

# 철도교량 동특성 분석을 위한 궤도형식별 모달 테스트

## Modal Tests of Railway Bridges considering the Type of Track Structures

김성일\*    유진영\*\*    문제우\*\*    홍성모\*\*    김종태\*\*  
Kim, Sung-Il    Yu, Jin-Young    Mun, Je-U    Hong, Seong-Mo    Kim Jong-Tae

---

### ABSTRACT

The dynamic behavior of railway bridges originates from dynamic properties of various spans and structural types. As a result, the exact estimation of dynamic properties of the railway bridge can produce the exact estimations of dynamic performances of the railway bridge. The damping ratio affects the dynamic responses of the railway bridge in the vicinity of the critical speed seriously. Eurocode, National Annex of each European country and Japan have their own specification for the damping ratio for the estimation of dynamic performance of railway bridges. In our case, the specification for Honam high speed railways follows the Eurocode. In the present study, for the verification and regulation of the damping ratio and investigation of various dynamic properties, modal tests of various structural types are performed. In addition, for the investigation of effects of track structures on the dynamic property of the bridge, ballast track and concrete track are installed and tested.

---

### 1. 서론

철도교량의 동적거동은 각 형식별/지간별 교량의 고유한 동특성으로부터 비롯된다. 따라서, 철도교량의 동특성에 대한 정확한 파악으로부터 철도교량의 정확한 동적성능평가가 이루어질 수 있다. 특히 교량의 감쇠비는 임계속도 부근에서 교량의 응답에 지배적인 영향을 미치므로 이에 대한 가정은 동적성능평가 시 결정적인 요인 중 하나이다. 유럽의 통합된 Eurocode, 유럽 각국 및 일본은 고유한 감쇠비 기준을 제안하고 있는데 반해 국내에는 이러한 규정이 없으며, 호남고속철도 기준의 경우 Eurocode에서 제시하는 바를 따르고 있다. 본 연구에서는 국내 철도교량의 동적성능평가를 위한 고유한 감쇠비 기준을 제안하기 위해 대표적인 교량 형식에 대한 모형을 제작하여 고유진동수 및 감쇠비를 면밀히 분석하고자 하였다. 또한, 자갈궤도, 콘크리트궤도가 교량의 동특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 궤도형식별 동특성 분석 실험을 수행하여 분석하였다.

### 2. 동적성능평가를 위한 감쇠비 기준

구조물의 동적거동은 하중특성 외에 구조물 고유의 질량, 강성, 감쇠비에 따른 영향을 받는다. 즉, 철도교량의 감쇠비 가정은 동적성능 평가시 매우 중요한 요소이며, 특히 공진속도 부근에서 구조물의 동적응답은 감쇠비에 의해 절대적으로 영향을 받으므로 고속철도 등 공진을 필연적으로 경험하는 구조물에서는 이에 대한 가정이 설계에 큰 영향을 줄 수 있다. 그림 1은 감쇠비에 따른 동적응답 증폭의 차이를 보여준다.

---

\* 정회원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부, E-mail : sikim@krii.re.kr

TEL : (031)460-5354 FAX : (031)460-5359

\*\* 한국철도시설공단 KR기술연구소

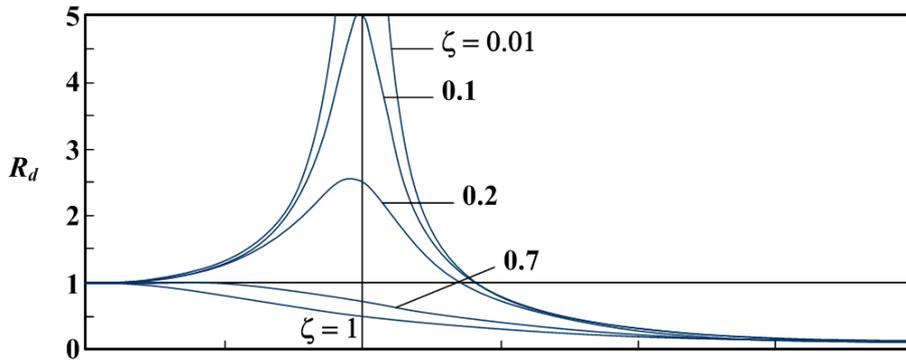


그림 1. 공진발생 시 감쇠특성에 따른 동적증대효과

Eurocode에서는 기존에 콘크리트 구조물에 대해 2.0~5.0%의 감쇠비를 적용하였으나 EN1991-2 (2003) 규정에서 표 1과 같이 변경하였다. 각 형식별, 경간별 교량에 대한 많은 현장실험 결과를 통해 도달한 감쇠비이나, 이 규정에 대해 너무 엄격하다는 의견도 제시되고 있다.

