

고속철도 PSC-BOX교를 대상으로 상시운행열차를 이용한 현장재하시험에 의한 공용 내하력 산정에 관한 연구

Study on the Load Capacity Evaluation of An Existing Bridge with Field Load Test by Regular Schedule Train

이채규*[†], 김대호*, 정시욱**, 신철수***, 김 규***

Chae-gue Lee*[†], Dae-Ho*, Si-Youk Jung**, Chul-Sik Shin***, Gue Kim***

Abstract Load carrying capacity of an existing bridge needs to be properly assessed for the safe operation and efficient maintenance. For the evaluation of load carrying capacity considering the current state of a bridge, field load test with test train have been conventionally utilized, where the deflection of structural members loaded by the controlled loading are measured and analyzed. However, full or partial control on high-speed railway train may cause not only inconvenience to the traffic but also increase of the logistics cost and time. So, an alternative method is proposed using ambient acceleration data excited by regular schedule train on a bridge. For validation, the proposed method was applied to evaluate the load carrying capacity for precision safety diagnosis bridge. The results show that the proposed method gives a reasonable load carrying capacities without traffic control and with easy installation of sensors.

Keywords : Load Capacity, Response, Field load Test,

초 록 교량의 안전성평가에서 공용내하력은 기본내하력에 현장재하시험을 통한 응답보정계수를 적용한다. 도로교의 상시 주행 차량은 미지 변수가 너무 많아 「정밀안전진단 세부 지침서」에 제시된 표준재하시험에 의해 복잡한 절차를 걸쳐서 응답보정계수를 산정하고 있다. 반면 고속철도 교량의 상시 운행열차는 무게, 주행 위치 및 속도 등 많은 변수가 알 수 있는 변수이므로 상시운행열차에 의한 상부구조의 거동 계측을 이용하여 응답보정계수를 산출하는 방법을 제시하였으며 현장적용을 통한 공용내하력을 산정하여 표준재하시험에 의한 공용내하력과 비교한 결과 $\pm 6\%$ 이내의 상대오차를 갖는 신뢰성 있는 공용내하력을 산정할 수 있었다.

주요어 : 공용내하력, 응답보정계수, 표준현장재하시험, 상시운행열차

1. 서 론

「시설물의 안전관리에 관한 특별법」에 의거 고속철도교량의 공용내하력을 산정하기 위한 현장재하시험을 실시함에 있어 철도 특성상 시험일정 계획 수립이 복잡하고 일단 결정된 재하시험일정은 변경이 곤란하며, 시험 당일 기상조건 및 제한된 시험시간으로 인하여 예상치 않은 오차가 발생하는 경우 대처할 수 없으며, 구조물의 기능 저하, 보강 확인 등의 평상시 과학적 유지관리가 필요한 경우에는 과도한 경비와 시간을 투자하여 특정계획에 의한 재하시험을 실시할 수 밖에 없는 실정이다.

† 교신저자: (주)한국구조물안전연구원 (chaegue@naver.com)

* (주)한국구조물안전연구원 ** 세안안전진단(주) *** 한국철도시설공단

고속철도 교량은 도로교 혹은 일반철도에 비해 거의 동일한 크기의 하중이 정해진 레일을 주행하는 조건이므로 「정밀안전진단 세부지침서」에 제시된 재하시험열차를 이용한 표준현장 재하시험 방법 대신에 상시운행열차를 이용한 현장재하시험 방법의 적용하여 기존의 표준재하시험방법에 의한 결과와 비교 분석하였다.

2. 현장재하시험 결과 분석 방법

2.1 개요

정밀안전진단 세부지침서에서 제시하고 있는 표준현장재하시험은 일반차량이 완전히 통제된 상태에서 정적재하시험, 동적재하시험을 실시하도록 하고 있고 전면 교통통제가 어려운 경우에 저속에 의한 의사정적시험 및 Low-pass filtering방법을 추천하고 있다. 그러나 이러한 방법은 도로교와 같이 상시통행하는 차량의 하중 크기 및 작용위치의 불확실성에 대비한 것으로서 특정된 중량의 열차가 특정된 레일에서 주행하는 고속철도에서는 적합하지 않다. 반면 하중 작용 조건이 유리한 고속철도는 영업운행의 여러 가지 제약조건으로 인하여 표준현장재하시험 방법을 적용하는 것이 곤란하므로 상시운행열차의 동적계측을 통해 신뢰성 있는 내하력을 산정할 수 있도록 개선할 필요가 있다.

