

신형식 철도교의 동적안전성 검토 및 적용 사례

Dynamic Performances Evaluation for Recently Developed Railway Bridge Decks and Its Applications



이인규*
In-Kyu Rhee



김성일**
Sung-Il Kim



김현민***
Hyun-Min Kim

1. 머리말

1960년대 초부터 국내에 도입된 프리스트레스 콘크리트 (pre-stressed concrete; PSC)의 기술은 급속히 보급되어 현재 PSC 합성형교가 철도교 및 도로교에 차지하는 비율은 매우 높다. PSC 거더는 시공성이 다소 복잡하고 품질관리에 어려운 점이 있지만 이러한 단점을 해결하기 위한 다양한 제작기법과 시공법이 제안되어 시공성, 경제성, 구조적 안정성에서 독보적인 위치를 차지하고 있다. 국내 철도교량 분야에도 <그림 1>과 같이 기존선의 교체 및 신설구간에는 경간길이 25m~30m의 일반 PSC 거더 및 프리플렉스 거더 등이 이용되고 있다. 현재 25m~40m 구간의 중소경간의 상부구조 형식은 각각의 재료특성, 구조성능 및 가격경쟁력을 극대화 하기위해 다양한 형식이 제시되고 있으며 국내 철도환경에 적용가능성이 검토되고 있다. 일부 상부구조형식은 특정 소규모 구간에 시험시공이 되어 있는 실정이다.

현재 기준에 시공되어있는 철도교량은 경간 18m 이하의 판형교가 36%를 차지하고 있으며, RC슬래브교 및 T빔교와 같은 콘크리트 교량 역시 대부분 25m 이하의 단지간 교량으로 설계 및 시공되어있다. 그러나, 토목 설계 및 시공기술의 발달과 더불어 교량의 장경간화는 경제성 및 공학적 효율성과 더불어 현재 세계적인 추세이며 국내 철도교량 분야에도 기존선의 교체 및 신설구간에는 경간길이 25m의 PSC거더교 및 30m 이상의 프리플렉스 거더 교량 등 다양한 교량형식이 사용되고 있으며, 특히 효율적인 단면 활용이 가능한 강재와 콘크리트를 합성시킨 신형식 교량 개발이 <그림 2>와 같이 급속히 확산되고 있는 중이다. 중소지간(경간장 40m 이하)의 경우에는 신형식 철도교 상부구조가 각각 기술적인 장점을 내세우며 경쟁을 벌이고 있다.

기존 철도교의 대다수인 PSC 거더 교량은 1960년대 국내에 처음 도입된 이래 뛰어난 시공성과 경제성으로 경간길이 30m 이하의 철도교 및 도로교에 매우 광범위하게 적용되었다. 그러

Slab, T-Beam, PSC Girder	Preflex	Steel Box, PSC Box	Arch, Truss, Extradosed	Cable-Stayed, Suspension
Short (~25m)	Medium (25~40m)	Medium-Long (40~70m)	Long (70~120m)	Very Long (120m~)

그림 1. 경간장별 대표적 교량상부구조 형식

* 정희원, 한국철도기술연구원 철도시스템연구센터 선임연구원
rhee@krti.re.kr

** 정희원, 한국철도기술연구원 철도시스템연구센터 선임연구원

*** 한국철도기술연구원 철도시스템연구센터 선임연구원



그림 2. 최근 개발된 다양한 신형식 철도교량 상부 구조

나, 자중이 크고 형고가 높기 때문에 경간길이 30m 이상일 경우에는 형고와 무게가 매우 비효율적이 되어 사용에 많은 제약이 따른다. 프리플렉스 교량은 이러한 PSC 거더의 대안으로 프리플렉션에 의해 콘크리트 단면에 압축력을 도입하여 단면성을 개선하고 장경간화 할 수 있는 장점을 지니고 있으나, 시공/제작상의 번거로움, 장기거동 손실 과다 발생 등의 문제점이 있는 실정이다. 신형식 거더, 슬래브 또는 슬래브일체식 철도교량은 일반적으로 이러한 단점을 보완하여 단면의 효율성을 높이고 장기거동 성능을 개선하고자 개발된 교량이다.

