

복합파설거더 고속철도교량 적용을 위한 동적안정성 검토

임지훈¹ · 김철희² · 최동호^{3*}

¹박사과정, 한양대학교, 건설환경공학과, ²석사과정, 한양대학교, 건설환경공학과, ³교수, 한양대학교, 건설환경공학과

Evaluation of Dynamic Stability of Complex Partial Girder for High-Speed Railway Bridges

Lim, Ji-Hoon¹, Kim, Cheol Hee², Choi, Dong-Ho^{3*}

¹Graduate Student (Doctor's Course), Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

²Graduate Student (Master's Course), Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

³Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

Abstract - The purpose of this study is to analyze the dynamic characteristics and the dynamic stability for the application of the complex partial girder for railway bridges. The complex partial girder is a girder in which a box girder is applied to the support part and an I-shaped steel girder is applied to the central part of a span. The complex partial girder has been applied to road bridges, but it has not yet been applied to railway bridges, and basic studies on dynamic characteristics and dynamic stability for application to railway bridges are insufficient. A finite element model of a simply supported complex partial girder railway bridge with a span length of 60 m was established, and a static analysis applying a KTX design train load and a dynamic analysis applying a numerical 3-dimensional train model with multi-degree of freedom were performed. The dynamic stability was analyzed by comparing the vertical deflection of the bridge, the vertical acceleration of the deck slab, and the distortion of the track calculated from the structural analysis with the limit values for ride comfort and running safety presented in the Korean Design Standard (KDS). As a result, it was concluded that the complex partial girder can be applied to railway bridges with a span of 60 m and has sufficient dynamic stability.

Keywords - Complex partial girder, Railway bridge, Ride comfort, Running safety, Dynamic stability

1. 서론

국내 다수의 강교량에 강박스 거더가 적용되고 있으며, 강박스 거더를 변형한 새로운 형식의 거더들이 개발되고 있다. 복합파설거더는 강박스 거더의 변형된 형식으로서 Fig. 1과 같이 지점부에 강박스 거더를 적용하고 경간 중앙부에는 I-형 강거더를 적용하여 강재량을 절감할 수 있는 거더이다^[1]. 지점부와 경간 중앙부 사이는 강박스 거더 단면에서 I-형 강거더 단면으로 변화는 구간(단면변화부)이 존재하며, 지점부 강박스 거더의 하부플랜지에 콘크리트를 합성한다.

Note.-Discussion open until June 30, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 30, 2020; revised December 02, 2020; approved on December 04, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-2220-0328 Fax. +82-2-2220-0399

E-mail. samga@hanyang.ac.kr

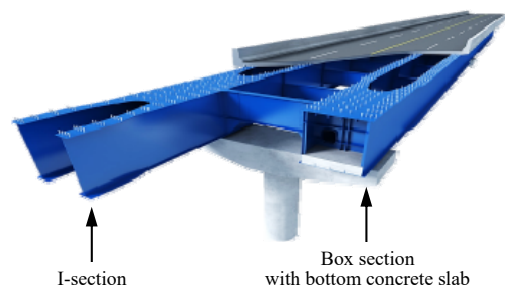


Fig. 1. Illustration of complex partial girder^[1]

복합파설거더는 현재까지 도로교량에 적용되어 왔으나, 철도교량에는 아직 적용된 사례가 없다. 철도교량은 열차 차륜에 의한 하중이 일정 간격으로 교량을 타격하므로 동특성 분석 및 동적안정성 검토가 매우 중요하다.

철도교량에 대한 동특성 및 동적안전성에 대한 연구로 Cho *et al.*^[2]이 경간장 50 m의 강합성 거더교의 동특성을 수치해석을 통해 검토하였고, Kim *et al.*^[3]이 강합성 소수주형 교의 동특성을 수치해석을 통해 검토하였다. Hwang *et al.*^[4]

은 강박스 거더 철도교량의 진동저감 방안을 분석하였다. 또한 Yun *et al.*^[5]은 경간장 25 m의 PSC I-형 거더 철도교량의 동적안정성을 검토하였으며, Park *et al.*^[6]은 경간장 40 m의 PSC 박스 거더 및 PSC I-형 거더 철도교량의 동특성을 검토하였다. Kim^[7]은 경간장 60 m의 복합파설거더 철도교량의 동특성 및 주행안전성에 대하여 수치해석을 통해 검토하였으나, 충분한 동적안전성을 확보하지 못하였다.

본 연구는 복합파설거더 교량이 고속철도교량으로서 경쟁력을 가질 수 있는 경간장 60 m에 대하여, 충분한 동적안정성을 가지도록 단면을 가정하고 국내 설계기준(Korea Design Standard, KDS)^[8]에 따라 검토하였다.

2. 철도교량 동적안정성에 대한 KDS 설계기준

2.1 일반사항

국내 설계기준 KDS^[8]에 따르면 열차 설계속도가 200 km/h 이상인 고속철도교량의 경우, 설계속도의 1.1배까지 10 km/h 마다 동적안정성(승차감 및 주행안전성)을 검토하며, 임계속도에서의 동적안정성을 검토하여야 한다. 임계속도 V_{cr} 은 식 (1)과 같이 산정할 수 있다^[8].

$$V_{cr} = f \times S_{eff} \quad (1)$$

여기서 f 는 모드해석을 통해 산정하는 첫 번째 휨고유진동수(Hz)이고, S_{eff} 는 유효타격간격(궤차간 중심간격)이며 KTX 고속열차의 경우 18.70 m이다.

2.2 승차감 설계기준

승차감 검토는 열차하중에 의한 교량의 최대 연직처짐으로 검토한다. 최대 연직처짐은 충격계수가 고려된 표준열차하중을 단선재하하는 정적해석과 실 열차하중을 단선재하하는 동적해석으로 산정할 수 있다. 승차감 검토 시 구조해

석으로 산정된 최대 연직처짐값은 KDS^[8]에 제시된 경간장 (span length)과 설계속도(design speed)에 따라 정의되는 연직처짐 제한값(Table 1)보다 작아야 한다.

