Full-scale 실험 모드해석을 이용한 노후화된 철도판형교의 진동특성

Vibrational Characteristics of the Deteriorated Railway Plate Girder Bridge by Full-scale Experimental Modal Analysis

김 주 우¹⁾ · 정 희 영²⁾
Kim, Joo Woo · Jung, Hie Young

요약 : 본 연구에서는 실험적 모드해석 기법을 이용하여 외부환경에 직접 노출되어 있는 실제 철도판형교의 full-scale 동적 테스트가 수행되었다. 충격해머 모드실험에 의해 얻어진 철도판형교의 모드 매개변수를 유한요소해석으로부터 구한 고유진동수와 모드형상과 비교, 분석하였다. 실험적 모드해석에 의해 측정된 실험 데이터와 해석적 진동분석에서 얻어지는 출력만의 데이터를 교량 부재의 기하학적 특성 및 재료적 특성을 다양하게 고려하여 모델보정 테크닉에 적용하였다. 철도판형교의 실험적 모드해석 결과를 검증하기 위한 유한요소모델이 모드인식 기법을 이용하여 보정되었다. 실험 데이터와 유한요소해석 기준모델의 모델보정과정의 결과와 함께 부재특성의 변화를 통하여 이루어질 수 있는 손상평가에 대한 기초적 데이터베이스가 제공된다.

ABSTRACT : In this study, experimental vibration tests are performed on a real full-scale railway steel plate girder bridge, which resides in open-space environments. Using experimental modal analysis techniques, the modal parameters of the railway steel plate girder bridge yielded by the modal testing of the impact hammer are compared and investigated with the natural frequencies and mode shapes obtained by finite element analysis. This work focuses on the application of model updating techniques to measured experimental data and output-only data from an analytical vibration study that takes into account various geometric and material properties of the bridge members. A finite element model of the railway bridge structure is used to verify the modal experimental results. It is subsequently updated using the corresponding modal identification technique. The basic database is provided to evaluate damage, which can be determined based on the changes in the element properties, resulting from the process of updating the finite element model benchmark and experimental data.

핵심용어 : 철도판형교, 실험 모드해석, 모델보정, 모드 매개변수, 충격해머

KEYWORDS : railway plate girder bridge, experimental modal analysis, model updating, modal parameter, impact hammer

1. 서론

1899년 경인선 신설을 계기로 철도시대를 개막한 이래 안전성, 에너지 효율성, 환경 친화성 등 사회·경제적 측면에서 철도교통수단에 대한 수요가 증가할 전망이다(건설교통부, 2007). 이에 따라 공용기간 동안 철도 구조물의 지속적인 감시를 통하여 구조성능을 유지하는 것이 불가피하며, 특히 기존 노후화된 교량 등 노반면을 제공하는 구조물에 대한 관

리가 절실하다. 이러한 구조물 중 판형교량은 그림 1에 나타난 바와 같이 상당수가 1930~1940년대에 건설된 초기형태의 철도교량 중에 하나로, 다른 구조형식의 신설교량으로 대체되어 그 수가 점차적으로 감소하고 있으나 현재 공용중인 국내의 기존선 철도교량 2,500개(철도통계연보, 2008) 중 791개(31.6%)로 아직까지 상당부분을 차지하고 있다. 대부분의 판형교는 사용연도가 오래되어 노후화되었으며, 사회·경제적 및 안전성 측면에서 지속적이고 진보된 유지관리를 위한 진

1) 교신저자. 세명대학교 건축공학과 교수, 공학박사
(Tel. 043-649-1329, Fax. 043-649-1755, E-mail: kw_kim@semyung.ac.kr)

2) 서울시립대학교 토목공학과 교수, 공학박사(hyjung@uos.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

단기술이 요구된다.

지난 30여 년 동안 구조물의 진동특성에 기초한 구조성능 및 손상평가 SHM(Structural Health Monitoring)기법의 잠재적 적용성으로 인하여 많은 연구자들(Richardson 등, 1974; Banks 등, 1996; Wang 등, 1997; Straser 등, 1998; Elliot 등, 1998; Parloo 등, 2003; Catabas 등, 2008)에 의하여 이루어져왔다. 판형교의 동적거동특성 평가에 대해서는 실험 및 수치해석을 이용한 연구가 황원섭 등(2007), 김현호 등(2005), 오지택 등(2002)에 의해 수행되었으며, 이들 연구에서는 외부 열차하중에 대한 국부적인 측정 위치로부터 얻어진 동적응답을 통하여 판형교의 동적거동을 예측하였다. 또한, Hu 등(2001)과 이정휘 등(2005)은 진동특성을 이용한 단순 강교량의 손상감지기법을 제시함으로써 결과의 타당성을 검증하였으나, 복합적인 거동 특성을 가진 판형교의 손상평가에 대한 연구는 상당히 미흡한 편이다.

