PSC-I 거더 철도교량의 3차원 동적 이동하중 해석 모델

Three Dimensional Model for Dynamic Moving Load
Analysis of a PSC-I Girder Railway Bridge

조정래 · 김동석* · 김영진 · 곽종원 · 장승엽

Jeong-Rae Cho · Dong-Seok Kim · Young Jin Kim · Jong-Won Kwark · Seung Yup Jang

Abstract In this paper we evaluated dynamic stability, considering the effects of modeling and analysis methods on moving load analysis, for which a sophisticated 3 dimensional model of a PSC-I type girder bridge was used. For this purpose, we suggested a reasonable modeling method and the physical properties of the concrete and ballasted track system involved. We also analyzed the response characteristics according to: 1) the type of track system; 2) whether or not the track was modeled; 3) whether or not the distance between the girder center and the bearing were considered; 4) the analysis method (i.e., direct integral and modal analysis); 5) whether or not the frequency was filtered.

Keywords : PSC-I girder bridge, moving load analysis, track system, dynamic stability

초 록 본 연구에서는 PSC-I 거더 교량을 대상으로, 3차원 교량 모델로 이동하중해석에 의한 엄밀한 동적 안정성 해석을 수행할 때의 모델링 방법과 해석방법에 대한 영향 평가를 수행하였다. 이를 위해 콘크리트 및 자갈 궤도 등을 채용할 때의 합리적인 모델링 방법론과 물성치를 제시하였다. 또한, 궤도 모델링 유무, 궤도 종류, 거더 중심에서 받침까지의 거리 고려 여부, 직접적분법과 모달해석법 등 이동하중해석법, 필터링 등이 응답에 미치는 영향을 분석하였다.

주요어 : PSC-I 거더교, 이동하중해석, 궤도시스템, 동적 안정성

1. 서 론

최근 200km/h~300km/h 수준의 고속화 철도에 대한 수요가 증가하면서 경제적인 PSC-I 거더교 형식의 철도교 건설이 활발히 추진되고 있다. PSC-I 거더교는 고속철도 교량에서 주로 사용된 PSC 박스 거더교에 비해 경제성이 우수하지만 동적 응답 특성이 좋지 못한 것으로 인식되어 왔다. 그 이유는 PSC-I 거더교가 상대적으로 비틀림 강성이 낮고, 동일한 주 횡모드의 고유진동수를 가진다 하더라도 중량이 작기 때문에 응답값이 클 수 있기 때문이다. 따라서 PSC-I 거더교를 고속화 철도에 적용하기 위해서는 엄밀한 동적 안정성 해석과 이를 이용한 거동평가가 필요하다.

PSC-I 거더 교량의 엄밀한 동적 안정성 해석을 위해서는 교량 횡방향에 따른 응답변화를 합리적으로 고려할 수 있는 3차원 모델이 필요하다. 일반적으로 PSC-I 거더 교량의 3차원 동해석 모델은 거더는 보요소로, 바닥판은 쉘요소로 모델링하는 방식이 적용되고 있으며, 모달해석법을 이용한 이동하중해석이 이루어지고 있다. 궤도는 별도의 모델링 없이 질량만을 교량 바닥판에 추가하는 방식으로 고려되고 있다.

한편 거더를 보로 모델링하기 때문에 필요한 교량 양단에서 거더 중심과 받침까지의 거리 고려는 해석자에 따라 임의로 선택되고 있다. 본 연구에서는 PSC-I 거더 교량을 대상으로, 3차원 교량 모델로 이동하중해석에 의한 엄밀한 동적 안정성 해석을 수행할 때의 모델링 방법과 해석 방법에 대한 영향 평가를 수행하였다. 콘크리트 및 자갈궤도 등을 채용할 때의 합리적인 모델링 방법론과 물성치를 제시하였다. 그리고 궤도 모델링 유무, 궤도 종류, 거더 중심에서 받침까지의 거리 고려 여부, 직접적분법과 모달해석법 등 이동하중해석법, 필터링 등이 응답에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 3차원 동해석 모델

2.1 해석 개요

해석 대상 교량은 Fig. 1에서와 같이 5주형의 PSC-I 복선 철도교[1]로서 경간장 30m, 35m에 대해 해석을 수행하였다. 이때 경간장에 따른 형고는 각각 2.2m와 2.6m이다. 궤도 종류는 자갈궤도와 콘크리트궤도를 고려하였다.

PSC-I 거더 교량의 엄밀한 동적 안정성 해석을 위해서는 교량 횡방향에 따른 응답변화를 합리적으로 고려할 수 있는 3차원 모델이 필요하다. 이 연구에서는 경간장, 궤도 종류, 거더 중심과 받침까지의 연단거리 고려 유무, 궤도 모델링 방법 등에 따른 차이를 분석하고자 Table 1과 같이 모델링

*Corresponding author.