표 1. 구조형식별 감쇠비 하한값

교량형식	감쇠비 하한값 (%)	
	경간 < 20m	경간 ≥ 20m
강구조, 합성구조	0.5+0.125(20-L)	0.5
프리스트레스트 콘크리트	1.0+0.07(20-L)	1.0
Filler Beam, 철근콘크리트	1.5+0.07(20-L)	1.5

감쇠비의 경우 일반 주행속도에서는 동적응답에 큰 영향을 미치지 못하며 공진을 유발하는 임계속도 부근에서 매우 큰 영향을 미친다. 그러나, 실제 구조물의 감쇠는 점성감쇠 보다는 구조적감쇠 특성이 있으며 처짐이력 등에 영향을 받아 큰 응답이 발생할 경우 감쇠비도 커지는 경향이 있다. 또한 기존 연구들의 실험결과 Eurocode의 감쇠비 하한치는 과도한 적용으로 판단하여 스페인 등에서는 독자적으로 상향된 감쇠비를 적용하는 사례도 있으며, 일본 역시 PSC를 포함한 콘크리트 교량에 대해 2%의 감쇠비를 적용하고 있다. 이와 같은 기준설정은 그림 2에서 보이는 바와 같이 모두 현장실험 결과를 기반으로 하고 있다.

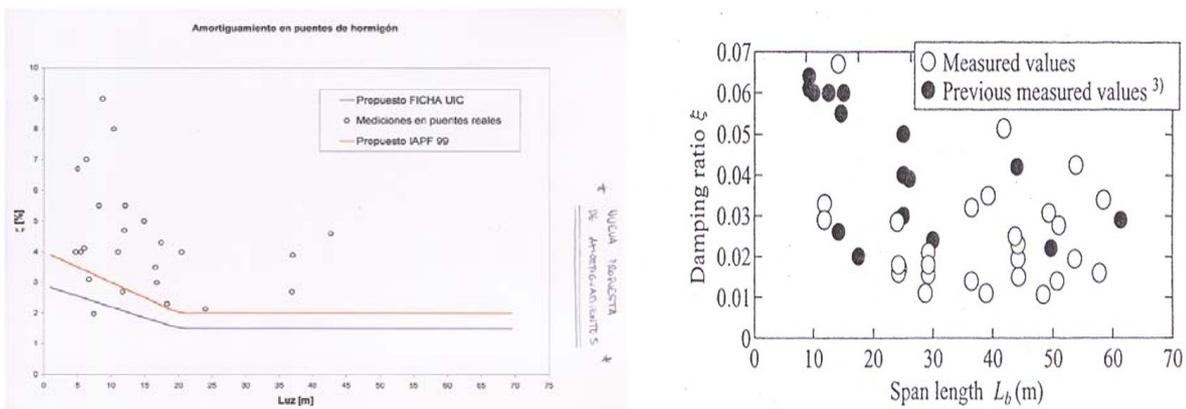


그림 2. 스페인(IAPF) 및 일본의 감쇠비 규정 (PSC = 2.0%)

### 3. 모형교량 선정 및 실험방법

실험체교량(상부구조)의 설계는 경부고속철도에서 사용 중인 소수주형 강합성거더를 선정된 후, 동적 특성 및 거동분석 실험의 목적에 부합되도록 하중 등 설계조건을 적용하여 상부구조 단면을 설계하였

다. 또한 무도상, 자갈도상, 콘크리트도상의 설치를 감안한 교량 설계를 수행하였다.