중소시간장을 가진 철도교 신형식의 치열한 경쟁의 배경에는 인구밀집지역인 도심부나 주거지역 인근에서 이루어지는 철도교량 신축에 있어서 급속시공은 매우 의미가 있다. 이러한 신속한 시공과 더불어 교량 거더의 형고의 유동적 조절도 중요하다. 기존 I형 거더는 단면에서 연직방향으로 중립축으로부터 떨어진 모멘트 팔 길이와 긴장력을 이용한 평형을 근간으로 하는 까닭에 형고 조절에 있어 다소 어려움이 있었다. 이에 제안된 신형식 프리캐스트 거더는 긴장력 조절, 압축축 성능향상에 따른 내하력 제고, 조립식의 간편한 시공성, 긴장재 면적조절 및 장기내구성 향상, 형고의 유연한 조절 등의 장점을 가지고 전형적인 I형 거더에 도전하고 있다. 이러한 시공성, 경제성, 내하력, 형고조절

의 유연성 등에 더불어 상부구조 경량화라는 부가적인 혹은 의도적인 이점을 동시에 구현할 수 있어 현 건설산업의 큰 키워드에 적절하다고 사료된다. 이러한 신형식 거더의 철도현장 적용성을 검토하기 위해서는 사전 정동적성능검증이 필수적이다. 도로교량과 달리 철도교량은 설계에 적용되는 하중의 크기 및 특성에서 많은 차이가 나며, 특히 지속적으로 반복되는 고속 중량의 열차하중에 대한 검토가 필요하다. 즉, 동적 이동하중의 반복작용으로 인한 진동특성 및 처짐과 가속도 등 동적응답과 피로현상 및 공진 가능성에 대한 검토가 이루어져야 한다.

2. 철도교량의 동적안정성 검토 과정

신형식 거더 교량의 철도교량 적용성 검토를 위해서는 설계기간장에 대해 철도교에 적합한 단면을 설계하고, 정적재하실험을 통해 새로이 구성된 단면에 대한 하중전달능력과 극한파괴패턴을 확인하여야 한다. 그와 더불어 철도교량의 동적인 안정성 확보를 위해 선정된 단면의 동적 안정성에 대한 거동분석 및 동특성 실내 실험을 실시한다. 철도교량에서 확보되어야 되는 동적안정성 인자, 예를 들면, 열차하중과 교량자체의 고유진동수간의 관계로 발생될 수 있는 공진시 동적연직처짐(교량상부구조), 연

직가속도(도상교란), 단부격임각(레일수준면), 먼틀림(하중분배) 그리고 고유진동수(공진대역 대비 최적설계) 등을 기준으로 개별적 동적 구조안정성 및 사용성 검토를 종합적으로 수행하여야 한다. <표 1>은 개별적 동적성능 검증항목을 나타내고 있다.

이러한 동적성능을 종합적으로 검토하기 위해 신형식 거더 교량의 실물모형에 대한 동적특성 분석 실험을 수행한 결과와 이 결과를 이용한 주행열차 하중에 대한 이동열차하중 해석 및 교량-열차 상호작용해석 수행을 통하여 동적거동을 분석하고 국내외 시방기준과의 적정성을 검토하여 동적성능을 평가하여야 한다. 현재 국내에서 운행되고 있는 철도차량은 고속철도인 KTX와 일반철도인 새마을호, 무궁화호, 화물열차 등으로 구분될 수 있으며, 일반철도의 새마을호, 무궁화호, 화물열차 주행 시와 고속열차인 KTX 주행 시에 대한 컴퓨터를 이용한 주행시뮬레이션을 실시하게 된다. 이러한 컴퓨터 시뮬레이션의 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 해석 교량모델, 입력물성치의 선정은 매우 중요하다. 입력 물성치의 대표적인 항목은 재료의 탄성계수, 푸아송비, 단위중량 등이며 이들 입력치를 통해 교량의 강성과 질량으로 대표화되며 최종적으로 이 들의 비로 규정된 고유진동수를 통해 해석모델의 적정성을 판단한다. 고유진동수는 일반적으로 고유치 문제에서의 스칼라 에너지양에 해당하며 대응되는 고유모드는 변위 방향성을 나타내어 이들 최소고유치와 그의 고유모드의 삼중적이 탄성에너지를 나타내게 되므로 실제 교량과 해석 교량과의 조율에 적절히 이용될 수 있다.