Tel.: +82-2-571-5977, E-mail: kds430@ict99.com

©The Korean Society for Railway 2013

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2013.16.4.286>

Fig. 1 Plan and side views of double-track railway bridge with five girders

방법에 따라 여러 가지 해석모델을 정의하였다. 표의 해석 유형에서 I뒤의 숫자는 경간 길이를, 숫자 뒤의 B와 C는 궤도 종류를 나타낸 것으로 각각 자갈궤도(Ballasted track)와 콘크리트궤도(Concrete track)를 의미한다. GB와 BB는 거더 중심과 받침 사이의 연단거리의 고려 여부를 나타낸다. Fig. 2에 나타낸 것처럼 GB는 거더의 중심선을 따라 보로 모델링된 거더의 끝단 절점에 경계조건을 직접 부과한 것이고, BB는 거더 끝단과 받침을 강체보(rigid beam)로 연결하고 받침 절점에 경계조건을 부과한 모델을 의미한다. C와 T는 궤도의 모델링 여부를 나타낸다. C는 궤도를 별도로 모델링하

지 않고 궤도의 질량만을 바닥판의 질량에 추가한 모델을 의미하며, T는 궤도를 2장에서 설명한 방식으로 모델링한 엄밀한 해석 모델이다. E00, E050, E100은 각각 레일을 교량 바깥까지 연장한 길이를 의미한다. E00은 레일 연장길이가 없으며, E050과 E100은 교량 길이의 0.5L, L씩 교량 양방향으로 연장한 것이다. Fig. 2에 자갈궤도를 대상으로 해석 모델의 차이를 도시하였으며, 콘크리트궤도 역시 동일한 방식을 적용하였다. 자갈궤도 및 콘크리트궤도를 포함한 모델링 상세는 2.3절에 제시하였다.

Table 1 Analysis model cases

Model case	Span(m)	Track type	Rigid offset	Track modeling	Rail extension out of span
I30B-GB-C	30	Ballasted	X	Only track mass is included	
I30B-BB-C	30	Ballasted	O	Only track mass is included	-
I30B-BB-T-E000	30	Ballasted	O	Track is fully modeled	0% of span length
I30B-BB-T-E050	30	Ballasted	O	Track is fully modeled	50% of span length
I30B-BB-T-E100	30	Ballasted	O	Track is fully modeled	100% of span length
I30C-GB-C	30	Concrete	X	Only track mass is included	-
I30C-BB-C	30	Concrete	O	Only track mass is included	-
I30C-BB-T-E000	30	Concrete	O	Track is fully modeled	0% of span length
I30C-BB-T-E050	30	Concrete	O	Track is fully modeled	50% of span length
I30C-BB-T-E100	30	Concrete	O	Track is fully modeled	100% of span length
I35B-GB-C	35	Ballasted	X	Only track mass is included	-
I35B-BB-C	35	Ballasted	O	Only track mass is included	-
I35B-BB-T-E000	35	Ballasted	O	Track is fully modeled	0% of span length
I35B-BB-T-E050	35	Ballasted	O	Track is fully modeled	50% of span length
I35B-BB-T-E100	35	Ballasted	O	Track is fully modeled	100% of span length
I35C-GB-C	35	Concrete	X	Only track mass is included	-
I35C-BB-C	35	Concrete	O	Only track mass is included	-
I35C-BB-T-E000	35	Concrete	O	Track is fully modeled	0% of span length
I35C-BB-T-E050	35	Concrete	O	Track is fully modeled	50% of span length
I35C-BB-T-E100	35	Concrete	O	Track is fully modeled	100% of span length

Fig. 2 Analysis model cases

2.2 적용 프로그램

본 연구의 해석에 적용된 프로그램은 한국건설기술연구원
에서 2008년부터 개발 중인 인하우스(in-house) 프로그램인

HFC와 hfAnalyzer이다. HFC는 연구자가 자신의 재료모델, 해석기법 등을 이식하여 사용할 수 있도록 객체지향프로그래밍(object-oriented programming) 기법으로 설계된 일종의 라

이브러리이며, hfAnalyzer는 HFC를 이용해 작성된 프로그램이다. HFC와 hfAnalyzer에는 2절점 보요소, 4절점 MITC 쉘요소, 각종 연속체요소 및 스프링요소가 구비되어 있으며, 일부 비선형 재료모델을 포함한 다양한 재료 모델이 구현되어 있다. 또한 정해석, 동해석, 고유치해석 등을 포함한 다양한 해석 기능이 구현되어 있다. 프로그램 기능과 정식화 과정, 검증 등은 조정래[2], 한국건설기술연구원의 연구보고서[3-7] 등에 제시되어 있다.

본 연구에서는 상기 프로그램에서 2절점 보요소, 4절점 MITC 쉘요소, 스프링요소 등이 요소로 해석모델을 구성하고 고유치해석 기능, 이동하중해석 기능 등을 통해 해석을 수행하여 그 결과를 정리한 것이다. 상기 프로그램은 고속 철도교량의 해석적 동적 이동하중해석에 다수 적용되었으며, 실험 결과 등과 비교된 바 있다[8-11].

