

철도교량 동적안정성 확보를 위한 거동한계기준에 대한 분석

Investigation of Traffic Safety Requirements for Railway Bridge

김성일* 정한욱** 이두재** 문제우** 김종태**
Kim, Sung-Il Jeong, Han-Uk Lee, Doo-Jae Mun, Je-U Kim, Jong-Tae

ABSTRACT

Dynamic instability of the railway bridge can cause track irregularities and be directly connected with unstable passenger comfort and derailment of the train. Europe and Japan had studied on this problem for a long time since 1960's, Results of those studies are reflected in recent Eurocode and the bridge design code of Japanese railway bridges. However, even though some traffic safety requirements were applied in Kyoung-bu highspeed railway by French engineers, we experienced many difficulties from insufficient information of criteria background and application procedures. In this paper, a investigation of recent traffic safety requirements of Europe and Japan for railway bridges will be introduced and application procedures for the estimation of dynamic performance will be proposed.

1. 서론

철도교량의 동적 불안정성은 궤도틀림 등 궤도구조의 불안정성과 직결될 수 있으며 이는 승객의 불안정한 승차감 및 열차의 탈선까지 연결될 수 있다. 유럽, 일본 등 철도선진국의 경우 60년대부터 지속적인 연구를 통해서 철도교량의 동적거동 한계기준을 제정하기 위하여 노력하였으며 이와 같은 연구결과는 최근의 Eurocode 및 일본의 철도교 설계기준에 반영되고 있다. 반면 국내의 경우 경부고속철도 설계에 프랑스 기술진에 의해 이와 같은 규정이 반영된 바 있으나, 규정의 수립 배경과 적용절차 및 방법 등에 대한 상세한 정보가 부족하였다. 본 논문에서는 유럽과 일본의 관련 최신규정을 조사/분석 하였으며, 적용절차 및 방법에 대한 구체적인 제시를 하고자 한다.

2. 동적거동 한계기준의 필요성 및 적용범위

철도교량은 도로교량과 달리 일정간격을 갖고 반복되는 축하중의 작용에 의한 동적거동이 매우 중요하다. 국내에서도 경부고속철도 도입과 함께 이 분야의 중요성이 인식되어지기 시작되었다. 반면, 유럽과 일본은 1960년대 이후로 지속적으로 관련 연구를 수행하여 철도구조물의 설계에 반영하고 있다. 일반 철도교량에 있어서 주행열차하중에 대한 동적거동 검토가 필요한지에 대한 여부는 엔지니어들에게 많은 혼란을 주고 있으며, 고속철도의 경우는 경부고속철도 건설 시 프랑스 기술진에 의해 제안된 'Bridge Design Manual'에 이와 관련된 규정이 있으나, 구체적인 적용 방법 및 해석방법 등에 대한 해설이 부족하였다.

* 정회원, 한국철도기술연구원 궤도토목연구본부, E-mail : sikim@krri.re.kr
TEL : (031)460-5354 FAX : (031)460-5359

** 한국철도시설공단 KR연구소

유럽의 ERRI D214 위원회는 다음과 같이 열차의 운행속도별, 교량의 지간별로 동적거동 검토 필요 여부에 대한 흐름도를 그림 1과 같이 제시하고 있으며, 이는 Eurocode에도 반영되었다. 그러나, 그림 1의 흐름도는 단순보거동을 하는 교량에 한정하는 등 여러가지 조건에 의해 제한되고 있으며, 열차의 운행속도가 200km/h를 초과하거나 실제 운행속도가 교량의 공진을 유발하는 속도 부근일 경우 기본적으로 동적해석에 의한 검토를 수행하도록 되어있다.

