

고속철도 교량의 열차하중에 대한 동적해석

Moving Train Analysis of High Speed Railroad Bridge



김성일*

* 한국철도기술연구원 고속철도연구본부 책임연구원

1. 서론

1.1 이동하중 해석의 역사적 배경

19세기 철도교량이 건설되기 시작하면서부터 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 강제진동의 이론적 해를 구하는 것에서 출발하였다고 볼 수 있다. 이와 같은 연구는 교량의 이상화 및 차량의 이상화 방법에 따라 그림 1과 같이 정리할 수 있다.

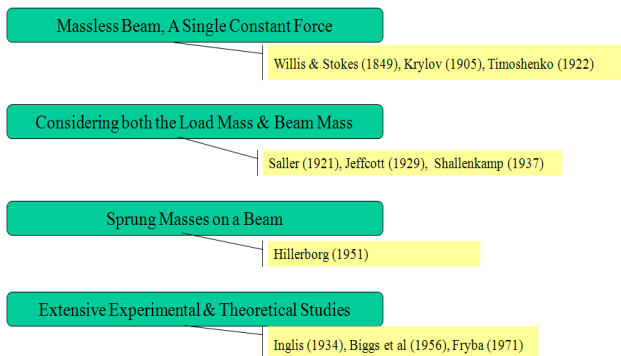


그림 1 이동 차량에 의한 교량의 거동에 대한 초기 연구

도로 혹은 철도에서 차량이 점점 고속화/중량화되는 반면, 교량의 장경간화/경량화는 이러한 이동 차량하중의 중요성을 더욱 부각시켜 연구자의 관심을 이끌었으며, 컴퓨터의 발달 및 유한요소 해석기법의 발달과 더불어 본격적으로 교량 및 차량에 대한 수치모델 수립 및 해석기법이 발달되었다. 이 후 교량/차량의 모델링 방법 및 교량/차량에 영향을 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(1988), 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 없으며

로, 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 일반화되면서 본격적으로 철도교량의 이동하중 관련 연구가 전세계적으로 진행되고 있으며, 고속철도 교량의 경우 설계속도가 이미 300km/h를 상회하고 향후 400km/h 대역이 논의되는 시점에서 고속철도에 일반적으로 적용되는 교량 형식은 필연적으로 설계속도 내에서 공진이 나타나며, 이에 대한 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 연구성과를 이루어 내고 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 복잡한 모델링 보다는 2차원 모델링 등에 의한 실용적 프로그램을 기반으로 하고 있었으나, 최근 고속철도가 활발히 추진되고 있는 스페인, 포르투갈의 학자들을 중심으로 본격적인 이론적 연구도 수반되고 있다.

이 외, 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. 중국의 경우에도 세계 최대 규모의 고속철도 건설과 더불어 이 분야 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 북경교통대학 등을 중심으로 추진되고 있다.

국내에서도 고속철도의 도입과 더불어 각 대학에서 교량/열차 상호작용해석 프로그램 개발을 위한 연구가 진행되었으며, 한국건설기술연구원은 국책사업을 통해 장기간에

걸쳐 고속철도 교량의 동적거동에 대한 연구를 수행하였으며, 최근에는 철도교량 설계기준 개정과 관련하여 연구를 수행한 바 있다.

한국철도기술연구원은 고속철도 외에도 일반철도 노후 교량(국내 비중이 가장 큰 노후 강관형교 등)에 대한 실험 연구, 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 있으며, 그 결과는 ‘철도설계기준(노반편; 2011)’에 반영된 바 있다.

