

# KTX 실차 고속 동하중 적용한 철도교 내하력 평가 개선방안

## Improvement Plan of KTX's Bearing Capacity Evaluation Using High-speed Dynamic Load

박옥정<sup>†</sup>                      민지홍\*                      이동춘\*\*  
Park, Ok Jeong              Min, Ji Hong              Lee, Dong Choon

**초 록** 통상적으로 철도교 정밀안전진단 시 필수항목인 내하력 평가는 정기열차 운행에 지장이 없는 심야시간대에 임시열차를 편성하여 측정된 자료를 토대로 산정하는 것이 일반적이다.

그런데 이 과정에서 여러 현실적 제약이 있어 중요한 항목인 하중, 열차속도 등을 운행조건과 유사하게 모의하기가 어렵고, 현시각 운전명령에 따라 운행한 측정치로 내하력을 평가 하기때문에, 상당한 편차가 발생하는 문제가 있다.

이런 문제점을 해소하고자 평가대상교량을 운행하는 정기열차의 운전속도, 운중 등의 실측치를 적용하여 철도교 내하력을 평가함으로써 임시열차를 편성하지 않는 만큼, 부족한 KTX 차량 운용 효율을 높이는 동시에 혹한기 연중 최저온도 대부터 혹서기 연중 최고온도 대까지 구조물과 레일축력 부가상태별로 각각의 실용력, 변위상태를 확인할 수 있고, 단선 임시열차로는 확인할 수 없는 상하선 교행시 열차풍의 부가효과도 확인 가능하다는 점 등 안전진단 정확도와 신뢰성을 제고하는 많은 장점이 있음을 알 수 있었다.

**주요어** : 내하력평가, 고속 동하중, KTX 실측

† 교신저자 : 정회원, 철도건설협회  
E-mail : ojpark12@naver.com TEL : 010-9496-9770  
\* 정회원, (주)철도안전연구소 기술연구소  
\*\* 정회원, 한국종합기술(주) 철도부

철도교량의 내하력 평가는 도로교량과 달리 일정 궤도를 주행하며, 중량의 축중이 일정거리로 반복되는 연행하중, 고속주행과 이에따른 횡하중의 명료한 응답 및 및 진동특성 등이 나타난다. 철도교는 하중비(활하중/고정하중)가 크므로 활하중의 영향이 높고, 열차하중의 연행, 다양한 속도대역, 차체의 롤링과 피칭, 엔진의 구동, 대차의 진동과 차륜의 회전운동 등 다양한 진동 유발요소가 있으며, 궤도에서는 궤도자체의 동적특성과 체결구의 일정한 간격 그리고 교량에서는 교량자체의 고유진동, 동일 거더의 연속에 따른 가진 등 다양한 진동 유발요소와 이들의 상호작용으로 대부분 실제 운행되는 열차에서도 공진이 자주 발생하는 것이 철도교의 동적 특성이다.

이러한 공진현상은 국철이나 고속철도를 운행하는 열차의 교량 주행에서 자주 나타나나, 국철의 재하실험에서는 기관차 1~2량으로 열차 편성이 짧으므로 가진에 의한 교량거동의 증폭은 확인이 거의 불가능하다. 또한 고속철도의 경우 재하실험열차로 KTX를 사용하므로 20량의 연행으로 교량의 고유진동과 차륜의 타격주기가 유사할 경우 일정속도 대역에서 가진에 의한 증폭이 측정될 수 있을 것이나, 이 또한 재하실험열차는 공차이므로 실제와는 다를 것이며, 확률적으로 높지는 않지만 상하행 열차가 동시 통과될 때의 동적거동을 확인하여 교량의 안전성이나 사용성을 평가하는 데에는 한계가 있다.

이와 같은 많은 동적특성을 재하실험열차로 단시간에 확인하는 것은 불가능하다. 일부에서는 정재하실험이 반듯이 필요한 것으로 주장하나 교량에서 KTX차량으로 정재하실험을 하는데

는 1시간이 상이 소요되며, 한국시설안전공단의 재하실험 지침에 따르면 이를 3회 측정할 것을 권고한다. 이는 차단시간 등을 고려한다면 적어도 2일간 수행하여야 하며, 동적재하실험을 이 지침에 의해 수행한다면 최소 5일 이상이 소요될 것이다. 이러한 이유로 실제 교량에서 거더의 대표적인 동적특성을 파악하기에는 한계가 있다.