이 연구에서는 full-scale 철도판형교에 대해 충격해머(impact hammer)를 이용한 실험적 모드해석(Modal Analysis)을 수행함으로써 모드 매개변수(Modal Parameter: 고유진동수, 감쇠비, 모드형상)를 도출하여 판형교의 진동특성을 분석하였으며, 유한요소해석을 통해 실험의 신뢰성 및 상관성을 검토하였다. 또한, 유한요소해석을 이용한 근사 매개변수 연구를 통하여 판형교 구성요소의 재료특성, 구속조건 및 손상 정도에 따른 모드 매개변수의 변화 양상을 파악하였다. 본 논문에서 제시한 실험 모드해석 과정 및 결과는 향후 기존 판형교량에 대한 SHM 기법 적용을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다.

(a) 연도별-구조형식별 철도교의 설치개소 변화추이

(b) 구조형식별 철도교 분포 현황(2008년 철도통계연보)

그림 1. 공용중인 철도교의 통계현황

2. 실험 모드해석

실내 실험을 통한 구조식별(system identification)의 모드실험에 대해 최근에 제시된 연구발표는 구조물의 구성요소의 손상탐지 및 평가에 대해 신뢰할만한 결과를 제시하고 있다. 그러나 이러한 연구에 있어서, 소음, 온도 및 습도 등의 외부환경과 차량운행 등과 같은 운영상태(operational condition)에 직접 노출되어 있는 실제 구조물에 대한 적용성은 여전히 많은 의문점을 갖고 있다. 따라서 이 연구에서는 노후화가 상당히 진행된 실제 철도판형교의 full-scale 실험을 통해 얻어낸 모드 매개변수의 타당성을 유한요소해석 수행과 같이 검증하고자 한다.

2.1 대상교량

이 연구를 위해서 그림 2와 같은 국내의 공용중인 판형교량 중 1940년 8월에 완공된 충북 제천시 소재의 장평천 3교를 대상교량으로 채택하였다.

(a) 장평천3교의 전경

(b) 실험대상 구간

그림 2. 실험대상 교량(장평천3교)

그림 3. 장평천3교의 횡단면도

그림 4. 실험대상 상부구조물의 도면

장평천 3교의 상부구조물은 한 경간이 약 13.6m이며, 총 8개의 독립적인 경간으로 이루어져있다. 두개의 주 거더는 사각 120°를 가지고 비대칭(skewness)으로 수직 및 수평 브레이싱에 의해 연결되어 있다. 장평천 3교의 횡단면과 실험대상 경간 상부구조물의 형상 및 치수는 각각 그림 3, 그림 4와 같고, 교량의 제원은 표 1에 나타났다.

표 1. 대상교량의 제원(단위 : mm)

항 목	치 수
지 간	12,900
전 장	13,400
거더 중심간 간격	1,800
복부(web) 판	1430×12
상부 플랜지	300×16
하부 플랜지	300×16
수직 및 수평 브레이싱	2-90×90×9

2.2 실험방법

철도판형교에 대한 실험적 모드해석의 가진을 위하여 충격해머(Impact Hammer)를 이용하였으며, 해머에 의해 발생하는 임펄스(Impulse) 가진에 대한 응답으로부터 구조물의 모드 파라미터를 구하였다. 비대칭 철도판형교의 전형적인 구조적 거동은 휨과 비틀림의 복합적인 형상으로 나타나게 되며, 이러한 거동에 가장 큰 영향을 미치는 주 거더를 측정 부재로 선택하였다.