2. 열차 이동하중 해석 시의 주요 사항

교량 상을 열차가 주행할 경우 교량의 동적안정성, 열차의 주행안전성 및 승차감 확보는 교량과 열차의 응답을 모두 직접적으로 확인할 수 있는 교량-열차 상호작용해석, 교량의 질량, 감쇠, 강성 행렬만을 구성하고 열차하중은 시간에 크기 변동없이 시간에 따라 이동만 하는 연행 이동집중하중에 의한 해석 등 다양한 해석방법에 의해 평가가 가능하다. 이러한 동적해석을 수행하기 앞서, 교량의 동특성을 결정하는 질량과 강성의 영향, 동적안정성 확보 여부에 있어 가장 중요한 요소인 공진에 대해 살펴보면 다음과 같다.

2.1 교량의 강성과 질량

교량의 강성 및 질량은 교량의 동특성 및 응답을 결정하는 요소이다. 교량의 강성이 높아질수록 처짐은 작아지며, 고유진동수는 증가하게 된다. 반면 교량의 질량은 정적응답과는 관계없이 교량의 동적응답에만 영향을 미치며, 질량이 높아질수록 고유진동수는 낮아지며 가속도 응답은 작아지게 된다.

즉, 정확한 교량 강성/질량에 대한 고려는 정확한 동적응답 예측으로 연결되며, 반대의 경우에는 부정확한 예측을 야기할 수 있다. 일반적으로 철도교량에 위치한 궤도구조의 경우 궤도의 강성효과를 무시하고 질량효과만 고려하는 것이 일반적이다. 이와 같은 경우 그림 2와 같은 상황을 예상할 수 있다.

따라서, 정확한 강성/질량의 고려 혹은 안전측으로서의 고려가 적절하게 필요하며, 이에 대해 유럽 및 일본에서는 다양한 연구가 시도 중이다. 유럽의 경우 ERRI의 연구자로

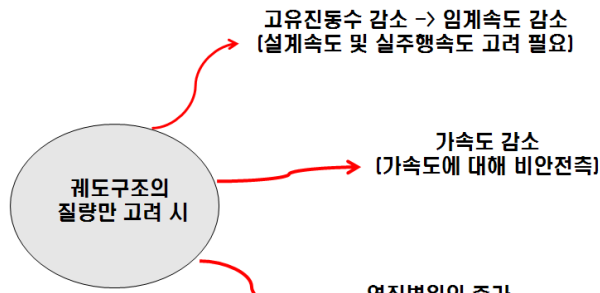


그림 2 궤도구조의 질량만 고려 시 동적응답에 미치는 영향

를 통해 설계강성에 비해 실교량의 강성이 12~22% 높다는 연구결과가 보고된 바 있으며, 일본의 경우에도 실교량에 대한 현장실험을 통해 실 강성에 대해 연구한 바가 있다.

2.2 공진 및 공진소멸

열차하중에 의한 교량의 동적거동은 교량의 동적특성과 차량의 동적운동에 의해 결정 되어 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 3은 등간격의 연행하중에 진행할 경우의 공진현상과 그에 따른 임계속도를 보여준다.

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

여기서, Ω 는 열차의 가진주파수, V 는 차량의 속도이며 S_{eff} 는 열차의 유효타격간격, ω_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.

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

여기서, V_{cr} 은 열차의 임계속도이다.

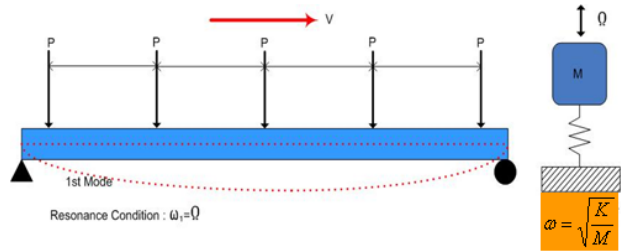


그림 3 등간격의 연행하중이 주행할 경우의 공진현상

그림 4는 KTX 주행 시 공진 발생을 일으키는 임계속도 주행 시와 일반적인 속도에서의 연직변위의 시간이력의 현장측정 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 합해져 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 발산조건