특히, 도로교와 철도교의 가장 큰 차이 중 하나는 중량이 상대적으로 큰 열차 하중이 열차 바퀴를 통해 교량에 재하되는데 대차간격에 따라 일정한 간격으로 전달된다는 점이다. 이는 열차가 통과하는 동안 일정한 간격의 반복하중이 재하되는 것을 의미하고, 이로 인해 하중재하주기와 구조물의 고유주기가 일치하는 경우 공진 발생가능성을 항상 내포하고 있다. 이 반복하중에 의한 공진의 영향은 구조물의 안전성에도 영향을 미칠 수 있지만 그보다는 유도상/무도상 궤도의 안전성과, 특히 열차 승객의 승차감에 더욱 좋지 않은 영향을 미치는 등 사용성에 대해 문제를 야기할 수 있다. 이러한 열차의 반복하중을 받는 교량의 동적거동을

정확히 분석하기 위해 교량의 동적거동과 관련되는 특성치를 정확히 입력하는 것은 매우 중요하다.

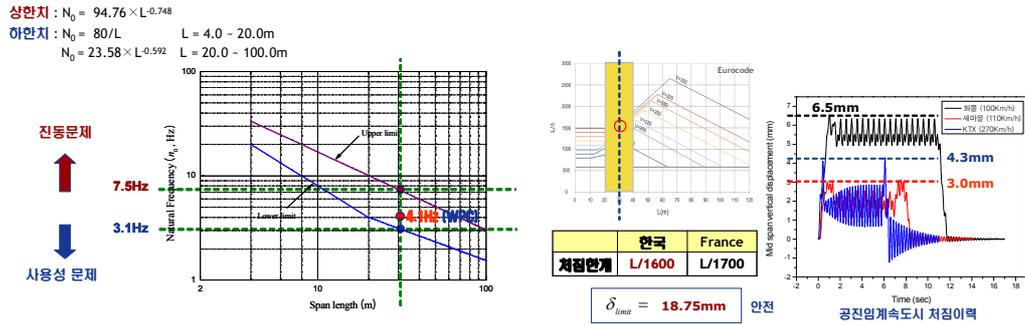
일반적으로 동적인 특성인 고유진동수와 감쇠비를 정확하게 추출하는 방법은 실물크기의 피 실험체에 가진기(혹은 파형을 발생시키는 가진원)를 이용한 가진 시험을 통하여 고유진동수와 감쇠비를 측정하고, 이로부터 얻어진 특성치를 철도교량의 동적 성능 평가시 동특성에 대한 입력치로 사용하면 될 것이다. 가진시험을 이용한 동특성 추출방법은 매우 간단하며 낮은 가진진동수에서 높은 진동수 범위로 단조증가(sweep)시키면서 피시험체의 고유진동수와 중첩이 되는 경우에 가장 큰 응답(가속도, 변위 등)을 나타내며 그 때 관련한 응답을 통하여 고유진동수와 감쇠비 등을 추정할 수 있겠다. 그러나 교량의 상부구조에 한해서는 중앙부에 위치한 가진기의 배치 뿐만 아니라 중앙에서 벗어난 다양한 부위에 위치한 가진점을 통하여 취득한 응답을 참조하여 최종적인 고유진동수를 판별하는 것이 중요하다. 교량의 구조는 단순구조, 연속구조 또는 사교, 직교 등의 기본 평면기하적인 차이가 있기에 다양한 위치에서의 가진점은 일반적인 고유진동수를 파악하는데 매우 중요하다. <그림 3>은 일반적인 단순지지된 거더의 휨 특성(1차 모드)를 파악하는데 주요한 가진방법을 예시한 내용으로 국부적인 충격해머를 이용한 충격파의 입력으로인해 발생하는 매질파를 설치된 가속도계를 이용하여 취득한 파형을 통해 고유진동수를 측정하는 방법과 더욱 큰 전달에너지를 갖는 관성에너지를 이용한 기계식 가진기를 이용하는 것이 일반적이며 더욱 확실한 고유진동수를 예측할 수 있다. 고유진동수는 주로 가진으로 인해 발생하는 강제진동 영역에서 판단할 수 있고 발생한 진동자체를 해당 구조물이 신속하게 흡수하거나 소산시키는 성능을 일반적으로 감쇠비로 정의한다. 감쇠비는 재료 혹은 구조물의 손상에 의하여 발생하거나 건설재료의 특성(예: 경량콘크리트보), 거더를 구성하는 기하적 형상 및 방법에 따라 달리 나타날 수 있다. 일반적으로 설계를 목적으로 하는 열차이동하중 해석에서 이용될 수 있는 적절한 감쇠비 역시 가진 실험의 자유진동영역에서 추출하여 사용할 수 있다.

