

# 철도교량 동적성능 평가를 위한 동특성 추출 실험연구

## Experimental Evaluation of Modal Properties for Estimation of the Railway Bridge Dynamic Performance

김성일\*      김남식\*\*      이정휘\*\*\*      이필구\*\*\*\*  
Kim, Sung-Il      Kim, Nam-Sik      Lee, Jung-Whee      Lee, Pil-Goo

---

### ABSTRACT

Resonance of railroad bridge can be broken out when natural frequency of the bridge coincides with exciting frequency of moving forces. In order to avoid aforementioned unpleasant response of the structure, exact determination of dynamic structural properties is important to understand dynamic behavior of the structure under moving train loads.

In the present paper, a 25 meters long full scale IPC girder and 15m Precom girder models were fabricated as a test specimen and modal testing was carried out to evaluate modal parameters including natural frequencies and modal damping ratios. In the modal testing, a digitally controlled vibration exciter as well as an impact hammer is applied to obtain frequency response functions more exactly and the modal parameters are evaluated varying with structural status.

---

### 1. 서론

철도교량의 공진은 열차에 의한 가진진동수(exciting frequency)와 교량의 고유진동수(natural frequency)가 일치할 경우 발생하며, 이러한 공진발생은 동적거동의 불안정성과 직결되어 교량의 성능저하 및 승객의 승차감에 매우 나쁜 영향을 줄 수 있다. 열차하중을 받는 교량의 동적성능에 대한 평가를 위해 교량의 동적거동과 관련되는 동적 특성치를 정확히 파악하는 것은 매우 중요하다.

근래 철도교량에는 기존의 PSC거더 교량 외에, 다양한 형식의 교량이 제안되고 있으며, 다단계 긴장에 의한 IPC거더교, I형 형강이 콘크리트 속에 매립된 형식의 Precom거더교 등이 그 예이다. 이러한 신형식 교량들은 단면 효율의 극대화, 저형고, 장대화 등에서 많은 장점을 갖고 있으나 이런 유연한 구조물은 필연적으로 동적거동 측면에서 불리함을 가질 수 있다. 따라서, 이러한 신형식 교량들의 철도교량 적용에 앞서 열차하중에 의한 동적성능 수준을 평가할 필요가 있으며 또한 이에 앞서 동특성을 파악하는 연구가 필요하다 (김성일 외, 2005).

이 연구에서는 25m 경간의 IPC거더와 15m Precom 거더 3개를 제작하여 고유진동수와 감쇠비 등의 모달 변수를 추출해내기 위한 동적실험을 수행하였다. 기존에 모달테스트 등에서 흔히 활

---

\* 정회원·한국철도기술연구원 궤도토목연구본부 선임연구원·공학박사·E-Mail:sikim@krti.re.kr - 발표자

\*\* 정회원·부산대학교 공과대학 토목공학과 교수·공학박사·E-Mail:nskim@pusan.ac.kr

\*\*\* 정회원·RIST 강구조연구소 선임연구원·공학박사·E-Mail:jwhee2@rist.re.kr

\*\*\*\* 정회원·RIST 강구조연구소 선임연구원·E-Mail:pg289@rist.re.kr

용되는 충격해머(impulse hammer)외에 가진기(vibration exciter)를 이용하였다. 실험결과는 동적성능평가를 위한 주행열차하중 동적해석에 신뢰성 높은 입력자료로 사용될 수 있었으며, 프리스트레싱 및 단면 균열 발생에 따른 구조물 동특성 변화를 고찰하였다.

## 2. 동특성 추출 실험 개요

철도교량용 IPC거더의 동특성을 파악하기 위하여 다음의 표 1과 같이 순차적으로 실험을 수행하였다. Test I부터 Test IV까지는 시공단계에 따른 구조계 변화를 고려한 IPC거더의 동특성을 얻기 위하여 구분하였다. Precom거더의 경우 그림 2에 나타낸 것과 같은 단면을 갖는 15m 거더이며, 정적거동 분석을 위해 cover depth 전단연결재 배치를 달리한 세 개의 시험체(CB1~CB3)로 구성되어 있다.