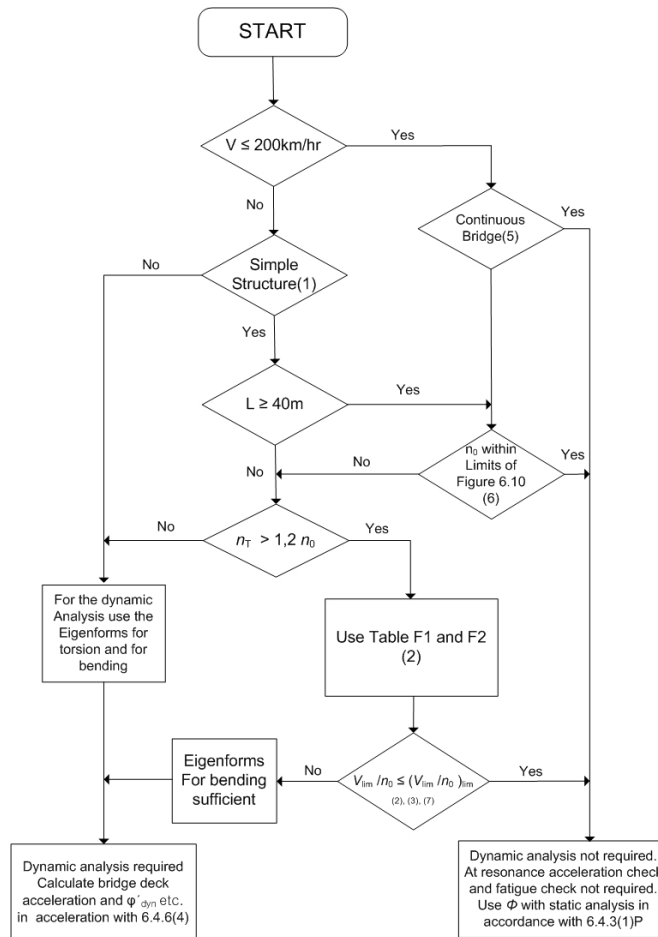


그림 1. Eurocode의 주행열차하중 동적해석 필요 여부 결정에 대한 흐름도

한편, 일본의 설계기준은 충격계수에 속도의 영향을 고려하고 있으며 2006년에 제정된 ‘철도구조물등 설계기준/동해설 - 변위제한’편의 기준은 주행안전성 관련 기준 및 승차감과 관련된 사용성 기준을 별도로 규정하고 있다. 이와 같은 기준은 교량/열차 상호작용해석에 의한 검토를 기본으로 하고 있으며 각각 탈선에 대한 안전한계와 차량의 연직가속도에 기반을 둔 분석을 통해 산출된 값이다. 또한 새로운 영철 운행속도 360km/h급 신간선에 대한 매우 엄격한 기준을 추가하였다.

국내의 경우에도 운행속도 300km/h 이상인 고속철도는 공진의 위험성 등을 고려해 반드시 주행열차하중에 대한 검토를 수행해야 하며, 일반철도의 경우 많은 경량화/장대화 등 동적거동에 취약할 수 있는 신형식 교량들이 개발되고 있는 점과 이에 대한 동적거동 검토 여부에 대한 설계자의 혼란을 방지하기 위해 국내 운행열차의 가진특성을 반영한 Eurocode와 같은 흐름도를 제시할 필요가 있다고 사료된다.

흔히 엔지니어들이 오해하고 있는 것은 정적설계의 충격계수와 동적해석에 의해 실제로 산출된 동적증폭계수이다. 철도교량의 동적거동 검토를 수행할 경우 동적해석에 의해 산출된 응답값과 충격계수를 고려한 정적설계에 의한 응답 중 불리한 응답을 설계에 반영하면 된다. 정적설계의 충격계수는 안전을 개념의 계수이며 실운행열차 동적해석에 의한 동적증폭계수와 직접적 관계가 없다. 정적설계의 충격계수와 실운행열차 동적해석에 의한 동적증폭계수의 비교는 무의미하며, 실운행열차 동적해석에 의한 동적증폭계수가 정적설계의 충격계수보다 크게 산출된다고 해서 이를 충격계수로 반영해 설계하중에 적

용할 수 없다.

3. 주행안전성 검토를 위한 동적해석 방법 및 조건

고속철도 교량의 주행열차하중에 대한 해석은 시간이력해석 혹은 모드중첩법에 의한 동적해석을 적용하며, 시간간격은 충분히 작아야 한다. 즉, 모드중첩법을 사용할 경우 첫번째 휨모드와 비틀림모드 등이 반드시 포함되어야 하며 국부모드를 제외한 전체모드가 충분히 고려되도록 모드 범위를 잡아야 한다. 또한, 동적해석은 교량 시점부터 출발하여 열차가 교량을 완전히 통과할 때까지 시간간격별로 수행되어야 한다. 주행열차하중에 대한 동적해석은 열차의 마지막 축이 완전히 교량을 통과할 때까지 수행되어야 한다. 즉, 교량의 경간이 40m이고 KTX 열차의 첫번째 축에서 마지막 축까지의 거리가 약 380m라면 첫번째 축의 총 주행거리는 마지막축이 교량을 완전히 통과할 때까지인 420m 이상이 되어야 한다.