2.2.1 실험과정

충격해머의 타격점을 한점에 고정시켜 가진함으로써 입력신호를 측정하고, 반면 출력신호는 능동센서를 옮겨가며 받아들이는 단독입력다중출력(Single Input Multiple Output : SIMO) 방법으로 실험이 수행되었다. 충격해머에 내장된 힘 변환기는 사용하는 팁의 경도에 따라 민감도(sensitivity)가 변화하며, 본 실험에서는 저주파수대역의 가력을 위해 고무팁(soft tip)을 사용하여 가진하였다. 또한, 가진에 의한 전기적 신호상태의 응답을 받아들이기 위하여 가속도계를 사용하였다. 출력신호를 측정하기 위한 가속도계는 4개의 측정점을 1 set로하여 총 11 set(즉, 총 44개 측정점)로 구성하였으며, 각 측정점에 대하여 교량의 수평과 수직 방향(즉, 2 자유도)에 대한 응답 가속도를 측정하였다. 일반적으로 진동이 크게 발생하고, 모드성분을 많이 포함하고 있는 곳에 기준점(driving point)을 선정하여 가력을 하여야 하나, 실험체의 여건상 지지부근의 하부플랜지에 가력하였다.

충격해머의 입력과 가속도계 응답신호의 결과를 증폭 및 필터링하여 종합적으로 취득 및 기록하고, 시간영역과 주파수영역에서의 신호변환 및 모드분석을 수행하여 모드파라미터를 추정하였다. 가속도의 측정점 및 방향, 실험과정, 그리고 실험장비는 그림 5와 같으며, 가속도계의 설치와 충격해머의 가력모습은 그림 6과 같다.

그림 5. 실험과정 및 Set-up

그림 6. 가력 및 가속도 응답 측정

2.2.2 분석조건

일반적으로 콘크리트도상을 갖는 교량구조물인 경우 비교적 낮은 대역의 주파수에서 진동모드가 나타나는 반면, 경량인 무도상 철도판형교인 경우 비교적 높은 주파수 대역에서 진동모드가 나타난다. 효율적인 실험 수행을 위하여 유한요소해석을 선행하였으며, 100 Hz미만의 주파수 대역을 선택하는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 또한, 신호의 안정성과 신뢰도 향상을 위해 신호 컨디셔너(signal conditioner)를 통해 신호의 증폭과 함께 0 Hz-100 Hz의 주파수 대역을 필터링하였고, 신호의 누설(leakage)을 최소화하기 위해 직사각형 창(rectangular window)함수를 사용하였다. 그리고 불규칙 신호의 랜덤 오차(random error)를 최소화하기 위하여 5회 가인의 평균값을 사용하였으며, 가진할 경우 발생될 수 있는 초기잡음(initial noise)에 의한 실험상 오차를 줄이기 위해 입력 채널에 지연(delay) 기능을 추가하여 주파수응답함수(FRF : Frequency Response Function)를 취득하였다. 표 2는 충격해머 진동실험 시 데이터 수집 및 분석조건을 나타낸다.

표 2 데이터 수집 및 분석조건

Signal Conditioner	Gain : 50 Filtering : 0-100 Hz
Data Analyzer	Window : Rectangular Averages : 5 times Number of Samples : 1024 Sampling frequency : 512 Hz Maximum Frequency : 100 Hz Measurement Time : 5.12 sec

2.2.3 분석과정

그림 7(a)는 각 측정점에서 측정된 단일 주파수응답함수를 오버레이(overlay)한 모습이다. 여기서 10 Hz 미만의 데이터는 실험과정에서의 잡음 또는 오차로 판단하고, 주파수응답함수 영역의 10 Hz~25 Hz를 침두치 영역으로 택하여 밴드 커서(band cursor)를 설정하였으며, 직교다항식(orthogonal polynomial)을 이용한 커브피팅(curve fitting)을 수행함으로써(그림 7(b) 참조) 모드 매개변수를 구할 수 있다.

(a) 주파수응답함수의 Overlay

(b) FRF의 커브피팅

그림 7. Modal Control 과정

본 실험 대상교량인 판형교는 2개의 주 거더가 비대칭으로 배치되어 있으며, 각각의 주 거더는 브레이싱으로 연결되어 있다. 이로 인하여 휨과 비틀림 거동이 혼합된 복합적인 거동이 발생될 수 있다. 따라서 가시적인 모드형상을 예측하여 민감도 분포도를 통해 주 모드를 판별하였다. 그림 8에 응답 가속도계의 넘버링을, 그림 9에 1차 모드의 각 측정점에 대한 민감도 분포를 나타내었다. 양쪽 거더 중앙하부의 측정점에서 교축의 직각방향(즉, x축 방향)으로 최대값이 나타났으며, 이를 통하여 1차 모드는 수평방향의 휨 거동이 주 거동을 알 수 있다.