철도교량에서 표준현장재하시험 방법을 개선하기 위하여 재하시험열차를 이용하는 대신에 상시운행열차를 이용하는 방법이 연구되었다. 이왕철[2]은 일반철도의 강철도교를 대상으로 정밀안전진단의 현장재하시험을 통해 상시운행열차의 계측에 의해서도 신뢰성 있는 공용내하력을 산정할 수 있다는 것을 확인하였다. 이채규 등[3]은 고속철도 PSC-box 교량에 대해서 2011년부터 2012년에 시행한 정밀안전진단에서 표준현장재하시험 데이터와 상시운행열차에 대한 Low-pass filtering방법을 제시하였고, 제시된 필터링 방법에 의한 정적처짐값이 표준재하시험방법에 의한 정적처짐과 비교하여 상대오차 $\pm 5\%$ 이내임을 확인하였다.

그러나 상기의 연구들은 상시운행열차에 의한 동적응답을 Low-pass filtering을 통해서 정적응답과 충격계수를 산정하므로 인하여 필터링에 따른 오차가 발생할 수 밖에 없는 문제점이 있었다. 따라서 상시운행열차의 계측결과를 이용하여 공용내하력을 산정하기 위해서는 상시운행열차에 의한 동적응답을 필터링하지 않고 동적응답값을 바로 적용할 수 있는 새로운 분석방법이 필요하다.

2.2 응답보정계수와 수정응답보정계수

교량의 안전성 평가를 위한 현장재하시험은 교량 거동을 대표하는 데이터의 변화여부를 분석하고 교량의 실제 내하력을 정량화시키기 위해 이론적 방법으로 산정한 기본내하력을 응답보정계수로 보완하여 공용내하력을 산정하기 위한 것이 가장 큰 목적이다. 교량의 공용내하력은 다음과 같이 산정하도록 하고 있다.

$$\text{공용내하력}(P) = K_s \times R_F \times P_r \quad (1)$$

$$K_s = \frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} \times \frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}} \quad (2)$$