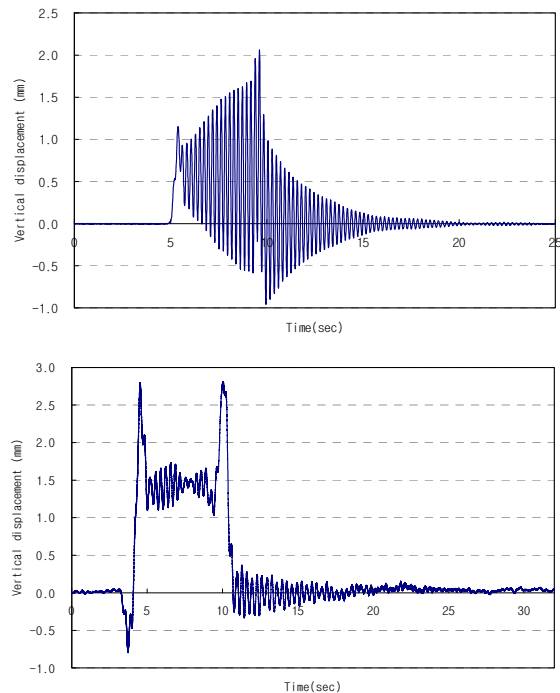


그림 4 임계속도 및 일반속도에서의 연직처짐 응답

에 비해 우선됨으로써 안정적인 동적응답을 나타내는 것으로 수학적으로 다음식과 같다.

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

여기서, L은 교량의 지간이다.

윗 식에서 주목할 점은 열차의 속도, 교량의 물성치 및 고유진동수 등과 관계없이 열차의 유효타격간격과 교량의 지간만으로 나타내어 진다는 점이다. 즉, 열차의 유효타격간격이 결정되면 다른 어떠한 매개변수와 관계없이 교량의 특정 지간을 결정해 공진소멸을 유도하여 안정적인 동적거동을 확보할 수 있는 교량의 설계가 가능하다는 점이다. 다시 말해, 특정열차가 주행하는 교량의 경우 이를 활용하면 공진으로부터 자유로운 동적거동 측면에서 대단히 안정적인 교량을 설계할 수 있다. 일본의 경우 500km/h 급의 초고속자기부상열차 시험선로에 이를 활용한 교량 건설을 실제로 적용하고 있는 것으로 알려져 있다.

3. 이동하중해석

3.1 차량 및 교량의 매개변수

차량이 교량 위를 주행하게 되면 상호 간의 작용으로 인해 서로 영향을 받게 되며, 이를 정리하면 그림 5와 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/하부 구조의 영향을 분석하고, 주행면 불규칙성을 고려한다.

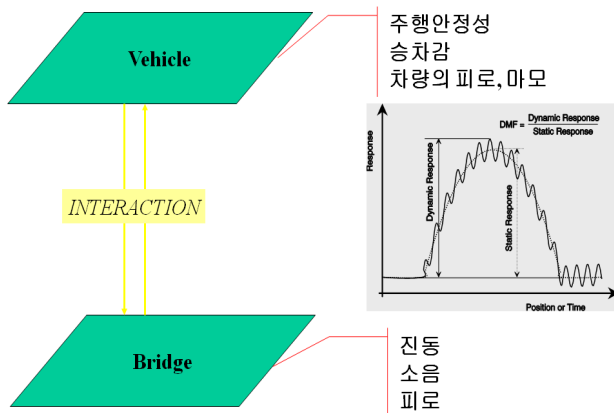


그림 5 차량/교량 상호작용으로 인한 영향

3.2 차량 및 교량의 모델링

교량-차량 상호작용 해석은 다음과 같은 차량 및 교량의 지배적인 운동방정식으로부터 구하며, 상호작용력을 통해 커플링된 방정식을 풀게 된다.

$$\begin{aligned} [M_B]\{\ddot{u}_B\} + [C_B]\{\dot{u}_B\} + [K_B]\{u_B\} &= \{F_t\} \\ [M_v]\{\ddot{u}_v\} + [C_v]\{\dot{u}_v\} + [K_v]\{u_v\} &= \{P_t\} \end{aligned}$$

그림 6은 교량-차량 상호작용해석의 일반적인 흐름도를 나타낸다.

