

# 이동하중 해석 및 철도교량 주행안전성/승차감 기준

## Moving Load Analysis and the Railway Bridge Specification for Traffic Safety and Passenger Comforts



김성일\*

\* 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원

### 1. 서론

#### 1.1 이동하중 해석의 역사적 배경

19세기 철도교량이 건설되면서부터 빠르게 교량 위를 주행하는 열차가 교량에 움직이면서 어떤 영향을 주는가에 대한 사람들의 의문이 시작되었다. 이동차량하중의 구조물에 대한 영향은 Inglis, Timoshenko, Fryba 등의 연구자에 의해 선구적으로 수행되었으며, 단자유도시스템에 대한 강제

진동의 이론적 해를 구하는 것에서 출발하였다고 볼 수 있다. 이와 같은 연구는 교량의 이상화 및 차량의 이상화 방법에 따라 그림 1과 같이 정리할 수 있다.

도로 혹은 철도에서 차량이 점점 고속화/중량화되는 반면, 교량의 장경간화/경량화는 이러한 이동 차량하중의 중요성을 더욱 부각시켜 연구자의 관심을 이끌었으며, 컴퓨터의 발달 및 유한요소해석기법의 발달과 더불어 본격적으로 교량 및 차량에 대한 수치모델 수립 및 해석기법이 발달되었다. 이후 교량/차량의 모델링방법 및 교량/차량에 영

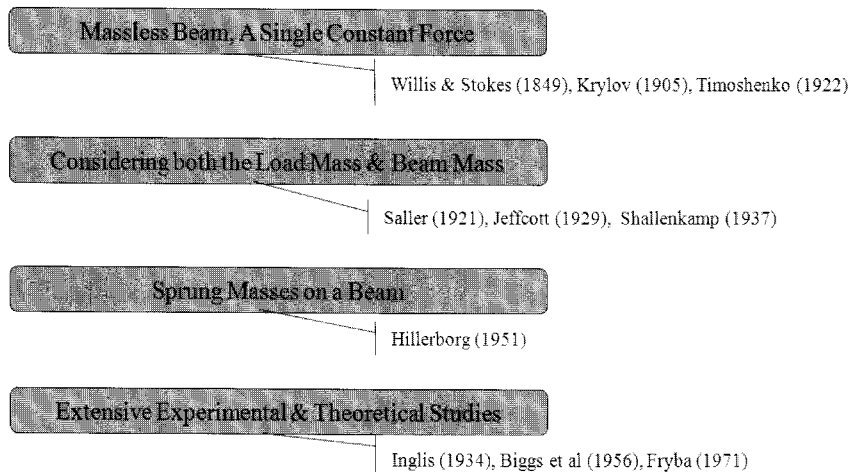


그림 1 초기 이동차량하중의 구조물에 대한 영향 연구

향을 미치는 매개변수에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 그 중 주요한 연구로는 곡선교에 대한 연구(Tan & Shore(1967), Christiano(1967), Chaudhuri(1975)), 철도교에 대한 연구(Machida & Matsuura(1983), Chu et al.(1985), Wang(1986)), 노면 불규칙성에 대한 연구(Scheffy(1956), Dodds & Robson(1973), Honda et al.(1982), Hamid et al.(1991)), 제동하중을 고려한 연구(Gupta & Traill-Nash(19880), Mulcahy et al.(1983), 광종원(1995)), 현가장치 특성을 고려한 연구(Page(1974), Kunjamboo & O'Connor(1984), 황의승(1990)), 축간격에 대한 연구(Walker(1968), Veletos & Huang(1970)), 차량의 초기진동(Honda et al.(1986), Kou(1997)) 등이 있다.

1.2 철도교량에 대한 연구

1990년대 이전의 이동하중에 대한 연구는 도로교량을 위주로 발달되어 왔으나, 교량에 작용하는 하중 중 자동차, 트럭 등에 의한 동적하중은 지배적인 하중이 될 수 없으므로 자연스럽게 철도교량으로 그 중심이 이동되고 있다.