2.3 해석 모델 상세

해석 모델은 거더교량의 특징을 반영할 수 있도록 Table 2와 같이 보요소, 쉘요소, 솔리드, 스프링 요소 등의 유한요소와 적절한 구속조건을 적용하여 구성하였다. Fig. 3과 Fig.

4는 각각 콘크리트케도와 자갈케도를 도입한 교량에 대한 해석모델을 나타낸 것이다. 제시한 해석모델은 케도를 모델링하고 교량 외부까지 레일을 연장하였으며, 거더 중심과 받침과의 연단거리를 고려한 해석모델로 본 연구에서 비교 분석된 모델 중 가장 엄밀한 모델인 BB-T-E050 또는 BB-T-E100에 해당한다. GB-C, BB-C, T-E00 모델은 그림에서 제시된 모델에서 관련된 부분이 삭제된 해석모델이다.

콘크리트케도로는 RHEDA2000을 가정하였다. 이 케도시스템은 PCL 층을 타설한 뒤 침목을 배치한 후 TCL 층을 타설하는 구조로 되어 있다. PCL 층은 질량으로만 고려하였으며, TCL 층은 평균높이 360mm를 적용하여 하중분배가 가능하도록 3층 구조의 Solid 요소로 모델링하였다. TCL 블록은 종방향으로 서로 분리되도록 모델링하였다. TCL 블록 하면의 절점과 바닥판의 절점은 절점-곡면 연결(Node-To-Surface constraint)로 연직방향(Z)으로 구속되도록 처리하였다. 또한 전단키의 위치에서 평면 내의 두 방향(X, Y)에 대해 바닥판의 절점과 구속되도록 처리하였다. 사용된 TCL 블록의 치수는 $L \times 2800\text{mm} \times 360\text{mm}$ 이고, 종방향 길이 L은 경간장을 고려하여 설정하였다. 콘크리트 케도에서 TCL 층에 침목이 포함되므로 침목 자체를 별도로 모델링에 고려하지

Table 2 Details of bridge model

Part	Member	Element/Constraint	Remark
Bridge	Girder	2-node beam	
	Crossbeam	2-node beam	
	Slab	4-node MITC shell	Included the mass of PCL in case of concrete track
	Connection between girder/crossbeam and slab	Node-to-node beam-type constraint	
	Connection between girder and bearing	Node-to-node beam-type constraint	
	guardrail	Only mass is included	
Concrete track	PCL	Only mass is included	
	TCL	8-node solid element	Three layers of solid element are used. Total height is assumed as 360mm.
	Connection between nodes on lower surface of TCL and slab	Node-to-surface constraint	
	Rail	2-node beam	
	Sleeper	Neglected	Included into TCL. 0.65m spacing
	Spring connection between rail and sleeper	2-node spring	
	Connection between sleeper and the upper surface of TCL	Node-to-Surface constraint	
	Spring connection between rail and sleeper (outer bridge)	1-node spring(earth spring)	
Ballasted track	Ballast	2-node/1-node spring	
	Sleeper	2-node beam	0.6m spacing
	Rail	2-node beam	
	Connection between ballast spring and slab	Node-to-surface constraint

Fig. 3 Details of bridge model with concrete track

않았다. 레일은 2절점 보요소로 모델링하였으며, TCL 상면에 650mm 간격의 침목 절점을 생성하여 TCL 상면과 Node-To-Surface 구속조건으로 연결하고 침목 절점과 레일 사이에는 레일패드와 체결장치의 영향을 고려하여 2절점 스프링 요소를 사용하였다. 레일의 연속성을 고려하여 교량 외부 토공부분에서 교량 길이만큼의 레일을 추가로 모델링하였으며, 지반스프링 형태의 케도스프링을 적용하였다.

자갈케도는 자갈층의 질량을 고려하여 자갈층 내부에 절점을 두고 그 절점에 질량을 부과하는 2층 또는 3층 모델을 사용하는 것이 일반적이다[13]. 하지만 교량을 3차원으로 모델링할 경우 이러한 접근법은 모델링이 너무 복잡한 단점이 있다. 본 연구에서는 자갈도상을 1개의 2절점 스프링으로 모델링하였다. 침목과 레일은 보요소로 모델링하였으며, 레일과 침목간의 스프링을 별도로 부과하지 않고 절점을 공유하는 방식을 사용하였다. 그 이유는 침목 아래의 자갈도상의 강성이 상대적으로 작기 때문이다. 콘크리트 케도와 마찬가지로 교량 외부 토공부분에서 교량 길이만큼의 레일을 추가로 모델링하였으며 지반스프링 형태의 케도스프링을 부과하였다. 교량 구간내의 케도스프링 하면의 절점과 바닥판은 Node-To-Surface 구속조건으로 연결하였다. 침목은 600mm 간격으로 배치되는 것을 가정하였다.