모달테스트를 수행할 때 사용된 가속도센서(accelerometer)와 변위센서(LVDT)의 위치는 그림 1, 3에 나타내었다. 사용된 충격해머는 질량 5.5kg, 주파수대역은 0~250Hz이며, 가진기는 비균형질량 100kg 2개로 구성되어 최대가진력 80kN, 가진 주파수대역은 0~10Hz의 제원을 가진다. 가속도 및 충격해머의 신호 측정빈도 (sampling frequency)는 500~1000Hz로 설정하여 Nyquist frequency 인 250Hz까지의 분석이 가능하도록 하였으며, 이는 구조물의 고유진동수 범위를 고려할 때 충분한 측정범위였다고 사료된다.

표 1. IPC거더 동적실험 순서

Test Case	실험모형 조건	실험 유형
Test I	하부 텐던만 긴장된 PSC거더 상태에서의 충격실험 수행	충격실험
Test II	PSC거더에 슬래브가 합성된 상태에서 실험 수행	충격 및 가진실험
Test III	슬래브가 합성된 PSC거더에서 상부텐던의 한쪽만 긴장한 상태에서 실험 수행	충격실험
Test IV	슬래브가 합성된 PSC거더에서 상부 텐던 모두 긴장한 상태에서 실험 수행	충격 및 가진실험
Test V	슬래브가 합성된 PSC거더에 대한 진동모드를 확인하기 위한 실험 수행	충격실험

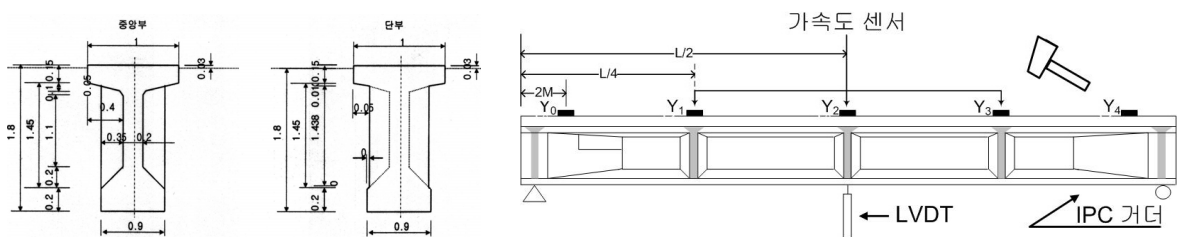
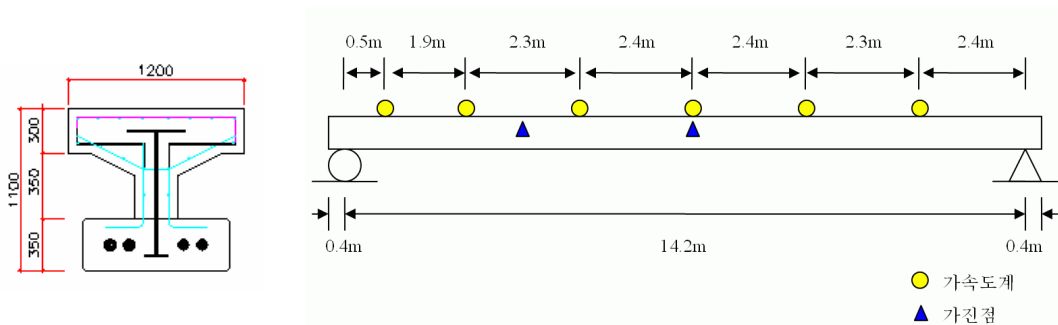


그림 1. IPC 25m거더 단면도 및 모달테스트에 사용된 센서의 위치



(a) 시험체 단면

(b) 가속도계 및 가진점 배치

그림 2. Precom 15m 거더 시험체 단면 및 센서배치



그림 3. 실험모형 전경, 충격실험 및 가진기

### 3. 동특성 추출

#### 3.1 IPC거더

그림 4는 TEST IV에서 실험모형에 대한 충격해머 타격 시 얻어진 APSD(Averaged Power Spectral Density)함수 (Bendat *et al.*, 2000)를 나타낸다. 감쇠비는 APSD 함수로부터 half-power band width method를 이용하여 추정하였다. 동일한 실험조건에서 가진기를 이용한 실험을 수행하였으며, 실험모형의 첫 번째 휨 고유진동수에서 공진을 일으키기 위하여 가진기의 가진주파수를 조정하며 수행하였다. 공진실험에서는 steady-state response가 얻어지는 공진주파수를 찾으며, 이 공진주파수에서 얻어진 각 가속도센서의 시간이력은 자유진동응답에 해당한다. 감쇠비는 logarithmic decrement를 이용하여 추정하였다.