2.3 주행안전성 설계기준

주행안전성 검토는 교량의 연직처짐, 교량 상판의 연직가속도 및 궤도의 면틀림에 대한 검토로 수행한다. 주행안전성에 대한 교량의 연직처짐은 표준열차하중을 단선재하 또는 복선재하하는 정적해석으로 산정하며, 산정된 최대 연직처짐값은 KDS^[8]에 제시된 조건식 식 (2)을 만족하여야 한다.

$$\frac{\delta}{L} \leq \frac{1}{600} \quad (2)$$

여기서 δ 는 교량의 최대 연직처짐이고 L 은 지간의 길이를 의미한다.

교량 상판의 연직가속도에 대한 주행안전성은 실 열차하중을 단선재하하는 동적해석으로 산정된 교량 상판의 연직가속도로 검토한다. 산정된 연직가속도의 절대 최댓값 $|a|_{max}$ 는 KDS^[8]에 따라 조건식 식 (3)을 만족하여야 한다.

- 자갈도상이 적용된 경우

$$|a|_{max} \leq 0.35 \text{ g} \quad (3a)$$

- 콘크리트도상이 적용된 경우

$$|a|_{max} \leq 0.5 \text{ g} \quad (3b)$$

여기서 g 는 중력가속도를 의미한다.

궤도 면틀림(out-of-plane distortion)에 대한 주행안전성 검토는 표준열차하중을 단선재하 및 복선재하하는 정적해석과 실 열차하중을 단선재하하는 동적해석으로 산정한 캔트(cant)의 단위 길이(종방향)당 변화량 또는 3 m당 변화량으로 검토한다. 여기서 캔트란 궤도의 내측 레일과 외측 레일의 고저차를 의미한다. KDS^[8]에서 제시하는 면틀림 제한값은 Table 2와 같다.

Table 1. Deflection limit for ride comfort

Design speed V (km/h)	Span length L (m)										
	0 - 25	25	30	35	40	45	50	55	60 - 75	80 - 95	100 - 120
$270 < V \leq 350$	$L/1,500$	$L/1,500$	$L/1,600$	$L/1,750$	$L/1,900$	$L/2,100$	$L/2,200$	$L/2,350$	$L/2,500$	$L/2,200$	$L/1,900$
$200 < V \leq 270$	$L/1,300$	$L/1,400$	$L/1,500$	$L/1,600$	$L/1,700$	$L/1,900$	$L/2,000$	$L/2,100$	$L/2,000$	$L/1,700$	$L/1,400$
$V \leq 200$	$L/1,100$	$L/1,200$	$L/1,300$	$L/1,500$	$L/1,500$	$L/1,400$	$L/1,300$	$L/1,200$	$L/1,100$	$L/800$	$L/600$

Table 2. Limit for out-of-plane distortion in railway track for running safety

Design speed V (km/h)		Limit value for the ratio of change in cant	
		(mm/m)	(mm/3m)
For static analysis using design train load	$V \leq 200$	1.0	3.0
	$V > 200$	0.5	1.5
For dynamic analysis using moving train load		0.4	1.2

3. 복합파설거더 철도교량

본 연구의 해석 대상 복합파설거더 철도교량은 경간장 60 m의 단순지지 형식의 교량으로 가정한다. Fig. 2(a)는 가정된 복합파설거더(강거더)의 상부 및 하부의 평면도를 보여주며, 두 거더의 중심을 나타내는 점선 사이의 간격은 7 m 이고 가로보의 간격은 5 m이다. Fig. 2(b)는 종단면도를 보여준다. 양쪽의 각 단부를 기준으로 0 m - 7.5 m 구간은 하부플

랜지에 콘크리트가 충전된 박스 단면, 7.5 m - 12.5 m 구간은 박스 단면, 12.5 m - 15 m 구간은 단면변화부로서 플랜지의 폭이 거더 종방향을 따라 변하는 I-형 단면(tapered I-section), 15 m - 30 m 구간은 I-형 단면으로 구성된다.

4. 수치해석 모델

4.1 교량 모델

교량 모델의 거더 단면 치수는 지점부의 하부플랜지에 콘크리트가 충전된 박스 단면, 박스 단면, 단면변화부의 I-형 단면, 중앙부의 I-형 단면에 대하여 각각 Figs. 3(a)-3(d)와 같이 가정하였다. 네 단면의 형고, 웨브의 높이와 두께, 플랜지의 두께는 모두 동일하게 가정하였으며, 플랜지의 폭을 달리 가정하였다. 단면변화부에 적용하는 거더 단면 치수는 단면변화부의 중앙(즉, 지지점으로부터 13.75 m 떨어진 지점)의 치수로 동일하게 적용하였다. 또한 웨브 중심간의 거리는 3 m이다. 가로보 단면 치수는 Fig. 3(e)와 같이 가정했으며, 레일의