Table 3과 Table 4는 자갈케도 및 콘크리트케도를 모델링하는 데 적용된 케도스프링의 강성과 감쇠계수를 정리한 것이다. 본 연구에서는 선형계로 한정하였으며 케도스프링의 비선형성을 고려하지 않았다. 이 물성치는 논문 및 실험 결과값에 근거하여 산정한 것으로 1개 레일에 대해서 교량 종방향의 스프링 배치간격(자갈케도 0.6m, 콘크리트케도 0.65m)을 고려한 값이다. 예를 들어 교량 종방향 강성은 UIC 774-3[15]의 열차하중이 있는 경우를 가정하여 다음과 같이 계산된 값이다.

자갈케도: $60\text{kN}/2.0\text{mm}/\text{m}/\text{track} \times 0.6\text{m spacings}/2 \text{ rails}/\text{track} = 9.0\text{kN}/\text{mm}$

콘크리트케도: $60\text{kN}/0.5\text{mm}/\text{m}/\text{track} \times 0.65\text{m spacings}/2 \text{ rails}/\text{track} = 39.0\text{kN}/\text{mm}$

침목이 별도로 모델링된 자갈케도의 교량 내 구간에서는 제시된 물성치로부터 교량 횡방향으로 전체 침목 길이에서 케도스프링이 분담하는 길이의 비를 곱하여 케도스프링의 물성치로 적용하였다. 한편, 레일은 UIC 60을 적용하였으며, 자갈케도용 PC 침목은 길이 2.4m의 국철연속식 89년형을 적용하였다[16,17].

Fig. 4 Details of bridge model with ballasted track

Table 3 Stiffness of track system in proposed model

Track type	Rail grade	Roadbed	Track stiffness per one rail(kN/mm)			Remark
			Vertical ^a	Longitudinal ^b	Transverse ^c	
Ballasted track	General railroad	Bridge/Tunnel	95.8	9.0 ^b	10.0	PANDROL e-Clip Spec. General: 5mm EVA pad High speed: 10mm rubber pad
		Earthwork	41.8	9.0	10.0	
	High speed railroad	Bridge/Tunnel	50.7	9.0	10.0	
		Earthwork	33.1	9.0	10.0	
Concrete track	General/High speed railroad	Bridge/Tunnel/Earthwork	61.1	39.0 ^b	10.0	PANDROL SFC Spec.

^aThe the 3-layer model of Zhai et al. [13] is applied for ballasted track, while the experimental data obtained by test method in the Specifications for Performance Test of Rail Fastening[14] is applied for concrete track.

^bThe initial slopes of loaded case in the UIC 774-3[15] are used

^cField measured data(transverse pressure/displacement)

Table 4 Damping coefficient of track system in proposed model

Track type	Rail grade	Roadbed	Track damping coefficient per one rail (kN-s/m)			Mass (ton)
			Vertical ^a	Longitudinal ^b	Transverse ^c	
Ballasted track	General Railroad	Bridge/Tunnel	99.36	30.45	32.10	0.161
		Earthwork	65.59	30.45	32.10	0.161
	High speed Railroad	Bridge/Tunnel	77.93	32.82	34.59	0.187
		Earthwork	62.92	32.82	34.59	0.187
Concrete track	General/High speed Railroad	Bridge/Tunnel/Earthwork	19.53	15.60	7.90	0.039

*The masses of rail and sleeper are considered for ballasted track, while only mass of rail is considered for concrete track

**The damping ratios are assumed as 40% for ballasted track [13] and 20% for concrete track [16], respectively.

3. 해석모델에 따른 고유진동수 해석

Table 5와 Table 6은 30m, 35m 교량의 궤도 종류, 거더 중심과 받침까지의 연단거리 고려 여부, 궤도 모델링 방법 등에 따른 고유진동수 해석 결과를 나열한 것이다. 모든 해석모델에서 1차와 4차 모드가 휨 모드로 나타났고, 2차와 3차 모드가 비틀림 모드로 나타났다. Fig. 5와 Fig. 6은 자갈 궤도와 콘크리트궤도일 때의 모드형상을 나타낸 것이다. 일반적으로 1형 거더의 경우 비틀림 강성이 작아 박스 거더 등에서 고차 모드에 나타나는 비틀림 모드가 저차 모드에서 나타난다. 이 연구에서도 2, 3차 모드에서 비틀림 모드가 나타나는 것으로 보아 이러한 현상을 확인할 수 있다. 특히 비틀림 모드인 2차 모드가 1차 휨 모드에 인접하여 바로 나타나는 것을 볼 수 있다.