표 2는 실험별 첫 번째 휨 고유진동수 및 감쇠비 측정 결과를 나타낸다. 슬래브가 합성되기 전인 TEST I에 비하여 슬래브 합성 후인 TEST II는 고유진동수가 약 5.32% 증가하였음을 알 수 있다. 또한 상부 텐던 좌, 우측을 긴장한 최종상태인 TEST IV와 비교하여 보면, 텐던 긴장에 의해 충격시험 시 1.78%, 공진시험 시 2.53% 증가하였음을 알 수 있으며, 이 결과로부터 휨 강성에 텐던 긴장에 의한 영향이 존재함을 알 수 있었다.

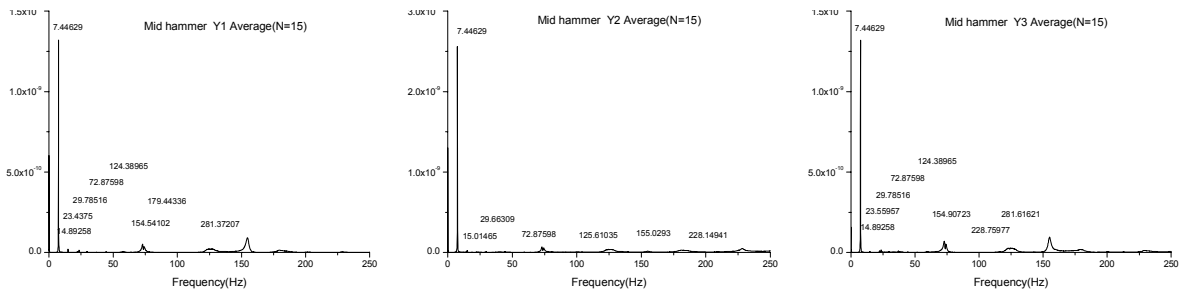


그림 4. 충격시험 시 가속도센서 (Y<sub>1</sub>, Y<sub>2</sub>, Y<sub>3</sub>)에서 얻어진 APSD 함수

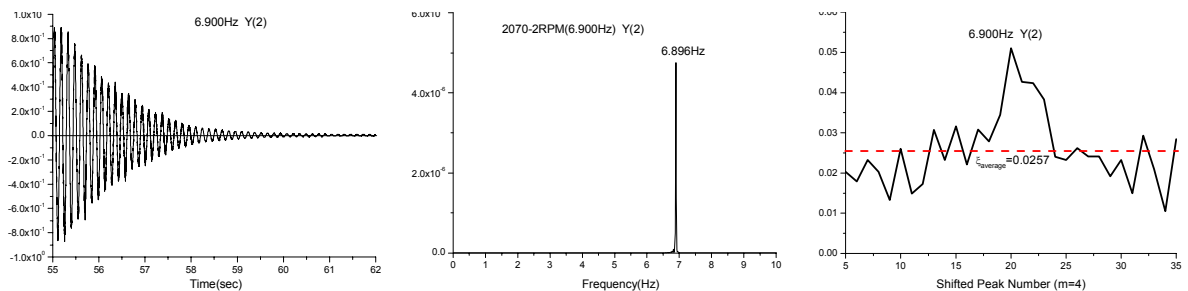


그림 5. 가진기에 의한 Y<sub>2</sub> 센서의 응답, APSD 함수, Logarithmic Decrement에 의한 감쇠비

표 2. 실험별 첫 번째 휨 고유진동수 및 감쇠비 분석 (Y<sub>2</sub> 센서)

	충격실험 (L/2) 타격		가진실험		고유치해석
	1st Bending Frequency	Damping Ratio	1st Bending Frequency	Damping Ratio	1st Bending Frequency
TEST I	6.95 Hz	2.19 %	-	-	6.02Hz
TEST II	7.32 Hz	1.25 %	6.73 Hz	2.68 %	-
TEST III	7.45 Hz	2.70 %	-	-	-
TEST IV	7.45 Hz	1.43 %	6.90 Hz	2.57 %	6.79Hz