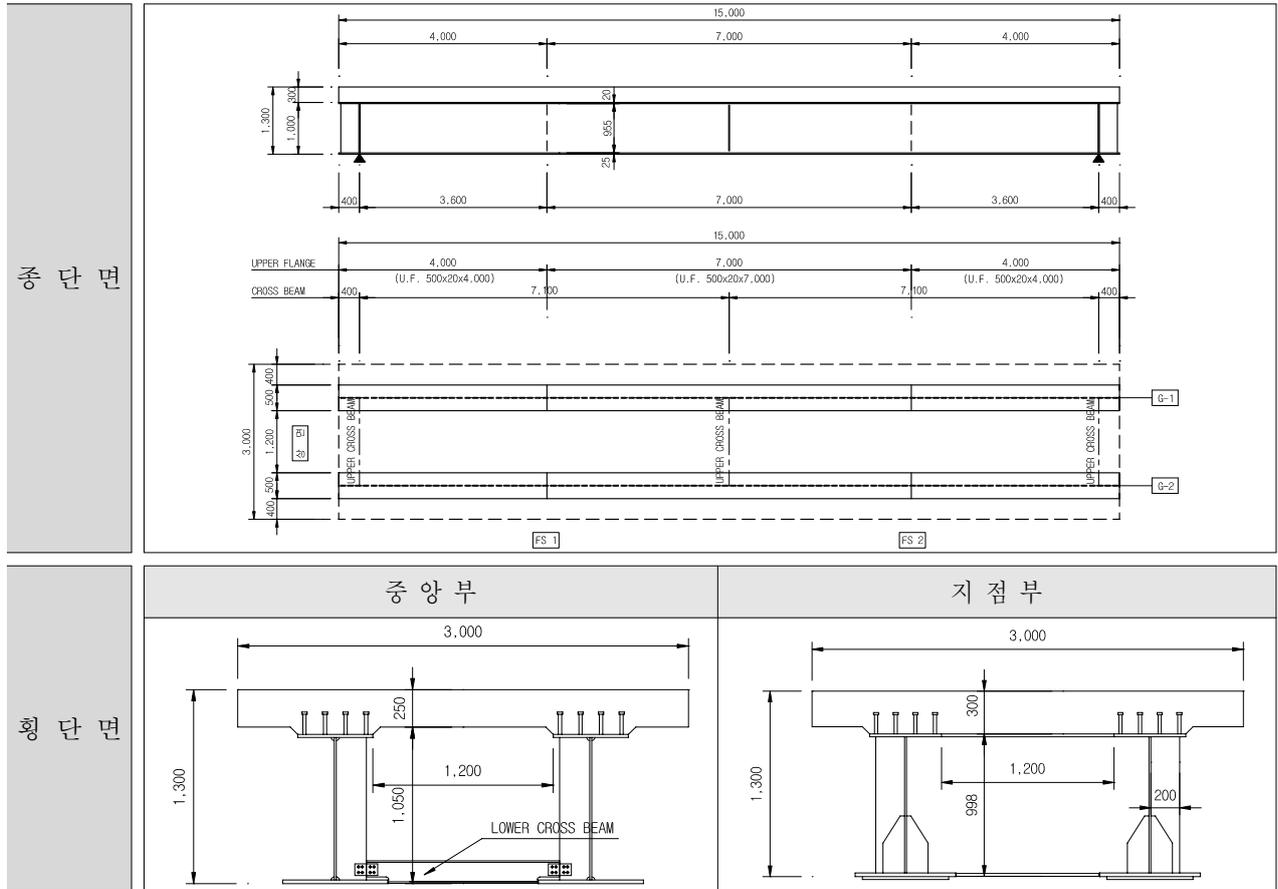


그림 3. 소수주형 강합성거더 종단면도 및 횡단면도

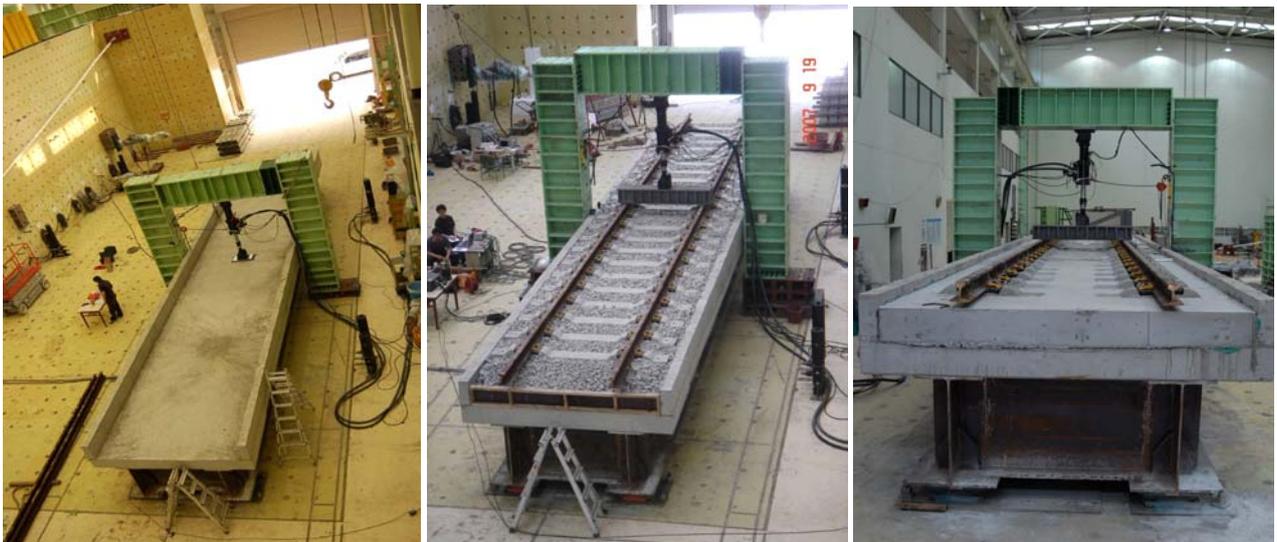


그림 4. 소수주형 강합성거더 시험체 전경

교량의 길이는 제작 및 실험여건을 우선적으로 고려하고 구조물의 고유진동수와 구조해석결과 등을 감안하여 15m의 경간을 적용하였다. 철도에서 사용되고 있는 교량의 폭으로는 고속철도 복선의 경우 14.0m로 표준화되어 있으며, 단선교량의 경우라 하여도 표준화된 단면은 없으나 최소 노반폭 4.0m에 좌우측 유지관리통로 등을 감안하여 9.0m를 사용하고 있다. 그러므로 실제 철도운행에 필요한 교량의 폭은 4.0m ~ 9.0m 정도이나, 이 경우 제작 및 운반에 어려움과 비용이 많이 들어가며 실험장소의 제약으

