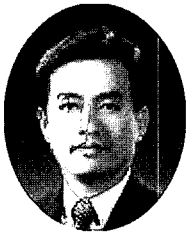
특 집

‖ 고속철도 구조물에 적용된 최신 기술 ‖

고속철도 교량의 동적해석과 설계

- Dynamic Analysis and Design of High-Speed Railway Bridges -



곽종원* *Kwark, Jong Won*

김병석** *Kim, Byung Suk*

1. 개 요

주행속도가 300 km/hr 이상의 고속으로 주행하는 열차의 경우에 주행안정성을 확보하기 위해서 레일을 포함한 선로구축물의 설계 및 관리기준이 매우 엄격하게 적용되어야 한다. 전체구간의 30 % 이상이 교량 구조물로 이루어진 경부고속철도의 경우에는 선로구축물의 요구조건을 만족시키기 위하여 일반 도로교의 경우와는 다르게 고속철도 교량의 설계시 매우 엄격한 설계규정이 적용되었다. 우리나라 고속철도 교량의 설계를 BRDM(bridge design manual)[1]에 근거하여 이루어지는데 이는 유럽 철도 설계기준인 UIC기준을 참조하여 작성되었으나, 일부 규정은 이보다 어 엄격한 기준을 갖고 있다. 일반 도로교의 경우에는 사하중과 활하중에 의한 처짐과 응력의 크기가 설계의 주요변수가 되지만, 고속철도 교량의 경우에는 그러한 조건뿐 아니라 주행하는 열차의 주행성능과 안정성이 보다 중요한 설계 요구조건으로 작용하게 된다.

고속으로 주행하는 열차의 경우에 열차의 윤축이 반복적으로 교량 위를 통과하게 되며 교량의 진동특성에 따라서 차량과 교량의 기하학적 상호관계와 동역학적 상호작용에 의해서 교량과 차량의 응답이 매우 불안정한 상태에 이를 수도 있다. 220 km/hr 이상의 고속으로 주행하는 열차의 선로에 위치한 교량의 설계에는 정적인 설계하중인 UIC 하중뿐 아니라 실차량의 주행에 의한 이동하중해석을 수행하여 교량의 동적 안정성을 확보하도록 하고 있다.

* 한국건설기술연구원 선임연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원

2. 열차의 주행에 의한 교량의 동적거동

2.1 고속철도 교량의 동적거동 관련 규정

경부고속철도교량에 설계기준으로 BRDM이 적용되었다. 차량의 주행에 의해서 발생하는 충격계수에 관한 규정은 BRDM 1.4.2에 언급되어 있다. 이 규정에는 표준 UIC 설계차량 하중에 충격계수를 곱하여 사용하는 것으로 되어있으며, 국부적인 상판의 과도한 진동과 교량의 공진효과를 고려하지 않고 동적응력과 진동효과만을 고려하고 있다. 이러한 규정은 차량의 주행 안전성이 아닌 구조물의 안전성에 근거하여 마련되었으며, 구조물의 재료(강, 콘크리트, PSC 등)에 무관하게 특성길이 Lc의 함수로 표현된다.

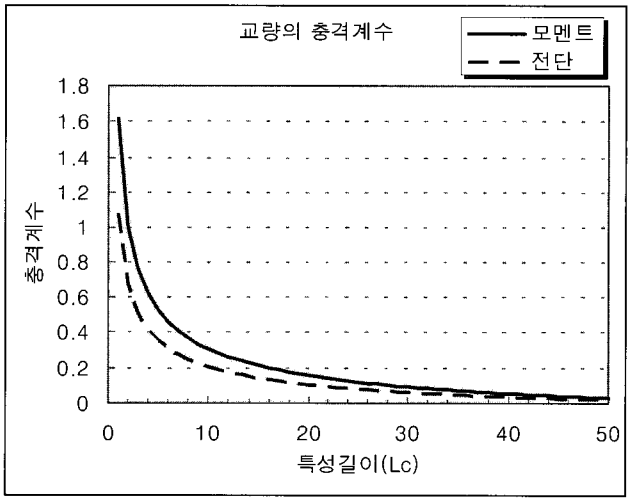


그림 1. UIC 표준하중에 의한 교량의 충격계수

〈그림 1〉에는 특성길이에 따른 충격계수를 도시하고 있다.

