특집기사

신형식 교량의 철도적용을 위한 동적성능 요구사항

The Design Requirements Associated with Dynamic Performance of the Railway Bridges

방 춘 석[1)*] 김 이 현[2)] 안 성 권[3)]

Bang, Choon Seok Kim, Lee Hyeon Ahn, Sung Kwon

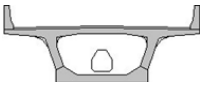
1. 서 론

현재 국내 철도현황을 살펴보면 전체 철도연장은 고속철도, 일반철도, 광역철도를 포함하여 3,557.3km이며(2010년말 기준) 복선연장은 1,763km로 복선화율은 49.6% 수준이고, 전철연장은 2,147km로 전철화율은 60.4% 수준을 나타나고 있다. 이 중 고속철도는 수도권 고속철도 사업이 완료되는 2014년에는 332.8km로 연장될 것이다. 이는 지난 20년간 철도연장이 약 287km가량 증가에 불과하였고 지난 5년간 교통SOC 투자 중 철도투자는 24%에 불과하였다. 하지만, 철도산업은 기후변화 및 에너지 문제 대두로 환경과 에너지 효율성의 중요성이 부각되면서, 2020년에는 영업거리 약 4,934km로 확충하는 등 앞으로는 녹색성장동력의 기간산업으로 지속적으로 투자가 증가될 추세이다. 또한 경쟁력 강화를 위해서 기존선은 고속화를 통하여 경쟁력을 강화 시키고, 신규 노선의 경우는 고속철도를 중심으로 건설되어야 할 필요성이 크게 증가되고 있다. 또한 국가철도망구축계획(2011~2020)에 의하면 설계속도별 수요와 사업비와의 관계를 분석하여 노선별 최적의 속도선정을 기존 건설·운영 중인 노선은 설계속도 180~230km/h급으로 고속화 사업을 추진하고, 신규 건설노선은 설계속도 250km/h 내외로 고속화를 추진하고 있는 실정이다.

철도 인프라 가운데 교량의 지간별 형식을 살펴보면 Table 1과 같이 간략하게 구분할 수 있다. 기존 국내에 시공되어있는 철도교량의 형식을 살펴보면 경간이 비교적 짧은 판형교가 46%로 대부분을 차지하고 있으며, RC-슬래브교 및 T-Beam과 같은 단순교 형태의 일반 콘크리트 교량이 지배적이었다.

1) 한국철도기술연구원, 선임연구원
2) 한국철도기술연구원, 선임연구원
3) 한국철도기술연구원, 선임연구원
* E-mail : csbang@krri.re.kr

Table 1 경간별 철도교량 구조형식

단경간 (~25m)	중경간 (25~40m)	중장경간 (40~70m)	장경간 (70~120m)	초장경간 (120m~)
슬래브, T-빔, PSC거더	프리플랙스	강박스, PSC박스 	아치, 트러스, 엑스트라도제	현수, 사장

그러다가 1960년대 PSC-Beam 교량이 처음 도입된 이래 뛰어난 시공성과 경제성으로 경간 25m 이내의 철도교 및 도로교에 매우 광범위하게 적용되었다. 그 이상의 경간일 경우에는 경부고속철도에 적용된 40m 경간의 MSS 공법을 이용한 콘크리트 박스교량과 같은 형식의 단면을 갖는 교량 또는 특수설계된 교량형식으로 시공한다. 왜냐하면 장경간화하기 위하여 일반적으로 PSC-Beam의 단면을 키우기에는 형고와 무게가 매우 비효율적이 되고 사용에 많은 제약이 따르기 때문에 거더형식의 PSC-Beam 교량은 25m 이상에 활용에는 적합하지 못했기 때문이다.

그러나 토목 설계 및 시공기술의 발달과 더불어 경제성 및 공학적 효율성과 더불어 30m 이상의 프리플렉스 거더 (Preflex girder) 교량 등 다양한 교량형식이 도입되고 있는 상황이다 (Table 2). 거더 형식의 교량에 나타나는 제약을 극복하기 위하여 다양한 기술을 접목한 신형식 교량이 점차적으로 개발되어 현재 도로교 및 철도교에 적용되고 있는 실정이다.