그림 8. 각 측정센서의 넘버링

그림 9. 1차모드의 민감도 분포

3. 유한요소해석

3.1 유한요소해석 모델

유한요소해석을 통해 실험의 신뢰성 및 상관성을 검토하기 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS(2008)을 사용하였다. 모델링은 장평천 3교의 복원도면과 현장조사로부터 수집한 실측자료를 통해 확보한 제원을 이용하여 3차원 유한요소로 구성 하였다.

판형교는 교량 자체의 강성과 외부하중에 비하여 중량이 현저히 작기 때문에 동적해석 시 교량구성요소(거더, 레일, 침목, 수직·수평 브레이싱, 보강재 등)의 질량에 의한 영향이 상당히 크다. 이러한 실제 판형교의 질량효과와 국부적인 진동효과를 반영하기 위하여 교량구성요소들의 물성치, 부재크기, 변단면, 접합조건 등을 고려하여 가능한 실제교량에 근접하도록 모델링 하였다.

(a) 판형교의 유한요소해석모델

(b) 유한요소해석모델의 세부

그림 10. 유한요소해석 모델

그림 10은 본 연구의 해석에 사용된 판형교에 대한 유한요소 모델을 나타낸 것이다. 그림 10(a)에 보이는 것과 같이 교량 주 거더는 8 절점 6 자유도 Shell 요소로, 침목과 레일은 3 절점 6 자유도 Beam 요소로, 그리고 브레이싱은 2 절점 3 자유도의 Link 요소로 이상화 하였다. 레일(KS60)의 궤간은 표준궤간인 1.435m를 적용하였고, 침목은 교량용 목침목(23cm

×23 cm)을 40cm간격으로 배치하였다. 또한, 침목·레일은 거더 상부 플랜지의 중립면을 기준으로 침목의 도심만큼 이격시킨 후 강성연결을 이용하여 주형 거더와 접합하였다.

이 때, 실제 판형교의 주 거더와 침목의 접합 상태(그림 11 참조)를 고려하기 위해 MPC(Multi-Point Constraints)옵션을 사용하였다. 연결부의 회전자유도는 구속하지 않고 교량의 축방향을 제외한 수직방향과 횡방향에 대해서는 동일 거동이 이루어질 수 있도록 구속하였으며, 여기서 적용된 구속조건은 침목과 레일의 거동에 따른 영향을 제외한 질량의 변위 효과를 고려하기 위해 Rigid Contact Surface로 설정 하였다. 동적해석을 위한 감쇠비는 실험을 통해 얻어진 값인 0.5 %를 적용하였다. 장평천 3교의 유한요소해석 모델에 사용된 재료특성은 표 3과 같다.

표 3. 해석대상 교량의 재료특성

구 분	강 재	침 목	레 일
단위중량(kg/m ³)	7,850	800	7,850
탄성계수(GPa)	210	16.8	210
단면적(cm ²)	-	529	91.15
프아송 비	0.3	0.345	0.3

(a) 거더 외측

(b) 거더 내측

그림 11. 주 거더와 침목의 연결 상태

3.2 유한요소 해석모델의 부가 조건

고유진동수는 교량 구성요소의 구조형식, 재료특성, 지지조건, 주위환경(온도, 습도, 소음 등), 실험·해석의 방법 및 조건 등 복합적인 요인에 의해 달라질 수 있다. 이러한 요인을 충분히 고려하여 해석에 반영하는 것은 현실적으로 어려운 일이나, 본 연구에서는 가능한 실제와 근접한 환경을 해석에 반영하기 위해 부가적인 조건을 적용하였다.