철도교량은 고속/중량의 열차하중이 일정한 간격을 갖고 반복되는 축하중 작용에 의해 항상 공진(Resonance)이라는 극도로 위험한 현상을 경험할 가능성이 있으므로 이 분야 연구의 중요성이 크게 부각되고 있다. 특히, 반복 축하중에 의한 공진개념이 일반화 되면서 본격적으로 철도교량의 이동하중 관련 연구가 전 세계적으로 진행되고 있으며, 고속철도 교량의 경우 설계속도가 300km/h를 상회하는 바, 일반적인 교량 구조물은 필연적으로 공진이 나타나며, 이에 대한 설계 검토가 필수적인 사항이 되고 있다.

철도 선진국인 유럽과 일본을 중심으로 이에 대한 연구가 진행되고 있으며, 지속적인 연구결과는 Eurocode 및 신간선 설계기준으로 반영되고 있다. 일본은 철도종합연구소인 RTRI를 중심으로 이 분야 연구가 진행되고 있으며, 특히 일본의 RTRI(Hajime Wakui & Masamichi Sogabe)는 1980년 초반부터 이 분야의 연구를 지속적으로 수행하고 있으며, 열차/교량 상호작용에 대한 DIASTARS라는 소프트웨어 개발을 통해 가장 선도적인 연구 성과를 이뤄내고 있다.

유럽의 경우 1950년대부터 ERRI(European Rail Research Institute)라는 유럽내 국가 간의 특별위원회 활동을 통해 이 분야의 연구를 진행하고 있으며, ‘철도교량에서의 동적하중의 결정’이란 1955년의 D23위원회를 시작으로 160km/h 이하 설계속도 교량을 대상으로 했던 D160, 최근 유로코드의 관련기준 근간이 된 200km/h 이상 교량의 동적거동에 대한 D214 위원회까지 진행되었다. ERRI의 연구는 실험적 연구가 주를 이루고 있으며, 이론적 연구의 경우 열차의 복

잡한 모델링 보다는 2차원 모델링 등에 의한 실용적 프로그램을 기반으로 하고 있다.

이외, 고속철도가 도입되고 있는 국가를 중심으로 이 분야의 연구가 진행되고 있으며, 대만의 Yang은 1990년대 공진소멸(Resonance Cancellation)이론을 수치적으로 증명하였으며, 교좌장치의 탄성고려, 열차하중 작용 시 동시에 지진하중이 작용할 시의 분석 연구를 수행하고 있다.

국내에서도 고속철도의 도입과 더불어 각 대학에서 교량/열차 상호작용해석 프로그램 개발을 위한 연구가 진행되었으며, 건설기술연구원은 국책사업을 통해 장기간에 걸쳐 고속철도 교량의 동적거동에 대한 연구를 수행하였으며, 시험선 노선부터 현재 상업운행 중 상태까지 실험계측 연구를 수행하고 있다.

철도기술연구원은 고속철도 외에도 일반철도 노후교량(국내 비중이 가장 큰 노후 강관형교 등)에 대한 실험연구, 신형식 철도교의 성능평가, 자기부상 열차 가이드웨이 등 열차 특성화된 교량의 동적거동 연구를 진행 중이며, 한국철도시설공단의 지원을 받아 국내최초로 철도교량 주행안전성 및 승차감 기준 수립을 위한 연구를 수행하여 ‘호남고속철도 설계지침(2007)’에 그 결과를 반영한 바 있다.

2. 이동하중해석

2.1 차량 및 교량의 매개변수

차량이 교량 위를 주행하게 되면 상호 간의 작용으로 인해 서로 영향을 받게되며, 이를 정리하면 그림 2와 같다.

이에 대한 분석을 위해 차량에서는 차량의 운동인 bouncing, pitching, rolling, yawing 등을 고려하며, 축간격, 현가장치 및 대차시스템의 특성, 제동특성 등을 고려한다. 교량에서는 교량의 연직방향 운동 외에 각 방향 운동을 고려하며, 상/하부구조의 영향을 분석하고, 주행면 불규칙성을 고려한다.