교량의 모델링은 초창기 보 요소만을 사용한 방법에서 최근에는 쉘요소 및 특수요소 등을 사용한 상세화된 모델링이 적용되고 있다. 최근에는 교량의 모델링에 대해 복잡한 요소까지 쉽게 구현 가능한 범용 소프트웨어를 이용하고 이의 모달데이터를 획득해 자체적으로 구성한 열차의 시스템행렬과 결합해 상호작용 해석을 수행하는 법이 많이 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.

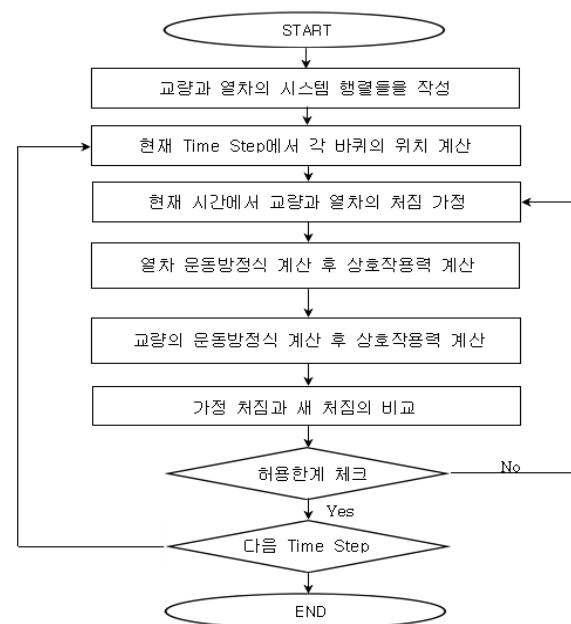


그림 6 교량-차량 상호작용해석의 일반적 흐름도

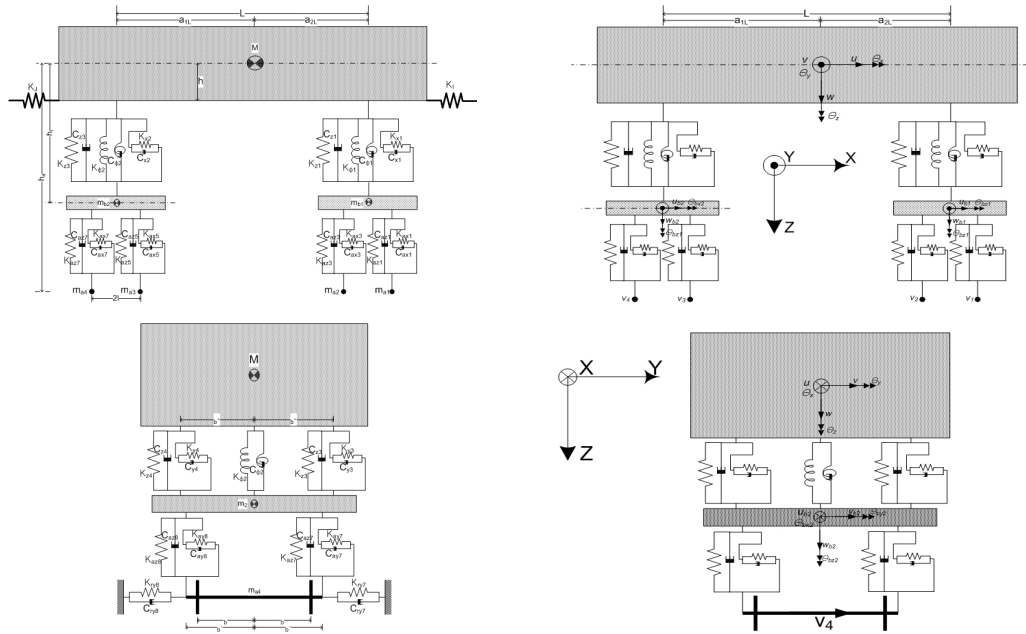


그림 7 4축 열차의 3차원 모델링 예

차량의 모델링은 상호작용을 고려하지 않는 이동집중하중에 의한 것이 설계에서 일반적으로 적용되고 있다. 교량과의 상호작용 분석을 위한 1자유도 이상의 현가장치를 고려한 모델링은 주행면 불규칙성의 영향, 교량 상 열차의 주행안전성 및 승차감의 직접적 평가, 휠/레일 접촉문제의 고려 등을 위해 지속적으로 개발되고 있다. 그림 7은 다자유도 열차모델링의 예를 나타낸다.

4. 교량 상 열차의 주행안전성 및 승차감 평가

결과적으로 교량-열차 상호작용해석 또는 이동집중하중에 의한 교량의 동적해석은 모두 교량 상을 주행하는 열차가 주행안전성 및 승차감을 확보하고 있는지에 대한 교량 상 운행한계기준을 평가하기 위한 과정이다. 주행안전성과 승차감 모두 열차의 응답에 의해 평가를 하는 것이 보다 직접적인 방법이나, 이를 위해서는 복잡하고 정확한 열차/교량 상호작용 모델의 구성 및 사용이 필요하다. 그러나 현재 교량해석 소프트웨어의 경우 어떠한 상용 소프트웨어도 이를 지원하고 있지 않다. 따라서, 교량 설계자의 편의를 위해 이를 연직변위 제한 등 교량의 응답(연직처짐, 연직가속도, 면틀림 등)을 통해 평가할 수 있도록 변환하여 제시하고 있는 실정이다.