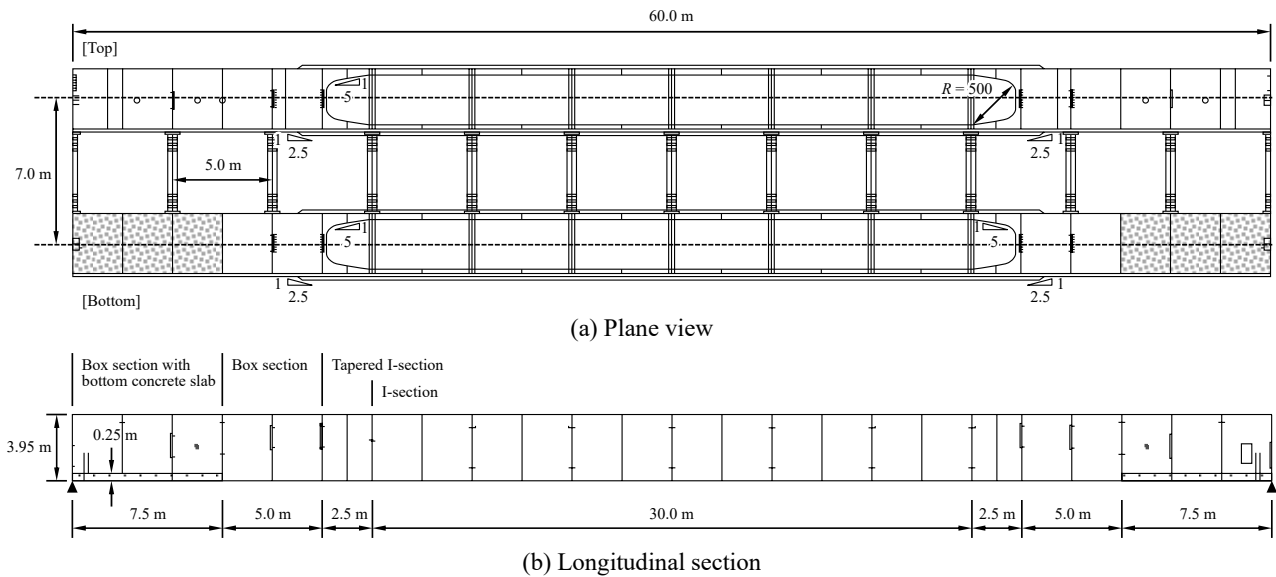


Fig. 2. Assumed geometry of complex partial girder for high-speed railway bridge

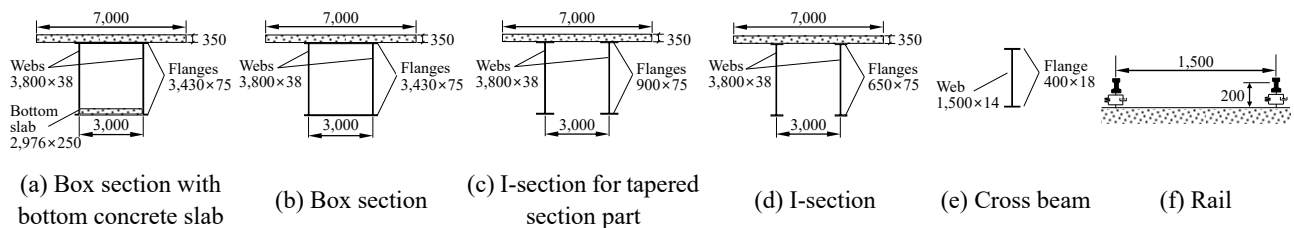


Fig. 3. Dimensions of cross-sections for an assumed complex partial girder for railway bridge (Unit: mm)

경우 Fig. 3(f)와 같이 도심이 거더 바닥판 상면으로부터 연직 방향으로 높이 0.2m에 위치하도록 가정하였으며, 인접한 레일의 도심 사이의 거리는 1.5m이다. 레일과 바닥판 상면은 스프링과 대시포트로 연결하였다. 이때 스프링 계수는 교축방향 및 교직방향으로 3.0×10^7 N/m, 연직방향으로 6.0×10^7 N/m이며, 대시포트 계수는 교직 방향으로 5.0×10^4 N·s/m, 연직 방향으로 7.5×10^4 N·s/m로 가정하였다^[9].

상기 단면들에 대한 물성치는 Table 3에 정리하였다. 여기서 ρ 는 단위질량, E_s 는 강재의 탄성계수, n 은 환산단면계수로 콘크리트의 탄성계수에 대한 강재의 탄성계수(E_s/E_c), A 는 환산단면적, I_x 는 비틀림에 대한 단면2차모멘트, I_y 는 교직방향에 평행하고 도심을 지나는 축에 대한 단면2차모멘트, I_z 는 연직방향에 평행하고 도심을 지나는 축에 대한 단면2차모멘트이다.

구조 요소들의 노드(node)는 거더, 레일 및 가로보의 도심에 위치시켰다. 또한 레일의 도심을 지나는 연직방향의 선과 상부슬래브 상단이 만나는 지점에 가상 노드(dummy node)를 배치하였다(Fig. 4).

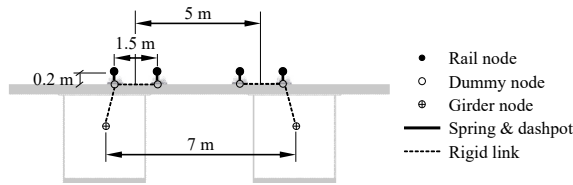


Fig. 4. Nodes and connections in a cross-section

Table 3. Properties for sections

Section	ρ (kg/m ³)	E_s (GPa)	$n (= E_s/E_c)$	A (m ²)	I_x (m ⁴)	I_y (m ⁴)	I_z (m ⁴)
Box section with bottom concrete slab	11,336.26	210	7	1.2591	1.9190	3.4096	2.5834
Box section	10,772.54	210	7	1.1533	1.9132	3.4086	2.5834
I-section for tapered section part	11,559.04	210	7	0.9088	0.0264	2.3596	2.7057
I-section	11,892.75	210	7	0.8338	0.0154	2.0219	2.5256
Cross beam	7,849.13	210	N/A	0.0354	2.3×10^{-6}	0.0122	0.0002
Rail	7,849.13	200	N/A	1.0000	1	3.22×10^{-5}	5.24×10^{-6}

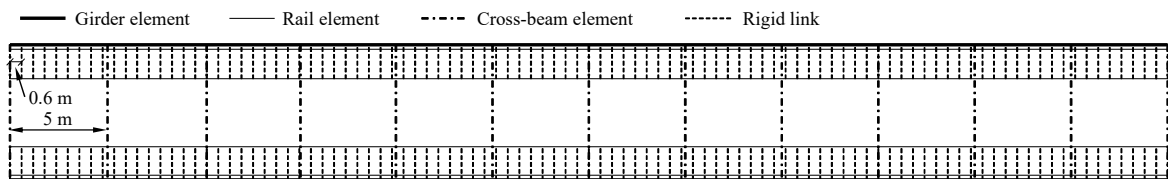


Fig. 5. Elements for a bridge model in plane view

노드 간 연결의 경우, 거더 노드-가상 노드 사이는 강결(rigid)로 연결하고, 인접한 가상 노드 사이는 강결로 연결하였으며, 가상 노드-레일 노드 사이는 스프링 및 대시포트로 연결하였다(Fig. 4).