로 인한 실험의 어려움 등이 발생된다. 따라서 이를 감안하고, 단선궤도를 부설할 수 있도록 철도 침목의 폭(2.5m)이상인 3.0m를 교량폭으로 결정하여 설계하였다. 교량의 종단면 및 횡단면도는 그림 3과 같으며, 그림 4는 실제 설치된 교량모형 전경을 나타낸다.

본 실험에 사용된 재하장치는 250kN 용량의 동적 Actuator로 별도로 구성된 재하 프레임을 통해 교량과 일체화 되어 가진되는 형식이며, 가진주파수의 범위는 0~25Hz 이다. 또한, 동특성을 추정하기 위한 자유진동 신호를 얻기 위해 quick release 방식에 의한 실험을 수행하였다.

동적거동 검토에 있어서 열차 주행시 발생하는 다양한 가진주파에 대한 검토는 필수적이다. 본 실험에서는 각 모형체의 동적특성에 따라 공진이 발생하는 가진주파를 기본으로 하고 다른 범위의 가진주파에 대한 영향을 분석하기 위해 1~16Hz까지 1Hz 혹은 0.5Hz 간격으로 실험을 수행하였다. 단 재하프레임의 고유진동수 대역에 해당되는 2Hz, 3Hz는 실험의 안전성확보를 위해 제외하였다.

최대하중과 하중의 진폭에 대한 영향을 분석하기 위해 170kN, 220kN의 2가지 경우의 최대하중에 대해 각각 하중진폭을 다음과 같이 구분하여 시험체에 재하하였다. 여기서 최대하중 170kN은 KTX의 축중을, 220kN은 일반적인 디젤 동력차의 축중을 대표하는 값이다. 그림 5는 본 실험에 적용된 하중의 진폭을 개념적으로 나타낸 것이다. 그림과 같이 재하된 하중의 중앙하중(Median Load)으로부터 케이스별로 고정된 최대하중까지 5%, 10%, 25%의 3가지 경우에 대한 진폭이 발생되도록 설정하여 시험체별로 가진하였다.

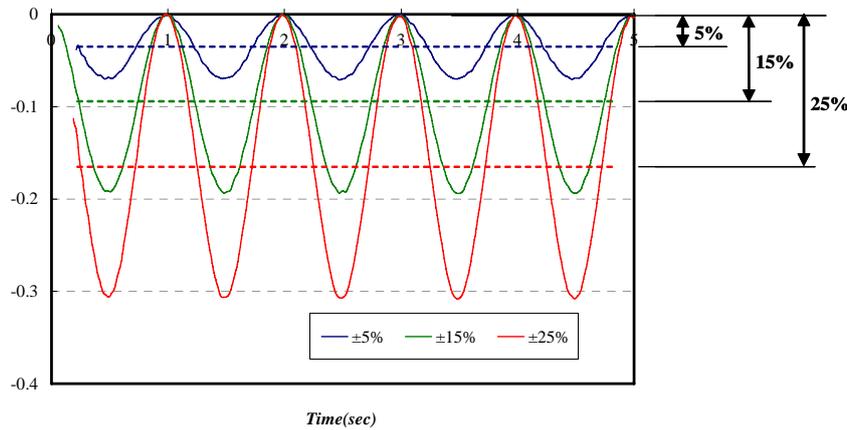


그림 5. 재하하중의 진폭

대상 교량의 동적응답 분석 및 특성 분석을 위해서 중앙경간에 가속도계와 변위계를 설치하였으며 모드형상을 추출하기 위해 단부, 경간의 1/4, 3/4지점에 가속도계를 추가 설치하였다. 또한 단부회전각 측정을 위한 변위계를 50cm간격으로 단부 근처에 설치하였다. 각 센서의 설치 위치는 그림 6과 같다.