열차의 주행속도가 220 km/hr 이상인 경우에는 실차량을 사용한 동해석을 수행하도록 규정하고 있으며, 이때의 동적 충격계수는 동해석에 의해서 계산되어야 한다. 계산된 실충격계수가 특성길이에 따른 충격계수보다 불리한 경우를 발생시킨다면 이를 구조물의 응력과 처짐에 적용하도록 규정하고 있다. 상판의 내민 단면의 경우에는 계산된 동적 충격계수의 20 %를 적용하도록 하고 있다.

이러한 구조물의 응력과 처짐에 대한 규정과 더불어 BRDM 1.8.2에서는 가속도, 비틂각, 단부꺽임각, 처짐, 그리고 승차감에 대한 설계기준을 제시하여 고속열차의 주행 안정성을 확보하고 있다. 열차의 주행속도가 220 km/hr 이상인 경우에 실제차량의 주행에 의한 구조물의 수직가속도를 계산하고 유도상 궤도에 대하여 제한치인 0.35 g를 초과하는지 검토하도록 규정하고 있다. 이러한 가속도 규정은 구조물의 과도한 진동을 방지하고, 특히 도상 자갈의 비산을 방지하는데 제한 목적이 있다. 고속 열차의 탈선방지를 위해서 실차량의 주행에 의한 교량의 비틂각은 횡방향으로 3 m 기선에서 0.4 mm/m 이하로 제한하고 있으며, 구조물의 종방향 휨거동에 의해서 교대와 만나는 교량의 끝단에서 꺽임각이 5×10^{-4} radian 이하로 유지되도록 하고 있다. 충격계수를 고려하지 않은 UIC 표준하중에 의한 구조물의 최대 수직처짐이 차량의 재하측 선로축에서 L/1700을 만족해야 하며, 뿐만 아니라 실제 고속열차에 의한 동적인 최대처짐, 회전각, 그리고 가속도응답이 규정을 만족하여야 한다. 마지막으로 승차감을 확보하기 위하여 고속주행하는 열차의 승객위치에서의 수직가속도가 0.05 g를 초과하지 않도록 규정하고 있다.

2.2 열차의 주행에 의한 교량의 진동 해석 및 공진

교량 위를 차량이 주행할 때, 차륜의 위치는 시간에 따라 변하게 되고 이는 교량에 동적인 하중으로 작용하게 된다. 일반적으로 교량을 설계할 때는 정적인 하중을 사용하지만 동적효과를 고려하기 위해 충격계수를 적용한다. 고속열차 교량의 경우에도 이러한 충격계수가 적용된다. 그러나, 고속으로 주행하는 열차의 경우에는 반복적으로 작용하는 차륜에 의한 교량의 공진현상을 고려하기 위하여 실제 차량에 의한 동해석을 수행하여야 한다. 또한, 승객의 승차감 해석을 위해서는 보다 정밀한 동해석이 요구된다.

이동하중에 의한 교량의 응답 해석방법으로는 일정이동하중해석(constant moving force), 이동집중질량해석(moving mass), 차량-교량상호작용해석(vehicle-bridge interaction)등이 있다. 일정이동하중해석은 차량을 교량의 동적운동방정식의 외력으로서 고려하는 것으로 차량 위치의 변화에 따른 교량의 동적인 응답을 구하는 방법이다. 이는 가장 간단한 방법으로 해석의 효율성은 매우 뛰어나나, 차량의 동적인 거동에 따른 영향이나 주행면의 상태 등을 고려할 수 없다〈그림 2(a)〉. 이동집중질량해석은 차량의 질량을 고려한 동해석으로서 차량의 진행에 따라 동적운동방정식의 외력과 관성력을 변화시키면서 응답을 구하는 방법이다. 차량의 질량이 교량의 질량에 비하여 무시할 수 없을 정도로 큰 경우(약 1/10 이상)에는 이방법이 효과적이다〈그림 2(b), (c)〉. 차량-교량 상호작용해석은 차량의 동적인 거동과 교량의 동적인 거동을 동시에 고려할 뿐 아니라 주행면의 상태까지 고려할 수 있는 이동하중 해석 방법이다. 차량-교량 간의 상호작용이 중요한 경우에 적용성이 뛰어나고 승객의 승차감 해석을 할 수 있는 장점이 있지만, 해석이 복잡하고 비경제적인 단점을 갖고 있다. 〈그림 2(d)〉