해석의 속도범위는 Eurocode의 경우 설계속도의 1.2배까지, 프랑스 기준인 CTRL의 경우 1.1배까지 수행하도록 되어있다. 최고속도와 별도로 주행열차하중에 대한 동적해석 전에 자유진동해석을 수행하여 공진을 일으킬 수 있는 임계속도를 미리 산정하고 이 속도를 해석범위에 반드시 포함하여야 한다. 임계속도 산정은 다음과 같다.

$$V_{cr} = \omega_1 \times S_{eff} \quad (1)$$

여기서, ω_1 은 교량의 첫번째 휨 고유진동수이며, S_{eff} 는 열차의 지배적타격간격으로 객차간 중심 사이의 거리이며 KTX와 G7 열차의 경우 18.7m 이다.

한편, 일정간격으로 진행되는 하중에 대하여 공진이 억제되는 공진소멸현상(resonance suppression)은 특정열차가 주행하는 철도교량에 대하여 교량의 지간과 축간격의 함수로 결정되는 현상으로서 철도교량에 적용 시 가장 위험한 응답을 유발하는 공진이 억제될 수 있는 이론이다 [8, 9]. 공진소멸을 결정하는 지간은 다음식과 같다.

$$L(m) = S_{eff}(m) \times (i + 0.5) \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

따라서, 18.7m의 지배적타격간격을 가지는 KTX나 G7열차에 대하여 다음 28.05m, 46.75m 등의 지간 혹은 이에 근접한 지간은 식 (1)에 의해 구해진 공진을 발생시키는 임계속도로 주행하여도 공진이 억제되는 안정적인 응답을 얻을 수 있다.

Eurocode 및 국내의 철도설계기준(철도교편)에는 다음과 같이 고유진동수의 상하한 범위를 규정하고 있다. 그러나, 이는 동적해석 필요 여부를 판단하기 위한 기준으로 하한치는 교량의 과도한 유연성을 방지하여 안전성 및 사용성을 높이기 위한 기준이다.

$$\begin{aligned} \text{첫번째 휨 고유진동수(Hz) 하한치 : } n_0 &= 80/L & L &= 4.0 \sim 20.0\text{m} \\ &= 23.58 \times L^{-0.592} & L &= 20.0 \sim 100.0\text{m} \end{aligned}$$

동적해석에 적용되는 대상열차하중은 실제 운행열차를 적용하며 모델링은 일반적인 검토 시 연행집중하중으로 고려한다. 궤도면 불규칙성의 고려, 승차감의 분석 등 보다 정밀한 해석의 경우에는 열차의 운동을 고려하는 교량/열차 상호작용해석을 수행할 수 있다. 일본의 경우에는 철도총합연구소(RTRI)에서 개발된 DIASTARS를 주로 사용하고 있다. KTX 20량 편성 축중배치도는 그림 2와 같다.

교량의 모델링은 정적설계 시 사용한 격자모델 이상의 모델을 적용해야 하며, 박스거더 교량 등에 대하여 공간뼈대요소로 단순화할 경우 실제 하중 위치를 적용할 수 있도록 편심이 반드시 고려되어야 한다. 교량의 모델링에 사용되는 재료 및 단면특성치는 정적설계에서 적용한 값을 사용하는 것이 안전측으로 볼 수 있다. 강성의 저평가는 임계속도를 낮추는 효과가 있는 반면 고평가는 임계속도를 높여 설계속도를 벗어나게 할 수도 있다. ERRI D214 위원회의 연구결과에도 실제 구조물의 강성은 궤도구조의 강성기여 등에 의해 14-23% 증가한다는 연구결과가 있으며 많은 실험적 연구에 의해 입증된 바 있다.

또한 동적탄성계수(Dynamic Young's Modulus) 역시 정적탄성계수보다 높은 것이 일반적이므로 정적설계에서 사용된 단면 및 재료특성값은 동적해석 시 충분히 안전측으로 볼 수 있기 때문이다. 또한 균열 발생에 의한 강성저하를 우려할 수 있으나, 반대로 감쇠비가 상승하는 효과가 있다.