실험에 앞서 수행한 자유진동해석 결과는 슬래브 타설 전 거더 상태만인 TEST I 구조에서 6.02 Hz, 슬래브 합성 및 긴장완료 후인 TEST IV 구조에서 6.79Hz로 나타났다. 해석결과와 실험결과는 가진기에 의한 공진시험과 잘 일치하였으며, 충격시험의 경우에는 상대적으로 큰 오차를 TEST I과 TEST IV에서 보였다. 공시체 시험을 통해 압축강도를 살펴본 결과 약 430kgf/cm<sup>2</sup>로 설계강도인 400kgf/cm<sup>2</sup>과 큰 차이를 나타내지 않아 탄성계수 변화도 미소한 것으로 나타났다. 또한, 가진기에 의한 추가질량 효과(약 1ton)는 실험모형 전체질량(약 75ton)에 비하여 매우 작으므로 가진기에 의한 고유진동수 추정치가 보다 정확한 것으로 판단되었다.

앞서 나타난 결과와 같이 충격햄머에 의한 실험과 가진기에 의한 실험 간의 결과 차이 분석을 위하여 TEST V에서는 1차 진동모드를 얻기 위한 충격실험을 보다 많은 가속도센서를 설치하고 수행하였다. 결과 차이의 주된 원인으로서는 충격실험에서 사용된 충격햄머의 가진력이 실험모형의 질량에 대해 상당 부분 부족한 것으로 추정되었다. 따라서 충격실험에서 얻어진 고유진동수는 공진실험에서 얻어진 고유진동수에 비하여 상대적으로 높은 값으로 나타났다. 즉 가진력의 부족으로 실험 모형의 1차 진동모드를 정확히 재현하지 못한 것으로 판단된다.

그림 6으로부터 충격실험을 통한 1차 고유모드의 유효길이를 확인할 수 있다. 앞서 추정된 바와 같이, 충격실험으로부터 얻어진 1차 휨 고유진동수는 실제 해당 진동모드의 유효길이가 22.07m로서 실험모형의 실제 고유진동수보다 큰 값을 얻게 된다. 또한 충격실험에서 얻어진 감쇠비의 평가에서도 가진실험에 의한 감쇠비보다 작은 값을 나타냈다.

가속도 센서	위치(m)	Magnitude of Power Spectrum	Normalization
Y <sub>0</sub>	2.0	5.33E-10	0.107
Y <sub>1</sub>	6.25	2.72E-9	0.548
Y <sub>2</sub>	12.5	4.96E-9	1
Y <sub>3</sub>	18.75	2.69E-9	0.542
Y <sub>4</sub>	23.0	5.4E-10	0.109

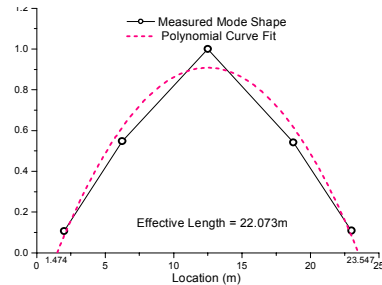


그림 6. Curve Fitting에 의해 추정된 충격시험 시 1차 진동모드의 유효길이

감쇠비에 대한 평가는 half-power bandwidth method 보다는 자유진동응답을 이용한 logarithmic decrement에 의한 추정방법이 더욱 신뢰할 수 있는 방법이다. 그러나 실험결과에서 나타난 감쇠비의 특성은 가속도 응답 크기의 변화에 따라 감쇠비의 변화가 발생하였으며, 이는 얻어진 자유진동응답이 정확하게 exponential decay가 일어나지는 않는다는 것을 의미한다. 따라서 가속도 응답 크기에 따라 변화하는 감쇠비를 평균한 값을 본 실험체의 대표 감쇠비로 추정하였다. IPC거더의 최종 사용상태 단면에 대한 감쇠비는 그림 4의 TEST IV의 결과를 이용해 2.5%로 추정하였다.