여기서, R_F : 기본내하율
 P_r : 활하중
 K_s : 현장재하시험을 통한 응답보정계수

$$\frac{\delta_{\text{계산}}}{\delta_{\text{실측}}} = \text{정적 응답비}$$

$\delta_{\text{계산}}$, $\delta_{\text{실측}}$: 구조해석, 정적재하시험(=의사정적재하시험)의 응답

$$\frac{1+i_{\text{계산}}}{1+i_{\text{실측}}} = \text{동적 응답비}$$

$i_{\text{계산}}$, $i_{\text{실측}}$: 철도설계기준, 동적재하시험에 의한 충격계수

$$i_{\text{실측}} = \frac{A_{\text{dyn}}}{A_{\text{sta}}} - 1$$

A_{dyn} , A_{sta} : 동적응답, 정적응답

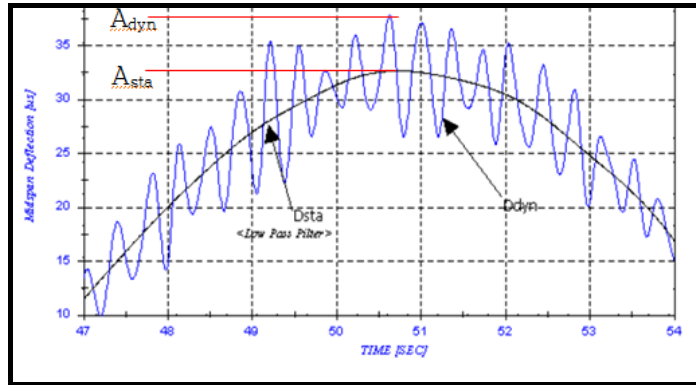


Fig.1 Dynamic response & Low-pass filtered response

정밀안전진단 세부지침서[1]에서는 현장재하시험과 구조해석을 통해 응답보정계수 K_s 를 산정하고 기본내하력(=RF × Pr)에 곱하여 공용내하력(Pr)을 산정하도록 하고 있다. 여기서 응답보정계수 K_s 는 정적하중에 따른 수치해석과 계측값의 응답비를 표현하는 정적응답비(= $\delta_{\text{계산}}/\delta_{\text{실측}}$)와 대상 교량에 주행 가능한 속도내에서 최대 동적효과를 표현하는 충격계수의 비를 표현하는 동적응답비(=(1+i_{계산}))/(1+i_{실측})로 산정하도록 하고 있다.

정적응답비에서 $\delta_{\text{실측}}$ 은 차량하중을 완전히 통제된 상태에서 시행하도록 하고 있으나 교통통제가 곤란한 경우 저속(10km/h)의 속도로 시험경간을 주행하여 계측한 동적응답곡선(Dynamic response)을 Low-pass filtering에 의해서 동적효과를 제거한 정적응답(Filtered response)를 구한 값을 사용할 수 있도록 하고 있으며, $i_{\text{실측}}$ 은 재하차량이 매 속도마다 동일한 코스로 주행할 수 없으므로 각각의 속도에 대한 동적응답곡선(Dynamic response)에서 충격효과를 제거한 응답값(Filtered response)과 동적응답값을 비교하는 방법으로 계산할 수 있도록 하고 있다. 또한 동적계측에서 재하차량의 주행 속도를 주행 가능한 범위내에서 속도를 변화시켜 가면서 주행하도록 한 것은 교량에 최대 동적효과를 발생시키는 임계속도의 충격계수를 반영하기 위함이다.

이와 같이 정적재하시험을 의사정적재하시험으로 대체 가능하도록 하고 각각의 속도로 주행한 동적응답을 정적재하시험 응답과 직접 비교하지 않고 각각의 주행 속도에 대해 별도의 충격계수를 산정할 수 있도록 한 것은 도로교의 문제점을 최대한 해결하고자 하는 방안이다. 반면에 거의 동일한 크기의 하중이 정해진 레일로만 주행하는 고속철도 교량의 동적응답곡선(Dynamic response)은 정적응답과 동적응답을 포함하고 있는 값이므로 K_s 의 분모항인 $\delta_{\text{실측}} \times (1+i_{\text{실측}})$ 와 동일한 값을 갖게 된다. 즉 철도에서는 열차가 레일에서만 주행하므로 정적응답비와 동적응답비를 별도로 산정하지 않고 동적응답값 자체를 직접 적용할 수 있다. 따라서 철도교량에서는 정밀안전진단 세부지침서에서 제시하고 있는 K_s 산정 공식 (2)의 대안으로 수정 K_s 산정공식 (3)를 적용할 수 있게 된다.

$$\text{수정 } K_s = \frac{\delta_{\text{계산}} \times (1+i_{\text{계산}})}{\text{최대동적 } \delta_{\text{실측}}} \quad (3)$$

여기서 최대동적 δ 실측 은 δ 실측 에 적용한 열차하중이 통과할 때 동적응답에서 계측된 최대 값이다. 수정 M_s 공식 (3)은 별도의 정적응답을 확인하지 않고 동적응답만으로도 공용내하력을 산정할 수 있도록 한 것으로서 거의 동일한 크기의 하중이 정해진 레일로만 주행하는 고속철도교량은 상시운행열차에 대한 계측으로도 신뢰성 있는 공용내하력을 산정할 수 있게 된다.

3. 현장검증시험

3.1 개요

현장검증은 경부고속철도상의 PSC-box교량의 정밀안전진단에서 실시한 현장재하시험의 계측 데이터를 활용하였다.