또한, 자중 및 궤도구조의 질량 등 2차 고정하중을 포함한 모든 부재의 질량이 고려되어야 한다. 강성과 반대로 질량의 저평가는 임계속도를 상승시킬 수 있다. 따라서, 임계속도가 충분히 고려될 수 있도록 질량이 모두 고려된 안전측을 사용한다. 그러나, 질량이 증가할수록 가속도 응답은 저감되는 면이 있으므로 가속도 응답이 한계기준에 근접할 경우 질량효과를 낮춘 모델을 고려하여 재평가 할 수도 있다.

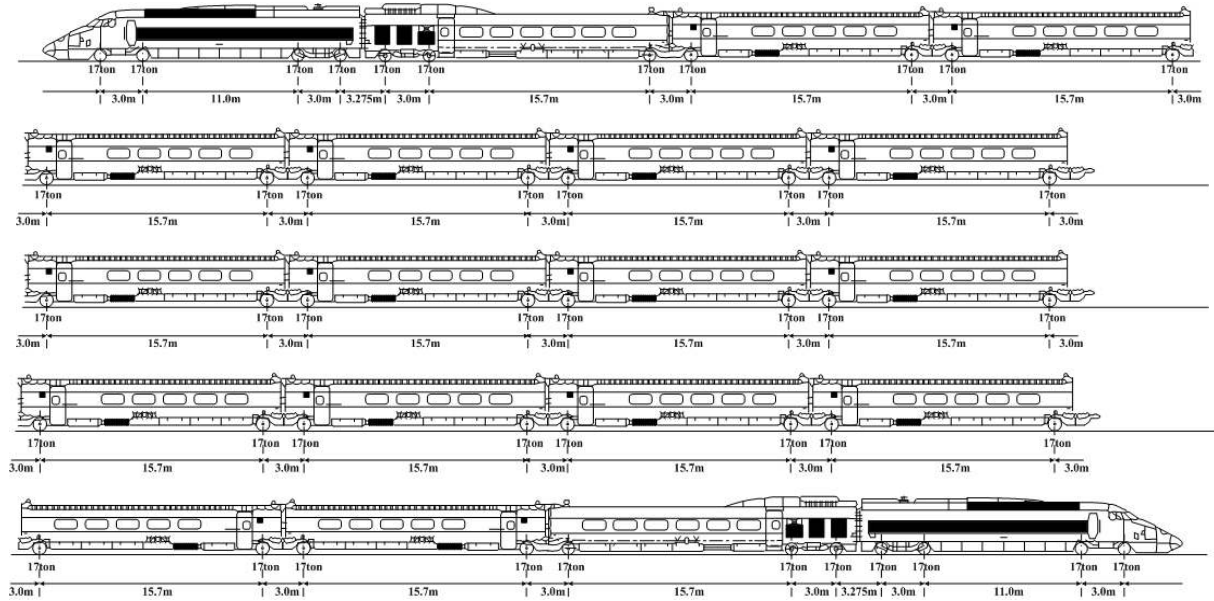


그림 2. KTX 하중선도

Eurocode에서는 동적해석 시 하중 재하는 단선, 복선교량에 관계없이 그림 3과 같이 궤도 중심에 따른 단선재하를 원칙으로 한다. 정적해석의 경우에는 최대 처짐이 유발되도록 하중재하를 함이 원칙이나, 주행열차하중에 대한 동적해석의 경우 공진에 대한 명확한 거동 분석 및 실열차 재하의 특성을 고려하여 단선재하를 원칙으로 한다.

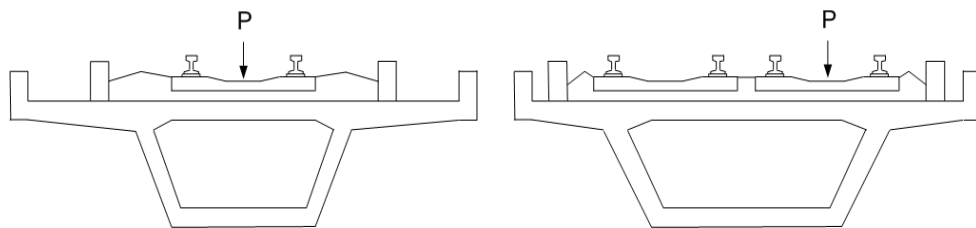


그림 3. 하중재하 점

동적해석 시 감쇠비의 가정은 매우 중요한 문제이다. 일반주행속도에서 감쇠비는 동적응답에 큰 영향을 미치지 못하나, 공진이 발생하는 임계속도 부근에서는 감쇠비는 동적응답에 매우 지배적인 영향을 준다. Eurocode에서는 교량형식 별 감쇠비를 표 1과 같이 제시하였으며, 안전측을 고려해 하한치를 적용할 것을 제안하고 있다.