거더, 레일 및 가로보를 나타내는 요소들은 도심을 연결하고 3D 빔(beam) 요소를 적용하였다. Fig. 5는 거더 요소, 레일 요소 및 가로보 요소의 배치를 평면도로 보여준다. 또한 강결(rigid link)을 나타내었다. 가로보 요소들은 거더 노드를 교직방향으로 연결하고 종방향으로 5 m 간격을 두고 있으며, 강결(rigid link)은 종방향으로 0.6 m 간격을 둔다.

4.2 KTX 고속열차 모델

정적해석 시 고려하는 KTX 열차하중은 국내 설계기준 KDS^[8]의 KRL-2012 여객전용 표준열차하중(design train load)을 적용하며, Fig. 6과 같다. 표준열차하중은 정적하중이므로 추가적인 동적효과를 고려하기 위하여, 표준열차하중에 $(1 + I_m)$ 곱하여 재하한다. 여기서 충격계수 I_m 는 식 (4)와 같다^[8].

$$I_m = \frac{1.44}{\sqrt{L_c} - 0.2} - 0.18 \quad (4)$$

여기서, L_c 는 경간장이고, 충격계수 I_m 은 0보다 크고 0.67보다 작은 값이다.

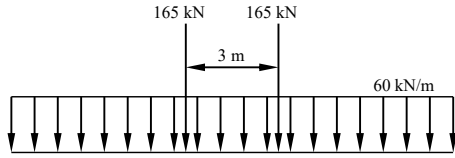


Fig. 6. Design train load: KRL-2012^[8]

동적해석 시 고려하는 KTX 열차하중은 power car(2량), power passenger car(2량), passenger car(15량), key car(1량)로 구성된 총 20량의 다자유도 3차원 열차 수치 모델(numerical 3-D train model with multi degree of freedom)로서 적용하였다.

Fig. 7은 열차의 구성과 열차의 치수 및 무게를 보여주며, Figs. 8(a)-8(d)는 각각 power car, power passenger car, passenger car 및 key car의 측면에서 보는 자유도를 나타내며, Fig. 8(e)는 차량의 정면에서 바라본 자유도를 나타낸다.

5. 수치해석 및 동적안정성 검토

5.1 개요

대상 복합과설거터 철도교량에 대한 정적해석은 상용 유

한요소해석 프로그램 MIDAS^[10]를 이용하여 수행하였다. 동적해석은 열차-궤도-교량 상호작용을 고려하기 위해 자체 개발한 유한요소해석 코드를 활용하여 수행하였다^{[11]-[13]}.

주행안전성 및 승차감 검토를 위한 검토 항목, 적용하는 열차하중, 하중재하 선로의 수 및 구조해석 방법을 Table 4에 정리하여 나타내었다. 설계속도는 350 km/h로 정의하였다.

또한 실 열차하중(다자유도 3차원 열차 수치 모델)을 재하하는 동적해석 시 열차속도는 100 km/h부터 390 km/h까지 10 km/h 간격을 두어 정하고, 추가적으로 고유치 해석으로부터 구하는 임계속도를 포함하였다.

5.2 고유치 해석

교량의 고유진동수 및 임계속도를 산정하기 위해 고유치 해석을 수행하였다. 고유치 해석으로부터 구한 1차, 2차, 3차 및 4차 고유진동수는 각각 2.96 Hz, 3.19 Hz, 3.73 Hz 및 11.86 Hz이다. 여기서 1차 고유진동수가 첫 번째 휨고유진동수였고, 3차 고유진동수가 첫 번째 비틀림고유진동수였다(Fig. 9).

1~4차 고유진동수에 대응하는 1~4차 임계속도를 식 (1)에 따라 산정하면, 1~4차 임계속도는 각각 $V_{cr,1} = 199.45$ km/h,