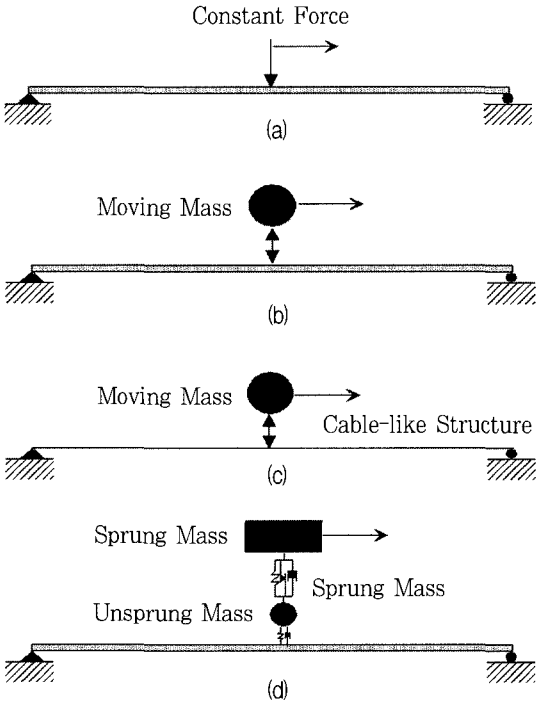


그림 2 이동하중 해석 방법

일반적인 도로의 차량과는 다르게 열차는 매우 많은 차륜이 일정 간격을 갖고 연속적으로 교량 위를 주행하게 된다. 이러한 차륜의 반복적인 통과는 교량에 일정한 진동수를 갖는 외력으로 작용하게 되고 이러한 경우에 교량의 고유진동수와 작용하여 공진 또는 부공진이 발생하게 된다. 고속철도의 경우에 설계 활하중이 매우 크고 이에 따라 교량의 강성이 매우 커지게 되므로 교량의 고유진동수가 일반 교량의 경우에 비하여 높은 편에 속한다. 경부고속철도 교량은 2@40 m 또는 3@25 m 콘크리트 상자형으로 설계되었으며 이러한 교량의 고유진동수는 4 hz 이상이다. 한편 KTX는 편성이 2P + 18T로서 열차의 전후 끝단에 동력차가 위치하고 그 사이에는 객차 16량이 배치되어 있으며 객차와 동력차 사이에 동력객차가 위치하고 있다. 이러한 열차는 18.7 m의 일정한 간격을 갖는 대차들로 지지되므로 KTX가 주행할 때 교량은 유효타격간격 18.7 m를 갖는 동하중을 받게 된다. 유효타격

간격을 갖는 열차의 주행에 의한 가진 진동수는 식(1)과 같이 표현된다.

$$\Omega = V / S_{eff} \qquad (1)$$

여기서, V는 주행속도(m/sec)이고 Ω는 가진 진동수(hz) S_{eff}는 유효타격간격(m)이다. 이러한 가진 진동수가 교량의 고유진동수와 일치하게 되면 공진이 발생하게 되며 이때의 주행속도를 위험속도 또는 공진속도라고 한다. 한편, 그러한 공진속도의 정수배에 해당하는 속도에서는 공진보다는 작지만 근접한 다른 주행속도보다는 큰 응답을 보이게 되는데, 이때를 부위험속도 또는 부공진속도라고 한다. 〈그림 3〉은 그러한 공진과 부공진에 대한 개념을 설명하고 있다.

