

궤도구조를 고려한 철도교량의 동적거동 분석

Dynamic Behavior Analysis of Railway Bridge considering Track Stiffness

강덕만† 안해영* 성덕통** 김성일*** 박용걸****
Kang, Duck-Man An, Hea-Young Sung, Deok-Yong Kim, Sung-Il Park, Yong-Gul

ABSTRACT

This study is objected by analyzing whether it is applied to the analysis model considering the track stiffness or not when the railway bridge is designed or reviewed for the dynamic stability. It is performed that the analysis model is verified by comparing the field test result with the analysis result. Also, The dynamic response of railway bridge through the existing analysis model is compared with the analysis model considered the track stiffness. In addition, it is performed by analyzing the model considering the stiffness of concrete track.

Therefore, this study is suggested that the design of railway bridge apply to the existing analysis model considering the mass of track and the dynamic stability review of railway bridge apply to it considered the stiffness & mass of track. Also, it is suggested that the stiffness of concrete slab on the bridge must consider when it is designed or checked over the dynamic stability.

key words : railway bridge(궤도교량), track stiffness(궤도강성), dynamic stability(동적안정성), field test(현장 측정)

1. 서 론

궤도교는 도로교와 달리 주행열차에 의한 동적하중이 궤도를 통하여 교량으로 전달되고, 이때 궤도구조의 동적거동 특성에 따라 하부구조물에 전달되는 하중의 크기가 달라진다. 하지만 현행 철도교 설계 시에는 궤도구조를 합리적으로 모형화하기에 번거로움이 있어 2차 고정하중으로만 고려하여 반영하고 있다.

자갈도상궤도의 경우 자갈의 상태 및 다짐정도에 따라 강성의 변화가 매우 심하여 이를 설계에 적용하기에는 다소 무리가 있기 때문에 “궤도구조물등설계기준·동해설의 궤도구조(유도상궤도)(안), 일본 철도총합연구소”에서는 자갈도상궤도 설계 시 도상탄성계수를 도상두께와 무관하게 200kN/mm을 적용하도록 제시하고 있다.[11] 하지만 자갈도상궤도의 경우 반복적인 열차하중에 의해 소성변형을 일으켜 탄성력을 소실하게 되고 경우에 따라 뜬침목 구간이 발생하는 등 설계 시 강성을 유지하기에 어려움이 있으며, 이로 인해 하부구조물에 전달되는 하중의 크기가 달라질 수 있다. 또한, 국내에서는 점차 콘크리트슬래브궤도의 적용이 늘어가고 있는 추세이지만 교량 설계 및 동적안정성 검토 시 콘크리트슬래브궤도의 강성을 무시하고 기존 자갈도상궤도와 동일한 2차 고정하중으로 고려하는 방법을 사용하고 있어 비경제적인 교량 설계가 이루어질 수 있으며 동적안정성 검토 결과가 실제 교량의 동적응답과는 상이할 수 있다.

† 책임저자 : 정회원, (주)삼보기술단 철도부, 과장, 공학석사

E-mail : lovebridge@chol.com

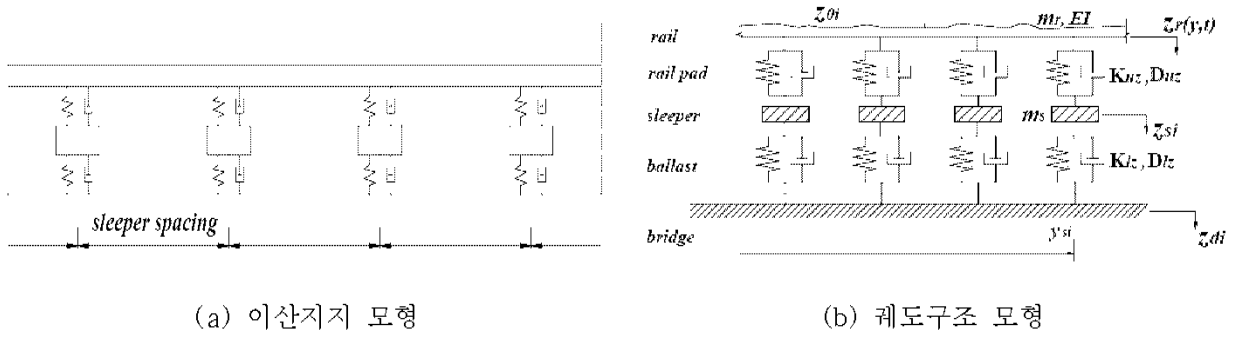
TEL : (0)3433-3000 FAX : (02)3433-3110

* 정회원, (주)삼현피에프, 대표이사, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도건설공학과, 석사과정

** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도건설공학과, 박사수료

*** 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

**** 정회원, 서울산업대학교 철도전문대학원, 철도건설공학과, 교수



(a) 이산지지 모형

(b) 궤도구조 모형

그림 1. 궤도구조 동해석 모형

따라서, 본 연구에서는 교량상 궤도를 기존의 철도교량 설계 시 적용하고 있는 2차 고정하중으로써 해석하는 방법과 실제 궤도를 모델링한 해석모델의 동적거동 변화를 비교분석하기 위해 범용유한요소해석 프로그램인 MIDAS civil 6.3을 이용하여 일반철도의 대표교량형식인 PSC 거더교에 대한 3D 동해석을 실시하였으며, 이를 현장측정한 결과와 비교하고 실 열차하중에 대한 공진 시 교량의 응답을 해석모델별로 검토하였다. 또한, 콘크리트궤도를 적용한 해석모델에 대하여 추가로 검토하였다.

2. 대상교량 제원 및 현장측정

2.1 대상교량의 제원

대상교량은 일반철도 구간(중앙선 도곡3교)의 대표 교량형식인 5주형 PSC 거더교(1@25m, 복선)로 신설 교량으로 선정하였으며, 단면 및 제원은 그림 2, 표 1, 2와 같다.