본 연구의 선행연구에서 운행열차의 운중을 측정하여 철도교의 재하실험 및 내하력 산정방법은 기존 재하실험과 내하력 평가법을 개선할 수 있는 방법을 제시하였으며, 이 방법으로 기존선과 고속철도에서 실제 재하실험과 동일한 조건으로 측정하고 결과를 비교검토하여 유용한 방법임을 기술하였다.

본 연구에서는 고속철도교의 정밀안전진단에서 실시된 재하실험과 문헌[/,/]에서 제시된 운행열차를 이용한 재하실험 방법을 비교 및 검토하고, 본 연구에서는 이들을 요약하고 운중측정을 통한 재하실험의 장점 및 현장안전과 유지관리에 유용함을 밝히고자 하였다.

## 2. 교량 내하력 산정 방법

철도교량에서 내하력실험을 시험열차와 운행열차를 이용하여 상호비교한 선행연구[/,/]내용을 요약하고, 운행열차를 이용한 내하력 산정 방법과 산정시 문제점에 대하여 간략히 기술하고자 한다.

### 2.1 기존 재하실험에 대한 개선( 필요성 )

현행 철도교 재하실험에 사용되는 차량은 기존선에서 기관차 1량 또는 2량을 사용하며 고속철도교에서는 KTX 고속열차를 사용하여 재하실험을 수행하고 있다. 그러나 이러한 방법은 기존선에서는 교량의 동적거동에 영향을 미치는 열차의 연행에 대한 분석이 불가능하며, 고속철도에서는 저속에서부터 고속(300km/h)에 따른 일정증속시험이 사실상 불가능하고 고속시험의 경우 교량을 포함하여 30km 정도의 선로가 확보되어야 한다. 고속열차의 투입 및 각종 전기, 신호, 안전 등의 문제는 물론 재하실험에 따른 발주처의 경제적 손실 또한 적지 않으며, 승객이 탑승하지 않으므로 교량에 미치는 동적 효과의 검증에도 불리하게 된다. 이러한 문제는 운행되는 열차의 운중을 측정하여 재하실험에 활용한다면 대상교량에서 최대의 동적효과를 얻을 수 있는 등 위의 문제들이 해소되게 된다. 기존의 재하실험과 운행열차를 이용한 재하실험을 비교하면 다음 표와 같다.

### 2.2 기존 내하력 산정식의 간소화( 근거 )

현재 적용되는 기존의 내하력(F)산정방법은 아래 식1과 식2이며 식 2를 간소화시키면 식 3이 되고 식 3에서 은 시험열차를 정적응답이 최대로 발생하는 교량상부에 재하시키고 이에 대한 정적응답고 열차를 주행시켜 동적응답을 구하고 이들로부터 응답비(Ks)를 산정하여 내하율(Rf)을 산정하는데 사용된다.

$$P = K_s \times R_f \times Pr \quad \text{식 1}$$

$$P = \frac{d_s \times (1 + i_s)}{d_{st} \times (1 + i_t)} \times \frac{f_a - f_d}{f_l \times (1 + i_s)} \times Pr \quad \text{식 2}$$

$$= \frac{d_s}{d_{ymax}} \times \frac{f_a - f_d}{f_l} \times Pr \quad \text{식 3}$$

여기서,  $d_{ymax} = d_{st} \times (1 + i_t)$

$i_s, i_t$  : 이론 및 실측 충격계수

$d_s$  : 이론처짐

$d_{st}$  : 재하실험에서 정적처짐

$d_{ymax}$  : 재하실험에서 최대처짐

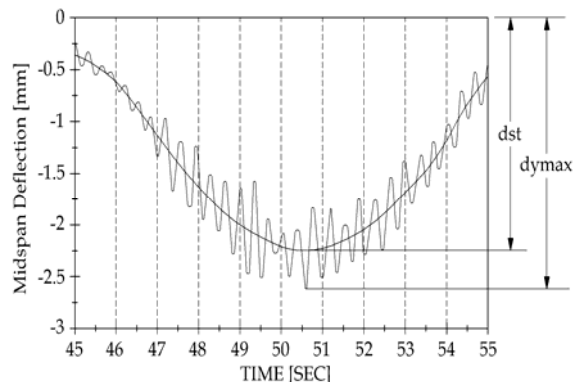


그림1. 충격계수와 최대처짐 관계

fa : 허용응력 , fd : 고정하중응력, fl : 설계하중응력(활하중)

내하력을 구하는 식 3은 계산에 의한 내하율(Rf)과 계산처짐 및 최대 처짐으로 산정할 수 있음을 의미한다. 이는 정재하실험이 필요하지 않다는 뜻이며 동적 운행열차를 이용한 동적측정으로부터 산정할 수 있고 이때 열차의 윤중이 다를 수 있으므로 이를 측정하여 윤중에 의한 이론처짐을 산정하면 되는 것이다.