실험결과 IPC거더의 고유진동수는 해석치와 1.62%의 오차로 비교적 잘 일치하므로, 탄성계수 및 질량 등 기존의 설계자료를 열차하중 해석에 이용하여도 적합하다는 결론이 도출되었으며, 감쇠비의 경우 2.5%의 감쇠비 적용이 적절한 것으로 판단된다. 이러한 실험결과는 열차하중 동적해

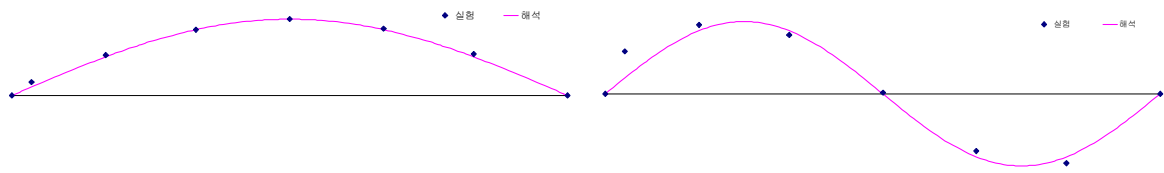
석에 신뢰성 높은 입력자료로 활용되어 철도교량의 동적성능을 평가하는데 활용할 수 있다.

### 3.2 Precom거더

시간영역의 가진력 및 가속도 응답으로부터 FRF를 얻기위해 Matlab의 내장함수를 사용하였으며, 동적특성치의 추출에는 Los Alamos Lab.에서 개발한 DIAMOND를 사용하였다.

다음의 그림 7과 표 3에서는 가진망치를 사용한 시험으로부터 얻은 구조물의 1차 및 2차 고유진동수와 모드형상을 나타내었다. 단순지지된 보 구조물의 이론해와 매우 근접한 모드형상 및 고유진동수를 얻을 수 있었으며, 세 개의 시험체에 대하여 일관성 있는 결과를 얻을 수 있었다. 시험체 사이의 미소한 고유진동수의 차이는 시험변수의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

충격햄머를 사용하는 경우 지점부까지 충분히 가진이 이루어지는지 확인하기 위하여 1개의 가속도계를 지점 근처에 추가로 설치하였으며, 모드형상으로부터 가진력이 충분함을 확인하였다. 2차 모드의 모드형상에서는 지점부의 진폭이 이론해에 비해 더욱 크게 나타났는데, 이것은 그 위치에 설치한 내부 정착장치의 질량에 의한 것으로 추정된다.



(a) 1차 모드 (9.57Hz)

(b) 2차 모드 (29.42Hz)

그림 7. 모드형상

표 3. 고유진동수 측정치 (Hz)

	CB1	CB2	CB3	평균
1차 모드	9.64	9.44	9.64	9.57
2차 모드	31.74	29.97	30.38	30.70

충격햄머를 사용한 실험결과 및 구조해석 결과로부터 구조물의 1차 고유진동수가 약 9Hz 근처에 존재함이 확인되었으므로, 가진 주파수를 8Hz에서 10Hz까지 0.1Hz 간격으로 변화시켜가며 응답을 측정하였으며, 약 8.8Hz의 가진주파수에서 최대 응답이 관찰되었다. 이것은 가진망치를 사용한 경우에 얻어진 고유진동수 9.57Hz 보다 약 0.77Hz 낮은 값으로, 가진기의 부가질량의 영향으로만 설명하기에는 큰 폭의 변화가 나타났다. IPC거더의 경우와 달리 이번 실험의 경우는 모드형상에서 뚜렷한 유효시간장의 감소가 관찰되지는 않았지만 이러한 영향도 포함되어 있을 것으로 추정된다. 그림 8에는 각 가진진동수에 따른 가속도 응답의 진폭과, 1자유도계의 FRF 이론식을 사용하여 curve fitting 한 결과를 함께 나타내었다.