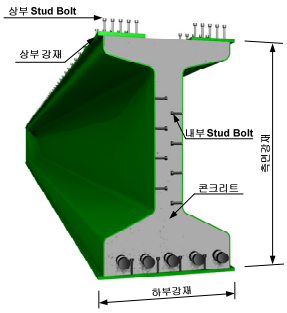
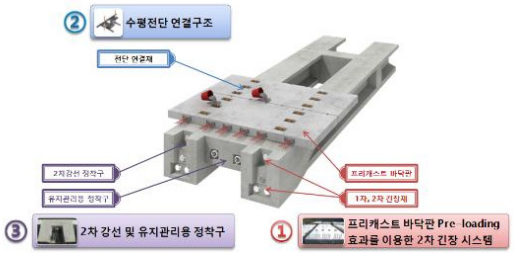
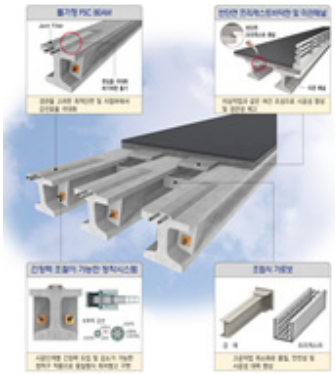
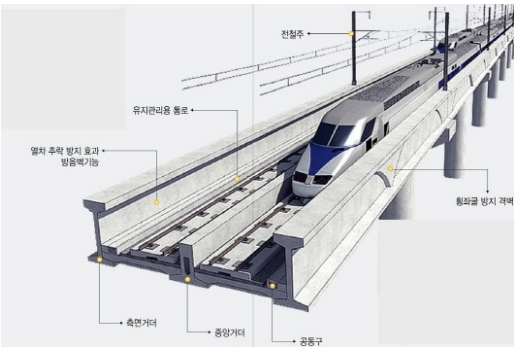
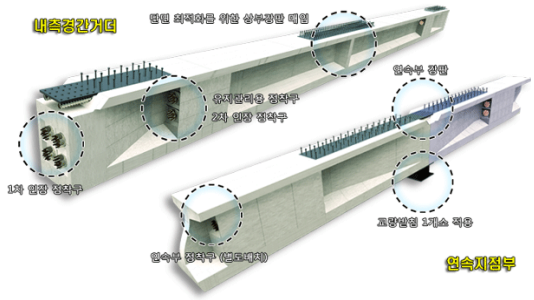
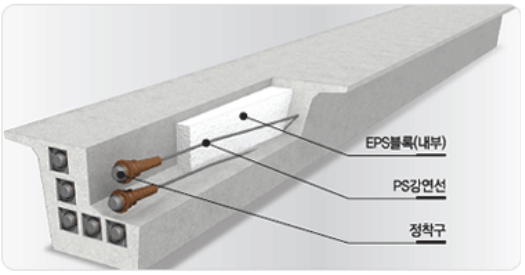
따라서 현재 25m~40m 구간의 중소경간의 상부구조 형식은 각각의 재료특성, 구조성능 및 가격경쟁력을 극대화 하기위해 다양한 형식이 제시되고 있는 실정이다. 개발된 형식의 교량이 국내 철도환경에 적용 가능한지 많은 방면에서 검토되고 있는 상황이며, 일부 상부구조형식은 특정 소규모 구간에 시험시공이 되어 있는 실정이다.

여기서 장경간 경량화를 추구한 신형식 교량들은 상대적으로 유연한 구조물이므로 충격계수 및 처짐 등 사용성 측면에서 취약할 수 있으므로 동적거동에 대한 검토가 필수적이다. 특히 도로교량과는 달리 철도교량 분야에서는 중경간 교량형식에 대한 동적거동 분석 및 적용성 검토가 매우 필요할 것으로 판단된다. 또한 열차하중의 특성으로 인해 설계속도에 따라 공진대역을 통과하는 경우의 동적특성은 반드시 검토하여야 한다.

2. 철도교 동적성능 기준

철도는 크게 고속철도(high speed railway)와 일반철도(또는 기존철도)로 구분되며 이들은 주행속도에 의해 구분된다. 고속철도 건설촉진법과 고속철도 건설규칙에 따르면 주요구간을 시속 200km 이상의 속도로 주행하는 철도로 정의되어 있다. 이는 외국의 경우에도 동일한 기준이 적용되고 있다. 철도교량 동적성능과 관련된 국내 시방기준으로는 “철도건설규칙(2009년 9월)”과 “철도설계기준 노반편(2011년)”, 호남고속철도 설계지침(2007)이 있으며, 외국의 관련 기준으로는 UIC Code 및 Eurocode, 프랑스 기준인 CTRL Technical Standards 등이 있다. 또한 많은 부분 ERRI(European Rail Research

Table 2 중경간의 신형식 교량(예)

	
SPC 거더교	PnP 거더교
	
Dr. PSC거더교	PSC U-Edge교
	
e-beam교	WPC 거더교

Institute) 보고서에 관련기준 및 설정근거 등이 제시되어 있다.