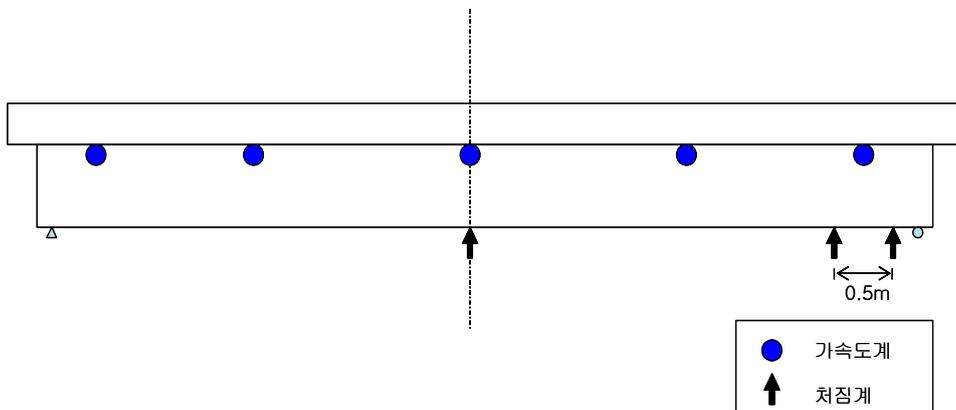


그림 6. 센서 설치도

#### 4. 궤도구조 형식별 응답분석

#### 4.1 정적응답 분석

케도의 강성기여를 검토하기 위하여 교량의 중립축 검토를 수행하였다. 정적재하시험에 의해 거더 중앙 상·하부플랜지에서 발생한 변형률을 측정된 후 응력으로 환산하여 거더의 중립축을 산정하였으며, 이를 통해 케도구조모형 적용이 교량의 강성기여도에 미치는 영향을 검토하였다. 그림 5.21은 200kN 재하시 거더 중앙 상·하부플랜지에서 발생한 최대응력값을 나타낸다. 여기서 (+)는 인장응력이며, (-)는 압축응력이다.

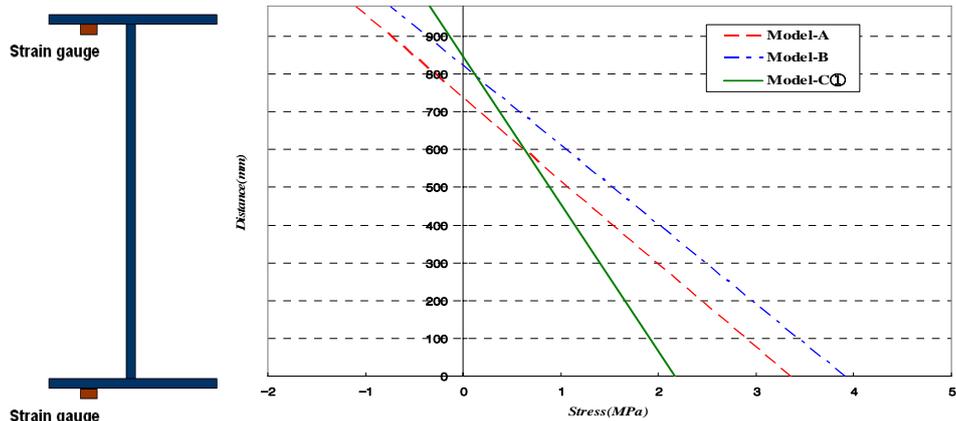
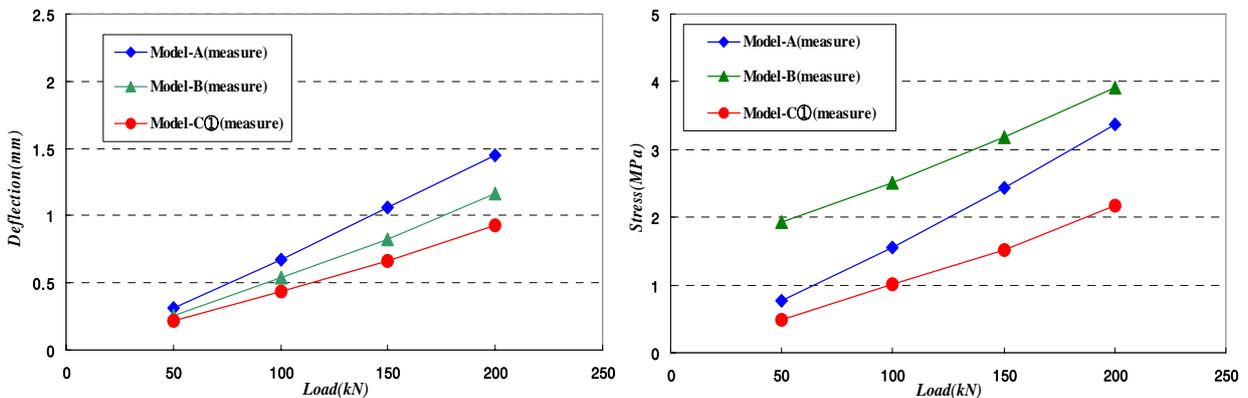