철도교의 동적성능과 관계되는 시방기준의 경우, 국내의 관련 기준으로는 철도설계기준(2011)에 교량 상 운행한계기준이 명시되어 있다. 국외의 관련 기준으로는 UIC Leaflet 및 Eurocode, 프랑스 기준인 CTRL Technical Standard, 스페

인의 IAPF 등이 있다. 또한, ERI(European Rail Research Institute) 보고서에 관련 기준 및 설정 근거 등이 제시되어 있다. 또한, 일본의 철도구조물 등 설계표준/동해설의 콘크리트교편 및 2006년도 발간된 변위제한을 참조할 수 있다

4.1 열차의 응답에 의한 직접적 평가

교량 상 열차주행시 안정성은 주행안전성(traffic safety)와 승차감(passenger comfort)으로 나뉜다. 먼저 차량의 주행안전성은, 차륜에 작용하는 횡압 Q 를 동적인 연직윤중 P 로 나눈 탈선계수로 평가되는 것이 일반적이다. 일반적으로 이 탈선계수가 0.8~1.2를 넘지 않도록, 구조물의 변위를 제한해 왔다. 열차의 윤중은 교량 위를 주행하면서 열차와 교량의 상호작용에 의해 지속적으로 변동되며, 이와 같은 윤중변동율은 동적인 윤중의 변화량을 정적 윤중으로 나타내므로, 윤중의 변화를 표시하는 지표로서 이용되고 있다. 이 중 특히 윤중감소율은 주행안전성을 평가하는 지표가 되고 있다. 실제의 열차 주행에서는 궤도틀림 혹은 풍압 등에 의해서도 횡압이나 윤중감소가 발생하며, 이러한 것들을 고려하여 일본의 경우에는 교량 상 주행안전성 검토를 위해 횡압 48kN, 윤중감소율 28.1%의 한계값이 탈선계수 0.8에 근거하여 정해져 왔다. 최근 발간된 “변위제한”편에서는 횡압 40kN, 윤중감소율 37.0%에 근거하여 연직변위 제한 기준을 설정하였다.