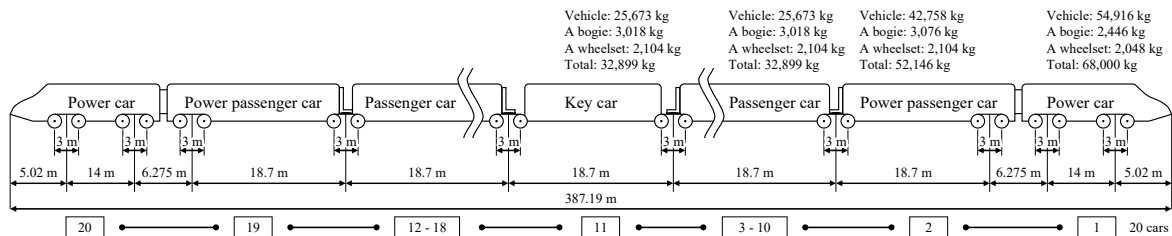


Fig. 7. Dimensions and properties for numerical train model

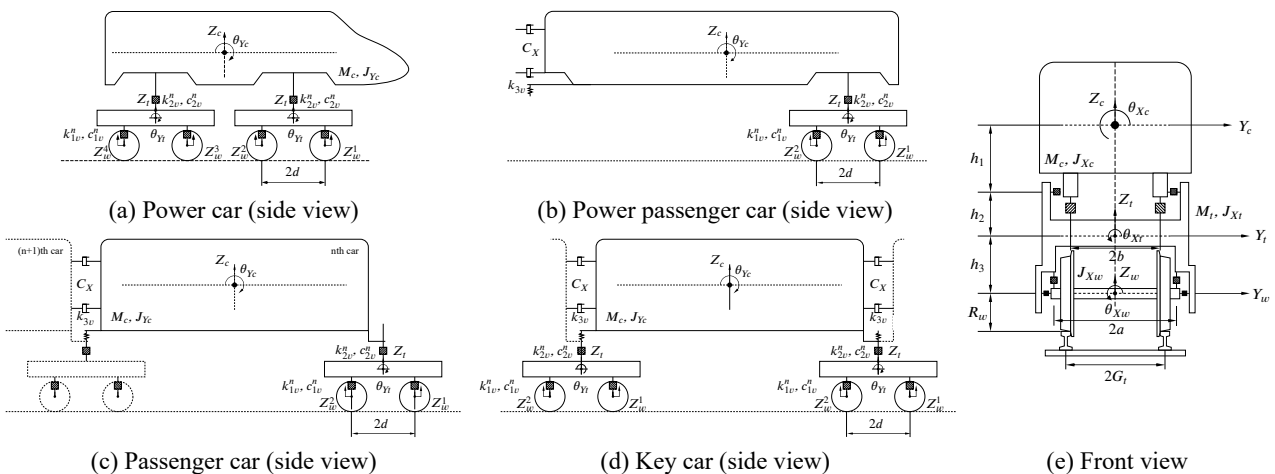


Fig. 8. Degree of freedom for numerical 3-D train model

Table 4. Check list and type of analysis for ride comfort and running safety

Dynamic stability	Check list	Train load	No. of loaded lane	Type of analysis
Ride comfort	Vertical displacement	Design KTX train load	1	Static analysis
		Numerical 3-D train model with MDOF	1	Dynamic analysis
Running safety	Vertical displacement	Design KTX train load	1, 2	Static analysis
	Vertical acceleration	Numerical 3-D train model with MDOF	1	Dynamic analysis
	Out-of-plane distortion	Design KTX train load	1, 2	Static analysis
Numerical 3-D train model with MDOF		1	Dynamic analysis	

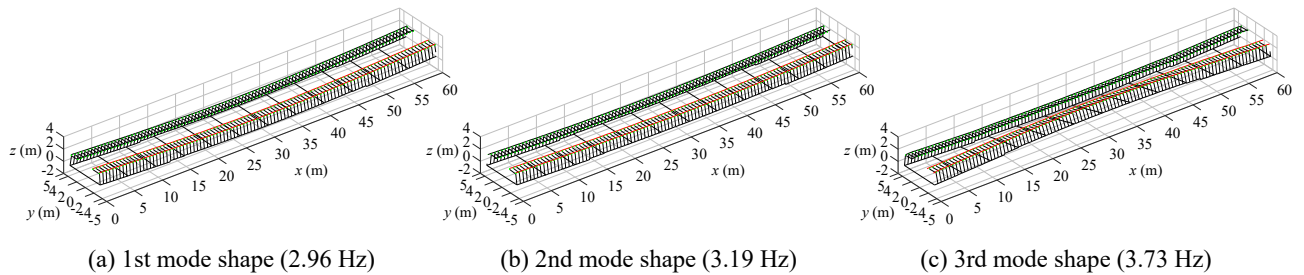


Fig. 9. Mode shape and frequency (Hz)

$V_{cr,2} = 214.65 \text{ km/h}$, $V_{cr,3} = 250.82 \text{ km/h}$ 및 $V_{cr,4} = 798.34 \text{ km/h}$ 이다. 설계속도의 1.1배인 385 km/h 내로 들어오는 1~3차 임계속도와 이에 대응하는 고유진동수를 Table 5에 정리하였다. 승차감 검토 및 주행안전성 검토를 위한 동적해석은 임계속도 199.45 km/h , 214.65 km/h , 250.82 km/h 를 포함하여야 한다.

Table 5. Mode frequency and critical speed for 1st - 3rd mode

Mode	Frequency (Hz)	Critical speed (km/h)
1st	2.96	199.45
2nd	3.19	214.65
3rd	3.73	250.82

5.3 승차감 검토

승차감 검토를 위해 복합파설거더 철도교량에 표준열차하중을 단선재하하는 정적해석 및 다자유도 열차수치 모델을 단선재하하는 동적해석으로 최대 연직처짐값을 산정하였다.

표준열차하중을 단선재하하는 정적해석으로부터 산정된 연직처짐값을 Fig. 10(a)와 같이 경간에 따라 표식 선으로 나타내었으며, Table 1에 따라 산정된 연직처짐 제한값인 24 mm 를 실선으로 나타내었다. 최대 연직처짐값은 19.54 mm 였다.

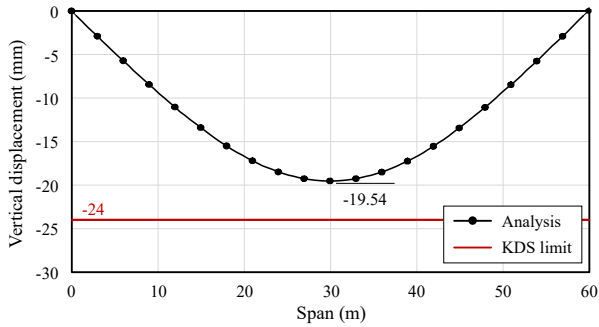
또한 다자유도 열차 수치 모델로 단선재하하는 동적해석

으로부터 산정된 최대 연직처짐값들을 Fig. 10(b)와 같이 열차속도에 따라 표식 선으로 나타내었으며, Table 1에 따라 산정된 연직처짐 제한값들을 실선으로 나타내었다. 이 경우의 최대 연직처짐값은 1차 임계속도(첫 번째 휨고요진동수에 대한 임계속도) 199.45 km/h 에서 9.88 mm 였고, 이와 유사한 정도의 9.81 mm 의 최대 연직처짐이 3차 임계속도(첫 번째 비틀림고유진동수에 대한 임계속도) 250.82 km/h 에서 발생하였다.