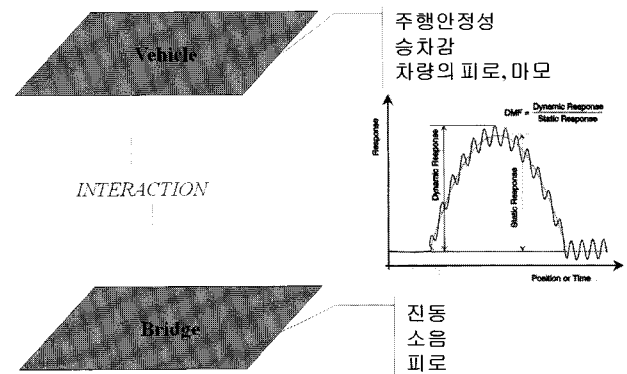


그림 2 차량/교량 상호작용으로 인한 영향

## 2.2 차량 및 교량의 모델링

차량/교량 상호작용 해석은 다음과 같은 차량 및 교량의

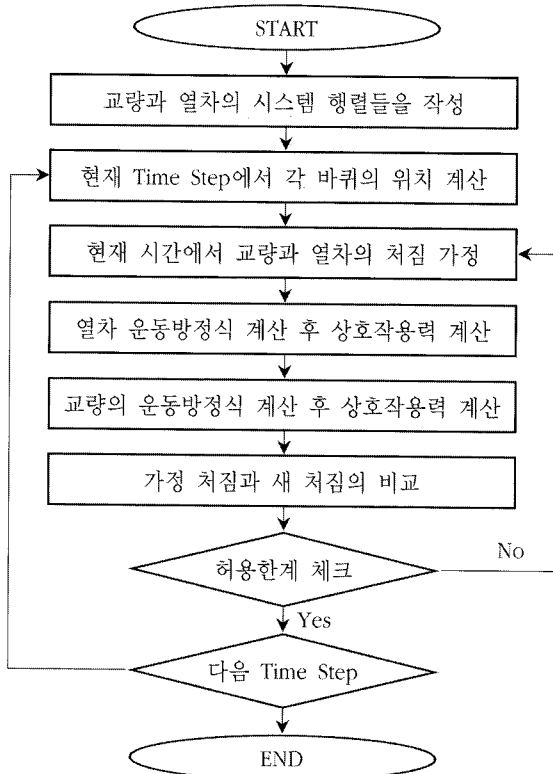


그림 3 차량/교량 상호작용해석의 일반적 흐름도

지배적인 운동방정식으로부터 구하며, 상호작용력을 통해 커플링된 방정식을 풀게 된다.

$$[M_B]\{\ddot{u}_B\} + [C_B]\{\dot{u}_B\} + [K_B]\{u_B\} = \{F_t\}$$

$$[M_v]\{\ddot{u}_v\} + [C_v]\{\dot{u}_v\} + [K_v]\{u_v\} = \{P_t\}$$

그림 3은 차량/교량 상호작용해석의 일반적인 흐름도를 나타낸다.

교량의 모델링은 초창기 보 요소만을 사용한 방법에서 최근에는 쉘요소 및 특수요소 등을 사용한 상세화된 모델링이 적용되고 있다.

교량의 강성 및 질량에 대한 합리적인 고려는 전체적인 거동을 예측하는데 있어 매우 중요한 요소이다. 교량의 강성은 고유진동수, 변위 등 응답에 직접적인 영향을 주며, 질량의 평가는 고유진동수, 교량의 가속도 산정에 큰 영향을 주게 된다. 또한, 감쇠비의 가정은 공진 시 응답에 절대적인 영향을 미친다. 최근의 연구동향은 이에 대한 적합한 평가를 위해 많은 실험적 연구가 수행되고 있다.