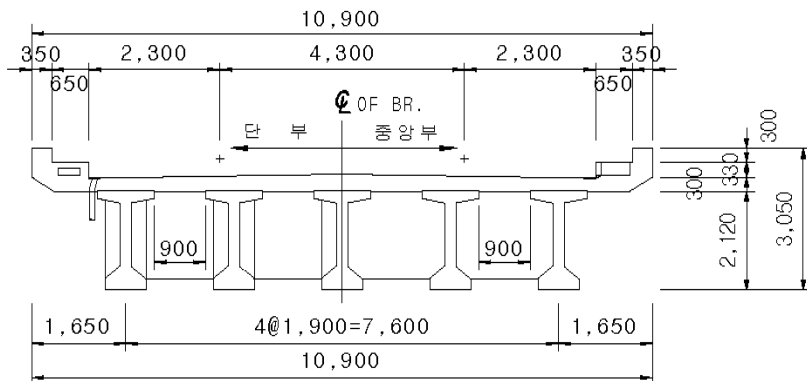


그림 2. 25m PSC거더 철도교의 제원 및 단면도

표 1. 25m PSC거더 철도교의 단면특성값

구분	내측 거더			외측 거더		
	단부	L/8	중앙부	단부	L/8	중앙부
A(m ²)	2.05940	1.65263	1.26510	2.25145	1.84468	1.45715
Ix(m ⁴)	1.14587	1.02484	0.91919	1.29571	1.15238	1.02016
Iy(m ⁴)	0.19743	0.15821	0.14720	0.41467	0.37815	0.36714
J(m ⁴)	0.23161	0.07601	0.02220	0.23663	0.08102	0.02722

표 2. 25m PSC거더 철도교의 재료 특성치

구 분	설계기준강도 (MPa)	탄성계수 (kN/m ²)	단위중량 (kN/m ³)	포와송 비 (v)	비 고
바닥판/가로보	27	2.5×10^7	25	0.2	
PSC 거더	35	2.7×10^7	25	0.15	

2.2 현장측정 및 결과

본 연구에서 선정된 대상교량은 6경간 단순교(6@25.0=150m)로 구성되어 있으며, 상부형식은 PSC Girder교로 이루어져 있다. 시험대상 경간은 동적재하시험시 센서부착 및 측정이 용이하고, 대상교량의 최대응답이 발생할 것으로 예측되는 최대 정모멘트 및 전단력 발생 구간인 S1 경간 중앙부와 A1 지점부를 측정경간으로 선정하였다.

철도교량의 동적거동 특성을 파악하기 위해 열차가 재하될 선로측 하부 거더에 변위계와 가속도계를 설치하였으며, 센서를 설치한 전경은 그림 3과 같다.

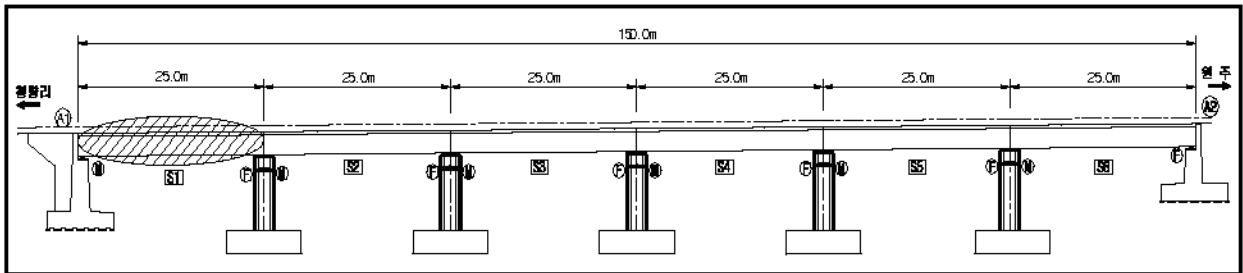
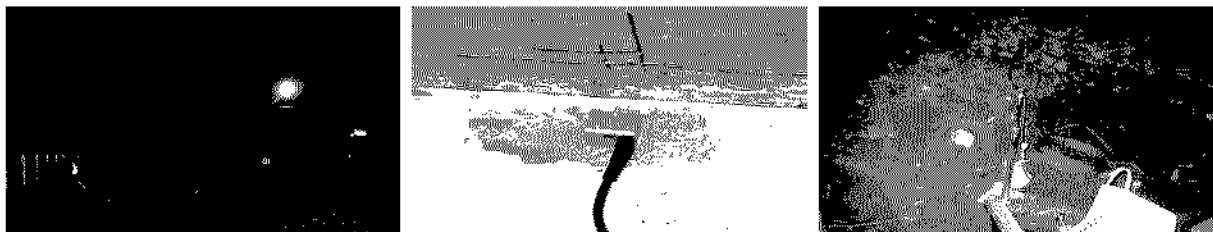


그림 3. 동적재하시험 대상 경간

표 3. 측정센서 설치위치에 대한 설명

구 분	위 치 설 명	측 정 항 목
DT1	S1 경간 중앙부 G1 플랜지 하면 중앙	처 짐
DT2	S1 경간 중앙부 G2 플랜지 하면 중앙	처 짐
DT3	S1 경간 중앙부 G3 플랜지 하면 중앙	처 짐
DT4	S1 경간 중앙부 G5 플랜지 하면 중앙	처 짐
ACC1	S1 경간 중앙부 G1 플랜지 하면	가속도



(a) 차량재하

(b) 가속도계

(c) 변위계

그림 4. 차량재하 및 센서설치 전경

대상교량의 정·동적 재하시험을 위해 성능이 양호한 차량을 선택하여 7200호 기관차를 사용하였으며, 재하차량의 체원 및 중량은 그림 5와 같다. 정적재하시험은 차량의 중심이 지간 중앙에 위치하도록 단선 재하였으며, 동적재하시험은 10~80km/h까지 20km/h씩 증가시키고 차량 통과 후 교량의 자유진동이 발

생하도록 일정 시간이상 측정하였다.