그림 7. 교량의 중립축 변화(200kN 재하시)

표 2. 케도구조모형의 강성기여도

	상부플랜지 응력 (MPa)	하부플랜지 응력 (MPa)	하면으로부터의 거리 (중립축위치) (mm)	비 고
Model-A (무도상)	-1.095	3.365	739.39	-
Model-B (자갈도상)	-0.535	2.673	816.56	9.45%
Model-C (콘크리트도상)	-0.346	2.165	947.82	21.99%

케도구조모형에 따른 중립축검토 결과, Model-A(교량)의 중립축위치에 비해 Model-B(교량+자갈도상)는 77.17mm, Model-C(교량+콘크리트도상)는 208.43mm 상승하였다. 이와 같은 교량의 중립축 상승은 교량의 강성 증가를 의미하며, 케도구조모형별 교량의 강성증가율은 Model-A의 경우에 비해 Model-B는 9.45%, Model-C는 21.99% 상승한 것으로 분석되었다. 자갈도상에 의한 강성증가 효과는 동적해석 시 무시하는 것이 일반적인 사항인데 반해 강성증가 효과가 존재함을 알 수 있다.



(a) 교량 중앙부 변위

(b) 거더 하부플랜지 응력

그림 8. 케도구조모형별 교량의 정적응답 비교

그림 8은 궤도구조모형 적용에 따른 교량의 정적응답 변화를 나타낸다. Model-B와 Model-C의 경우가 Model-A에 비해 교량 중앙부 변위량이 작게 나타났으나, Model-B의 경우에는 강성이 증가하였음에도 불구하고 200kN 재하 시 Model-A에 비해 거더 하부플랜지 응력이 약 0.6MPa 크게 나타났다. 이는 도상자갈이 교량에 미치는 영향이 강성기여 보다 질량기여 효과가 크기 때문인 것으로 판단된다. 이에 대한 분석은 고유진동수 분석을 통해 다시 한 번 확인할 수 있다. 또한, Model-C의 경우에는 중립축 상승과 함께 거더 상·하부플랜지의 응력이 모두 감소한 것으로 보아 강성기여효과가 질량기여효과보다 상대적으로 크게 작용한 것으로 판단되며, Model-B에 비해 동일한 중량을 적용한 Model-C가 정적하중 재하로 인한 교량의 부담력을 줄일 수 있는 것으로 분석되었다.

#### 4.2 고유진동수 분석

소수주형 강합성거더의 가진시험을 통해 확보된 자유진동신호로부터 고유진동수를 산출한 결과는 그림 9와 같다. 도상의 종류에 따라 도상 부설전은 13.23Hz, 자갈도상은 11.72Hz, 슬래브 궤도는 12.21Hz로 궤도형식에 따라 고유진동수의 차이가 발생한다.



그림 9. 소수주형 강합성거더의 고유진동수 분석결과 (궤도부설 전, 자갈도상, 콘크리트도상)

일반적으로 궤도구조의 경우 해석 상 편의성 및 간편성을 고려해 질량효과만 고려하는 것이 일반적이다. 그러나, 많은 현장 실험 및 ERRI의 실험적 연구결과에서도 나타나듯이 자갈도상의 경우에도 강성증가에 일정부분을 기여해, 실험치가 해석치에 비하여 높게 나타나는 것이 일반적인 경향이다. 본 연구에서는 이러한 효과를 정량적으로 분석하고자 하였으며, 그 결과를 정리하면 표 3과 같다.

표 3. 궤도구조 영향에 따른 첫 번째 휨 고유진동수 비교·분석

구 분	① 실험치(Hz)	② 해석치(Hz) (질량만 고려 시)	③ 해석치(Hz) (강성도 고려 시)	비 고
Model-A (교량)	13.23	13.94	13.94	5.1% 오차
Model-B (자갈도상)	11.72	10.09	-	
자갈도상의 효과	실험 시 11.4% 감소	질량만 고려 해석 시 27.6% 감소	질량/강성 고려 해석 시 25.0% 감소	자갈도상에 의한 강성효과 존재
Model-C (콘크리트도상)	12.21	10.09	12.51	질량만 고려 시 17.4%, 강성 고려 시 2.4% 편차
콘크리트도상의 효과	실험 시 7.7% 감소	질량만 고려 해석 시 27.6% 감소	질량/강성 고려 해석 시 2.6% 감소	

표 4에서 주목할 점은 자갈도상이나 콘크리트도상 모두 질량만 고려 시 해석 상에서는 27.6%의 고유진동수가 감소하게 되나, 실험에 의한 결과 자갈도상의 경우 11.4% 감소, 콘크리트도상의 경우에는 7.7%의 감소폭에 그친다는 점이다. 즉, 강성효과가 예상되는 콘크리트도상 뿐 아니라 자갈도상의 경우에

도 상당한 강성기여를 하고 있음을 알 수 있다. 해석 시 질량효과만 고려함에 따른 고유진동수의 감소는 공진을 발생시키는 임계속도의 감소로 연결되므로, 설계속도 내에서의 정확한 공진 및 동적거동 분석에 오류를 일으킬 수 있다.