GB-C와 BB-C 결과를 비교해 보면 BB-C가 GB-C에 비해 1차 고유진동수는 조금 감소하나 2차 모드의 진동수가 상대적으로 크게 증가함을 알 수 있다. 즉, 거더 중심과 교량 받침 사이의 연단거리를 고려하는 경우 첫 번째 비틀림 모드의 진동수를 증가시킴으로써 해서 인접해 있던 1, 2차 모드를

떨어뜨려 놓는 효과를 발휘하게 된다. 그 이유는 거더중심과 받침을 강체 연결함으로써 비틀림 강성이 상대적으로 크게 증가되기 때문이다. 따라서 거더 교량의 경우, 특히 비틀림 모드의 영향이 클 수 있는 복선 교량의 경우에는 보다 타당한 결과를 도출하기 위해 받침과 거더 중심선을 강체 연결하는 모델을 사용할 필요가 있다.

궤도를 모델링하는 경우(BB-T-E000, BB-T-E050, BB-T-E100)가 궤도를 모델링하지 않고 질량만 고려한 경우(BB-C)보다 고유진동수가 높게 계산되었다. 그 이유는 궤도의 강성이 고려되면서 교량 전체의 강성이 증가하기 때문이다. 교량 외부로 연장한 교량 길이에 따라 강성 증가로 인한 고유진동수가 점차 높게 계산되나 교량 외부로 50%로 연장한 모델(BB-T-E050)과 100% 연장한 모델(BB-T-E100)은 큰 차이가 없다. 즉 일정길이 이상 레일을 연장하는 경우 강성 증가 효과가 거의 없으며 어떤 값에 접근함을 의미한다. 특히 콘크리트 궤도의 경우 종방향 궤도스프링 상수가 크기 때문에 강성 기여의 효과가 자갈궤도에 비해 더 크게 나타났다. 이 때문에 콘크리트궤도 모델 중 BB-T-E000에서 BB-T-E100로 모델링이 바뀔 때 진동수의 증가 폭이 크게 나타났다.

Table 5 Natural frequencies of 30 m span bridge

Model Cases	1 st mode	2 nd mode	3 rd mode	4 th mode
I30B-GB-C	4.54045	5.03514	12.5628	16.3850
I30B-BB-C	4.42001	5.71187	11.1873	15.5441
I30B-BB-T-E000	4.42215	6.14889	11.274	15.5139
I30B-BB-T-E050	4.53643	6.15651	11.2871	15.7360
I30B-BB-T-E100	4.54010	6.15676	11.2871	15.7404
I30C-GB-C	4.42988	5.00108	12.2808	16.2891
I30C-BB-C	4.31272	5.66269	10.9590	15.1907
I30C-BB-T-E000	4.51705	5.9057	10.9223	15.6296
I30C-BB-T-E050	4.79210	5.94317	10.9314	16.1714
I30C-BB-T-E100	4.79257	5.94324	10.9318	16.1724

Table 6 Natural frequencies of 35 m span bridge

Model Cases	1 st mode	2 nd mode	3 rd mode	4 th mode
I35B-GB-C	3.90929	4.23619	10.9265	13.6475
I35B-BB-C	3.80530	4.71995	9.97161	13.3259
I35B-BB-T-E000	3.81057	5.14539	10.1122	13.3067
I35B-BB-T-E050	3.92157	5.15370	10.1197	13.5295
I35B-BB-T-E100	3.92469	5.15395	10.1198	13.5363
I35C-GB-C	3.81800	4.20695	10.6951	13.5499
I35C-BB-C	3.71678	4.67771	9.78576	13.0287
I35C-BB-T-E000	3.87721	4.86574	9.76008	13.3856
I35C-BB-T-E050	4.13847	4.90451	9.76618	13.9380
I35C-BB-T-E100	4.13868	4.90454	9.76618	13.9385

Fig. 5 Mode shapes of bridge with ballasted track

Fig. 6 Mode shapes of bridge with concrete track

4. 궤도 고려 유무와 해석법에 따른 이동하중해석

본 절에서는 궤도의 고려 유무와 직접적분법과 모달해석법 등 해석법에 따라 동적 이동하중해석을 수행하여 그 영향을 분석하였다. 본 연구에서 직접적분법은 구성된 전체 질량 및 강성행렬을 사용해 수치적분을 적용하는 것을 의미한다. 해석은 Fig. 7의 KTX 열차 하중을 10km/hr 단위로

420km/hr까지 증가시키며 해석하였다. 지간장 30m는 KTX의 공진소멸 지간장인 28.05m(KTX의 축간격 18.7m의 1.5배)에 근접하여 공진이 발생하더라도 응답이 증폭되지 않는다. 따라서 본 절에서는 공진시 불리한 거동을 보이는 35m 교량에 대해서만 해석법에 따른 차이점을 분석하기로 한다.