3.1.1 상시운행열차의 동적응답에서 필터링한 정적 처짐

2011~2012년 사이에 시행하였던 정밀안전진단에서 현장재하시험을 실시한 14개의 교량 상선과 하선 각각의 시험결과를 분석하였던 연구결과[3]에서 의사정적시험의 동적응답은 1Hz내의 필터링에서 일정한 정적응답으로 수렴하였으며, 상시운행열차의 동적응답은 10Hz이상부터 일정한 정적응답으로 수렴한 것으로 제시하였다. 또한 매일 첫번째로 주행하는 시험주행열차의 필터링한 정적응답은 의사정적시험에서 필터링한 정적응답 대비 상행선은 1.7%, 하행선은 2.8%의 상대오차 범위내에서 구할 수 있으며, 250~300 km/h로 주행하는 상시운행열차에 의한 동적응답을 필터링한 정적응답은 의사정적시험에서 필터링한 정적응답 대비 상행선은 최대 4.2%, 하행선은 최대 6.2%의 상대오차가 발생하는 것으로 분석하였다.

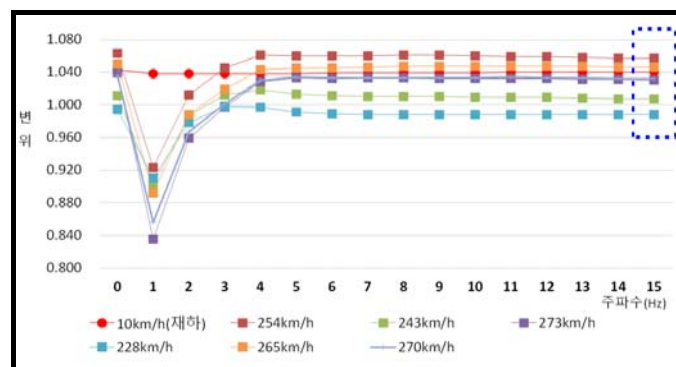


Fig.1 Low-pass filtering values for **Dynamic response of regular schedule train (2016)**

2015년 및 2016년 정밀안전진단에서 획득한 상시운행열차에 의한 동적응답을 필터링한 결과 2013년 연구결과와 동일하게 10Hz이상에서는 일정한 정적응답으로 수렴하였으며 2011년 실시하였던 의사정적시험에서 필터링한 정적응답 대비 -5.0% ~ 1.6%의 상대오차를 갖는 정적응답을 구할 수 있었다.

3.1.2 최대 충격계수 유발 임계속도

철도설계기준 노반편(2013)에서 공진여부를 분석하기 위한 임계속도(V_{cr})를 $V_{cr} = W_1 \times S_{eff}$ 로 산정하도록 하고 있다. 여기서, w_1 은 교량의 첫번째 휨 고유진동수이며, S_{eff} 는 열차의 지배적 타격간격(객차 간 중심간격)으로 고속열차는 18.70m로 규정하고 있다. 2013년 연구결과[3]에서는 재하시험열차와 상시운행열차의 충격계수를 각각의 동적응답을 필터링한 정적응답을 기준으로 충격계수를 산정하여 분석한 결과 재하시험열차에 의한 충격계수보다 상시운행열차의 충격계수가 전반적으로 더 크게 산정된 것으로 제시하였다. 2015년과 2016년 정밀안전진단에서 측정한 고유진동수를 이용하여 임계속도를 산정한 결과 PSC-Box교량은 단순교나 2경간 연속교 모두 276 ~

320km/hr로서 상시운행열차의 속도범위인 270 ~ 300km/hr와 근접하므로 상시운행열차조건이 최대 동적응답을 발생시킨다는 것을 확인하였다. 따라서 상시운행열차가 270km/hr이상으로 주행하는 PSC-Box교량은 상시운행열차를 이용하여 현장재하시험을 실시하여도 신뢰성 있는 공용 내하력을 산정할 수 있다.

3.1.3 표준 Ks산정식과 수정 Ks산정식

2015년 및 2016년 실시한 정밀안전진단에서 현장재하시험을 실시하였던 PSC-box교량을 대상으로 세부지침서에서 제시한 표준현장재하시험에 의해 정적응답과 동적응답을 별도로 계측하여 식(2)에 의해 산정한 응답보정계수 Ks와 상시운행열차에 의한 동적응답만을 가지고 식(3)에 의하여 산정한 수정Ks를 비교 분석한 결과 공진이 발생한 교량을 제외하면 ±5%이내의 상대오차를 갖는 응답보정계수 Ks값을 구할 수 있었다.