3.2.1 구성요소의 질량효과

교량진동의 기초가 되는 단순교 횡진동의 고유진동수는 주요 변수(강성, 질량, 경간장, 지지조건 등)에 의해 결정된다. 이들 변수 중 경간장과 질량은 유한요소모델을 비교적 정교하게 모델링하였기 때문에 실제 판형교의 리벳과 반복적인 도색으로 인한 질량효과를 제외하면 그 차이는 매우 작을 것으로 판단된다. 표 4는 전체질량에 대한 판형교 구성요소의 비율을 나타낸다. 판형교와 같이 경량인 교량의 동적해석 시 교량 구성요소의 질량은 적지 않은 영향을 주며 전체질량에서 약 32%를 차지하는 침

목·레일은 보요소를 이용하여 이를 반영하였다. 이에 비해 점검로는 전체질량의 약 7%를 차지하여 고유진동수에 미치는 영향은 작을 것으로 판단되나, 질량의 편향으로 인한 모드형상의 변화 가능성을 내포하고 있다. 따라서 그림 12(a)와 같은 주 거더에 부착된 점검로의 체적을 환산하여 점검로가 연결된 보강재의 부착면의 두께를 일정비율로 증가시켜 점검로의 국부적인 질량효과를 반영하였다. 또한, 그림 12(b)에 나타난 궤간 내측에 설치되어 있는 추가적인 레일을 모델에 반영하였다.

표 4. 유한요소해석에 반영된 판형교 구성요소의 질량비율

구 분	주 거더	수직·수평 브레이싱	침목·레일	점검로	전체
질량(kg)	13,091.30	834.57	7,370.42	1,771.41	23,067.70
비율(%)	56.75	3.62	31.95	7.68	100

(a) 거더에 부착된 점검로

(b) 레일 및 침목

그림 12. 해석에 반영된 부가질량

3.2.2 경계조건

현재의 철도교와 같이 상부 도상을 갖는 교량형식이 아닌 대부분 일체 강점기에 시공되었던 판형교로 분류되는 전형적인 단순보형 무도상 철도교는 상부구조물이 가벼우며, 철도차량의 충격이 교량에 그대로 전달되는 것이 특징이다. 특히, 판형교의 대표적인 교량받침인 선받침은 강체받침의 일종으로 철도차량의 충격을 하부의 교량받침 콘크리트 교각에 그대로 전달하기 때문에 이러한 충격으로 인한 콘크리트의 파손이 심각하다(최은수 등, 2006). 이로 인하여, 그림 13과 같이 장평천 3교의 기존 선받침은 이동거리부족 및 하부 콘크리트 교각이 파손되어, 구형금속이 활하중으로 인한 회전을 제어하고 상부의 미끄럼판이 수평변위를 수용하는 스페리컬 받침으로 교체되었다. 그림 14는 스페리컬 받침의 구성 및 지지형태를 나타낸다.

유한요소해석 시 교량받침의 경계조건에 따라 교량의 동특성이 변화하기 때문에 지지조건의 설정은 매우 중요한 변수가 될 것이다. 일반적으로 판형교는 해석의 편의상 이상적인 단순지지로 설정하는 경우가 대부분이다. 하지만, 스페리컬 받침의 성능은 회전을 제어하는 내부 구형강재와 수평이동면의 마찰에 의해 크게 좌우되기 때문에 받침의 마찰과 스프링강성을 고려하여 해석하는 것이 바람직하다. 이와 같은 조건은 스프링요소와 댐퍼를 이용하여 적용할 수 있다. 그러나, 현 실험의 여건상 마찰계수 및 스프링계수 값을 얻는데 어려움이 따르기 때문에, 양단에

설치된 스페리컬 받침(그림 14)의 성능을 일반적으로 사용되는 힌지, 롤러의 구성인 단순지지로 단순화하여 해석상의 경계조건으로 적용하였다. 또한, 레일의 양 끝단은 연속된 레일의 강성을 고려하기 위하여 대칭 경계면에 구속조건을 적용하였다.

그림 13. 기존 선받침의 손상

(a) 스페리컬받침의 구성

(b) 가동단

(c) 고정단

그림 14. 지지단부의 스페리컬받침

3.2.3 외부환경

공용중인 구조물은 변화하는 온도 조건하에 놓여있으며, 온도변화는 구조물의 열변형(잔류응력) 효과로 나타난다. 이와 같은 온도효과는 동특성 측정값에 변화를 가져올 수 있다. 김남식 등(2002) 등의 연구결과에 의하면, 온도변화에 따른 가속도 응답의 변화를 확인하기 위해 장기적인 실험을 하였으며, 그 결과 외부환경에 민감한 고차모드의 진동수에서 적지 않은 차이를 보였다.