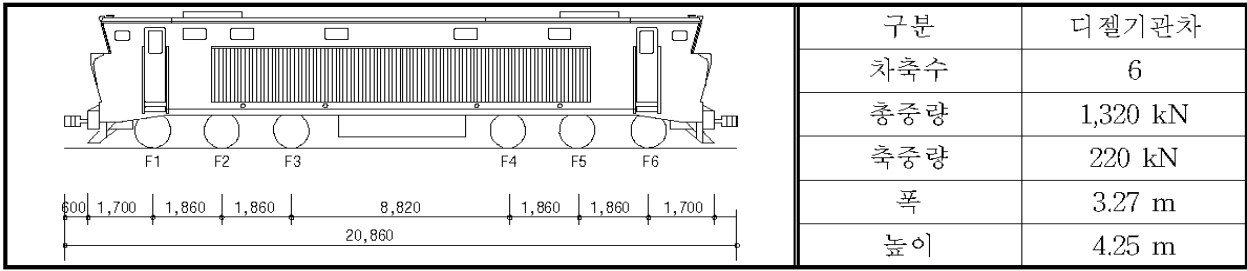
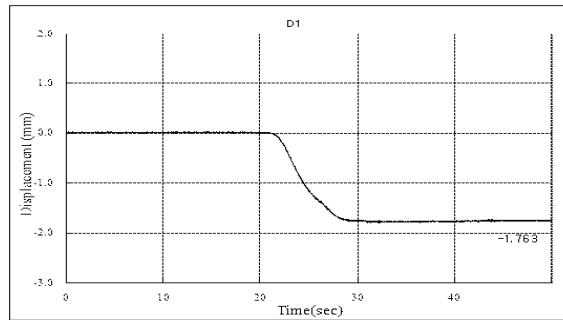
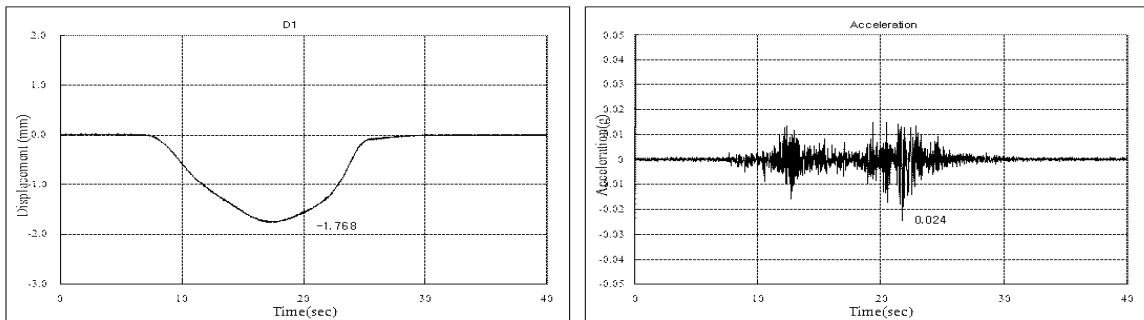


그림 5. 재하차량의 제원 및 축하중

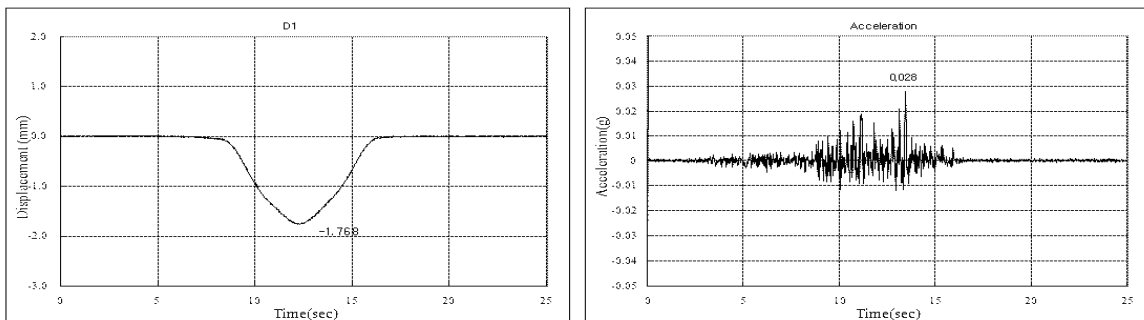
대상 교량에 대한 정·동적재하시험에 의한 현장측정 결과는 그림 6과 같다.