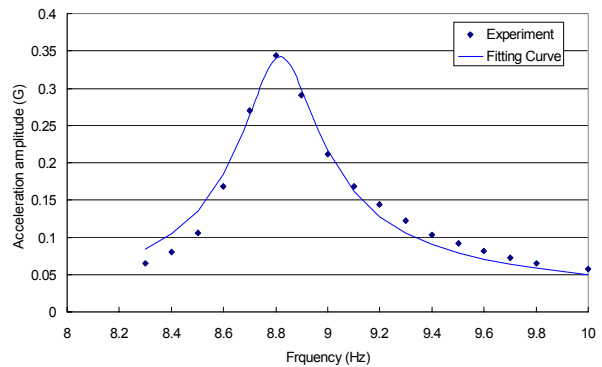


그림 8. 가진기 실험을 통한 주파수응답 곡선

구조물이 완성된 직후, 200톤의 정적하중을 재하한 뒤, 그리고 구조물이 완전히 항복한 이후의 세 시점에 고유진동수를 측정하여 그 변화를 관찰하였으며, 그 결과를 표 4에 정리하였다. 200톤의 정

적하중을 재하한 뒤의 구조물은 하부플랜지를 둘러싸고 있는 콘크리트 케이싱에 균열이 발생하여 강성기여를 하지 못하는 상태이며, 항복 후의 구조물은 바닥판 콘크리트가 압축 파괴되어 그 기능을 완전히 상실한 상태이다. 표에 나타낸 바와 같이 200톤 하중을 재하한 후 1차 고유진동수는 약 4.6%, 2차 고유진동수는 약 6.8% 감소하였으며, 항복 후에는 각각 18.4%, 9.7% 감소하는 결과를 얻을 수 있었다.

표 2. 손상에 의한 고유진동수 변화

	1차 모드		2차 모드	
	진동수(Hz)	감소율(%)	진동수(Hz)	감소율(%)
손상 전	9.57	0.00	30.70	0.00
200톤 재하 후	9.14	4.56	28.62	6.78
항복 후	7.81	18.38	27.73	9.66

## 6. 결론

철도교량은 도로교량과 달리 반복되는 일정간격의 축하중을 지속적으로 받게 되어 공진의 발생 가능성이 항상 존재한다. 철도교량의 열차하중에 대한 동적해석 시 설계자료에 기준하여 물성치를 적용하고 공진 발생 시 가장 지배적인 변수로 작용하는 감쇠비의 경우에는 가정에만 의존하게 된다. 본 연구에서는 철도교량 동적해석의 신뢰성을 높이기 위하여 실물로 제작된 철도교량용 25m IPC거더와 15m Precom거더에 대하여 모달테스트를 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

a. 충격hammer에 의한 충격실험 시 실험모형에 대하여 충분한 가진력을 확보할 수 없을 경우 유효시간이 짧아져 고유진동수가 높게 추정되고, 감쇠비도 작은 값으로 추정될 수 있다.

b. 프리스트레싱 단계에 따른 모달테스트 결과 텐던의 긴장에 의한 휨강성 증가 영향이 있음을 확인 할 수 있었다.

c. 균열발생 및 항복 등 구조물 손상에 따른 동특성치 변화를 고찰할 수 있었다.

향후, 본 연구를 통해 도출된 모달 특성은 철도교량의 교량-열차 상호작용해석에 적용되어 동적성능 평가를 수행할 것이며, 현장에 실 시공된 철도교량에 대한 모달테스트 및 현장실험에 의해 더욱 구체화된 결론을 도출할 예정이다.

## 참고문헌

1. 김성일 외 (2005) IPC거더 동적거동 분석에 의한 철도교량 적용성에 관한 연구-중간보고서, 한국철도기술연구원.
2. M. Saiidi, B. Douglas, and S. Feng (1994) "Prestress Force Effect on Vibration Frequency of Concrete Bridges", *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol.120, No.7, pp. 2233-2241.
3. Bendat, J. S. and Piersol, A. G. (2000) *Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 3rd Ed.*, John Wiley & Sons, Inc.
4. Doebling, S.W., Farrar, C.R., and Cornwell, P.J., (1997), DIAMOND: A Graphical User Interface Toolbox for Comparative Modal Analysis and Damage Identification, in *Proc. of Sixth International Conference on Recent Advances in Structural Dynamics*, Southampton, UK, July 1997, pp. 399-412.
5. Ewins, D. J. (2000) *Modal Testing: Theory, Practice and Application, 2nd Ed.*, Research Studies Press Ltd.
6. The MathWorks. (1999). *Using MATLAB, version 5.3*. Natick, MA, USA