물론 임계속도의 감소는 안전측 설계로 귀결될 수 있으나, 경제적 설계를 위한 정확한 분석 혹은 설계속도가 아닌 실운행속도에 대한 거동 예상을 위해서는 적절한 강성고려가 필요함을 알 수 있다. 특히 콘크리트도상 적용 시 질량만 고려하는 것은 매우 불합리한 것으로 판단되며, 반드시 강성에 대한 고려를 반영할 필요가 있음을 알 수 있다.

### 4.3 감쇠비 분석

그림 10~12는 소수주형 강합성거더의 도상상태에 따른 최대하중별 감쇠비의 결과를 나타낸 것이다. 감쇠비의 산정은 하중 가진 후 quick-release에 의해 얻어진 자유진동 신호를 logarithmic decrement 방법에 의해 추출하였다.

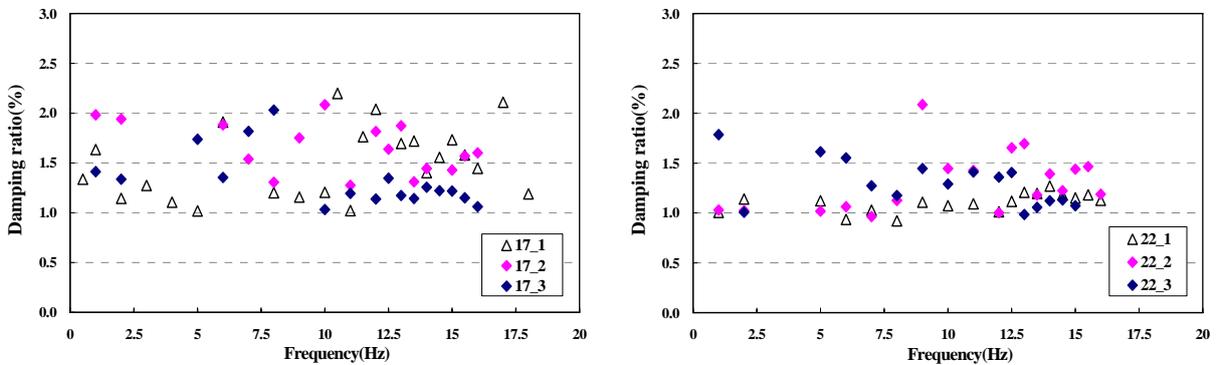


그림 10. 소수주형 강합성거더 (레도부설 전)의 감쇠계수 (170kN, 220kN)

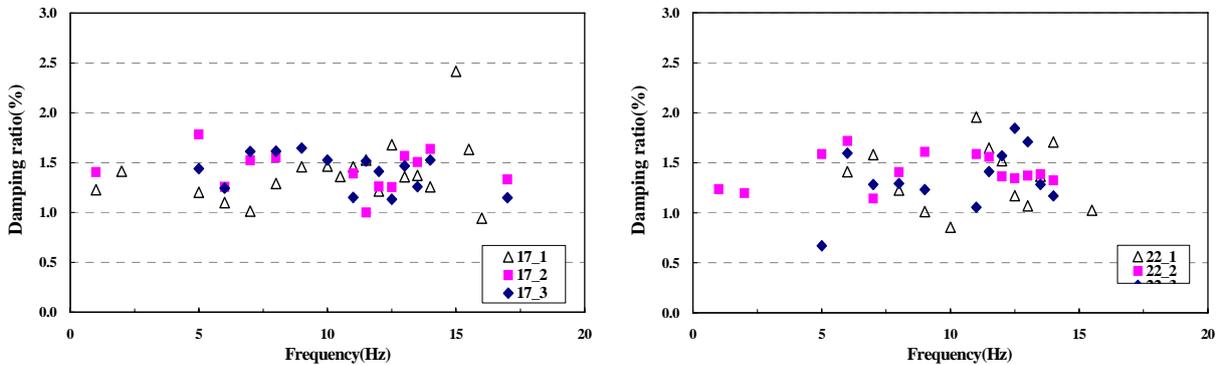


그림 11. 소수주형 강합성거더(자갈도상)의 감쇠계수 (170kN, 220kN)