직접적분법의 경우 레일리감쇠, 모달해석에서는 모달감쇠를 각각 적용하였으며 사용된 감쇠비는 1%이다. 철도설계기준[18]에서는 이동하중이 한 요소를 3회 이상 타격하게 하

Fig. 7 KTX train

Table 7 Results for PSC-I girder bridge according to modeling and analysis methods

	Ballasted track				Concrete track			
	I35B-BB-E100		I35B-BB-C		I35C-BB-E100		I35C-BB-C	
	Direct integral	Modal analysis	Direct integral	Modal analysis	Direct integral	Modal analysis	Direct integral	Modal analysis
1st natural freq. [Hz]	3.92469		3.8053		4.13868		3.71678	
Resonance speed[km/h]	264.2		256.2		278.6		250.2	
Maximum vertical acc.[m/sec ²]	2.7174	2.7177	3.071*	2.998	2.773	2.7572	2.938*	2.8382
Maximum vertical def.[mm]	7.111	7.212	8.171	8.271	6.502	6.660	8.173	8.271
Maximum deck twist [mm/3m]	0.140	0.138	-	-	0.208	0.207	-	-

*30Hz low-pass filtering applied

Table 8 Ratios of analysis results to BB-E100-Direct model

	Ballasted track				Concrete track			
	I35B-BB-E100		I35B-BB-C		I35C-BB-E100		I35C-BB-C	
	Direct integral	Modal analysis	Direct integral	Modal analysis	Direct integral	Modal analysis	Direct integral	Modal analysis
Ratio of resonance speed to BB-E100-Direct	1		0.970		1		0.898	
Ratio of max. vertical acc. to BB-E100-Direct	1	1.000	1.130*	1.103	1	0.994	1.060*	1.024
Ratio of max. vertical def. to BB-E100-Direct	1	1.014	1.149	1.156	1	1.024	1.257	1.272

*30Hz low-pass filtering applied

고, 최소 5개의 모드이상 표현할 수 있도록 제한하고 있다. UIC 776-2[19]에서는 30Hz, $1.5f_1$, f_3 (여기에서 f_1 , f_3 는 첫 번째 및 세 번째 고유진동수) 중 큰 진동수 대역을 가지도록 제한하고 있다. 이에 따라 모드해석에서는 5개의 모드를 적용하였고 해석간격은 다음과 같다.

$$\Delta t = \min\left(\frac{l_2}{3v}, \frac{1}{2f_{\max}}\right), f_{\max} = \max(30\text{Hz}, 1.5f_1, f_3) \quad (1)$$

한편 UIC CODE[19]에서는 실험과 해석에서 식(1)에 제시한 $f_{\max}$ 로 필터링을 수행하도록 하고 있다. 보통 $f_{\max}$ 는 30Hz이다.

Table 7은 궤도 고려 유무와 해석법에 따른 결과를 요약

하여 나타낸 것이다. 선택된 해석모델은 궤도를 고려하고 교량 외부까지 레일을 교량길이의 100% 연장한 모델(BB-T-E100)과 궤도의 질량만을 고려한 모델(BB-C)이다. 고유진동수는 3장에서 계산된 값이고, 공진속도는 $v = f_1 \cdot d$ (여기에서 $d=18.7\text{m}$)로 계산된 값이다. 연직가속도, 연직처짐, 면틀림 등은 직접적분 또는 모달해석 등의 해석법에 따라 수행된 이동하중해석 결과 중 속도별 가장 큰 응답을 의미한다. 해석 대상 교량인 35m 교량은 공진시 응답이 지배적으로 모든 경우에 있어 공진시 응답값이다. 연직가속도와 연직처짐은 경간 중앙에서, 교량 연직방향으로 바닥판의 가장 큰 응답을 제시한 것이고, 면틀림을 철도설계기준[18]에서 제시한 것과 같이 교축방향 3m간격으로 1.5m폭의 레일 위치에서 최

대 응답값이다. 표에서 궤도모델의 채용여부에 따라 고유진동수 차이로 인해 공진속도가 차이 나지만 설계를 지배하는 인자인 연직가속도는 거의 비슷함을 알 수 있다. 그 이유는 공진시 연직가속도가 교량의 질량에 지배 받기 때문이다[8]. 다시 말하면 궤도 모델을 채용하지 않더라도 궤도의 질량을 적절하게 고려할 경우 연직가속도 응답은 궤도 모델을 채용한 경우와 큰 오차를 보이지 않는다. 반면에 연직처짐과 면틀림은 궤도 모델링 유무에 따라 차이를 나타낸다. 정량적인 비교는 Table 8에 도시하였다. 특히 콘크리트 궤도를 채용한 경우 그 차이가 크며 궤도의 면틀림 또는 처짐이 지배적인 구조인 경우에는 궤도의 모델링이 필요하다. 마지막으로 직접적분법과 모달해석법 등 해석법에 따른 차이는 미미한 것을 확인할 수 있다. 하지만 궤도모델을 채용하지 않고 직접적분법을 수행하여 해석한 경우 열차하중이 가력된 위치에서 고진동수 응답의 기여분으로 인해 비정상적으로 높은 가속도 이력이 계산된다. Fig. 8과 Fig. 9는 콘크리트궤도에 대해 궤도 모델링 유무에 따른 직접적분법 해석 결과 중 속도별 최대가속도 응답을 UIC-776-2[19]에서 제시하는 필터링을 수행한 것과 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 궤도를 질량으로만 고려하고 직접적분법을