차량의 모델링은 상호작용을 고려하지 않는 이동집중하중에 의한 것이 설계에서 일반적으로 적용되고 있다. 교량과의 상호작용 분석을 위한 1자유도 이상의 현가장치를 고려한 모델링은 주행면 불규칙성의 영향, 차량 승차감의 직접적인 평가, 휠/레일 접촉문제의 고려 등을 위해 지속적으로 개발되고 있다. 그림 4는 다자유도 열차모델링의 예를 나타낸다.

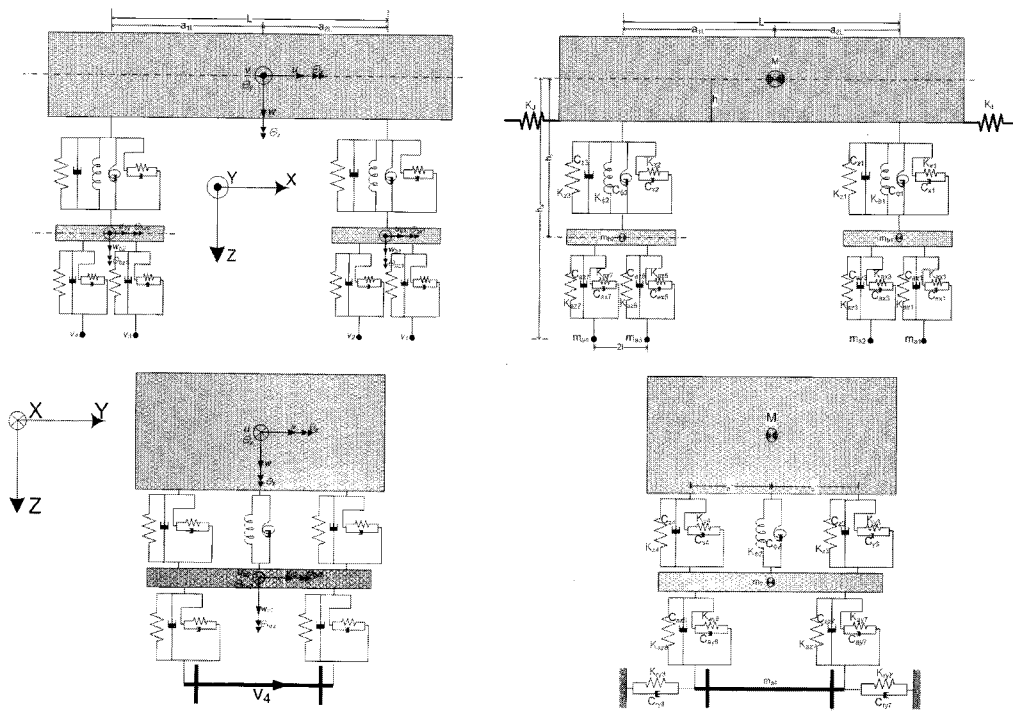


그림 4 4축 열차의 모델링 예

### 2.3 공진 및 공진소멸

열차하중에 의한 교량의 동적거동은 교량의 동적특성과 차량의 동적운동에 의해 결정되어 진다. 즉, 교량의 고유진동수(natural frequency), 차량의 속도와 유효타격간격(effective beating interval)에 의해 교량의 공진현상을 예측할 수 있다. 즉, 다음식과 같이 교량의 고유진동수와 차량의 가진진동수(exciting frequency)가 일치할 경우 공진현상이 발생하게 되어 매우 불안정한 동적거동을 유발하며, 이는 주행안전성 및 승객의 승차감에도 나쁜 영향을 준다. 그림 5는 등간격의 연행하중에 진행할 경우의 공진현상과 그에 따른 임계속도를 보여준다.

$$\Omega(\text{Hz}) = V / S_{\text{eff}} = \omega_1(\text{Hz})$$

여기서,  $\Omega$ 는 열차의 가진주파수,  $V$ 는 차량의 속도이며  $S_{\text{eff}}$ 는 열차의 유효타격간격,  $\omega_1$ 은 교량의 첫 번째 고유진동수를 나타낸다.