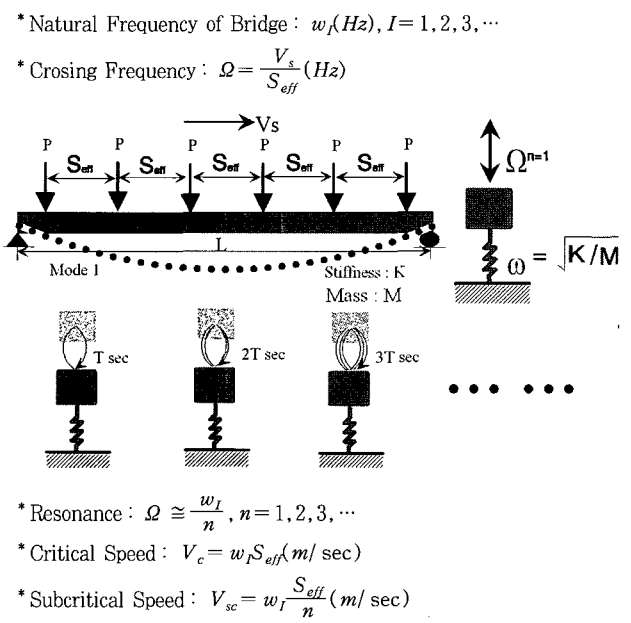


그림 3. 공진과 부공진의 개념

공진과 부공진에 의한 교량 응답의 확대 현상을 보기 위해서 고유진동수가 4.3 hz인 40 m 단경간 교량을 임의적으로 선정하고 해석을 실시하였다. 170 kN의 축하중 40개가 10 m 간격으로 연행할 때의 교량 응답을 구해보면 공진속도와 부공진속도에서 매우 큰 응답이 발생하는 것을 알 수 있다.〈그림 4〉

공진이 발생하는 경우에 차량이 교량을 통과하는 지속시간과 감쇠비에 따라서 그 응답 확대 정도가 결정되므로 교량의 감쇠비와 열차의 편성이 중요하게 된다. 특히, 공진이 발생할 때는 감쇠비에 따라 응답이 매우 민감하게 변하며 감쇠비가 작은 경우에는 그 정도가 더욱 심각하게 된다. 이러한 감쇠비는 교량의 형식에 따라 차이를 갖게 되고 실제 교량의 감쇠비는 일반적으로 알려진 교량 형식에 따른 감쇠비와 다를 수 있으므로 이동하중 해석 시 감쇠비의 적절한 선정이 매우 중요하다.