주행안전은 탈선 가능성을 예측함으로써 평가할 수 있다. 탈선 가능성을 평가하는 가장 일반적인 지표는 탈선계

수로 아래 식으로 주어진다.

$$K_{Q/P} = Q/P$$

여기서 Q 는 횡압이고, P 는 동적 윤중이다. 일반적으로 윤중과 횡압은 각각 차체의 수직 및 수평가속도와 상관관계가 매우 높다는 사실로부터 탈선계수(KQ/P) 및 윤중감소율(KdP)은 다음과 같이 수직 및 수평차체가속도로 나타낼 수 있다.

$$K_{Q/P} = \frac{Q}{P} = \frac{Q}{P_0 - \Delta P} = \frac{2P_0 \frac{\beta}{\lambda_H} a_H}{P_0 - P_0 \frac{\beta}{\lambda_V} a_V} = \frac{2 \frac{\beta}{\lambda_H} a_H}{1 - \frac{\beta}{\lambda_V} a_V}$$

$$K_{dP} = a_V$$

여기서, P_0 : 정적 윤중, ΔP : 윤중 변동분, β : 축중에서 차체 중량이 차지하는 비율(차체 중량비), λ_V : 차체 중량에 의한 윤중변동이 전체 윤중변동에서 차지하는 비율

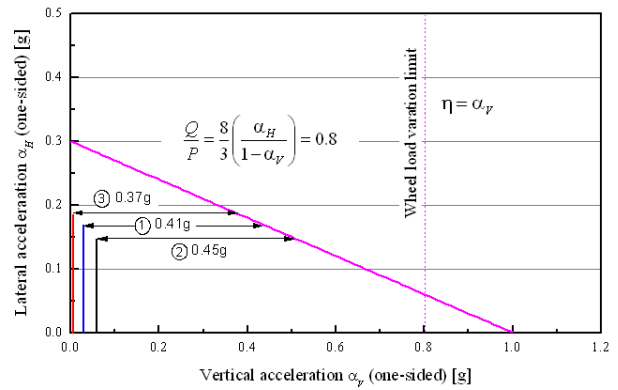


그림 8 주행안전을 위한 차량 가속도 관계

(차체 윤중 변동율), λ_H : 차체 중량에 의한 횡압이 전체 횡압에서 차지하는 비율(차체 횡압비), a_V : 차체 상하 가속도(편진폭) [g], a_H : 차체 좌우 가속도(편진폭) [g]이다.

Sato의 연구결과에 따르면 $\beta=2/3$, $\lambda_V=2/3$, $\lambda_H=1/2$ 가 가정될 수 있으므로 위 식의 탈선계수는 다음 식과 같이 단순화될 수 있다.

시간에 따른 하중(P(t)) 구형 방법

- 시간에 따른 동적하중 p(t)로 구현하기 위해 하중의 Time Step에 따른 위치를 계산하여 해당 위치에서의 등가결점력으로 지환한다.
- 이 때 위치에 따른 결점력은 해석에 적합한 Function을 가칭하여 사용. (Ex - Ramp Function, Sine curve Function, Cubic Curve Function...)

Function of Ramp

Function of Cubic Curve

KTX (20량) 속하중 구성의 예

Step#1 교량 모델링(상세생략)

Step#2 단위하중지하

- 이동 경로상의 결점에 하중자유도별 단위 하중을 재하한다.
- Assign -> Joint static loads -> Force

Step#3. Time History Function 정의

- 이동 경로상의 결점에 해당되는 Time History Function을 정의한다. (실제적인 하중이동에 대한 시간이력을 구현함)
- Define -> Time History Functions

Step#4. Time History Cases 정의

- Step#2의 단위하중과 Step#3의 Function을 Matching하고 동해석에 필요한 Option 값을 입력
- Define -> Time History Cases