그러므로 공진을 유발하는 차량의 임계속도(critical speed)는 다음식과 같이 나타낼 수 있으며, 교량의 고유진동수와 열차의 유효타격간격을 알면 공진을 유발하는 임계속도를 미리 예상할 수 있다. 임의의 차량이 임의의 간격으로 통과하는 도로교량과 달리 철도교량은 특정 열차만 주행하게 되므로 공진을 발생시키는 임계속도의 파악이 가능하다.

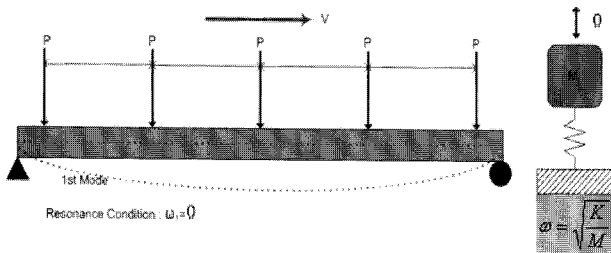
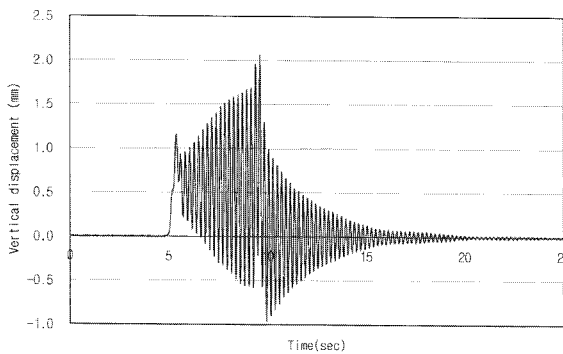


그림 5 등간격의 연행하중이 주행할 경우의 공진현상



$$V_{cr} = \omega_1 \times S_{\text{eff}}$$

여기서,  $V_{cr}$ 은 열차의 임계속도이다.

그림 6은 KTX 주행 시 공진 발생을 일으키는 임계속도 주행 시와 일반적인 속도에서의 연직변위의 시간이력의 현상 측정 결과를 보여준다

한편, H.Wakui(1992), Yang 등(1997)은 단순보와 연행 이동집중하중에 대하여 수학적 정식화에 의한 해석적 해를 통하여 연행 이동하중에 의한 단순보의 공진소멸현상을 언급하였다.

교량의 운행열차하중에 의한 동적응답은 특정시간에서 교량위에 위치한 축하중에 의한 동적응답과 이미 교량을 통과한 축하중에 의한 자유진동효과가 합쳐져 결정된다. 공진현상은 교량을 통과한 하중에 의한 자유진동 효과가 무한대로 발산하면서 결정되는 것인 반면, 공진소멸현상은 이와 달리 교량을 통과한 이동하중의 자유진동효과가 모두 소멸되는 항이 존재함으로써 교량의 동적응답이 현재 교량에 위치한 하중에 의해서만 결정될 때 발생하는 현상이다. 즉, 공진을 발생시키는 임계속도이나 소멸조건이 발산조건에 비해 우선됨으로써 안정적인 동적응답을 나타내는 것으로 수학적으로 다음식과 같다.

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

여기서,  $L$ 은 교량의 지간이다.

윗 식에서 주목할 점은 열차의 속도, 교량의 물성치 및 고유진동수 등과 관계없이 열차의 유효타격간격과 교량의 지간만으로 나타내어진다는 점이다. 즉, 열차의 유효타격간격이 결정되면 다른 어떠한 매개변수와 관계없이 교량의 특정 지간을 결정해 공진소멸을 유도하여 안정적인 동적거동을 확보할 수 있는 교량의 설계가 가능하다는 점이다. 다시말해, 특정열차가 주행하는 교량의 경우 이를 활용하면 공진으로부터 자유로운 동적거동 측면에서 대단히 안정적