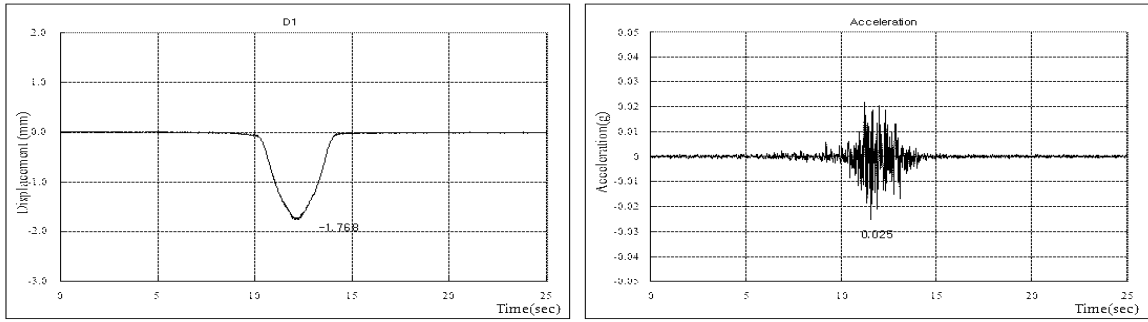
(a) 정적재하



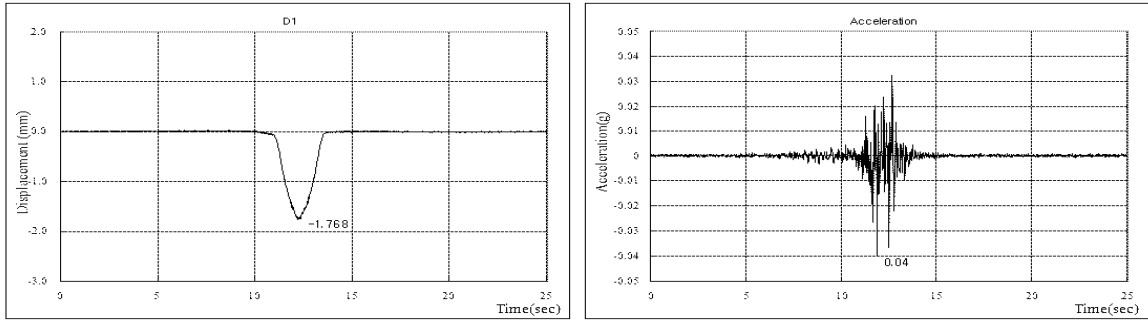
(b) 10 km/h



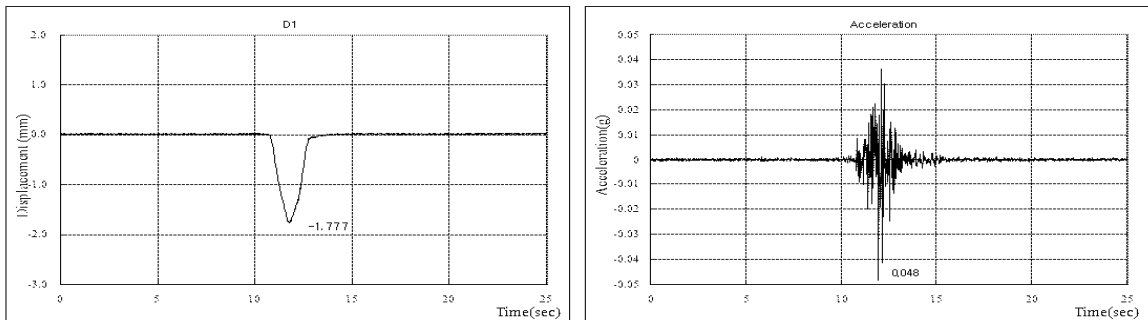
(c) 20 km/h



(d) 40 km/h



(e) 60 km/h



(f) 80 km/h

그림 6. 현장측정 결과(PSC Girder, 25m)

2.3 해석 모델링

궤도구조에 따른 대상교량의 동적거동을 비교분석하기 위하여 기존 설계 시 궤도구조를 2차 고정하중으로만 적용하는 격자해석모델과 궤도구조의 특성을 고려한 격자+셀 모델로 구분하였다. 본 연구에서 적용한 3D-simulation model은 표 4와 같으며, 향후 교량상 콘크리트궤도의 부설을 고려하여 이에 대한 검토를 추가로 수행하였다.

Model-①의 경우는 레일 및 침목을 고려한 자갈도상궤도를 2차 고정하중으로 계산하여 각 거더에 등분포하중으로 적용하고 적용하중에 대해 질량으로 기여하도록 고려하였으며, Model-②의 경우는 침목과 레일은 frame요소, 도상자갈과 패드는 스프링-댐퍼요소, 상부슬래브는 셀요소로 모델링하였다. 여기서 레일과 침목의 질량을 뺀 도상자갈의 질량을 슬래브상에 등분포하중으로 작용하도록 하였으며, 슬래브를 모델링에 적용하였기 때문에 거더는 합성전의 거더 강성만을 고려하였다. 또한, Model-③은 교량상 콘크리트슬래브궤도 적용에 대한 교량의 동적응답의 변화를 검토하기 위해 Model-②의 자갈도상궤도와 동일한 질량이 고려되도록 380mm두께의 콘크리트슬래브궤도를 가정하였으며, 스프링-댐퍼요소로 모델링한 패드에 의해 레일과 콘크리트 슬래브가 연결되도록 모델링하였다.

궤도의 구성요소별 특성값은 표 5와 같으며, 레일의 경우는 60kg/m 장대레일을 사용하였고 침목은 PC침목을 630mm간격으로 배치하였다. 또한, 2차 고정하중으로 고려되는 도상자갈은 침목하면까지 300mm 두께를 적용하여 궤도하중을 산정하였으며, 도상자갈 및 패드의 수평 스프링계수는 무한대로 가정하여 수직방향에 대해서만 거동하도록 하였다.

표 4. 3D-simulation model


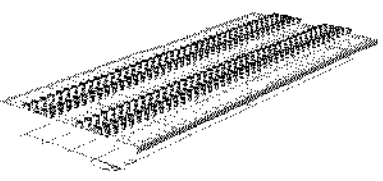
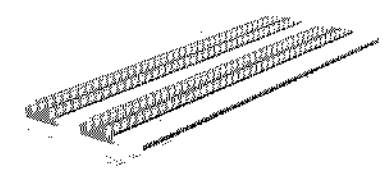
구분	modeling	비고
Model-① (격자해석모델) - 자갈도상레도 -		· 레도구조를 포함한 2차 고정하중은 등가의 분포하중으로 고려 · 교량설계 및 안정성 검토 시 일반적인 해석 모델
Model-② (격자+셀 해석모델) - 자갈도상레도 -		· 레일과 침목의 중량을 뺀 도상자갈만을 2차 고정하중으로 적용 · 도상자갈 및 패드의 강성과 진동감쇠를 스프링-댐퍼요소로 고려 · 레일 및 침목은 Frame 요소소로 모델링
Model-③ (격자+셀 해석모델) - 콘크리트레도 -		· 콘크리트레도의 강성과 패드의 강성 및 진동감쇠 고려 · 레일은 Frame 요소, 패드는 스프링-댐퍼요소로 모델링

표 5. 레도구조의 구성요소별 특성값

요소	특성	특성값
레일 (60kg/m)	탄성계수(E)	$2.06 \times 10^8 (\text{kN/m}^2)$
	단위중량	$0.608 (\text{kN/m}^3)$
	x축에 대한 단면 2차 모멘트(I _{xx})	$3.09 \times 10^{-6} (\text{m}^4)$
	z축에 대한 단면 2차 모멘트(I _{zz})	$5.13 \times 10^{-6} (\text{m}^4)$
침목 (PC)	단위중량	$1.3 (\text{kN/m}^3)$
	수평방향 스프링계수(K _{ux})	∞
	수평방향 감쇠계수(C _{ux})	0
	z축에 대한 단면 2차 모멘트(I _{zz})	$9.69 \times 10^{-5} (\text{m}^4)$
도상자갈 및 패드	단위중량	$19 (\text{kN/m}^3)$
	도상자갈 수직방향 스프링계수(K _{uz})	$200 (\text{kN/mm})$
	도상자갈 수직방향 감쇠계수(C _{uz})	$0.98 (\text{kN} \cdot \text{sec/mm})$
	패드 수직방향 스프링계수(K _{uz})	$400 (\text{kN/mm})$
	패드 수직방향 감쇠계수(C _{uz})	$0.098 (\text{kN} \cdot \text{sec/mm})$
콘크리트 레도	단위중량	$25 (\text{kN/m}^3)$
	압축강도	35MPa
	레도 수직방향 스프링계수(K _{uz})	$21.5 (\text{kN/mm})$
	레도 수직방향 감쇠계수(C _{uz})	$1.582 (\text{kN} \cdot \text{sec/mm})$