2.1 충격계수

철도설계기준(노반편, 2011년)과 호남고속철도 설계지침(2007)에 따르면 HL 표준열차하중에 대한 충격계수는 다음과 같다. 충격계수는 철근콘크리트, 프리스트레스 콘크리트와 강구조 또는 합성구조물에서 동일한 값을 갖는다.

모멘트에 대한 충격계수 :

$$I_m = \frac{1.44}{\sqrt{L_c} - 0.2} - 0.18 \quad (0 < I_m \leq 0.67)$$

전단에 대한 충격계수 :

$$I_s = \frac{0.96}{\sqrt{L_c} - 0.2} - 0.12 \quad (0 < I_s \leq 1.0)$$

철도설계기준(노반편, 2011년)에 따르면 200km/h 이하에서 철근콘크리트교 및 프리스트레스트 콘크리트교의 충격계수 i(%)는 아래와 같다.

	L ≤4m	i =60%
4m <	L ≤39m	i =125 / √L(%)
	L >39m	i =20%

정적하중에 의한 교량의 처짐에 대한 동적하중의 처짐으로 표현되는 충격계수는 단순히 지간장의 함수로 결정되는 경우, 고속의 열차하중이 작용하는 철도교량에서는 공진에 의한 진폭의 증가 가능성, 열차차륜, 주행면의 불규칙성 등 다양한 조건에 따른 영향이 고려되지 않고 있다. 실제 철도교량의 경우 다양한 종류의 열차 및 각 열차의 축간격에 의해 설계속도 내에서 공진의 발생가능성이 크며, 이와 같은 공진 발생 시 시방기준 상의 충격계수를 충분히 상회할 수 있으며 감쇠비에 따라서 매우 커질 수 있다. 반면, 이러한 공진에 의한 매우 큰 값의 충격계수를 설계에 반영하게 되면 교량은 매우 비현실적이고 비경제적인 단면의 과다설계로 귀결될 수 있으므로 주의하여야 한다.

철도설계기준 및 호남고속철도 설계지침에 따르면 설계속도가 200km/h 이상일 경우 실제 열차하중 하에서의 동적해석을 필수적으로 수행하여야 한다. 실제 열차하중으로 계산된 구조물의 응력이나 변형량이 계산된 충격계수를 사용하여 HL 표준열차하중에 의해 계산된 값들보다 크게 되는 경우에는 구조물의 응력이나 변형치를 실제 열차하중에 의한 값으로 적용하도록 하고 있다.

2.2 고유진동수

호남고속철도 설계지침(2007년) 및 UIC 776-1에서는 고유진동수의 하한치는 교량의 과도한 유연성을 방지하여 안전성 및 사용성을 높이기 위한 기준으로 이해할 수 있으므로 다음 하한치에 대한 규정을 참조하도록 하고 있다(Fig. 1).

첫 번째 휨 고유진동수(Hz) 상한치 :

$n_0 = 94.76 \times L^{-0.748}$

첫 번째 휨 고유진동수(Hz) 하한치

: $n_0 = 80/L$ L = 4.0 ~ 20.0m

$23.58 \times L^{-0.592}$ L = 20.0 ~ 100.0m

2.3 연직가속도

상판의 수직가속도의 과도한 발생은 궤도의 불안정성과 차륜/레일 접촉력의 감소 및 교좌장치의 들림 등을 유발할 수 있고 이것은 윤중변동의 증가와 도상의 교란, 교좌장치 부반력 발생 등 철도교량의 안전성과 밀접한 관계가 있으므로 제한하고 있다. 철도설계기준(노반편, 2011년)과 호남고속철도 설계지침(2007)에 따르면 주행열차하중에 의해 발생하는 철도교량 상판의 최대 연직가속도는 다음 값을 초과해서는 안 된다.

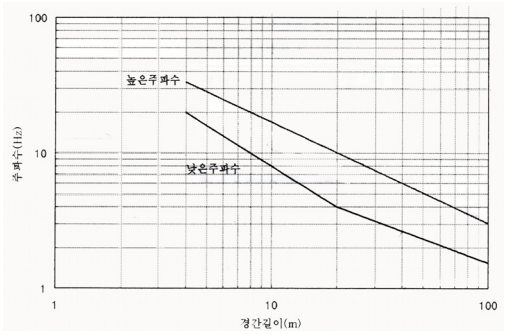


Fig. 1 경간길이에 따른 고유진동수(Hz)의 상한 및 하한값

○ 자갈 궤도 : 0.35g 이하
○ 콘크리트 궤도 : 0.5g 이하

ERRI D 214 RP9(1999) 보고서에 따르면, 과도한 Deck의 진동에 따른 다음과 같은 잠재적 위험요인을 완화시키기 위하여 상판의 수직가속도에 대한 검토가 필요하다고 기술되어 있다.