운행열차를 이용한 재하실험은 2003년 동해남부선 범어사천 등 25개 교라에서 적용시킨 바 있으며, 2009년 경부선 금호강철교, 경부고속철도에서는 2010년 갈항교 및 2011년 문곡교에서 적용시켰다.

금호강 관형교에서 내하력은 운행열차에 대비 재하실험열차 내측거더에서는 1.0%높게 외측 거더에서는 -2.9% 낮게 나타났으며, 문곡교에서는 1.0%높게 나타났다. 이 결과들은 기존방식과 3%이내의 오차를 보였다.

그러나 본 연구방법은 윤중을 직접측정하여 이를 가지고 내하율과 정적처짐을 산정하므로 이를 측정하지 않고 열차제작하중으로 고정하여 내하력을 산정하는 기존 방식보다 합리적인 방법임을 알 수 있다. 다음 윤중 통계를 보면 평균치는 제작하중과 큰 차이가 없으나 측정된 윤중은 변동계수가 약 6%정도로 실제 내하율 계산에서 측정된 하중을 사용하는 것이 합리적이다. 측정에는 오차가 있을 것이나 운행열차로 다수의 측정 결과들로부터 통계적인 방법으로 내하력을 산정하는 것이 보다 공학적 관점에서 합리적이다.

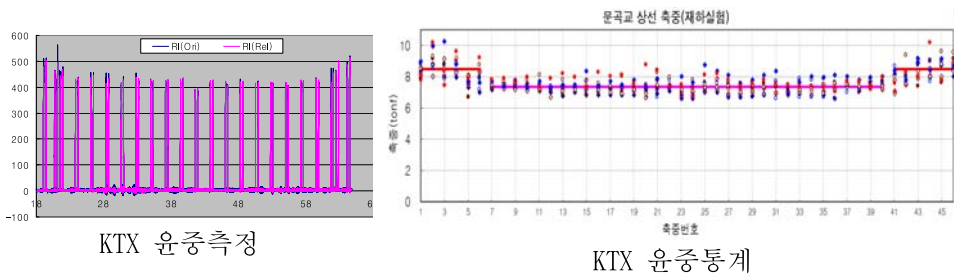


표 4 축중 전체통계(kN)

전체	동력차	객차
평균치	85.4	74.7
최대치	102.5	88.0
최소치	72.6	62.4
표준편차	5.6	4.3
변동계수	6.54	5.72

- 1) 기존의 재하시험에서 정적처짐을 구하기 위한 많은 노력이 필요 없다.
- 2) 이론적 충격계수나 실측 충격계수를 구할 필요가 없다.
- 3) 재하실험 하중으로 이론최대처짐이 계산되면 실측최대처짐으로부터 내하력을 구할 수 있다.
- 4) 3항에서의 하중은 실측한 윤중과 축거를 사용하며 필요시 횡압도 측정하여 사용한다.
- 5) 측정된 윤중 모두에 대한 이론 및 실측치를 구하여 식 4로부터 내하력을 산정한다.
- 6) 응답비 통계로 공진성을 분석하고 이로 인한 내하력이 낮게 나오는 경우 동적검토를 수행하여 내하력을 재계산한다.
- 7) 정적처짐 및 충격계수가 필요할 경우 최대처짐으로부터 filtering하여 정적처짐과 충격

표 5 기존 재하실험과 운행열차를 이용한 재하실험 비교

		기존 재하실험	운행열차를 이용한 재하실험	
열 차		시험열차	운행열차	
하 중		열차설계하중(실제하중과 다름)	통과열차 윤중측정	
내 하 력	정적치짐	정재하실험 또는 의사정적실험	사용하지 않음	최대 동적응답으로부터 산정
	충격계수	시방서에 의해 산정	사용하지 않음	
	실측충격계수	동적과 정적 치짐비로 산정	사용하지 않음	
	산정식	복잡함(식 1 적용)	간단함(식 2 적용)	
횡하중		적용 불가	횡압을 측정하여 내하력에 적용	
곡선 및 캔트		적용불가	원심력 측정하여 내하력에 적용	
윤 중		측정 안함	측정(통과톤수의 합리적 산정)	
경제성		시험열차, 선로차단, 행정비용 필요	필요 없음	
실험안전		시험중 안전사고 대비	안전 위험 없음	