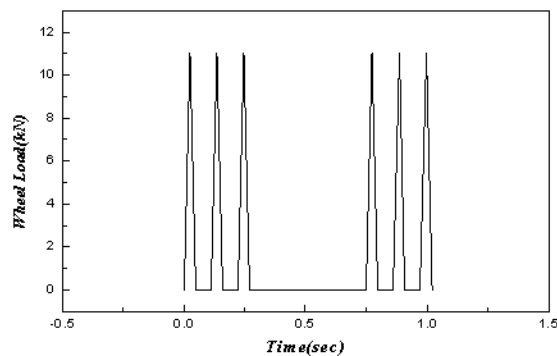


그림 7. 시간이력함수(디젤동력차)

열차하중모델은 현장재하시험과 동일한 열차하중조건에 대해 시간이력함수를 이용하여 해석을 수행하였다. 선정차량의 운중은 시간경과에 따라 일정한 속도로 주행하면서 교량 상판위의 레일을 따라 작용하도록 하였으며, 단선재하하였다. (그림 7 참조)

3. 레도구조 적용에 따른 철도교량의 동적거동 결과 및 분석

3.1 고유진동수 분석

본 연구에서 적용한 레도구조를 고려한 해석모델의 적합성 및 차량하중에 의한 공진발생 속도대역(임계속도)을 알아보하고자 교량의 자유진동해석을 수행하여 지배적인 첫 번째 휨 고유진동수를 산정하였고, 대상교량의 현장측정을 통해 제시된 고유진동수와 비교·분석하였다. 현장측정에서 얻은 교량의 진동가속도 데이터 중 차량주행 데이터를 삭제하고 교량만의 자유진동영역에 대해 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 통해 교량의 고유진동수를 확인하였다.[7]

레도구조 적용에 따른 고유진동수(1st mode) 변화는 그림 8과 같다.

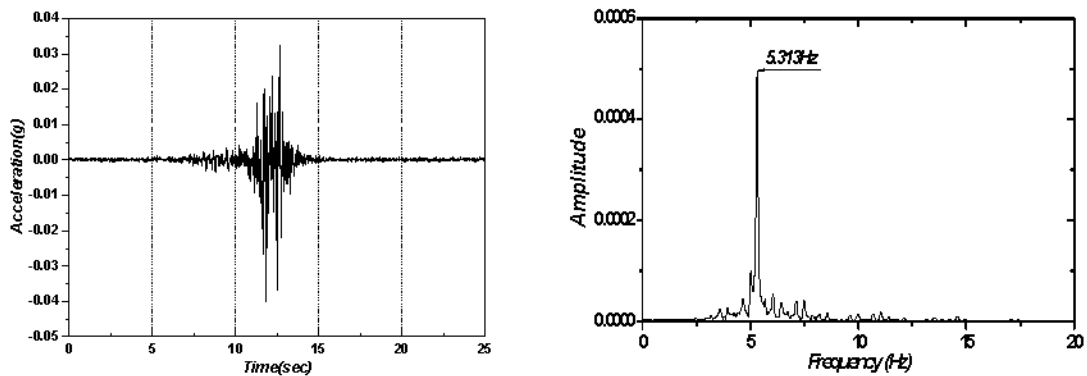


그림 8. 고유진동수 1st mode 형상 및 결과

본 대상교량의 고유진동수해석결과 UIC 776-1 규정에서 제시하고 있는 25m경간에 대한 기준(3.507~8.530Hz)을 만족하였으며, 현장측정을 통해 제시된 고유진동수(5.31Hz)와도 약 1~6.6%의 편차를 보여주어 적용한 해석모델은 타당한 것으로 판단된다.

레도구조 적용에 따른 고유진동수 분석결과 자갈도상레도의 강성을 고려하지 않은 Model-①의 경우 실측치와 6.2%의 가장 큰 편차를 보였으며, 레일, 침목, 패드, 자갈을 모형화한 Model-②의 경우가 실측치와 2.6%의 편차를 보여 가장 근사한 값을 가지는 것으로 나타났다. 또한, Model-③의 경우는 콘크리트레도 적용에 따른 강성증가로 인해 레도 강성을 고려하지 않은 Model-①과 자갈도상레도의 강성과 질량을 고려한 Model-②보다 고유진동수가 각각 5.6%, 1.7% 증가하였다. 즉, 완공된 실교량의 경우 교량설계 시 적용하는 Model-①에 의한 설계강성보다 실강성이 높다는 것을 의미한다.

3.2 동적응답 분석

그림 9에 3D-simulation 해석을 통한 교량의 동적응답과 현장측정 결과를 비교하였다.