본 실험은 특정기간(2010년 6월 30일)에 통과 차량 및 인적이 적은 곳에 위치한 장평천 3교를 대상으로 수행되었으며, 이때의 외부온도는 22°C로 유지되었다. 따라서 외부잡음에 의한 영향과 온도에 의한 센서 민감도 및 강철의 열변형 효과는 매우 적을 것으로 판단되며, 저차의 4개 모드를 분석대상 모드로 고려하였으므로 온도영향에 따른 보정은 배제하였다.

4. 실험 및 해석의 결과분석

표 5와 표 6에 실험 및 해석적 모드해석으로부터 얻은 모

드매개변수(고유진동수, 감쇠비, 모드형상)를 나타내었다.

표 5. 실험적 모드해석의 모드 매개변수

Mode no. (Frequencies , Damping ratio)	Isometric View	Side View	Top View
1 (12.4Hz, 0.51%)
2 (16.2Hz, 0.54%)
3 (18.4Hz, 0.59%)
4t (23.0Hz, 0.43%)

표 6. 유한요소해석 결과의 모드 매개변수

Mode no. (Frequencies)	Isometric View	Side View	Top View
1 (12.53Hz)
2 (18.75Hz)
3 (25.18Hz)
4 (24.68Hz)

모드형상은 실험을 기준해서 낮은 주파수 구간부터 1차 수평형, 1차 수직형, 2차 수평형, 수평 국부좌굴모드 순으로 나타난다. 실험과 해석의 모드형상은 가시적으로 상당히 근접한 결과를 나타내고 있으나, 고유진동수의 경우는 표 7에 나타난 바와 같이 1차, 4차 모드를 제외한 2차, 3차 모드에서 15%~36%로 적지 않은 차이를 나타낸다. 이는 유한요소해석모델링에 있어서 그림 15와 같은 실제 교량에 발생된 피로 균열, 상당히 오래된 공용기간으로 인한 국부변형과 현 강재의 재료특성과의 차이 및 물리적인 파라미터, 경계조건과 접합 부위의 단순화, 연결 부위의 불확실성 등에 대하여 이상화된 가정으로 인한 오차라고 판단된다. 실제로 이러한 많은 요인들을 충분히 고려하여 유한요소해석 모델에 반영하기에는 한계가 있다. 다른 한편으로, 실험적 측면에서 볼 때 외부에 노출된 환경에서의 장비계측 오류 등으로 인해 실험데이터의 오차가 수반될 수 있음을 간과해서는 안될 것이다.

표 7. 실험 및 해석의 고유진동수(단위 : Hz)

Mode no.	실험값	해석값	오차율(%)
1	12.4	12.53	1.0
2	16.2	18.75	15.7
3	18.4	25.18	36.8
4	23.0	24.68	7.3

(a) 거더 플레이트의 손상 (b) 가새 플레이트의 손상
그림 15. 손상위치 및 유형

일반적으로 실제 구조물의 거동을 정확히 파악하기 위해서는 이상화된 구조모델을 사용하는 해석보다는 실험을 통해 실제 상황에서 측정된 값을 보다 신뢰할 수 있다. 하지만 유지관리를 위한 교량의 손상검출, 건전도 등의 예측에 활용되기 위해서는 신뢰도 높은 해석모델이 요구된다. 이에 따라, 실험을 통해 얻어진 모드 데이터를 기반으로 해석모델의 매개변수를 보정하는 모델보정(Model Updating)이 필요하다. 이러한 구조물의 모델보정에 관한 실험 및 수치적인 연구가 지속적으로 진행되고 있으며, 본 연구에서는 교량의 고유특성 및 구속조건에 국부적인 변화를 주어 고유진동수의 대략적인 변화 양상을 살펴보았다. 표 8은 매개변수의 분류를, 그리고 표 9와 그림 16은 매개변수 연구결과를 나타낸다.