Eurocode의 감쇠비 기준은 실교량에 대한 다수의 실험결과를 형식별로 정리하여 얻은 값이다. 그러나, 실제 구조물의 감쇠는 점성감쇠 보다는 구조적감쇠 특성이 있으며 처짐이력 등에 영향을 받아 큰 응답이 발생할 경우 감쇠비도 커지는 경향이 있다. 스페인 등에서는 실험결과에 의해 그림 4와 같이 강교나 강합성 교량의 경우에는 Eurocode와 같은 0.5%를 사용하나, 콘크리트교나 PSC 교량의 경우에는 실험결과에 근거해 상향된 감쇠비인 2%를 적용하는 사례도 있다. 국내에서도 많은 실내외 실험결과를 통해 합리적인 감쇠비 적용 기준을 마련할 필요가 있다.

표 1. 구조형식별 감쇠비 하한값 (Eurocode)

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

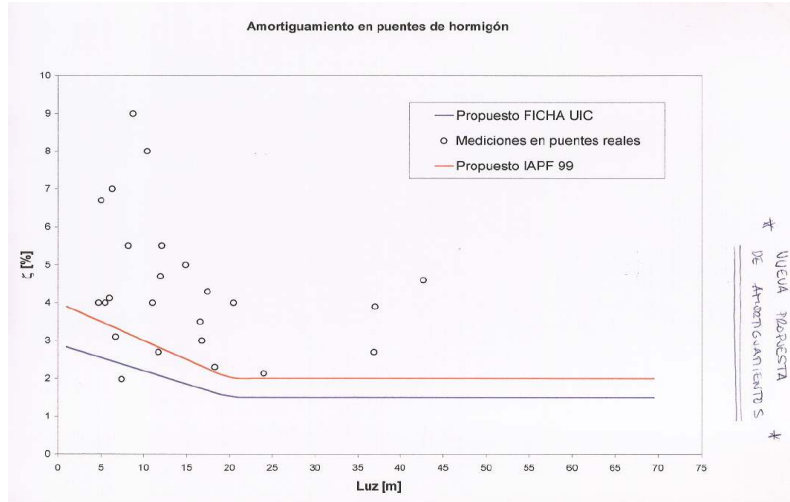


그림 4. 스페인의 감쇠비 기준 (콘크리트 및 PSC 교량)

4. 동적거동 한계기준

4.1 교량 상판의 연직가속도

상판의 연직가속도의 과도한 발생은 도상의 교란 등 궤도의 불안정성과 차륜/레일 접촉력의 감소, 윤중변동의 증가 및 교좌장치의 들림 등을 유발할 수 있으므로 제한되어야 한다. Eurocode는 교량 상판의 연직가속도 제한값으로 유도상궤도의 경우 0.35g, 콘크리트슬래브 궤도의 경우 0.50g를 규정하고 있다. 이는 ERRI D214의 연구결과로부터 제한된 값으로 실험결과 자갈도상의 교란 등 이상거동이 발생한 0.7~0.8g에 대하여 안전율 2를 적용하여 0.35g를 규정한 것이다.

4.2 교량의 연직방향 처짐

국내 경부고속철도의 처짐제한 규정은 L/1700을 사용하고 있으며, 일반철도교의 경우 ‘철도설계기준 - 철도교편’에 따라 속도별, 지간별로 제한되고 있다. Eurocode의 경우 LM71 혹은 SW0하중에 대하여 L/600으로 규정하고 있다. 단, 고속철도 등에 대하여 승차감 등을 고려하여 실 운행 열차하중에 대한 동적해석을 통해 속도별, 지간별로 그림 5와 같이 처짐에 대한 한계기준을 적용하도록 하고 있으며, 이에 대하여 단경간의 연속수, 연속교의 경우 등에 따라 감소계수를 적용할 수 있도록 하고 있다.