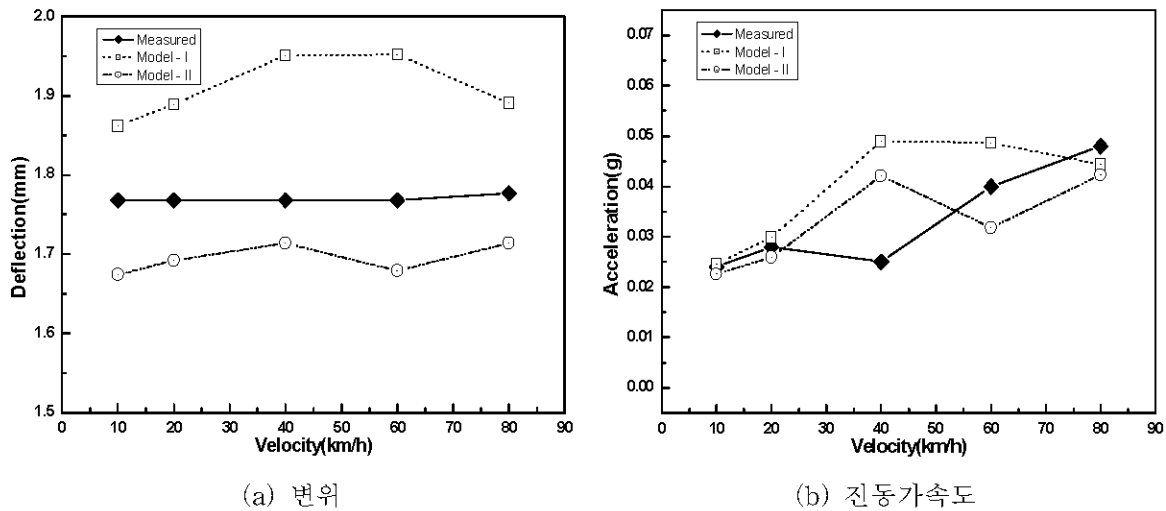


그림 9. 교량중양부 동적응답 비교

해석모델별 교량의 동적응답 비교 결과, 격자해석모델인 Model-①의 경우가 궤도강성을 고려한 Model-② 및 현장측정값보다 변위 및 가속도가 높게 나타났으며, Model-②가 현장측정치에 근사한 것으로 나타났다. 이는 실제 자갈도상궤도의 도상자갈 강성이 다짐작업 및 현장여건에 따라 차이가 있어 Model-②에 입력한 도상자갈 강성치(200kN/mm)와 다르기 때문인 것으로 판단된다.

대상교량의 공진 발생 시 해석모델별 동적응답을 분석하고자 무궁화호(동력차 1량+객차 4량)에 대한 시간이력함수를 이용하여 해석을 수행하였다. 선정차량의 운중은 시간경과에 따라 일정한 속도로 주행하면서 교량 상판의 레일을 따라 작용하도록 하였으며, 단선재하하였다. 차량의 주행속도는 임계속도와 부임계속도를 고려하여 실제 운행속도보다 높은 속도로 0~200km/h까지 10km/h씩 증속시켜가며 해석을 수행하였다. 해석모델별 무궁화 객차사이 거리(19.25m)에 대한 임계속도 및 부임계속도는 표 6과 같이 계산할 수 있다.[6] 임계속도 계산 결과 2차 고정하중으로만 적용한 Model-①에 비해 궤도구조의 강성을 고려한 Model-②와 Model-③의 고유진동수가 증가하여 임계속도가 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 궤도구조의 강성을 고려하지 않은 해석모델의 경우 공진을 발생시키는 임계속도대역이 실제 철도 교량의 임계속도와 상이할 수 있으며, 교량상 콘크리트궤도의 적용 시 기존 동적안정성 검토방법에 비해 임계속도가 증가할 수 있는 것으로 분석되었다.

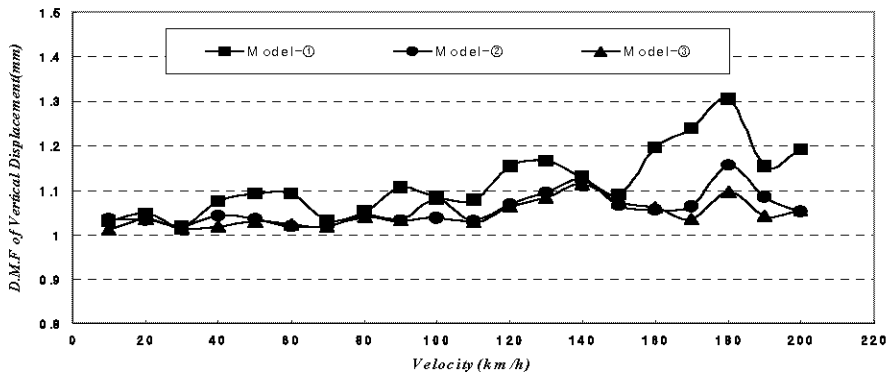
표 6. 대상교량의 임계속도 산정

Model	①	②	③
임계속도(km/h)	345.1	358.2	364.5
부임계속도(km/h)	172.5	179.1	182.2

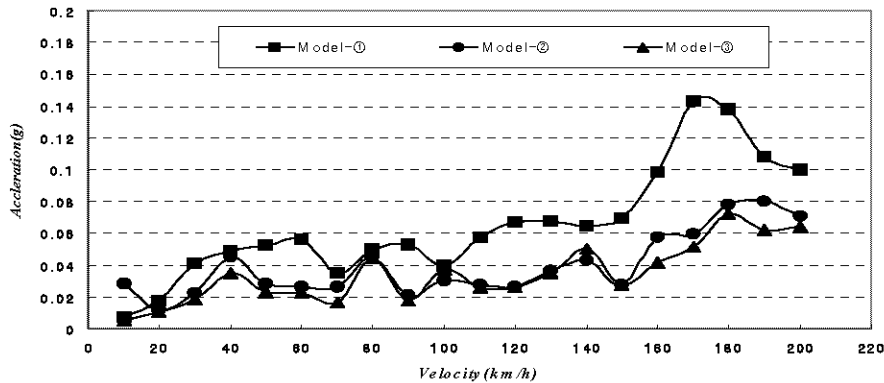
궤도구조별 철도교량의 동적응답은 단선재하로 인해 가장 큰 응답을 보이는 Girder 1의 동적응답을 비교·분석하였으며, 동적증폭계수(Dynamic Magnification Factor)와 교량 중양부 진동가속도, 교량 단부의 단부회전각에 대해 검토하였다. 검토결과는 그림 10과 같으며, 표 7에 이를 종합하여 정리하였다.

표 7. 해석모델별 철도교량의 동적응답 결과 비교(180km/h 시)