2.4 경간 중앙부 연직처짐

경부고속철도의 경우 처짐기준이 L/1,700이었으나, 호남고속철도 설계지침에서는 다음 Fig. 2와 같이 경간 길이별, 열차 속도별로 승차감을

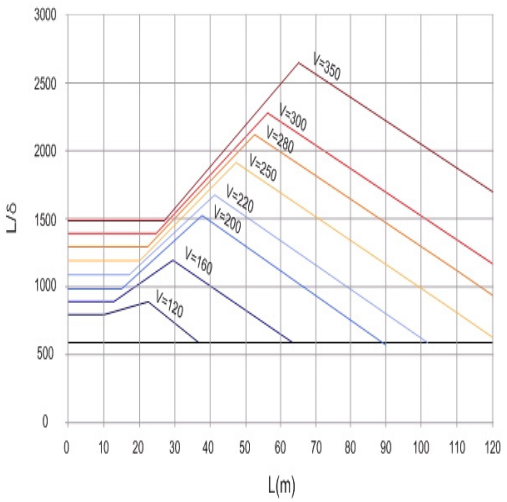


Fig. 2 3련이상의 단순교에 대한 최대연직처짐 제한 (승차감 = '매우양호')

고려한 연직 처짐 규정을 두고 있다.

철도설계기준(노반편)에 따르면 승객의 승차감 만족을 위한 실 운행열차하중 동적해석에 의한 최대 연직처짐은 다음 Table 3과 같은 규정을 적용하여 제한하고 있다.

2.5 단부꺾임각 (단부 종방향 변위)

UIC 774-3에 의하면, 연직하중에 의한 단부 꺾임각은 궤도/교량 상호작용 거동을 만족시키기 위한 중요한 인자로써 deck 상부 끝단에서의 변위를 제한함으로써 도상의 안전성을 유지하도록 규정하고 있다. 장대레일 상에서 온도변화, 시동/제동하중, 및 연직하중에 의한 deck 상부 끝단과 성토부 그리고 연속하는 두 deck 상부사이의 거리의 합이 단부꺾임각의 최대허용치가 된다.

국내 철도설계편람(궤도편)에는 교량상판의 단부꺾임각에 의한 자갈도상의 불안정성을 방지하기 위하여 열차 수직하중이 작용할 때 교대끝단 상면과 상판의 끝단상부면, 또는 연속하는 상판사이의 끝단상부면 사이의 종방향 변위한계를 다음과 같이 제한하고 있다.

○ 궤도/교량 상호작용을 고려한 경우 끝단상부면 종방향 변위는 8mm 이내로 제한되어야 한다.
○ 궤도/교량 상호작용을 고려하지 않은 경우 (교량만 해석한 경우) 끝단상부면 종방향

Table 3 최대연직처짐 제한 (승차감 = '매우양호')

설계속도 (V) (km/h)	거더 또는 부재의 경간(m)										
	0~20	25	30	35	40	45	50	55	60~75	80~95	100~120
270<V≤ 350	L /1500	L /1500	L /1600	L /1750	L /1900	L /2100	L /2200	L /2350	L /2500	L /2200	L /1900
200<V≤ 270	L /1300	L /1400	L /1500	L /1600	L /1700	L /1900	L /2000	L /2100	L /2000	L /1700	L /1400
V≤ 200	L /1100	L /1200	L /1300	L /1500	L /1500	L /1400	L /1300	L /1200	L /1100	L /800	L /600

변위는 10mm 이내로 제한되어야 한다.

이러한 규정은 UIC 774-3, Eurocode 1 PART 2 에서도 제시되어 있다. 반면, 프랑스 기준은 상판의 양쪽 단부 사이의 꺾임각으로 한계치를 규정하고 있다.

프랑스 기준(Channel Tunnel Rail Link Technical Design Standards)에 의하면, 단부 꺾임각의 한계치는 다음과 같다.

○ 단부의 꺾임각이 인접 성토구간에 접해있는 경우

$\theta_{max}(rad) \leq 6.5\times10^{-3}$: 단선

$\leq 3.5\times10^{-3}$: 복선

○ 꺾임각이 연속된 2개의 상판사이에 있는 경우

$(\theta_1+\theta_2)_{max}(rad) \leq 10.0\times10^{-3}$: 단선

$\leq 5.0\times10^{-3}$: 복선

220km/h의 속도를 초과하는 경우에 대해서는 위의 기준에 다음과 같은 기준을 추가 적용하여 단부꺾임각을 검토하여야 한다.