적용한 Fig. 8에서 열차하중이 가력되는 부분에서 고진동수 응답의 기여분으로 인해 비정상적으로 높은 가속도 이력이 관찰된다. 이러한 응답은 변위응답에서는 관찰되지 않으며 가속도응답에서만 관찰되는 현상으로 필터링을 수행하면 사라지게 된다. 반면에 Fig. 9에서 알 수 있듯이 궤도를 고려한 엄밀한 모델에서는 궤도 모델로 인해 충분히 하중이 분산되기 때문에 비정상적인 가속도 응답의 증폭은 발생하지 않았다. 한편 모달해석에서는 기본적으로 낮은 차수의 모드(여기에서는 5개 모드)만을 대상으로 하기 때문에 이러한 현상이 없다.

정리하면 궤도의 질량을 적절히 고려하는 경우 궤도모델 유무에 따라 고유진동수 차이로 인해 공진속도는 변경될 수 있지만 공진시 가속도 응답에는 큰 차이가 없다. 반면에 처짐 및 면틀림은 어느 정도 차이가 있을 수 있다. 따라서 이동하중해석을 통해 동적 안정성을 평가할 때 처짐 및 면틀림이 설계기준에서 제시하는 허용치와 비교할 때 큰 마진이 없을 경우 궤도를 채용한 모델링이 필요할 것으로 판단된다. 한편 직접적분법 및 모달해석 등 해석법에 따른 차이는 무시할 수 있으나 궤도를 질량만으로 모델링한 후 교량 상판에 직접 차량 하중을 타격하여(다시말하면 궤도를 모델링하

Fig. 8 Model I35C-BB-C -direct integral method

Fig. 9 Model I35C-BB-T-E100 -direct integral method

지 않고) 직접적분법으로 해석하는 경우 UIC-776-2[19]에서 제시하는 필터링을 반드시 수행해야 올바른 해석결과를 얻을 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 30m, 35m경간장의 PSC-I형 거더 교량을 대상으로, 3차원 교량 모델로 이동하중해석에 의한 엄밀한 동적 안정성 해석을 수행할 때의 모델링 방법과 해석 방법에 대한 영향평가를 수행하였다. 콘크리트 및 자갈케도 등을 채용할 때의 합리적인 모델링 방법론과 물성치를 제시하였다. 케도 모델링 유무, 케도 종류, 거더 중심에서 받침까지의 거리 고려 여부, 직접적분법과 모달해석법 등 이동하중해석법, 필터링 등이 응답에 미치는 영향을 고찰하였고 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1. 거더 중심점-받침간 거리를 고려할 경우 교량의 1차 휨 모드에 대한 영향은 미미하나, 1차 비틀림 모드에 대한 진동수를 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 타당한 결과를 도출하기 위해 받침과 거더 중심선을 강제 연결하는 모델을 사용할 필요가 있다.

2. 케도 모델링을 통해 케도의 강성을 추가로 고려한 경우 케도 질량만을 고려한 경우에 비해 1차 휨모드의 진동수가 증가하는데 자갈케도보다 콘크리트케도일 때 그 변화의 폭이 더 크게 나타났다. 특히, 케도 모델링시 교량 외부까지 연속되는 레일을 고려할 경우 콘크리트 케도에서 1차 휨모드의 진동수 증가가 크게 나타났다. 즉, 콘크리트케도의 강성증가 효과가 자갈케도보다 더 크다고 할 수 있다.

3. 케도를 모델링하지 않고 케도 질량만을 고려한 해석모델에 직접적분법을 사용하여 이동하중해석을 수행할 경우 하중이 직접 가해지는 위치에서는 비정상적인 고진동수 성분을 갖는 가속도 응답이 나타났다. 이러한 현상은 고차모드를 필터링하거나 해석방법으로 모달해석을 적용하거나 케도를 모델링할 경우 사라지는 것으로 나타났다.

4. 같은 경간장일 때 콘크리트케도가 자갈케도에 비해 큰 고유진동수를 가지며, 연직 처짐은 작고, 연직 가속도와 면틀림은 큰 것으로 나타났다. 하지만 동적 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 연직 가속도는 큰 차이를 보이지 않는다.