일본의 ‘철도구조물 등 설계표준/동해설 - 변위제한 2006’의 주행안전성을 고려한 변위제한은 차량의 탈선계수의 한계값과 윤중감소율의 한계값으로부터 구조물의 변위에 의해 발생하는 연직가속도의 한계값을 설정한 후 유도된 값을 열차/교량 상호작용해석을 통하여 검토하거나, 이것이 어려울 경우 간략모델에 의해 설정된 처짐한계값을 표 2와 같이 적용하도록 되어있다. 그러나 이는 새롭게 운행될 360km/h 신간선을 고려한 매우 엄격한 규정이며, 승차감을 고려한 기준의 경우 더욱 엄격한 규정이 적용되고 있다. 변위제한의 기준이 된 윤중감소율이 속도의 2승에 비례하는 경향이 있으므로 기존의 260km/h 설계에 비하여 크게 엄격해졌음을 알 수 있다. 이 일본기준은 콘크리트 슬래브궤도를 기준으로 작성한 값이다.

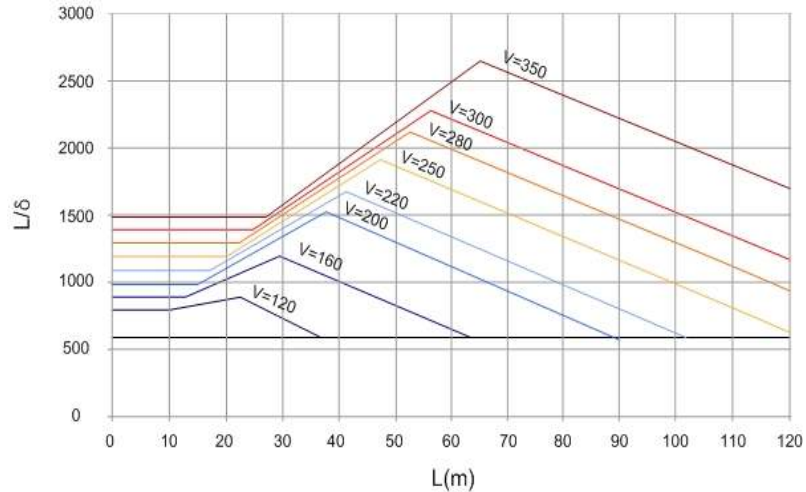


그림 5. Eurocode의 처짐 규정

표 2. 주행 안전성에서 정해지는 거더의 휨의 설계 한계값(일본기준 신칸센)

연수 (連數)	최고속도 (km/h)	거더 또는 부재의 스패ん 길이 L_0 (m)									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100이상
단련 (單連)	260	$L_0/700$									
	300	$L_0/900$									
	360	$L_0/1100$									
복수련 (複數連)	260	$L_0/1200$					$L_0/1400$				
	300	$L_0/1500$					$L_0/1700$				
	360	$L_0/1900$					$L_0/2000$				

처짐에 대한 검토 시, I형 거더교의 경우 최대처짐은 최외측거더에서 발생하며 PSC 박스거더 교량이나 소수주형 강합성형 교량의 경우 캔틸레버부가 취약할 수도 있다. 따라서 교량전체의 최대처짐 발생 부분에 대한 종합적 검토를 하여야 한다.

4.3 단부꺾임각

단부꺾임각에 대한 제한은 도상의 이완 방지와 부가적인 레일응력 증가를 억제하기 위한 것으로 자갈 도상궤도의 교량 단부회전각은 충격계수를 고려한 설계하중에 의한 정적응답과 실 운행열차 동적해석에 의한 동적응답은 다음을 만족하여야 한다.

표 3. 교량 단부꺾임각의 제한

HL하중 혹은 설계하중 적용시 (정적해석)	교대부 : θ_{\max} (rad) = 3.5 (단선교의 경우 6.5) $\times 10^{-3}$ rad 교각부 : $(\theta_1 + \theta_2)_{\max}$ (rad) = 5.0 (단선교의 경우 10.0) $\times 10^{-3}$ rad
고속철도 등에 대한 실 운행열차 적용시 (동적해석)	교대부 : θ_{\max} (rad) = (2.0 $\times 10^{-3}$) / h rad 교각부 : $(\theta_1 + \theta_2)_{\max}$ (rad) = 4.0 $\times 10^{-3}$ / h rad h : 레일중심과 교좌장치 중심까지의 거리

콘크리트 슬래브 궤도에서는 도상 이완의 가능성이 없으므로 단부변위를 제한하지 않고 직접적으로 레일응력과 체결장치의 부상력을 규정하고 있다. 따라서, 궤도-레일 상호작용과 관련된 규정인 교량 단부에서의 부상력(uplift force), 압축력, 들림 등의 직접적인 검토에서 단부꺾임각을 포함하여 고려한다.