○ 단부의 꺾임각이 인접 성토구간에 접해있는 경우

$\theta_{max}(rad) \leq 2.0\times10^{-3}/h(m)$

○ 꺾임각이 연속된 2개의 상판사이에 있는 경우

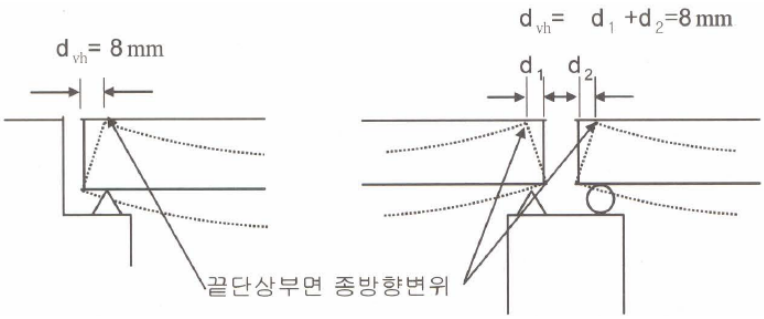
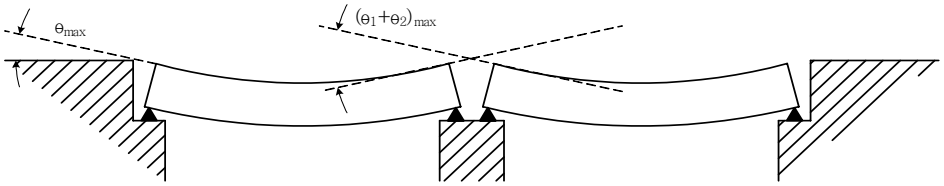
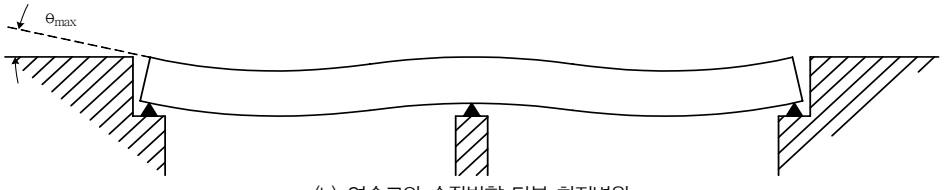


Fig. 3 단부꺽임에 의한 상판끝단 상부면 종방향 변위



(a) 단순교의 수직방향 단부 회전변위



(b) 연속교의 수직방향 단부 회전변위

Fig. 4 교량의 수직방향 단부 회전변위

$(\theta_1+\theta_2)_{max}(rad) \leq 4.0\times10^{-3}/h(m)$

여기서, h(m)는 레일면과 교좌장치 중심(교량 베어링 종류에 따라 다름)까지의 거리이다. 경부고속철도의 기준(BRDM)과 비교하면, 성토구간에 접해 있는 경우의 h를 4m로 간주하면 $\theta_{max}(rad) \leq 5.0\times10^{-4}$가 단부꺾임각 기준이 된다.

CTRL 기준과 같은 단부꺾임각은 교량의 연직변위에 가장 의존적이므로 승차감에 의거한 엄격한 연직변위 검토로 충분히 대체가 가능하다. 따라서 직접적인 단부꺾임각 기준은 과거 경부고속철도기준(BRDM)에서 존재하였으나 현재 국내 철도관련 설계기준 및 해외의 Eurocode, 일본 기준에서는 존재하지 않는 기준이다.

2.6 교량상판 단부 단차

철도설계편람(궤도편), EUROCODE 1 PART 2에서는 차량 수직하중 작용시 인접상판 사이 또는 상판과 교대 사이의 단차를 다음과 같이 제한하고 있다.

- 3mm : 최대속도 160km/h 이하의 선로
- 2mm : 최대속도 160km/h 이상의 선로

2.7 상판의 면틀림

틀림은 차륜과 레일의 접촉에 대한 안전을 확보하여 탈선 위험을 최소화하기 위한 것으로 교량의 교축직각방향 회전에 의한 캔트 변화 (비틀림 각변화) 제한규정이다. 면틀림은 Fig. 5와 같이 3m 떨어진 두 지점에서의 양쪽레일에 대한 캔트의 변화량(mm/궤도1m)을 의미한다. 호남고속철도 설계기준에서는 상판 면틀림의 3m 기준 면틀림 변화량 값은 1.5mm/3m 이내로 제한한다.

