11개 교량 14개 재하시험 단면에 대해 교량 관리주체에게 Law Data를 요구하여 일일 시험주행열차 및 상시운행열차에 대해 왕림교와 동일한 방법으로 분석을 실시하였다.

Table 5 정적응답비 산출을 위한 실측처점 선정 방법

	재하시험 열차	상시운행 열차
시험 방법	<ul style="list-style-type: none"> · 재하열차하중 이용 · 열차 운행 종료 후 실시 (AM 02:00 ~ 04:00) · 실측 정적거동 계측 · 시험열차를 저속(10km/h)의 속도로 주행하여 계측한 동적응답곡선을 Low Pass Filter에 의해서 동적효과를 제거하여 정적효과를 구함 	<ul style="list-style-type: none"> · 상시운행열차에 대한 동적 거동만을 계측 - 170km/h (시험운행열차) - 250~300km/h (상시열차) · 실측 정적거동 계측 · 상시운행열차의 동적응답곡선을 Low Pass Filter에 의해서 동적효과를 제거하여 정적효과를 구함

그 결과 Table 6에서 보는 바와 같이 170km/h로 주행하는 일일 시험주행열차는 10km/hr의 Filtering값 대비 0.0~3.2% 범위, 평균 1.2%의 상대오차가 발생하는 것으로 산정되었으며, 총 26Case 중 13Case는 1.0% 이하의 상대오차가 발생한 것으로 산정되었다. 반면, 250km/h 이상으로 주행하는 상시운행열차는 10km/hr의 Filtering값 대비 0.85~6.49%의 범위, 평균 3.85%의 상대오차가 발생하는 것으로 산정되었다.

이와 같이 주행속도가 170km/h인 경우는 평균 1.2% 정도의 상대오차가 발생하고 250km/h 이상의 고속주행에서는 평균 4% 정도의 상대오차가 발생하는 것은 고속열차의 고속주행에 따른 동적효과(교량의 공진 등)가 반영되었기 때문으로 판단된다.

4.5 동적응답비 산정을 위한 충격계수의 신뢰성

재하시험열차의 속도별 동적응답곡선과 상시운행열차의 동적응답곡선에 대해 세부지침서에서 안정적인 실측충격계수 분석을 제공하는 것으로 소개하고 있는 방법 3을 적용하여 충격계수를 산정하였다. 즉, 동적재하시험의 동적응답곡선(Dynamic response)에서 충격효과를 제거한 곡선(Filtered response)과 동적계측 값을 비교하는 방법을 적용하여 충격계수를 산정하였다.

왕림교를 대상으로 주행속도를 증가시켜 가면서 재하시험열차에 의한 동적거동곡선에서 산정된 충격계수는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 주행속도가 250km/h 이상에서 항상 최대 충격계수가 산정되는 것으로 나타났다. 또한 재하시험열차에 의한 충격계수와 상시운행열차에 의한 충

Table 6 시험주행열차와 상시운행열차의 Filtering값과 재하시험열차 10km/hr 계측값의 Filtering값과의 상대오차 (%)

연번	교량명		10km/hr 의사정적에 대한 상대오차 (%)				비고
			170km/h		1)250~300km/h		
			상선	하선	상선	하선	
1	왕림교	단순	1.65	2.84	3.02	4.88	
2	마하1교	단순	0.64	0.19	4.15	4.69	
3	마하2교	단순	2.73	0.39	3.16	4.67	
4	마하3교	단순	2) -	1.47	4.63	4.34	
5	향남교	단순	1.52	0.19	5.42	1.37	
6	금강2교	단순	2.86	0.74	4.12	6.49	
7		연속(2)	0.40	0.21	3.96	5.09	
8		연속(3)	1.15	0.36	1.52	3.38	
9	문곡교	단순	1.80	0.61	4.40	0.85	
10		연속(2)	2.03	0.36	5.92	2.63	
11	시목교	단순	0.00	1.45	4.82	4.25	
12	중척1교	단순	0.11	1.29	1.13	4.17	
13	중척2교	단순	3) -	2.97	3) -	4.98	
14	금곡교	단순	0.00	3.20	4) -	2.15	
평균 상대오차			1.2%		3.85%		

※ 1) 250~300km/h ; 각각의 상대오차의 절대값에 대한 평균치
 2) 데이터 없음
 3) 의사정적(10km/h) 시험시 계측값 오류발생
 4) 상시 시험시 계측값 오류발생
 ※ 연속(2)는 2경간 연속, 연속(3)은 3경간 연속을 의미함

Table 7 동적응답비 산출을 위한 실측충격계수 산정 방법

	재하시험 열차	상시운행 열차
시험 방법	<ul style="list-style-type: none"> · 재하시험차용 동적거동 계측 <ul style="list-style-type: none"> - 속도를 증가하면서 계측 - 50, 90, 170, 230, 270, 300km/h · 실측충격계수 	<ul style="list-style-type: none"> · 상시열차에 대한 동적거동 계측 <ul style="list-style-type: none"> - 250~300km/h (상시 주행) · 실측 충격계수
	<ul style="list-style-type: none"> · 재하시험의 동적응답곡선에 Low Pass Filter에 의해서 동적효과를 제거한 정적효과와 동적응답곡선의 최대값을 비교하여 실측 충격계수 산정 	<ul style="list-style-type: none"> · 상시운행열차의 동적응답곡선에 Low Pass Filter에 의해서 동적효과를 제거한 정적효과와 동적응답곡선의 최대값을 비교하여 실측 충격계수 산정