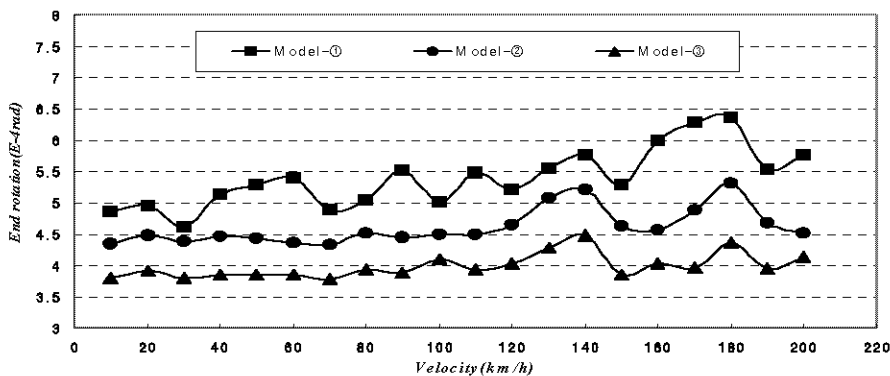
구 분	고유진동수 (Hz)	동적증폭계수 (D.M.F)	진동가속도 (g)	단부회전각 (rad)	비 고
국내·외 철도교 설계기준	3.507~8.530	1.3384(25m)	유도상 : 0.35 무도상 : 0.5	$\theta_{\max} \leq 6.5 \times 10^{-3}$	
Model-① (자갈도상레도) -레도강성 미고려-	4.98	1.3063	0.138	0.636×10^{-3}	
Model-② (자갈도상레도) -레도강성 고려-	5.17 (3.67% 증가)	1.1549 (13.10% 감소)	0.0780 (45.47% 감소)	0.531×10^{-3} (16.50% 감소)	(①:②의 증감율)
Model-③ (콘크리트레도) -레도강성 고려 시-	5.26 (5.32% 증가)	1.0955 (19.24% 감소)	0.0719 (47.89% 감소)	0.436×10^{-3} (31.44% 감소)	(①:③의 증감율)



(a) G1 중앙부 수직처짐 D.M.F



(b) 교량 중앙부 진동가속도



(c) 단부회전각

그림 10. 해석모델별 철도교량의 동적응답(무궁화호)

분석결과, 본 대상교량은 부임계속도대역에서 동적증폭계수(D.M.F), 진동가속도 및 단부회전각이 모두 국내·외 설계기준을 만족하였다. 부임계속도인 170~180km/h의 속도대역에서는 Model-①(궤도강성 미고려)에 비해 Model-②(궤도강성 고려)의 동적증폭계수가 13.10%, 진동가속도는 45.47%, 단부회전각은 16.50% 감소하였으며, 콘크리트궤도를 적용한 Model-③의 경우에 동적증폭계수는 19.24%, 진동가속도는 47.89%, 단부회전각은 31.44% 감소하였다. 현행 설계 시 적용하는 Model-①(궤도강성 미고려)의 경우 궤도구조를 적용한 모델에 비해 변위 및 가속도가 크게 발생하였고, 고유진동수가 낮게 평가되어 동일한 차량에 대해 임계속도 및 부임계속도 대역이 낮은 것으로 분석되었다. 특히, 부임계속도 대역인 130~140km/h, 170~180km/h에서는 궤도강성을 고려함에 따라 공진에 의한 발생 응답이 감소하고 실제 교량의 응답과 근사한 응답치를 얻을 수 있는 것으로 분석되었다.

3.3 궤도지지강성 변화에 따른 철도교량의 동적응답 분석

궤도지지강성이 교량의 동적응답에 미치는 영향을 파악하고자 실제 교량의 응답과 유사한 Model-②(자갈도상궤도)의 무궁화호 180km/h에 대해 자갈도상궤도의 강성을 200kN/mm로 적용한 후 레일패드 강성을 20~100kN/mm까지 10kN/mm씩 증가시켰으며, 100~1,000kN/mm까지 100kN/mm씩 증가시켜가며 해석을 수행하였다. 또한, 레일패드의 강성을 고정한 후 자갈도상궤도의 강성을 200~1,000kN/mm까지 100kN/mm씩 증가시켜가며 해석을 수행하였다. 검토항목으로는 교량 중앙부 변위 및 진동가속도와 궤도(레일 및 침목) 변위 및 진동가속도에 대해 검토하였으며, 검토결과는 그림 11, 12와 같다.

자갈도상의 궤도지지강성 증가에 따른 교량 중앙부 및 궤도(레일 및 침목)의 최대 변위 및 진동가속도는 다소 감소하는 경향이 나타났으나 그 크기가 매우 미소하였으며, 궤도지지강성이 400kN/mm이상에서는 교량 중앙부 변위 및 가속도가 수렴되는 것으로 분석되었다. 또한, 레일패드의 강성을 10~100kN/mm까지 증가시킨 경우 교량 중앙부 변위 및 진동가속도의 크기가 미소하게 감소하고, 200kN/mm이상에서 수렴되는 것으로 분석되었다.

따라서 공진 시 자갈도상궤도의 궤도지지강성에 따른 궤도/교량의 동적응답 변화는 매우 미소한 것으로 판단된다.