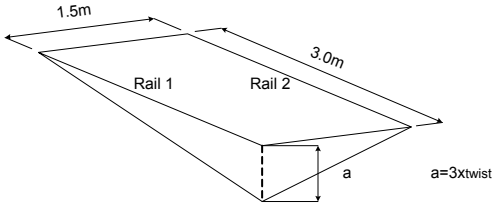


Fig. 5 교량 상판 면틀림

3. 동적성능 검토사례

열차하중을 받는 교량의 동적거동을 정확히 분석하기 위해서는 교량의 동적거동과 관련된 특성치를 정확히 선정하고 입력하는 것은 매우 중요하다. 이를 위해 다음 Fig. 6과 같이 실대형 모형실험을 수행하여 동특성을 파악하여야 한다. 모달테스트로 고유진동수 및 감쇠비 등을 얻을 수 있으며, 공진테스트를 수행할 수 있다.

한국철도기술연구원(2008)에서는 이러한 특성을 지닌 경간 길이 실물 30m경간의 WPC 거더를 제작하여 정·동적 시험을 수행하여 수치해석과의 결과를 비교하여 물성값의 검토 및 이에 대한 동적성능을 분석한 바가 있다. 그 당시 단면제원은 자갈궤도로 구성되어진 설계속도 200km/h 이하의 일반철도를 대상으로 수행되었었다.

WPC 거더교량은 기존 PSC 거더 교량에 비해

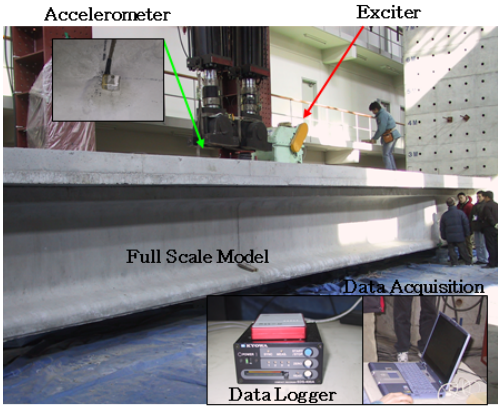


Fig. 6 실물모형의 동적실험 전경

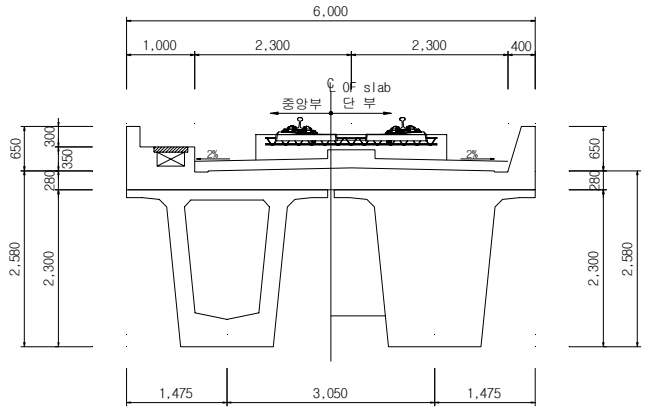


Fig. 7 검토단면 제원

U형 PSC 거더의 상부플랜지와 긴장력을 적절히 이용하여 내력균형의 여유를 확보하고 그 결과로 거더의 형고를 낮춘 효율적인 거더 형식의 교량이다. 폐합단면의 거더로 비틀림 저항성이 높고 작은 단면으로 큰 저항력을 갖도록 설계되어 결과적으로 경제적이며 시공이 용이하다고 할 수 있다. 동바리, 거푸집, 낙하물 방지공 등이 생략되어 경제적이고, 상부슬래브 콘크리트 즉시 타설로 공정도 간단하고 낮은 형고비로 미관이 양호하고 평면곡선 설치가 가능한 장점을 갖고 있다.

3.1 분석결과

본 기술지에서는 경간장이 35m인 단선 철도 설계단면(Fig. 7)을 갖는 WPC 거더 철도교량에 대한 동적검증을 수행한 경우를 보여주고자 한다. 동적성능 검증을 위하여 열차하중은 8량 1편성 새마을호, 20량 1편성 화물열차 및 KTX에 대하여 주행속도별 동적해석을 수행하여 대상구조물이 철도교량으로서의 동적기준을 만족하는지 타당성 분석을 수행하였다. 동적거동해석에 사용한 프로그램은 범용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS 6.9를 사용하였다.