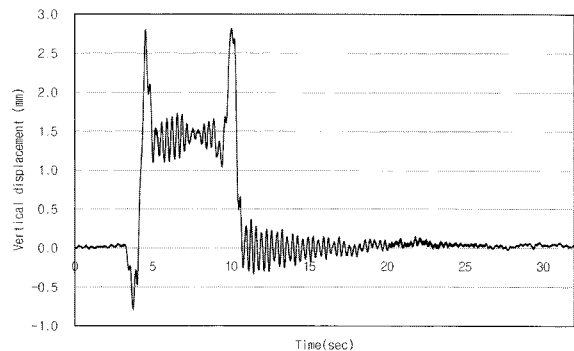


그림 6 임계속도 및 일반속도에서의 연직처짐 응답

인 교량을 설계할 수 있다. 일본의 경우 500km/h급의 초고속차기부상열차 시험선로에 이를 활용한 교량 건설을 실제로 적용하고 있다.

### 3. 주행안전성 및 승차감 평가 기준

전술한 바와 같이, 열차/교량 상호작용해석의 발달은 결과적으로 합리적인 교량의 주행안전성 및 승차감 평가기준 제정으로 귀결되고 있다. 복잡한 상호작용해석 모델을 통한 다양한 연구 수행은 실무 설계에 용이하게 적용할 수 있도록 합리적인 기준을 제정하는데 바탕이 되고 있다. 현재 Eurocode, 유럽 각국의 National Annex, 일본 신간선설계 기준에 이에 대한 기준이 적용되고 있으며, 국내에서도 경부고속철도에 유럽의 기준을 일부 도입한 것을 시작으로 한층 상세화 된 호남고속철도 설계지침 및 관련 연구가 수행되고 있다.

#### 3.1 동적해석의 필요유무 판단

일반적으로 설계속도 200km/h 이상에서는 공진의 발생 가능성이 매우 커지므로 동적해석을 수행해 주행안전성 및 승차감에 대한 평가를 수행하고 있다. Eurocode는 설계속도 200km/h 이하 교량의 경우 동적 분석이 필요한지에 대한 판단을 할 수 있는 과정을 수록하고 있으며, 국내에서도 한국철도기술연구원에서 최근 수행한 연구에 국내 운행열차의 가진특성을 고려하여 이에 대하여 제안한 바 있다.

결과적으로 운행열차의 가진특성을 고려해 공진의 발생 여부를 미리 판단할 수 있도록 제시하는 것이 합리적이다.

#### 3.2 교량의 감쇠비

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 교량 형식 별 감쇠비를 표 1과 같이 제시하였으며, 안전측을 고려해 하한치를 적용할 것을 제안하고 있다.

Eurocode에서 규정된 감쇠비는 매우 엄격한 값으로 볼 수 있다. 실제 구조물의 감쇠는 점성감쇠 보다는 구조적감쇠 특성이 있으며 처짐이력 등에 영향을 받아 큰 응답이 발생할 경우 감쇠비도 커지는 경향이 있다. 또한 기존 연구들의 실험결과 Eurocode의 감쇠비 하한치는 과도한 적용으로 판단되어져 일본, 스페인 등에서는 자율적으로 상향된 감쇠비를 적용하는 사례도 있다. 국내에서도 감쇠비 기준 수립을 위한 철도교량 실내/외 실험연구가 최근 수행된 바 있다.

#### 3.3 교량의 응답기준

##### 3.3.1 교량 상판의 수직가속도

상판의 수직가속도의 과도한 발생은 궤도의 불안정성과 차륜/레일 접촉력의 감소 및 교좌장치의 들림 등을 유발할 수 있으므로 제한되어야 한다. 상판의 수직가속도는 ERRI D214의 연구결과로부터 제한된 값으로 실험결과 자갈도상의 이상거동이 발생한 0.7~0.8g에 대하여 안전율 2를 적용하여 0.35g를 규정하였으며, 콘크리트궤도의 경우 0.50g를 적용하고 있다. 가속도의 과도한 발생은 운중변동의 증가와 도상의 교란, 교좌장치 부반력 발생 등을 억제하기 위한 것으로 철도교량의 안전성과 밀접한 관계에 있다. 최근 유럽에서도 안전율 2.0이 너무 과도하다는 지적이 도출되고 있으나, 주행안전성 및 궤도안전성 보장의 측면에서 현재까지 이와 같이 적용되고 있다.