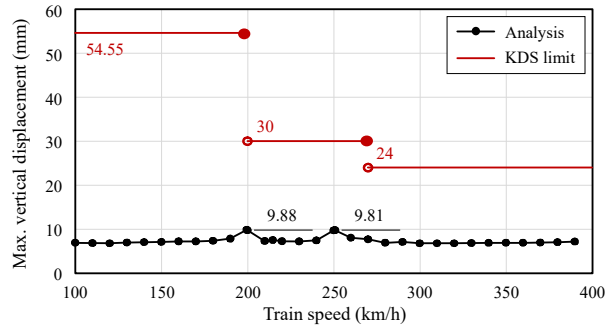
결과적으로는 정적해석 및 동적해석의 경우에 발생한 최대 연직처짐값들이 모두 KDS^[8] 제한값보다 작으므로 승차감 기준에 대하여 안전측에 해당하였다.

5.4 주행안전성 검토

주행안전성 검토를 위하여 표준열차하중을 단선재하 및 복선재하하는 정적해석으로 교량 연직처짐값을 산정하였으며 각각 Fig. 11(a), Fig. 11(b)와 같이 경간을 따라 표식 선으로 나타내었고 식 (2)에 따라 산정한 KDS^[8] 제한값 100 mm 를 실선으로 나타내었다. 단선재하하는 경우 최대 연직처짐값은 19.54 mm 이고(Fig. 11(a)), 복선재하하는 경우 발생한 최대 연직처짐값은 26.35 mm 였다(Fig. 11(b)). 따라서 표준열차하중으로 발생한 최대 연직처짐값이 KDS^[8] 제한값보다 작으므로, 연직처짐에 관한 주행안전성은 안전측에 해당하였다.

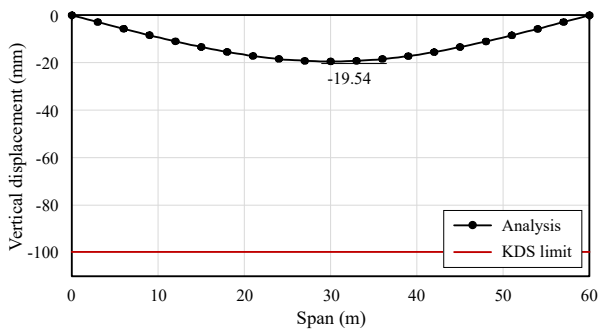


(a) Displacement along with span from static analysis

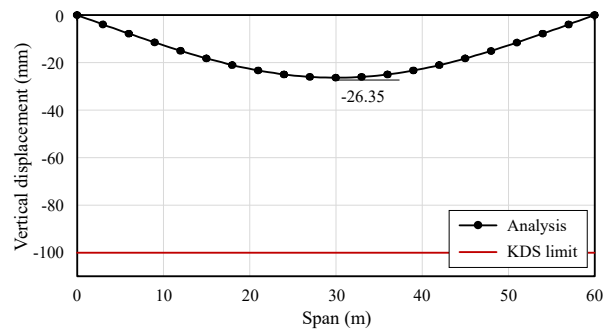


(b) Maximum displacement versus train speed from dynamic analysis

Fig. 10. Vertical displacement



(a) One lane loaded



(b) Both lanes loaded

Fig. 11. Vertical displacement along with span from static analysis

교량 상판의 연직가속도에 대한 주행안전성 검토를 위해 다자유도 열차 수치 모델을 단선재하하는 동적해석을 열차 속도별로 수행하였다. KDS^[8]에서 제시하는 교량 상판의 연직가속도의 검토위치에 대응하도록, 동적해석으로부터 산정된 연직가속도는 Fig. 4의 가상 노드의 연직가속도로 구하였다. 교량 위를 주행하는 열차속도에 따른 교량 상판의 연직가속도의 최댓값을 Fig. 12에 표식 선으로 나타내었으며, 콘크리트 궤도에 해당하는 KDS^[8]의 연직가속도 제한값 $0.5 \text{ g} (= 0.4905 \text{ m/s}^2)$ 을 실선으로 나타내었다.

최대 연직가속도는 열차속도가 증가함에 따라 함께 증가하는 경향을 보였다. 교량 상판의 연직가속도의 최댓값들 중 최댓값은 열차속도 390 km/h에서 발생하는 4.80 m/s^2 였다. 따라서 교량 상판의 연직가속도의 최댓값들이 KDS^[8] 제한값보다 작으므로, 연직가속도에 관한 주행안전성은 안전측이었다.

궤도 면틀림에 대한 주행안전성 검토를 위해 표준열차하중을 단선재하 및 복선재하하는 정적해석을 수행하였으며, 실 열차하중(다차원 열차 수치 모델)을 단선재하하는 동적해석을 수행하였다. 면틀림 값은 Fig. 13과 같은 종방향으로

길이 3 m 단위의 궤도에 대하여 시작점에서의 변형된 내측 레일과 외측 레일의 고저차($\delta_2 - \delta_1$)와 시작점으로부터 3 m 떨어진 지점에서의 변형된 내측 레일과 외측 레일의 고저차($\delta_4 - \delta_3$)의 변화량인 $[(\delta_4 - \delta_3) - (\delta_2 - \delta_1)]$ 의 절댓값으로 산정할 수 있으며, 이때 단위는 mm/3m이다. 또한 면틀림은 $[(\delta_4 - \delta_3) - (\delta_2 - \delta_1)]/3$ 의 절댓값으로 산정할 수 있으며, 이때 단위는 mm/m이다.

표준열차하중을 단선재하 및 복선재하하는 정적해석 결과로부터 산정한 면틀림 값을 경간을 따라 Fig. 14(a)와 Fig. 14(b)에 각각 표식 선으로 나타내었으며, Table 2에 따라 산정된 KDS^[8] 제한값 0.5 mm/m는 실선으로 나타내었다. 단선재하시 면틀림의 최댓값은 0.25 mm/m이었으며, 복선재하시 면틀림의 최댓값은 0.15 mm/m였다.