4.4 교량 상판의 면틀림

면틀림은 차륜과 레일의 접촉에 대한 안전을 확보하여 탈선 위험을 최소화하기 위한 것으로 3m떨어진 두 지점에서의 양쪽레일에 대한 캔트의 변화량(mm/궤도1m)을 의미한다. 즉, 고속철도 교량의 경우 실제 운행열차하중에 의한 동적해석에서 3m 떨어진 두 지점의 최대 변화량이 1.2mm 이내여야 함을 의미한다.

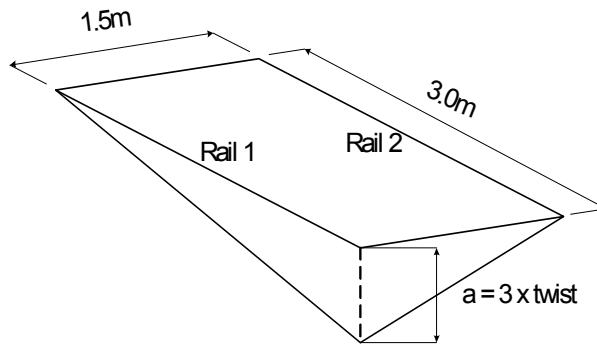


그림 6. 면틀림의 정의

표 4. 교량 상판 면틀림의 제한

속도(km/h)	면틀림(mm/m)	3m 기준 면틀림 변화량
$V \leq 120$	1.5	4.5mm/3m
$120 < V \leq 220$	1.0	3.0mm/3m
$220 < V$	0.5	1.5mm/3m
실 고속차량(동적계수 포함)	0.4	1.2mm/3m

5. 결론

철도교량의 동적안정성은 주행안전성 및 승객의 승차감과 관련하여 매우 중요한 확보 대상이다. 일정 간격을 갖고 반복되는 열차의 축하중은 도로교량과 전혀 다른 동적하중 조건을 유발하여 교량 설계에 있어 지배적인 요소가 될 수 있다. 본 논문에서는 이와 관련한 유럽 및 일본의 최신 관련 규정을 분석하였으며, 적용방법 및 조건 등에 대하여 서술하였다.

유럽 및 일본과 같은 철도선진국의 경우 철도교량의 동적거동에 대한 장기간의 실험 및 이론적 연구를 통하여 관련 규정을 개정하고 있는 상황이다. 국내 경부고속철도 계획 및 건설 시에는 이에 대한 대책이 미비하여 교량 구조물의 형식이 변경되었던 사례도 있었다. 따라서, 다가오는 호남고속철도 건설에서는 이에 대한 명확한 규정 적용이 필요하다고 판단된다. 또한, 경량화/장대화에 의해 향상된 경제성 및 구조적 효율성을 지향하는 신형식 철도교량의 적용성 판단에도 활용하기 위한 규정 마련이 시급하다고 판단된다.

향후 연구에서는 국내에서 운행되는 열차의 가진특성을 분석하고 이를 반영한 동적거동 한계기준이 검토되어야 하며, 또한, 다양한 교량 형식에 대한 실험 및 이론적 연구를 통해 국내 고유의 기준수립을 위한 연구가 진행되어야 한다.

감사의 글

이 연구는 한국철도시설공단에서 시행하고 있는 ‘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. Channel Tunnel Rail Link(1999), Loading and Particular Criteria for CTRL Railway Bridges, Rail Link Engineering.
5. 한국철도시설공단(2004), 철도설계기준(철도교편), 한국철도시설공단
6. 한국철도시설공단(2005), 고속철도설계기준 - 노반편, 건설교통부
7. 일본 국토교통성철도국 (2006), 철도구조물등설계기준/동해설 - 변위제한, 철도총합연구소
8. Y.B. Yang, J.D. Yau & L.C. Hsu, "Vibration of Simple Beams due to Trains Moving at High Speeds", Engineering Structures, 19(11), 1997, pp.936-944
9. 김성일, 곽종원, 장승필, "교량의 지간장과 고속전철하중 유효타격간격 사이의 관계에 따른 공진현상", 한국지진공학회 논문집, 제 3권 2호, pp.67-75, 1999.6