##### 3.3.2 교량의 연직 처짐

국내 경부고속철도의 처짐제한 규정은 L/1700을 사용하고 있으며, 일반철도교의 경우 ‘철도설계기준 - 철도교편’에 따라 속도별, 시간별로 제한되고 있다. Eurocode의 경우 LM71 혹은 SW0하중에 대하여 L/600으로 규정하고 있다. 단, 고속철도 등에 대하여 승차감 등을 고려하여 실 운행열차하중에 대한 동적해석을 통해 속도별, 시간별로 그림 7과 같이 처짐에 대한 한계기준을 적용하도록 하고 있으며, 이에 대하여 단경간의 연속수, 연속교의 경우 등에 따라 감소계수를 적용할 수 있도록 하고 있다. 즉, 주행안전성과 승차감 변위기준 양쪽에 대해 모두 검토하여야 한다.

처짐에 대한 검토 시, I형 거더교의 경우 최대처짐은 최

표 1 Eurocode의 구조형식별 감쇠비

교량형식	감쇠비 (%)	
	경간 < 20m	경간 ≥ 20m
강구조 (판형교 등)	0.5+0.125(20-L)	0.5
프리스트레스트 콘크리트, 강합성구조	1.0+0.07(20-L)	1.0
Filler Beam, 철근콘크리트	1.5+0.07(20-L)	1.5

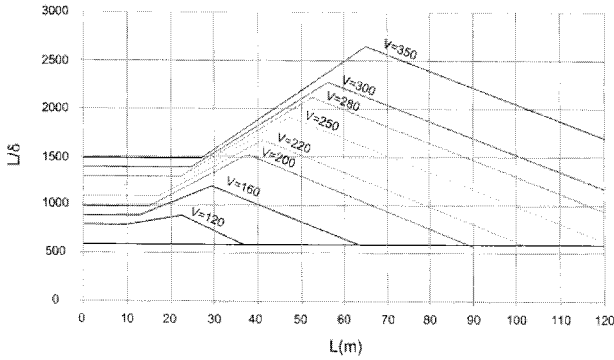


그림 7 Eurocode의 처짐 규정

외측거더에서 발생하며 PSC 박스거더 교량이나 소수주형 강합성형 교량의 경우 캔틸레버부가 취약할 수도 있다. 따라서 교량전체의 최대처짐 발생부분에 대한 종합적 검토를 하여야 한다.

3.3.3 단부회전각

단부회전각의 제한은 도상자갈 이완 및 부가적 레일 응력 증가를 억제하기 위함이다. 그러나, 현재 신설되는 고속철도 교량은 콘크리트궤도를 적용하는 것이 일반적이므로 콘크리트궤도 단부사용성 검토로 대체하는 것이 일반적이다.

3.3.4 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 두지점의 최대 변화량이 1.2mm 이내여야 함을 의미한다.

표 2 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

참 고 문 헌

1. 김성일 (2000), “고속철도교량의 교량-열차 상호작용해석”, 박사학위논문, 서울대학교
2. EUROCODE 1 Part 2, “Actions on Structures : General actions - Traffic loads on bridges”, European Committee for Standardization
3. Y.B. Yang, J.D. Yau, and L.C. Hsu, “Vibration of Simple Beams due to Trains Moving at High Speeds”, Engineering Structures, Vol.19, No.11, 1997, pp.936~944
4. 일본 국토교통성철도국 (2006), “철도구조물등설계기준/동해설 - 변위제한“
5. 한국철도시설공단 (2007), “호남고속철도 설계지침”
6. 한국철도기술연구원 (2008), “철도교량 동적안정성 및 동적설계기준에 관한 연구”, 한국철도시설공단

[담당 : 김만철, 편집위원]