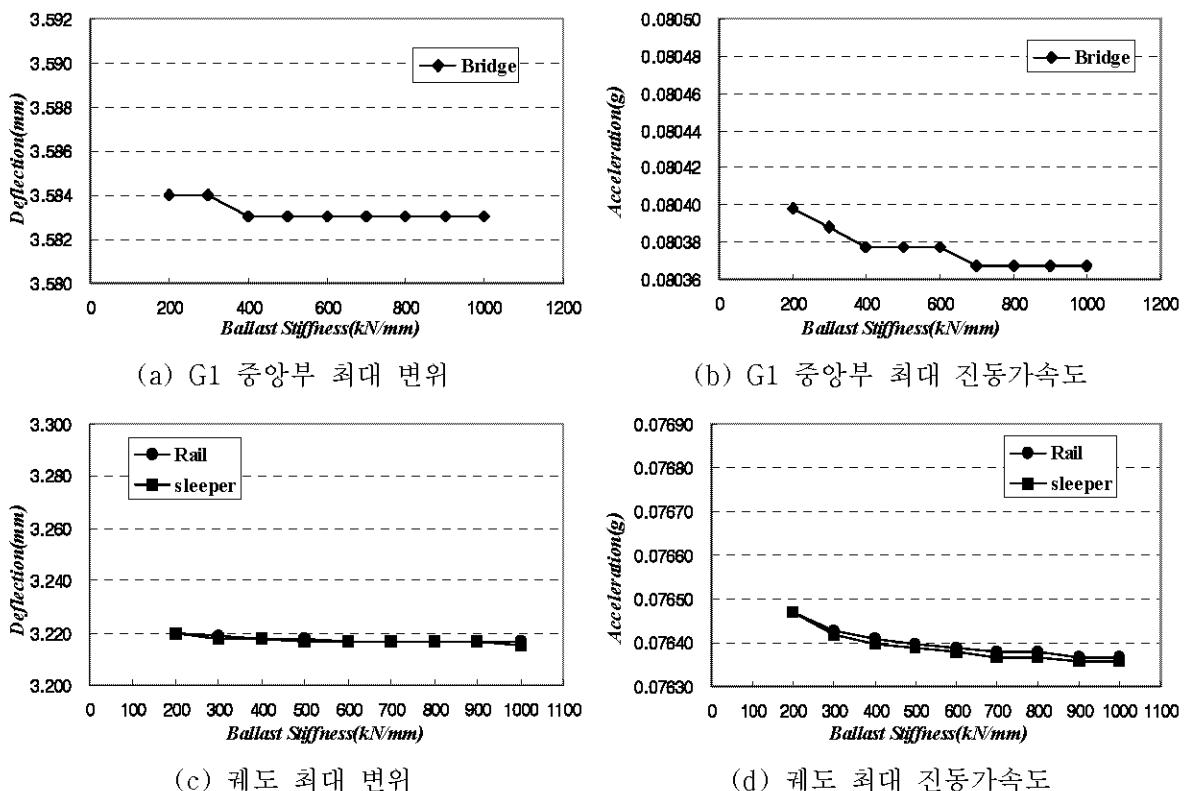
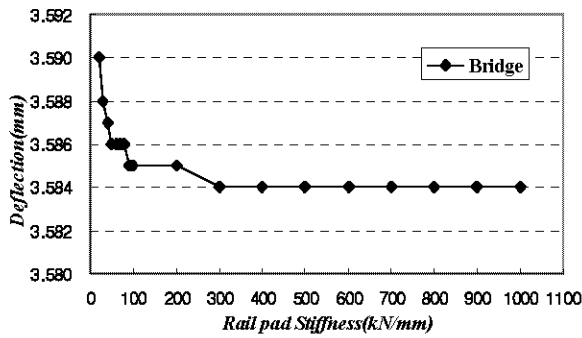
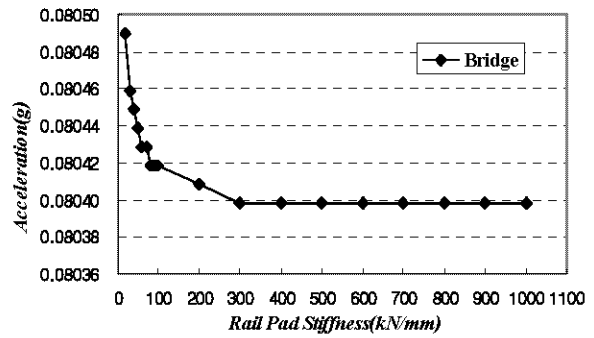


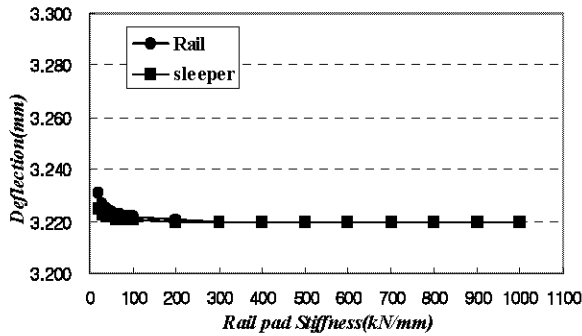
그림 11. 자갈도상 강성변화에 따른 교량/궤도의 동적응답



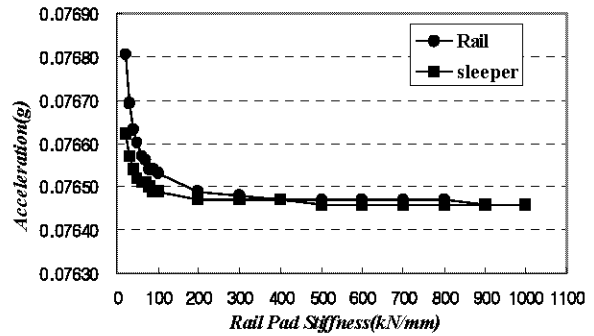
(a) G1 중앙부 최대 변위



(b) G1 중앙부 최대 진동가속도



(c) 궤도 최대 변위



(d) 궤도 최대 진동가속도

그림 12. 레일패드 강성변화에 따른 교량/궤도의 동적응답

4. 결 론

궤도구조를 고려한 철도교량의 동해석 모델은 실제 철도교량의 고유진동수 및 동적응답에 근사한 값을 얻을 수 있으나 자갈도상궤도가 부설된 철도교량의 경우 자갈도상의 노후화에 따른 강성변화, 궤도를 램 및 차륜플랫에 의한 충격 발생 등을 고려한다면 현재 시행하고 있는 안전측 설계방법이 합리적이라 판단된다. 하지만 실제 응답과 가까운 해석을 요구하는 동적안정성 검토 시에는 궤도강성을 고려한 동해석 모델을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국철도시설공단(2004), “철도설계기준(철도교편)”
2. 한국철도시설공단(2008), “철도교량 동적안정성 및 동적설계기준에 관한 연구”
3. 고속전철 구조물 안전성 기술 개발(2단계1차년도 연차보고서), 한국건설기술연구원, 2000
4. 김성일, 고속철도교량의 교량-열차 상호작용해석, 박사학위논문, 서울대학교, 2000.2
5. 김성일, 정원석, 최은수 (2005), “공진소멸 현상을 이용한 기존선 철도교량의 지간최적화를 위한 연구”, 한국철도학회 논문집, 제8권, 제2호, pp128-136
6. 성덕룡, 박용결, 김성일, 이준호(2008), “콘크리트슬래브궤도 체결장치의 패드강성에 따른 궤도/거동 분석”, 한국철도학회 2008 춘계학술대회 논문집
7. 김성일, 유진영, 문제우, 홍성모, 김종태(2008), “철도교량 동특성 분석을 위한 궤도형식별 모달 테스트”, 한국철도학회 2008 춘계학술대회 논문집
8. ERRI D 214 RP9(1999), "Rail Bridges For Speeds $v > 200 \text{ km/h}$ ", European Rail Research Institute
9. EUROCODE 1 Part 2, "Actions on Structures : General actions - Traffic loads on bridges", European Committee for Standardization
10. 일본 국토교통성철도국 (2004), “궤도구조물등설계기준/동해설 - 콘크리트구조물”.
11. 일본 국토교통성철도국 (2006), “궤도구조물등설계기준/동해설 - 변위제한”.