또한 다자유도 열차 수치 모델을 단선재하하는 동적해석으로부터, 열차속도에 따른 면틀림의 최댓값을 Fig. 15(a)에 표식 선으로 나타내었으며, Table 2에 따라 산정된 KDS^[8] 제한값 0.4 mm/m는 실선으로 나타내었다. 최대 면틀림은 열차속도가 3차 임계속도(첫 번째 비틀림고유진동수에 대한 임계속도)인 경우에 발생하였으며, 이 최대 면틀림 값은

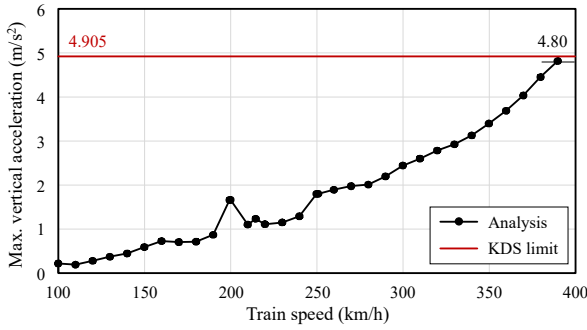


Fig. 12. Maximum vertical acceleration versus train speed

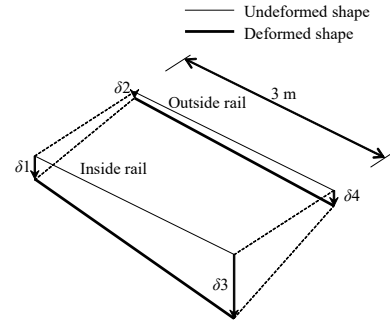
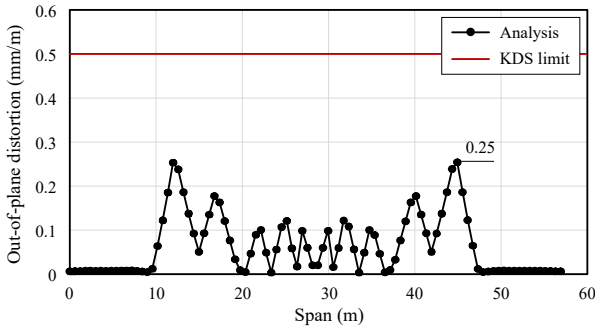
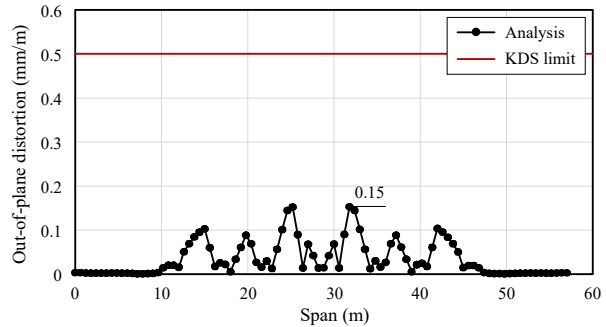


Fig. 13. Out-of-plane distortion of track

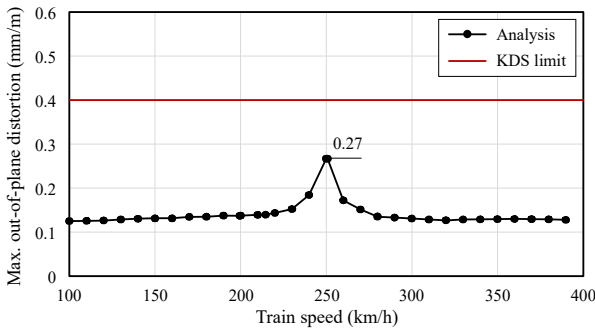


(a) One lane loaded

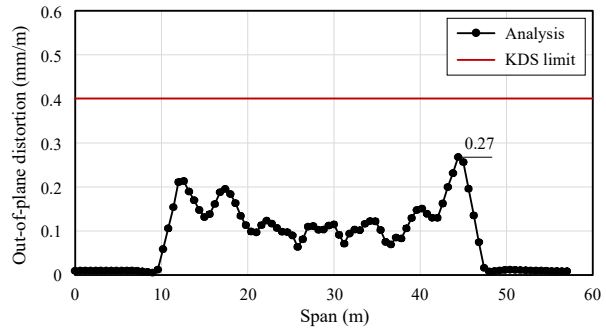


(b) Both lane loaded

Fig. 14. Out-of-plane distortion obtained from static analysis



(a) Maximum distortion versus train speed



(b) Distortion along with span at train speed = 250.82 km/h

Fig. 15. Out-of-plane distortion from dynamic analysis

0.27 mm/m였으며, 이 최대 면틀림이 발생한 시점에서 교량 경간을 따라 면틀림 값을 Fig. 15(b)에 표시 선으로 나타내었으며, KDS^[8] 제한값 0.4 mm/m는 실선으로 나타내었다.

표준열차하중을 단선재하한 경우인 Fig. 14(a) 및 다자유도 열차 수치모델을 250.82 km/h로 단선재하한 경우인 Fig. 15(b)에서 볼 수 있듯이 최대 면틀림은 단면변화부 부근에 발생하는 것을 알 수 있었다. 결과적으로 정적해석 및 동적해석으로부터 산정되는 면틀림 값들이 모두 KDS^[8] 제한값보다 작으므로 면틀림에 관한 주행안전성은 안전측이었다.

6. 결론

본 연구는 강박스 거더의 변형된 형식인 복합파설거더를 적용한 경간장 60 m의 고속철도교량의 동특성과 동적안정성(승차감 및 주행안전성)을 국내 설계기준 KDS^[8]에 따라 검토하였다. 대상 복합파설거더를 가정하고 유한요소해석 모델을 구성하였다. 표준열차하중을 재하하는 정적해석 및 다자유도 열차 모델을 적용한 동적해석으로 교량 연직처짐, 교량 상판 연직가속도, 궤도 면틀림을 산정하였다.