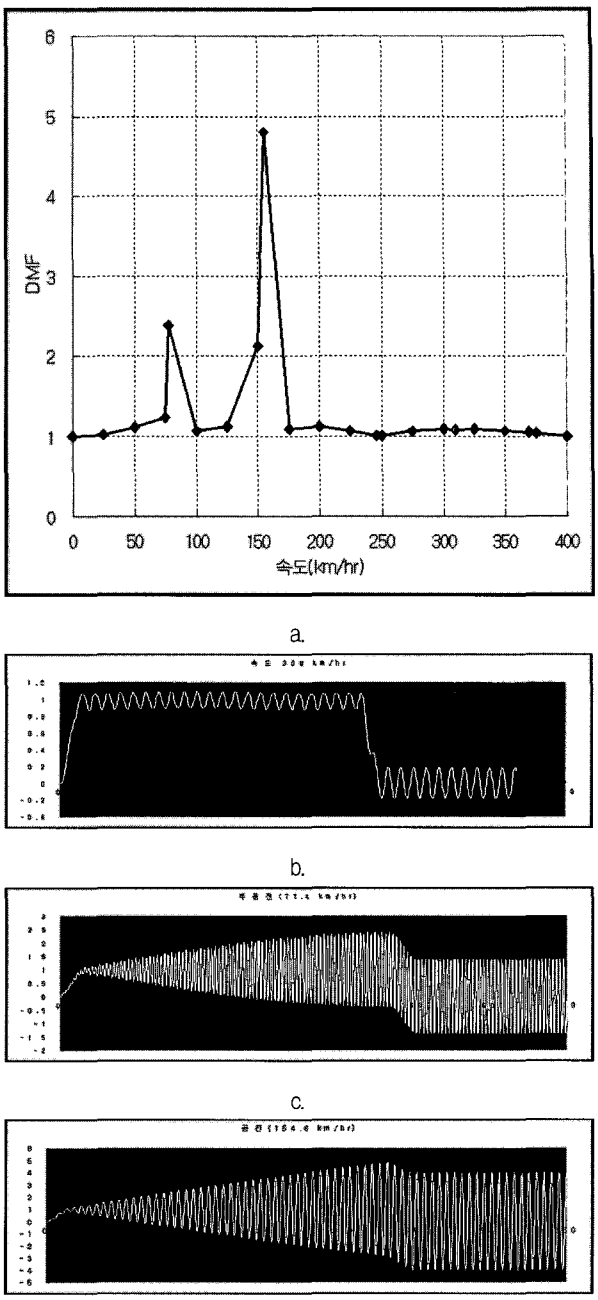


그림 4. 연행하중에 의한 공진
a. 속도에 따른 응답, b. 300 km/hr일 때 처짐 c. 부공진속도(77 km/hr)일 때 처짐, d. 공진속도(150 km/hr)일 때 처짐

2.3 지간장에 따른 공진 감소

고속열차가 주행하는 경우에 차량의 실제 주행속도 내에서 교량이 공진 또는 부공진을 일으킬 수 있으며, 현재 시공되어 있는 경부고속철도 2@40 m 콘크리트 상자형 교량의 경우에 약 290 km/hr 근처에서 이러한 현상이 확인되고 있다. 이러한 공진에 의한 교량의 응답은 열차의 주행 안정성 확보를 위해 제한치 이내로 발생되어야 하며, 이를 만족시키기 위해 교량의 강성과 감쇠를 조절하기도 한다. 그러나, 공진은 교량에 과도한 진동을 발