Step#5. Analysis Option 입력

- 시간이력해석을 위한 Dynamic parameter를 setting
- Analyze -> Set Options -> Set Dynamic Parameter

Step#6. Analysis

- Analyze -> Run

Step#7. 결과 확인

- 확인하고자 하는 결점을 선택하여 응답을 확인한다.
- Display -> Show Time History traces

그림 9 범용 소프트웨어를 이용한 연행 이동집중하중 해석의 과정

$$K_{Q/P} = \frac{8}{3} \left(\frac{a_H}{1-a_V} \right)$$

국내 철도차량안전기준에 관한 규칙에 의하면 탈선계수는 $K_{Q/P}=0.8$ 의 값을 적용하므로 횡축을 a_V , 종축을 a_H 로 하는 좌표 상에 그림 8과 같이 나타낼 수 있다.

승차감에 대하여는 열차 내부에서 발생하는 가속도로 평가하는 것이 직접적인 방법이며, 이에 대한 국제적 지표가 다양하게 소개되어 있다. Eurocode의 경우 0.1g 이하에 대해 “매우 좋은”, 0.13g 이하에 대해 “좋은”, 0.2g 이하에 대해 “보통”의 승차감으로 평가하고 있다.

4.2 교량의 응답에 의한 간접적 평가

철도설계기준(2011)에서는 교량 설계자의 편의를 위해 연행 이동집중하중에 대한 교량의 동적해석을 통해 철도교량의 동적거동을 평가할 수 있도록 하고 있다. 이는 전술한 바와 같이 열차의 응답을 통해 직접적으로 평가할 수 있는 범용 소프트웨어의 부재 및 교량 설계자의 편의를 위해서이다. 또한, 교량의 응답의 경우 대부분의 경우에서 교량-열차 상호작용에 의한 해석에 비해 열차의 질량 및 강성을 고려하지 않는 연행 이동집중하중 해석에 의한 결과가 안전측이기 때문이기도 하다. 다만, 매우 유연한 구조의 장경간 교량 등의 특수구조에 대해서는 교량-열차 상호작용에 의한 직접적 평가가 Eurocode, 국내 철도 설계기준 등에서도 권장되고 있다.

그림 9는 범용 구조해석 소프트웨어 중 실무에서 쉽게 접근 가능한 SAP2000을 사용하여 시간에 따른 열차하중을 생성하고, 이를 구조물에 작용시켜 교량의 동적응답을 분석하는 예를 도식화한 것이다.

5. 맺음말


위와 같이 교량 상 열차의 이동하중해석에 대하여 간략

히 살펴보았다. 새롭게 개발된 HEMU-430X 열차가 시운전시 420km/h의 속도를 초과하였으며, 호남고속철도가 완공된 후 지속적인 시험운행을 통해 운행속도 향상을 추구할 것이다. 이런 측면에서 이 분야의 연구 및 기준 설정은 매우 중요하다고 볼 수 있다. 기존의 연구 방향이라고 할 수 있는 열차 및 교량 모델링의 정밀화에서 현재는 합리적인 교량 상 운행한계기준 도출을 위한 연구로 추세가 옮겨져 가고 있다고 볼 수 있다.

현재, 국내에서는 운행 중인 열차의 특성을 감안한 승차감 확보를 위한 연직변위 기준의 독자적 제시가 진행되고 있으며, 궤도구조/온도하중 등과의 인터페이스를 고려한 종합적 변형 한계 제시에 대한 연구가 진행될 예정이다.

또한, 교량 설계자를 위한 편리한 인터페이스를 갖춘 동적해석 소프트웨어의 개발 및 보급도 필요하다고 판단된다.

참고 문헌

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 (2011), “철도설계기준 (노반편)”.
6. 한국철도기술연구원 (2008), “철도교량 동적안정성 및 동적설계기준에 관한 연구”, 한국철도시설공단. 

[담당 : 조정래 편집위원]