이 연구에서는 케도 모델링에서 물성치를 매개변수로 하는 분석이 이루어지지 않았으며 종방향 케도스프링의 비선형성을 고려하지 않았다. 또한 교량 외부로 연장하는 교량 길이에 따른 강성 증가효과를 다양한 길이에 따라 정량적으로 분석하지 않았다. 이 부분에 대해서는 향후 연구를 통해 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(PSC 교량의 스마트 긴장력 관리 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] J.-R. Cho, Y.J. Kim, J.S. Park, J.H. Kim (2012) A study on dynamic stability of railway bridges using IPC girder, Korea Institute of Construction Technology, KICT 2012-013.
- [2] J.-R. Cho (2009) Object-oriented finite element framework using hybrid programming, *Ph.D Thesis*, Seoul National University.
- [3] B.-S. Kim, J.-W. Kwark, S.-Y. Park, C.-B. Joh, et al. (2008) System integration for hybrid cable stayed bridge, Korea Institute of Construction Technology, KICT 2008-106.
- [4] Y.J. Kim, B.-S. Kim, C.-B. Joh, J.-R. Cho, et al. (2009) System integration for hybrid cable stayed bridge, Korea Institute of Construction Technology, KICT 2009-102.
- [5] Y.J. Kim, B.-S. Kim, J.-R. Cho, W.J. Chin, et al. (2010) Development of Design and Construction System Technology for Hybrid Cable Stayed Bridge, Korea Institute of Construction Technology, KICT 2010-088.
- [6] Y.J. Kim, B.-S. Kim, J.S. Park, J.-R. Cho, et al. (2011) Development of design and construction system technology for hybrid cable stayed bridge, Korea Institute of Construction Technology, KICT 2011-076.
- [7] Y.J. Kim, B.-S. Kim, Y.H. Park, J.S. Park, et al. (2012) Development of design and construction system technology for hybrid cable stayed bridge, Korea Institute of Construction Technology, KICT 2012-075.
- [8] J.-R. Cho, K. Cho, J.-W. Kwark, Y.J. Kim (2012) Dynamic characteristics of simply supported single span bridges for KTX and HEMU using design diagram, *Journal of The Korean Society for Railway*, 15(5), pp. 498-507.
- [9] J.-R. Cho, Y.J. Kim, J.S. Park, Y.-H. Park (2012) Application of ARPACK eigensolver to large-scale finite element model, *Proceedings of Korea Concrete Institute Conference*, Fall, Mooju, 24(2), pp.573-574.
- [10] J.-R. Cho, Y.J. Kim, Y. Yang, J. Koo (2011) Dynamic analysis of new-type V-girder bridge, *Proceedings of The Korean Society for Railway Conference*, Fall, Jeju, pp. 1536-1541.
- [11] H. Yoon, W.-J. Chin, J.-R. Cho, C.-G. Hwang, J.-W. Kwark (2012) A comparative study on acceleration from measurement and dynamic analysis of high speed railway bridge, *Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference*, Fall, Wonju, pp.175-176.
- [12] J.-W. Kwark, H. Yoon, W.-J. Chin, J.-R. Cho, C.-G. Hwang (2012), A study on acceleration on high speed railway bridges considering load distribution effect, *Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference*, Fall, Wonju, pp.177-178.
- [13] W.M. Zhai, K.Y. Wang, J.H. Lin (2004) Modelling and experiment of railway ballast vibrations, *Journal of Sound and Vibration*, 270, pp. 673-683.
- [14] Korea Railway Network Authority (2002) Specifications for Performance Test of Rail Fastening.
- [15] UIC (2001) UIC CODE 774-3, Track-bridge interaction - Recommendations for calculations, 2nd edition.

- [16] S.Y. Jang, S.C. Yang (2012) Assessment of train running safety, ride comfort and track serviceability at transition between floating slab track and conventional concrete track, *Journal of the Korean Society for Railway*, 15(1), pp. 48-61 (in Korean).
- [17] S.B. Seo (2002) *Railway Track Engineering*, Revised edition, Eul & AI, Seoul, pp. 126-127.
- [18] H.S. Yoo, S.K. Hwang, D.H. Kim, et al. (2011) Design Criteria for Railroad : Road Bed, Korea Railway Network Authority, 11-B551219-000018-14.
- [19] UIC (2009) UIC CODE 776-2, Design requirements for rail-bridges on interaction phenomena between train-track and bridge, 2nd edition.

접수일(2012년 11월 5일), 수정일(2013년 2월 4일),
게재확정일(2013년 6월 24일)

Jeong-Rae Cho : chojr@kict.re.kr

Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyangdae-ro 283, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

Dong-Seok Kim : kds430@ict99.com

Technology Research Institute, Interconstech Co., Ltd., 6 floor, ICT Tower, 502-6, Sinsa-dong Gangnam-gu, Seoul 135-887, Korea

Young Jin Kim : yjkim@kict.re.kr

Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyangdae-ro 283, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

Jong-Won Kwark : origilon@kict.re.kr

Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyangdae-ro 283, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 411-712, Korea

Seung Yup Jang : syjang@krri.re.kr

High-Speed Railroad System Research Center, Korea Railroad Research Institute, Chuldo-bangmulgwan-ro 171, Uiwang-si, Gyeonggi-do 437-757, Korea