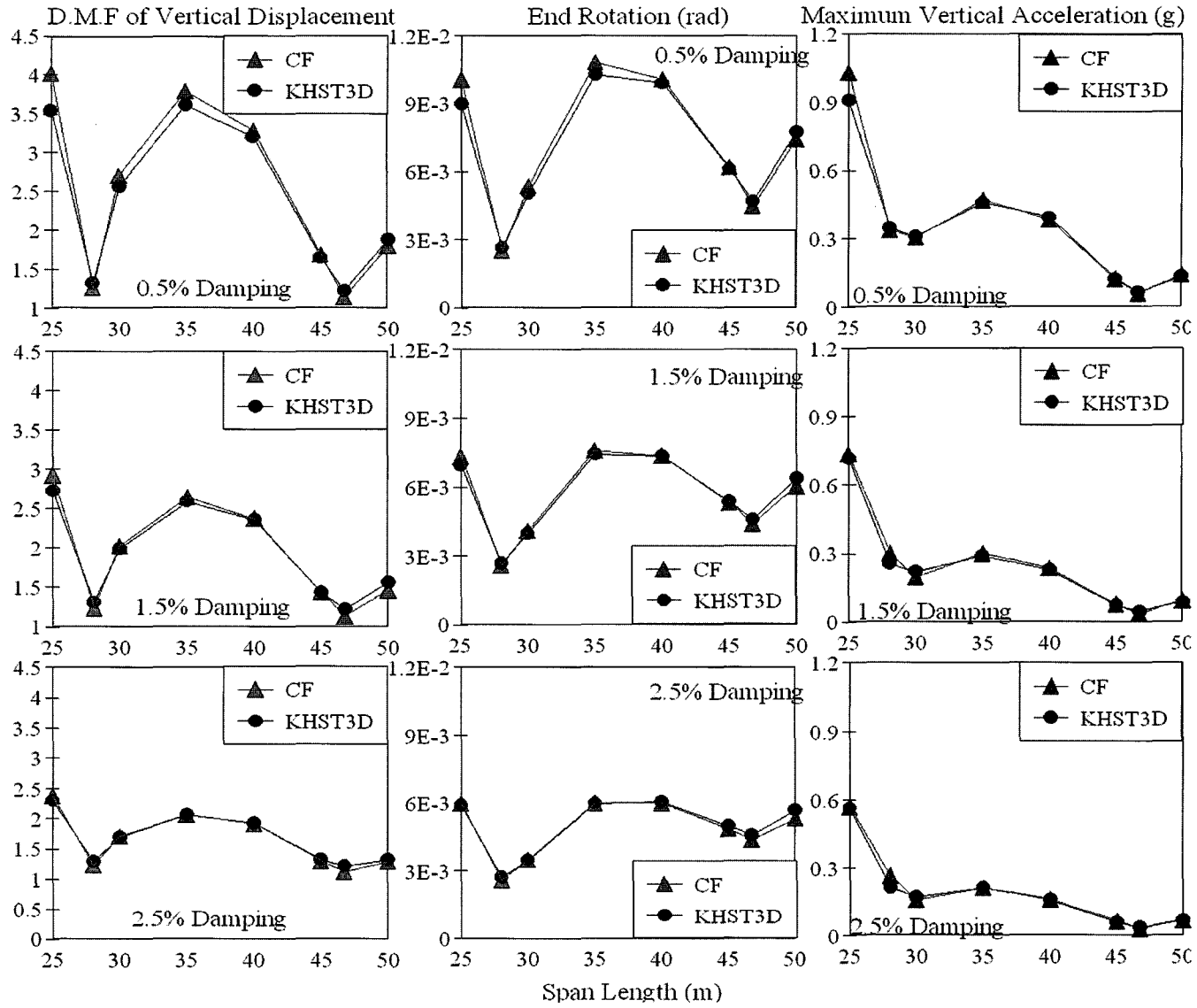


그림 5. 지간장에 따른 공진 소멸현상

생시키게 되며, 특히 가속도의 경우에는 BRDM에 규정된 제한치에 근접한 경우도 관측되고 있다.

경부고속철도의 설계와 건설이 시작된 이후에 몇몇 연구자들이 열차의 주행에 의한 교량의 동적거동에서 특이하고 유용한 현상을 발견하였다. 특정한 경간장을 갖는 교량의 경우에 차륜간격과 경간장의 기하학적 관계에 의해서 교량의 동특성치에 상관없이 공진이 소멸되는 현상이 바로 그것이다. 이러한 공진소멸 현상은 교량의 공진에 의한 과도한 진동을 회피할 수 있는 매우 유용한 방법으로서 실제 교량에 적용될 수 있을 것으로 기대되고 있다.

H. Wakui(1992)[2], Yang 등(1997)[3]은 단순보와 연행 이동집중하중에 대하여 수학적 정식화에 의한 해석적 해를 통하여 연행 이동하중에 의한 단순보의 공진소멸현상을 설명하였다.

일정한 간격을 갖는 윤축이 속도 v로 길이 L인 단순보 위를 주행하는 경우에 반복적인 윤축의 통과에 의한 가력 진동수를 Ω라 할 때 $\Omega = \pi v/L$이고 속도매개변수 S는 가력 진동수 Ω와 보의 고유진동수 w의 비로서 식(2)와 같이 정의된다.

$$S = \frac{\Omega}{w} = \frac{\pi v}{wL} \tag{2}$$

임의의 N 번째 윤축이 단순보에 진입할 때 N-1 번째까지의 윤축들에 의한 하중효과가 0이 되는 경우가 공진소멸조건으로서 이때 보의 반응은 보를 지나간 모든 윤축에 의해 발생된 보의 자유진동이 억제되어 단순보의 동적응답은 단순히 N번째 윤축에 의해서 결정된다. 소멸 조건을 만족하는 속도 매개 변수는 식(3)과 같다.

$$S = \frac{1}{2i-1} (i = 1, 2, 3, \cdots\cdots) \tag{3}$$

이러한 속도매개변수의 조건에서는 공진이 소멸되고 진동이 최소화 되는 몇 가지 최적의 열차 속도가 존재하게 된다. 이러한 공진소멸 조건은 열차의 속도, 교량의 물성치 및 고유진동수 등과 관계없이 유효타격간격과 교량의 지간장만으로 구성되며 유효

타격간격이 18.7 m인 KTX의 경우에는 다음과 같은 지간장에서 공진소멸 현상이 나타나게 된다.

$$L(m) = 18.7(m) \times (0.5, 1.5, \ldots)$$
$$= 9.35(m), 28.05(m), 46.75(m), 65.45(m) \cdots$$

임의의 단순교 지간장을 25 m에서 50 m까지 변화시키며 이상화한 교량의 이동하중해석을 수행하여 이 효과를 살펴볼 수 있다. 사용된 교량은 강합성형 교량으로서 사용된 제원과 자유진동해석에 의한 고유진동수 및 공진속도를 〈표 1〉에 나타내었다. 열차의 모델링 방법으로는 교량과의 상호작용을 고려하지 않는 이동집중하중에 의한 모델링(CF)과, 교량과의 상호작용을 고려하며 열차 각 요소의 병진운동과 회전운동을 모두 고려한 3차원 모델링(KHST3D)의 두 가지 방법을 사용하였으며, 해석결과를 예상되었던 공진소멸현상이 지간장 28.05 m와 46.75 m에서 확인되었다.