표 1. 일반적인 철도교량의 동적성능검증 항목

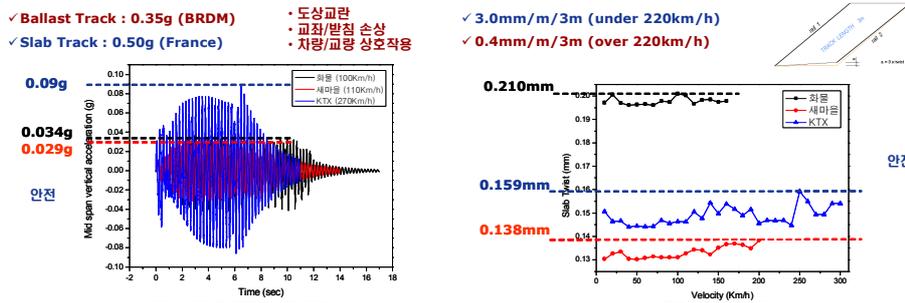
관련 특성	측정 항목
구조안전성	주부재 응력(충격계수)
설계변수	고유진동수
주행안전성 및 구조안전성	상판의 연직가속도
	단부격임각
	상판의 먼틀림
승차감	경간 중앙부 연직처짐
	객차 연직가속도



그림 3. 비대칭 매스에 의한 관성력을 이용한 가진기 및 충격해머에 의한 고유진동수 추출 방법



(a) 철도교량 상부구조의 고유진동수 상, 하한치 및 연직처짐 허용기준(예)



(b) 철도교 상부구조의 연직가속도 및 면틀림 허용기준(예)

그림 6. 일반적인 철도교의 동적성능검사의 대표적 항목 및 방법(예)

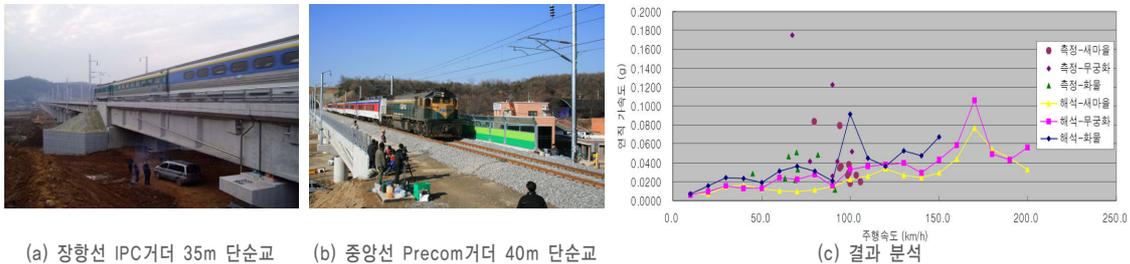


그림 7. 신형식 상부구조를 갖는 철도교량의 실영업열차 주행을 통한 현장재하실험 및 결과 분석

4. 맺음말

철도교량은 일반적으로 도로교와 달리 중량의 열차가 주기적으로 재하된다. 이러한 열차에 의한 주기적인 동적하중에 의한 교량의 거동을 검토하여 동적안전성과 사용성 관련 기준 만족 여부를 확인하여야 한다. 경제성, 시공성 및 사회환경적 요구되는 조건과 더불어 경량화, 급속시공 요건 등을 새로이 수용한 신형식 상부구조 철도교량에 대한 동적성능검증은 구조안전성을 추구하는 정적성능과 더불어 동적효과를 고려하면서도 사용성의 요구 사항을 만족시켜야 하므로 필수적인 검토사항이다. 신형식 거더의 구조부재로서의 정동적 실험의 결과를 통해 기본적인 구조 성능과 사용성능을 확인하고, 이들 실험에서 추출된 기본 물성치

를 이용하여 신형식 거더, 슬래브로 구성된 경간장별 철도교량에 대해 각 열차하중, 열차속도에 따른 동적성능 검사를 설계기준에 근거하여 판단할 수 있다.

최종적인 검증과정으로서 해당 교량이 현장적용될 경우 실 열차 주행시험을 통하여 정동적 구조성능과 소음진동 등의 영향에 대하여 평가를 수행할 수 있다. 이러한 체계적인 과정을 거쳐 종합적인 구조적 안전성 및 사용성, 사회환경요건을 구비하는 신형식 철도교가 제시되도록 하여야 한다. □

담당 편집위원 :
 이희업(한국철도기술연구원) leehu@krti.re.kr