Table 1 Nomal Ks and modified Ks

교량명		일시	표준Ks 식(2)	수정Ks (식3)	상대오차 (%)	구조형식		비고
1	노장1교	2015	1.790	1.380	23	PSC-box	단순	공진발생
2	노장2교	2015	1.766	1.765	0	PSC-box	단순	
3	연제교	2015	1.059	1.002	5	PSC-box	단순교	
4	노장1교	2015	1.630	1.300	20	PSC-box	2경간 연속	공진발생
5	노장2교	2015	1.063	1.074	-1	PSC-box	2경간 연속	
6	연제교	2015	1.017	1.006	1	PSC-box	2경간 연속	
7	산동3교	2015	1.050	1.110	-6	PSC-box	3경간 연속	
8	동산교	2015	1.353	1.322	2	PSC-box	3경간 연속	
9	연제교	2015	1.197	1.194	0	PSC-box	7경간 연속	
10	연제교	2015	1.217	1.281	-5	PSC-box	7경간 연속	
11	문곡교	2016	1.413	1.446	-2	PSC-box	단순교	
12	중척1교	2016	1.500	1.419	5	PSC-box	2경간 연속	
13	시목교	2016	1.265	1.268	0	PSC-box	2경간 연속	
14	금강2교	2016	1.304	1.301	0	PSC-box	단순교	

3. 결론

시설물안전관리에관한특별법에서는 시간경과에 따른 교량의 공용 내하력을 평가하기 위해 주기적으로 현장재하시험을 실시하도록 권장하고 있다. 그러나 정밀안전진단 세부지침은 도로교를 기준으로 현장재하시험 실행 및 분석방법이 기술되어 있고, 도로교에서 발생될 수 있는 교통통제의 곤란뿐만 아니라 상시운행차량의 하중 규모 및 동적 재하시험시 주행 코스에 대한 불확실성으로 인하여 오차를 최소화하기 위해 Low-pass filtering이라는 기법을 적용할 수 있도록 하므로 인하여 동적응답을 필터링하면서 어쩔 수 없이 오차가 포함될 수밖에

에 없으며, 수많은 동적응답을 필터링함으로 인하여 시간적 경제적 손실이 발생할 수 밖에 없다. 그러나 고속철도 교량에서는 하중규모와 주행코스가 더 이상 불확실성이 아니므로 필터링 방법을 적용하지 않고 동적응답 자체를 바로 응답보정계수산정에 적용하는 수정 K_s 산정 공식을 제안하였다. 2015년 및 2016년 정밀안전진단에서 실시하였던 현장재하시험의 데이터를 분석하여 세부지침서에 제시된 표준재하시험방법에 의해 산정한 응답보정계수 K_s 와 상시운행열차에 의한 동적응답을 직접 적용한 수정 K_s 를 비교한 결과 공진현상이 발생한 교량을 제외하면 $\pm 5\%$ 이내의 상대오차를 갖는 응답보정계수 K_s 값을 구할 수 있었다. 따라서 상시운행열차에 의한 수정된 K_s 식을 응답보정계수산정에 대해서 추가적인 데이터를 수집하여 신뢰성을 확보한다면 공용내하력을 산정하기 위한 필터링에 따른 계산오차의 감소, 유지관리의 효율성 증대 및 과학적인 유지관리를 위한 현장재하시험의 개선에 크게 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 국토교통부(2016) 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침서(교량편), pp. 1-50 - 1-55.
- [2] 이왕철 (2009) 상시운행열차를 이용한 강철도교 내하력 평가 방법에 관한 연구, 한양대학교 석사학위 논문
- [3] 이채규, 정시욱, 김대호, 남진우, 황규산 (2013) 경부고속철도 교량의 현장재하시험 방법 개선, 한국구조물진단유지관리공학회 가을 학술발표회 논문집, pp. 643-646.