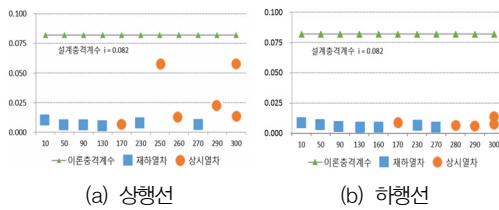


Fig. 5 왕립교 속도별 충격계수 산정 결과

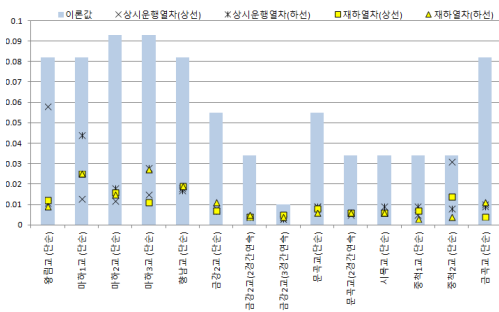


Fig. 6 분석 대상 교량들의 충격계수 산정 결과

격계수를 비교하면 상시열차에 의한 충격계수가 항상 더 크게 산정되는 것으로 나타났다.

이를 바탕으로 정적처짐의 신뢰성을 평가한 14개의 교량에 대해서도 충격계수를 산정한 결과 Fig. 5에서 보는 바와 같이 상시운행열차시의 충격계수가 항상 크게 산정되는 것으로 나타났다.

따라서 동적응답비는 열차의 주행속도별 충격계수 중 최대 충격계수를 이용하여 산정한다는 것을 감안한다면 250km/h 이상의 상시 운행시

의 동적계측만을 계측하여도 응답수정계수를 산정하기 위한 동적응답비는 신뢰성을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결론

고속철도의 현장재하시험을 정밀안전진단 세부지침서에 제시된 방법에 의거 재하시험열차를 이용한 현장재하시험을 실시하고자 하는 경우 시간적 및 경제적 제약조건이 클 뿐만 아니라 향후 과학적인 유지관리를 위한 기초자료 확보를 위하여 상시운행열차를 이용한 동적계측으로 산정된 내하력의 신뢰성 확보여부를 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 내하력 산정을 위한 최대 정적응답변위는 PC(동력차)에 의한 발생되므로 승객탑승에 의한 영향은 미소한 것으로 판단된다.
- (2) 동적계측된 동적응답곡선에 대해서 10km/h로 주행한 의사정적시험인 경우 0.6~1.0Hz의 필터링 범위에서 수렴하는 반면 상시주행열차의 동적계측값은 14Hz 이상의 필터링 범위에서 수렴하는 경향을 보이고 있다.
- (3) 총 26개의 재하시험 결과를 분석한 결과 170km/hr로 주행하는 일일 시험주행열차의 동적계측값을 필터링하여 구한 정적처짐은 10km/h 의사정적재하시험의 동적계측값을 필터링하여 구한 정적처짐과 비교하여 최대 상대오차는 3.2%이고 평균 상대오차는 1.2%이며, 26Case 중 13Case는 1.0% 이하의 상대오차 발생하고 있으므로 170km/h로 주행하는 시험주행열차를 이용하여 의사정적재하시험을 실시해도 신뢰성 있는 정적응답비를 산정할 수 있는 것으로 판단된다.

- (4) 250km/h 이상으로 주행하는 상시운행열차의 동적계측값은 10km/h 주행하는 의사정적재하시험에서 구할 수 있는 정적처짐에 비교하여 평균 3.85% 정도의 상대오차를 갖는 정적처짐을 구할 수 있으나 경우에 따라서는 5% 이상의 상대오차가 발생하고 있어 의사정적 재하시험으로 적용할 수 없는 것으로 판단된다. 따라서 170km/h로 주행하는 시험주행열차의 계측 데이터의 신뢰성 확보여부를 확인하는 보조자료로 활용하여야 할 것으로 판단된다.
- (5) 재하시험열차에 의해 계측된 동적거동곡선을 필터링하여 산정된 충격계수는 주행속도가 250km/h 이상에서 항상 최대 충격계수가 산정되었고, 재하시험열차에 의한 충격계수와 상시운행열차에 의한 충격계수를 비교하면 상시운행열차에 의한 충격계수가 항상 더 크게 산정되는 것으로 나타나 250km/h 이상의 상시 운행시의 동적계측만을 계측하여도 신뢰성 있는 동적응답비를 산정할 수 있는 것으로 판단된다.

상시운행열차를 이용하여 산정된 교량의 내하력이 신뢰성을 확보하고 있는가를 파악하기 위하여 의사정적시험(10km/h)의 Low Pass Filtering한 정적처짐을 기준으로 상시운행열차의 동적응답곡선에 대해 Low Pass Filtering한 정적처짐과 비교한 결과, 170km/hr으로 주행하는 일일 시험주행열차의 Low Pass Filtering한 정적처짐은 어느 정도 동적효과가 반영되어 있다고 할지라도 신뢰할 수 있는 정적변위를 구할 수 있는 것으로 나타났으며, 충격계수는 상시운행시에 최대값이 계측되는 것으로 나타나 상시운행열차의 동적계측데이터를 이용하여도 공용내하력 산정을 위한 신뢰성 있는 응답수정계수를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 향후 고속철도 교량을 공용기간중에 정밀안전진단 세부지침서상의 현장재하시험방법을 적용하여 현장재하시험을 실시하는 것은 매우 비효율적인 방법이므로 상시운행열차에 의한 내하력 산정기법을 더 정밀하게 연구하여 구조물의 과학적인 유지관리를 실현해야 할 것이다.

담당 편집위원: 장정환
(티엠이앤씨 대표)
jang9344@empal.com