동적해석 결과 최대 연직처짐은 열차가 1차 임계속도 199.45 km/h로 주행하는 경우 경간 중앙부에서 최댓값이 발생하였고, 최대 연직가속도의 경우 열차속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며 열차가 설계속도 350 km/h의 약 1.1배인 390 km/h로 주행하는 경우 경간 중앙부에서 최댓값이 발생하였다. 최대 면틀림은 열차가 3차 임계속도 250.82 km/h로 주행하는 경우 단면변화부에서 가장 크게 발생하였다.

구조해석으로 산정된 연직처짐과 연직가속도 및 면틀림의 최댓값들과 KDS^[8]에서 제시한 제한값들을 비교하여 검토한 결과, 복합파설거더 철도교량은 승차감에 관한 연직처짐 제한값과 주행안전성에 관한 연직처짐, 연직가속도 및 면틀림 제한값을 모두 만족하였다. 따라서 복합파설거더는 경간 60 m의 고속철도교량에 적용이 가능하며, 충분한 동적안정성을 가지고 있다.

참고문헌(References)

- [1] Kim, C.H., Jang, I.H., and Jung, K.Y. (2018) Structural Performance and Economical Analysis of Complex Partial Box Girder, *Proceedings of the Annual Conference of the Korean Society of Civil Engineers (KSCE 2018 Convention)*, KSCE, pp.163-164 (in Korean).
- [2] Cho, S.-K., Jung, H.-O., and Kim, S.-I. (2007) Parametric Study on Steel Composite Girder Bridges for HONAM High-Speed Railway Considering Criteria Requirement of Dynamic Response, *Proceedings of the Annual Fall Conference of the Korean Society for Railway*, KSR, pp.1364-1372 (in Korean).
- [3] Kim, E., Park, J.W., and Sim, S.H. (2013) Dynamic Behavior of Composite Steel Girder Bridge Exceeding Train Speed 350km/h, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, KAIS, Vol.14, No.7, pp.3518-3527 (in Korean).
- [4] Hwang, E.S., Kim, D.Y., and Jang, S.H. (2017) Analysis of Dynamic Response and Vibration Mitigation for Steel Box Girder Railway Bridges, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.6, pp.487-495 (in Korean).
- [5] Yun, J.H., Choi, K.Y., Kwon, K.S., and Chung, W.S. (2012) Effect of Crossbeam on Dynamic Characteristic and Safety of PSC-I Railway Bridge, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.12, No.4, pp.25-30 (in Korean).
- [6] Park, J.-K., Jang, P.-K., Cha, T.-G., Kim, C.-W., and Jang, I.-Y. (2014) Dynamic Response of PSC I Shape Girder Being Used Wide Upper Flange in Railway Bridge, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.19, No.4, pp. 125-135 (in Korean).
- [7] Kim, C.H. (2020) *Evaluation of Running Safety and Dynamic Characteristics of Complex Partial Girder for Railway Bridge*, Master's Thesis, Hanyang University, Korea (in Korean).
- [8] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018) *General Rules for Bridge Design (KDS 24 10 10: 2016)*, Korea (in Korean).
- [9] Zeng, Z.-P., Liu, F.-S., Lu, Z.-H., Yu, Z.-W., Lou, P., and Chen, L.-K. (2016) Three-Dimensional Rail-Bridge Coupling Element of Unequal Lengths for Analyzing Train-Track-Bridge Interaction System, *Latin American Journal of Solids and Structures*, Brazilian Association of Engineering and Mechanical Sciences, Vol.13, No. 13, pp.2490-2528.
- [10] MIDAS I.T. (2019) *Midas Civil On-line Manual*, MIDAS Information Technology Co., Ltd., Korea (in Korean).
- [11] Mu, D., Ma, C., Park, M., Lim, J.-H., and Choi, D.-H. (2019) Stochastic Analysis of the High-Speed Train-Track-Bridge System Under Horizontal Spatially Varying Earthquakes, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.5, pp.369-380 (in Korean).
- [12] Mu, D., Gwon, S.-G., and Choi, D.-H. (2016) Dynamic Responses of a Cable-Stayed Bridge Under a High Speed Train with Random Track Irregularities and a Vertical Seismic Load, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol.16, No.4, pp.1339-1354.
- [13] Mu, D., and Choi, D.-H. (2014) Dynamic Responses of a Continuous Beam Railway Bridge Under Moving High Speed Train with Random Track Irregularity, *International Journal of Steel Structures*, KSSC, Vol. 14, No.4, pp.797-810.

요 약: 본 연구의 목적은 복합파설거더의 철도교량 적용을 위한 동특성 분석 및 동적안정성 검토 연구이다. 복합파설거더는 지점부에 강박스 거더 단면을 적용하고 중앙부에 I-형 강거더 단면을 적용한 거더이다. 복합파설거더는 도로교량에 적용되고 있으나, 철도교량에는 아직 적용된 바 없으며, 철도교량에 적용하기 위한 동특성 및 동적안전성에 대한 기초연구가 아직 부족하다. 경간장 60 m의 단순지지 형식의 복합파설거더 철도교량의 유한요소모델을 구성하였고, 설계속도 350 km/h의 KTX 표준열차하중을 적용한 정적해석과 다자유도 3차원 수치 열차 모델을 적용하는 동적해석을 수행하였다. 구조해석으로부터 산정된 교량의 연직처짐, 교량의 연직가속도 및 궤도의 면틀림 값들을 국내 설계기준 KDS(Korea Design Standard)에서 제시한 승차감 및 주행안전성에 관한 제한값들과 비교하여 동적안전성을 검토하였다. 동적안전성 검토 결과, 복합파설거더는 경간 60 m의 철도교량에 적용이 가능하며, 충분한 동적안전성을 가지고 있다는 것을 확인하였다.

핵심용어: 복합파설거더, 철도교량, 승차감, 주행안전성, 동적안정성