표 8. 매개변수의 분류

변수	내 용	추정근거
1	지지단의 경계조건 양단 롤러	스페리컬 받침
2	주형거더의 단위중량 10%증가	리벳의 질량효과
3	침목의 단위중량 20%증가	체결부속물 및 수분
4	브레이싱의 탄성계수 10%감소	강재의 제조과정과 구성성분
5	주형거더의 탄성계수 10%감소	강재의 제조과정과 구성성분
6	침목의 교축직각방향 자유도 free	일부 거동 허용

표 9. 매개변수연구 결과

(단위 : Hz)

구분	Mode no.			
	1	2	3	4
Reference	12.4	16.2	18.4	23.0
초기모델	12.53	18.75	25.18	24.68
1	12.19	19.02	25.06	24.69
2	12.02	18.23	24.08	23.80
3	12.46	18.47	25.21	24.64
4	12.42	18.73	24.90	24.56
5	12.16	17.94	23.79	24.30
6	10.20	18.45	21.76	23.64
4+5	12.06	17.92	24.05	23.68
2+3	11.95	17.97	24.09	23.76
2+5	11.66	17.44	22.93	23.24
5+6	9.76	17.93	21.00	22.76

그림 16. 매개변수 결과 그래프

표 9로부터 교량구성요소 중 주 거더의 재료특성 변화(변수 2, 변수 5)가 고유진동수에 민감하게 반응하는 것으로 나타남을 알 수 있다. 이는 주 거더가 전체교량의 60%에 달하는 질량을 차지함으로 인하여 재료특성에 따른 영향력이 크게 작용하는 것으로 판단된다. 이외에 다양한 추정근거에 따른 교량구성요소의 강성감소, 질량증가를 통해 고유진동수가

각 모드별로 다른 비율을 가지고 낮아지는 것을 알 수 있다. 또한, 지지단 경계조건(변수 1), 침목과 주형거더의 접합조건(변수 6)의 자유도 변화에 따른 고유진동수의 변화가 매우 민감하게 나타난다. 따라서 해석모델에 지지조건 및 구속조건을 반영 할 때 주의가 필요함을 알 수 있다. 변수 6, 변수 2+5의 세번째, 네 번째 모드가 서로 교차 되어 나타나는데, 이는 유한요소 모델의 강성비율의 변화에 의한 것으로 사료된다.

교량구성부재가 복잡한 형태로 연결되어있어서 각각의 부재는 서로 간의 연계 및 간섭에 의해 복잡한 거동을 나타낸다. 이로 인하여 해당 거동에 대해 관여하는 매개변수가 다르기 때문에 단일 매개변수의 보정으로 각 모드에 대해 만족하는 고유진동수 값을 얻기 힘들다. 따라서 대략적으로 조합된 매개변수의 결과에 나타나듯이 추후 매개변수의 적절한 조합을 통해 모델보정을 수행한다면 신뢰할 수 있는 해석모델의 유추가 가능할 것으로 판단된다.

표 10에 비재하 철도교량의 고유진동수 상한 및 하한기준을 나타내었다. 주형의 진동가속도는 유도상 교량인 경우에 도상의 교란을 방지하고 승객의 승차감 확보를 위해 국제철도연맹(UIC)에서 한계진동수를 제한하고 있다. 해석 및 실험에서 얻어진 휨진동수는 한계진동수 권고기준을 만족하고 있음을 알 수 있다.

표 10. UIC 한계진동수 기준 (지간 : 12.9 m)

수치해석값	실험값	UIC	
		상한기준	하한기준
12.8	12.4	14.0	6.2

5. 결 론

본 연구에서는 현재 사용중인 실제 철도관형교(장평천 3교)에 대해 충격해머를 이용한 실험적 모드실험을 수행하였으며, 측정된 실험 데이터의 분석을 통하여 모드 매개변수를 취득하였다. 이러한 실험의 적합성 및 신뢰성을 검증하기 위하여 유한요소해석을 병행하였으며 손상평가의 기초적 자료로서의 활용을 위한 모델보정이 이루어졌다.

관형교의 구조요소 중 주 거더의 재료특성의 변화가 진동특성에 가장 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었으며, 이외에 다양한 추정근거에 따른 교량구성요소의 강성감소, 질량증가를 통해 고유진동수가 모드별로 다른 비율로 낮아지는 것을 알 수 있었다. 지지단의 경계조건, 침목과 주 거더의 접합조건 변화에 따른 관형교의 동적특성의 변화가 매우 민감하게 나타났다.

비대칭 관형교에서는 부재간의 복잡한 연계 및 간섭에 의해 휨과 비틀림이 혼합된 복합적인 거동을 나타낸다. 이로 인하여 해당 거동에 대해 관여하는 매개변수가 다르기 때문에, 단일 매개변수의 보정으로 모든 모드에 대해 만족하는 진동수와 모드형상을 얻는 것은 매우 어렵다.