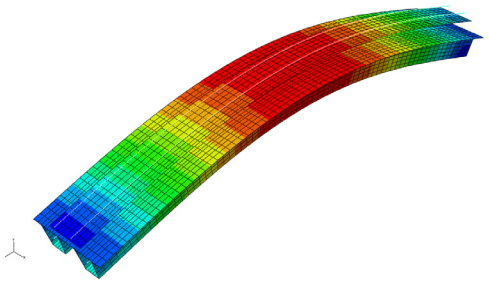
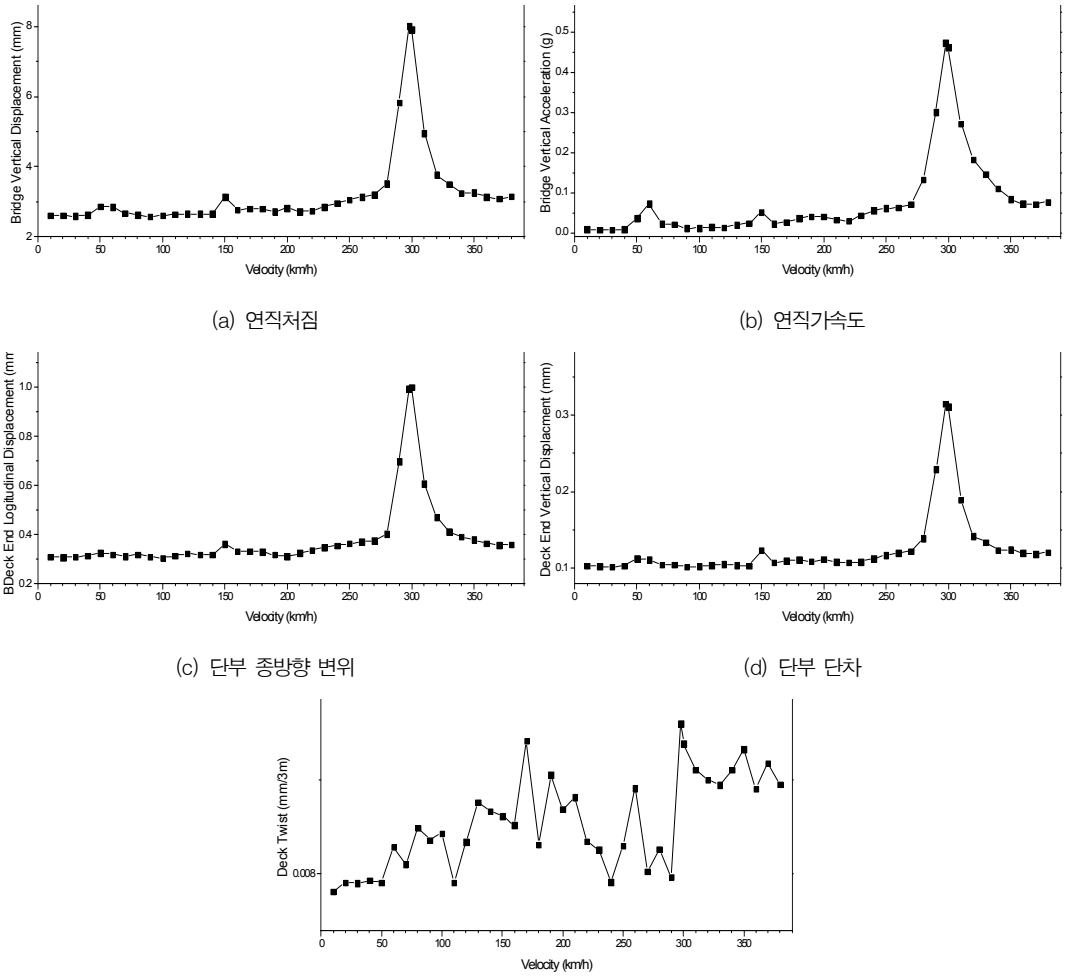


Fig. 8 고유진동수 해석결과 : 4.43Hz

먼저 고유치해석을 우선 수행하여 고유벡터인 모드형상을 분석할 수 있었다. 해석 대상 WPC 거더 철도교량의 첫 번째 휨 고유진동수는 4.43Hz로(Fig. 8) 철도설계기준 및 호남고속철도 설계지침을 만족하고 있음을 알 수 있었다.

동적 수치해석 결과를 통해 얻어진 WPC 거더 철도교량의 동적성능 결과 값을 Fig. 9에 도시하였으며, 앞서 기술한 동적 기준치와 비교 검토하여 철도교량에 적용함에 있어서 동적성능 기준을 만족하는지에 대한 검토를 수행한 경우이다.