표 1. 단순 합성교의 지간에 따른 공진속도

지간장 (m)	25	28.05	30	35	40	45	46.75	50
고유진동수 (Hz)	4.7	4.6	4.1	3.5	3.1	2.6	2.4	2.2
공진속도 (km/h)	314	311	274	236	208	175	163	151

3. 결 언

2004년 4월에 경부고속철도의 개통함으로써 고속열차 시대를 맞이하게 되었다. 건설 경험이 일부 선진국에 한정되어 초기에는 어려움이 많았으나, 지속적인 연구를 통하여 고속철도교량의 안전성 확보와 선진화를 이루게 되었다. 특히 고속철도 교량의 동적 안정성 확보를 위한 연구를 통하여 교량 동해석은 세계적인 수준에 이르렀다고 해도 과언이 아닐 것이다. 한편, 이러한 결과로서 고속열차 주행에 의한 공진에 대한 대비책 마련이 가능해졌으며, 공진소멸현상을 이용한 경제적이고 한층 향상된 주행 안전성을 가진 고속철도 교량의 설계 및 건설이 가능할 것으로 판단된다. 1990년 초기에 경제적인 교량건설을 위한 형식으로 I형 PSC 거더교가 계획되었으나 동적 안정성이 문제가 되어 상자형 교량으로 형식이 변경되어 이를 경부고속철도 전 구간에 걸쳐서 대표형식으로 건설하게 되었다. 건설이 진행되면서 국가적인 연구를 통하여 새로운 기술들이 개발되었으며 향후에 건설될 고속철도 교량에는 개발된 기술들을 적용하였으며 경제성을 갖춘 다양한 형식의 교량 설계가 가능할 것으로 예상된다. 또한, 이러한 연구와 기술을 바탕으로 BRDM의 일부 불합리한 규정의 개정과 함께 안전성을 확보하면서 경제성을 갖춘 교량의 건설이 가능하도록 하는 기준의 제시도 가능할 것으로 사료된다.

또한 고속철도 건설의 경험과 연구결과의 활용을 통하여 중국 러시아 등 해외로의 고속철도사업 진출도 가능할 것으로 판단된다. ◙

참고문헌

1. Korea High Speed Rail Construction Authority, "Bridge Design Manual(BRDM)," 1995.
2. Hajime Wakui & Nobuyuki Matsumoto, "Dynamic Study on New Guideway Structure for JR Maglev," Proceedings of the 1st International Conference on High Speed Ground Transportation Systems, Orlando, Florida, 1992.
3. 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.

도서소개 - "콘크리트 구조설계기준 해설"

◈ 소개

:"… 1999년 5월에 건설교통부 제정 「콘크리트 구조설계기준」이 발간되었으며, 2000년 9월에 본 학회에서는 「콘크리트 구조설계기준」을 실무에 사용하는 설계기술자들이 설계기준의 배경을 이해하고, 이를 실제 설계에 적합하게 적용할 수 있도록 「콘크리트 구조설계기준 해설」을 발간하게 되었습니다. 그러나 통합 제정 당시의 설계기준에서 몇몇 오류가 발견되고 또 그 동안의 연구결과를 반영하기 위해 2003년 4월에 「콘크리트 구조설계기준」을 개정하였으며, 이 개정판에 대한 해설집을 이번에 발간하게 되었습니다.…"(머리말 中)

- 제 목 : 콘크리트 구조설계기준 해설
- 저 자 : 사단법인 한국콘크리트학회
- 출판사 : 기문당
- 출판일 : 2004년 2월
- 페이지 : 405쪽
- 정 가 : 28,000원