그러나 본 연구에서와 같이 다양하게 조합된 매개변수의 결과를 이용하여 추후 매개변수의 적절한 조합을 통해 모델보정을 수행한다면 신뢰할 수 있는 해석모델의 유추가 가능할 것으로 판단된다. 이러한 시도는 향후 관형교의 실험적 모드해석을 이용한 손상 평가 및 건전도 평가를 위한 기초적인 자료를 제공할 것이다.

감사의 글

이 연구는 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (R01-2006-000-10610-0)

참고문헌

- 건설교통부(2007) 미래철도기술개발사업, 제1부 중장기계획 Part2.
- 김남식(2002) 상시진동을 이용한 남해대교의 동특성 평가, 2002년도 추계학술대회논문집, 한국소음진동공학회, pp. 988-993.
- 김현호, 오지택, 송재필, 김기봉(2005) 유한요소프로그램을 이용한 철도관형교의 동적거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제8권, 제3호, pp. 228-234.
- 오지택, 최진유, 김현민(2002) 철도 무도상관형교의 고유진동특성에 대한 연구, 2002년도 추계학술대회논문집, 한국철도학회, pp. 1041-1046.
- 이동호(2004) 온도와 지점조건이 진동특성에 미치는 영향에 대한 실험적 연구, 석사학위논문, 서울시립대학교.
- 이정희, 김성곤, 장승필(2005) 강교량의 손상감지를 위한 주파수유한요소프로그램을 이용한 주파수 영역 패턴인식 기법, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제17권, 제1호, pp. 224-234.
- 정의하(2004) 관형교의 동특성개선에 대한 연구, 석사학위논문, 서울산업대학교.
- 최진유, 오지택, 김현민, 이상배(2002) 무도상관형교의 동적거동 특성 분석을 위한 실험적 연구, 2002년도 추계학술대회논문집, 한국철도학회, pp. 678-683.
- 정영화 등(2000) 교량정밀 안전진단을 위한 첨단기술의 개발 : 진동반응측정을 이용한 구조물의 결함발견, 연구보고서, 건설교통부.
- 최은수, 이희업, 김성일, 김이현(2006) 디스크 받침에 의한 철도 관형교의 고유진동수 및 동적 거동 변화, 한국강구조학회

논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제4호, pp. 437-446.

황원섭, 조은상, 오지택, 김현민(2007) 무도상 철도관형교의 동적응답특성 및 보강방안, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제19권, 제3호, pp. 281-290.

ANSYS (2008) Reference Manual, Ver. 10.0.

Banks, H.T., Inman, D.J., Leo, D.J., and Wang, Y. (1996) Experimentally Damage Detection Theory in Smart Structures, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 191, No. 5, pp. 859-880.

Catabas, F.N., Gul, M., and Burkett, J. (2008) Conceptual Damage-sensitive Features for Structural Health Monitoring: Laboratory and Field Demonstrations, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 22, No. 7, pp. 1650-1669.

Elliott, A.S. and Richardson, M.H. (1998) Virtual Experimental Modal Analysis (VEMA), *Proceedings of 16th IMAC*.

Hu, N., Wang, X., and Fukunaga, H. (2001) Damage assessment of structures using modal test data, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 3111-3126.

He, J. and Fu, Z.F. (2001) *Modal analysis*,

Butterworth-Heine-mann.

Parloo, E., Guillaume, P., and Overmeire, V.M. (2003) Damage assessment using mode shape sensitivities, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17, No. 3, pp. 499-518.

Richardson, M.H. and Pootter, R. (1974) Identification of the Modal Properties of an Elastic Structure from Measured Transfer Function Data, *ISAASI 74250 - International Instrumentation Symposium*, pp. 239-246.

Straser, E.G. and Kiremidjian, A.S. (1998) *A Modular, Wirelee Damage Monitoring System for Structures*, Repor No. 128, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, USA.

Wang, Z., Lin, R.M., and Lim, M.K. (1997) Structural Damage Detection Using Measured FRF Data, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 147, pp. 187-197.

(접수일자 : 2011. 10. 7 / 심사일 2011. 10. 13 /
심사완료일 2012. 2. 3)