유한요소 해석모델을 바탕으로 10차 모드까지 고려하여 모드중첩법을 이용한 동적 해석을 수행하였으며, 해석 결과로부터 앞에서 언급한 동적성능 기준인 중앙부의 연직처짐, 연직 가속도,



(a) 연직처짐

(b) 연직가속도

(c) 단부 종방향 변위

(d) 단부 단차

(e) 면틀림

Fig. 9 KTX 열차운행에 따른 동적성능

단부꺽임각, 단부단차, 면틀림에 대한 열차종류 및 속도대역별 응답 값을 분석한 결과 동적성능이 만족한 것으로 나타났다.

3.2 공진대역

철도교량은 일정한 축간격을 가진 열차가 주행함으로써 구조물과의 상호작용으로 인해 공진의 가능성이 존재하게 된다. 또한 중량의 열차하중이 고속으로 주행함에 따라 처짐과 가속도 등의 동적 물리량에 대한 안정성 검증이 필요하다.

단순보인 경우 열차의 유효타격거리와 교량연장의 관계에 따라 공진소멸현상이 나타난다. 이에 따르면 새마을호 및 화물열차의 경우에는 35m의 지간장에서 공진소멸 경간장이 나타나므로 매우 유리한 것으로 나타난다. 하지만 고속열차 주행의 경우 공진대역이 Fig. 10과 같이 나타나는데, 이는 단면의 증가에 따라 공진 속도대역이 증가함을 보여준다. 따라서 공진 속도대역을

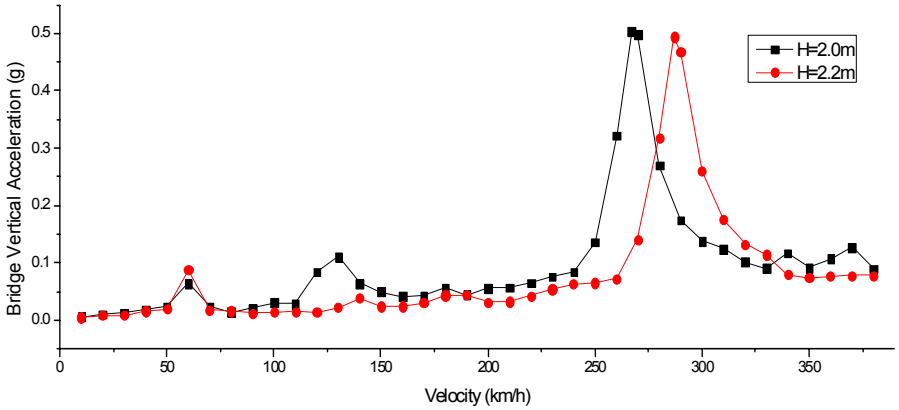


Fig. 10 단면변화에 따른 공진대역 전이

회피할 수 있는 설계단면이 요구되는데, High Performance Concrete를 사용한다면 강성 및 질량의 변화를 줌으로써 동적성능을 개선할 수 있는 하나의 방안이 되지 않을까 생각한다.

4. 맺음말

철도교량에서 동적성능이 매우 중요하게 다루어지는 이유는, 철도교량의 경우 도로교와 달리 사하중에 대한 활하중의 비율이 매우 크며 다량의 객차 또는 화차가 고속으로 일정한 간격으로 주행하므로 발생하는 구조물과 열차하중의 상호작용에 의한 영향이 구조물 성능에도 매우 큰 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 열차의 주행안전성, 유지보수 또는 승객의 승차감과 연관된 사용성에 영향을 주기 때문에, 이러한 측면의 동적 설계기준에 대한 만족여부를 판단하는 것이 철도교량의 형식선정에 있어 매우 중요하다.

본 기술기사에서는, 국내외 철도교량의 동적성능기준을 살펴보고 동적성능 검토의 적용 예를 수치해석적 결과를 통해 살펴보고 철도교의 적용성을 알아보았다. 향후 더욱 실용적이며 효율적인 형식의 철도교량이 더욱 많이 개발되어 현장에 적용되길 바라며, 토목기술 발전에 끈임 없는 노력하시는 모든 기술자 분들께 감사의 마음을 표현합니다.

참고문헌

1. WPC GIRDER 철도교량의 동적거동 분석, KRRI, 2012
2. 한국철도시설공단, “철도설계기준(노반편)”, 2011.

담당 편집위원: 김현기
(한국철도기술연구원
철도구조연구실 선임연구원)
hkkim@krri.re.kr