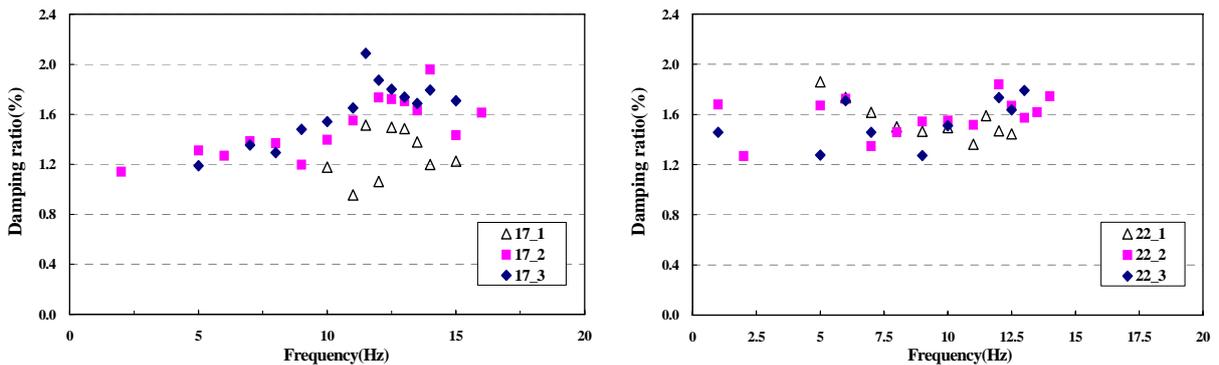


그림 12. 소수주형 강합성거더(콘크리트도상)의 감쇠계수 (170kN, 220kN)

일반적으로 감쇠비는 재료에 의한 영향이 가장 크며, 구조물의 경우 처짐이력(하중크기)에 의한 영향도 상당하다. 본 실험에서는 감쇠비에 대한 가진주파의 영향은 명확히 나타나지 않았으며, 본 실험에서는 최대하중 및 하중진폭에 대한 영향도 크게 나타나지 않았으나, 이는 하중의 크기가 170kN, 220kN으로 제한적이었던 이유로 판단된다.

Eurocode와 호남고속철도 기준에서는 강합성 거더의 경우 0.5%의 감쇠비를 제안하고 있으며 표 1에 따라 구조물 경간에 따른 할증을 적용할 경우 본 실험체인 15m 경간의 강합성거더의 경우 1.125%가 된다. 그러나, 그림 10~12에서와 같이 비교적 작은 실험 가진하중에도 불구하고 대부분의 경우 1.0~2.0%의 감쇠비를 확보하고 있음을 알 수 있으며, 대체적으로 평균 1.5% 정도의 감쇠비를 확보함을 알 수 있다. 따라서 Eurocode의 감쇠비 제안은 매우 엄격한 기준이라고 판단된다.

## 5. 결론

철도교량의 동적안정성은 주행안전성 및 승객의 승차감과 관련하여 매우 중요한 확보 대상이다. 이에 대한 정확한 평가 및 예측을 위해서는 교량의 동특성에 대한 정확한 사전분석이 필요하다. Eurocode, 유럽 각국의 National Annex, 일본 등은 감쇠비에 대한 구조형식별 명확한 기준을 적용하고 있으나, 국내에서는 이에 대한 기준이 없으며 이를 위한 연구사례가 절대적으로 부족한 현황이다.

본 연구에서는 소수주형 강합성거더를 대상으로 고유진동수 및 감쇠비를 분석하고자 하였으며, 특히 궤도형식이 철도교량의 전체 시스템의 동특성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 중립축 이동을 통한 강성기여 효과, 고유진동수 분석에 의한 질량/강성 기여효과를 분석하였으며, 감쇠비에 대한 많은 데이터 수집을 통해 감쇠비 기준 설정에 활용하고자 하였다.

향후 연구에서는 소수주형 강합성형 외의 프리스트레스트 콘크리트 형식의 교량에 대한 다양한 하중 조건에 대한 실내실험 연구 분석이 수행될 것이며, 실 열차 운행 중 다양한 형식별, 경간별 교량에 대한 현장실험 결과를 토대로 철도교량 동적성능평가를 위한 감쇠비 기준이 수립될 예정이다.

## 감사의 글

이 연구는 한국철도시설공단에서 시행한 ‘철도교량 동적안정성 및 동적설계기준에 관한 연구’로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. ERRI D214/RP9 Final Report, 1999, Rail Bridges For Speeds > 200km/h.
2. Eurocode 1 : Actions on Structures - Part 2 : Traffic Loads on Bridges, 2003.
3. Eurocode - Basis of Structural Design, 2005.12
4. 한국철도시설공단(2004), 철도설계기준(철도교편), 한국철도시설공단
5. 한국철도시설공단(2005), 고속철도설계기준 - 노반편, 건설교통부
6. 일본 국토교통성철도국 (2006), 철도구조물등설계기준/동해설 - 변위제한, 철도총합연구소
7. 김성일 외 (2007), 철도교량 동적안정성 및 동적설계기준에 관한 연구 (중간보고서), 한국철도기술연구원