

무도상 판형교의 동적거동특성 분석을 위한 해석적 연구

Numerical Analysis to Investigate Dynamic Characteristics of Steel Plate Girder Railway Bridges without Ballast

최진유*, 오지택**, 김현민***, 김영국****
Choi, Jin-Yu Oh, Ji-Taek Kim, Hyun-Min Lee, Sang-Bae

Abstract

A dynamic characteristics of existing steel plate girder railway bridges without ballast were investigated from the finite element analysis. Span lengths, types of vehicle and running speeds are selected as parameters for analyses. For more exact analysis, it was adopted that 3-dimensional bridge models and wheel loads were produced by averaging field measured wheel loads of running vehicles at various speeds. Dynamic vertical deflections, dynamic amplification factors and vertical accelerations of bridges having 9m, 12m and 18m span length were investigated and compared with the limit values specified in Korean railway bridge specification.

1. 서론

판형교의 동적거동특성을 수치해석을 통하여 분석하여 보았다. 판형교의 동적응답은 주행열차의 종류, 열차주행속도, 교량의 경간 길이, 교량의 중량, 궤도틀림, 레일이음매의 위치, 교대배면과 교량의 강성차이에 의한 충격효과 등 많은 복합적인 요인의 상호작용에 의해 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 동적 거동에 영향을 미치는 많은 요인들 중에서 우선적으로 판형교의 동적 거동에 가장 지배적인 영향을 미치는 경간길이와 열차의 종류, 주행속도를 매개변수로 한 유한요소해석을 해석을 수행하여 동적거동특성을 분석하여 보았다. 분석대상 교량은 운행선상에 가장 많이 분포하고 있는 경간 길이 9m, 12m, 18m인 직선 판형교를 대상으로 하였으며, 새마을 PMC 8량 및 16량 편성, 디젤1량 및 2량 견인 무궁화, KTX 20량 편성의 5가지 유형의 열차를 40km/h~180km/h까지 20km/h의 속도로 증가시켜가면서 총 120가지 경우에 대하여 해석을 수행하여 동적수직변위 및 동적중폭계수, 수직진동가속도를 비교분석하여 판형교의 동적거동특성을 알아보았다.

2. 유한요소해석

대상 구조물 해석에 사용한 유한요소 프로그램은 구조해석용 상용 프로그램인 SAP2000N을 이용하였다. 판형교의 모델은 3차원 유한요소로 구성하였으며, 교량에 작용하는 열차하중은 실제 운행

* 한국철도기술연구원, 철도토목연구팀, 선임연구원, 공학박사, 031)461-8531(284), jychoi@krti.re.kr

** 한국철도기술연구원, 철도토목연구팀, 팀장, 공학박사, 031)461-8531(281), jtoh@krti.re.kr

*** 한국철도기술연구원, 철도토목연구팀, 연구원, 공학석사, 031)461-8531(282), hmkim@krti.re.kr

**** 철도청, 시설본부, 토목시설과, 토목시설팀장, 공학석사, 042)481-3385, ykknr@navor.com

선상을 운행하는 여러 열차하중을 직접 측정하여 통계 처리한 평균 축중으로 하였다.

교량 모델링에서 복부판과 상·하부 플랜지는 각각 Shell요소로 모델링 하였으며 레일, 침목, 그리고 수직 및 수평 브레이싱은 각각 Frame요소로 모델링 하였다. 60kg 레일을 사용하였으며 궤간은 표준궤간인 1.435m를 적용하였고, 침목은 교량용 목침목(23×23×300 cm)을 10m당 25개로 배치하였다. 표1은 해석에 적용된 물성값[1]이며, 그림1은 해석에 사용된 모델의 예이다.

상하플랜지는 표준도를 근거로하여 교량 위치별 변단면을 고려하였다. 또한 레일과 침목, 침목과 상부플랜지의 연결에는 Constraint 옵션을 사용하여 레일과 침목은 병진변위와 회전변위의 모든 자유도에 대해, 침목과 상부플랜지는 모든 병진변위에 대해 동일하게 거동하도록 하였다.

표 1. 수치해석 적용 물성치

	레일	침목	강재
단위중량(t/m^3)	7.85	0.8	7.85
단면적(cm^2)	77.5	529	-
탄성계수(kg/cm^2)	2.1×10^6	1.68×10^6	2.1×10^6
포아송 비	0.3	0.345	0.3

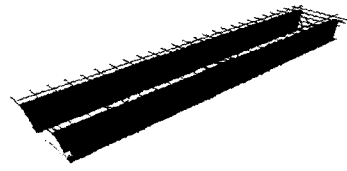


그림 1. 9m 판형교 모델링

열차하중의 유형은 대차 형식에 따라 크게 2가지로 나뉘며, 새마을 PMC 동력차, 일반객차, 화차 등에 쓰이는 단일 대차에 2개 차축이 있는 Bo-Bo형과 디젤기관차와 같이 3개 차축의 대차를 갖는 Co-Co형이 있다. 이러한 대차유형에 따라 새마을 PMC 8량 및 16량 편성, 디젤기관차 1량 및 2량으로 견인되는 편성의 4가지 열차유형과 앞으로 운행될 고속열차(KTX) 20량 편성등 총5가지로 구분하였으며 실 운행열차에 대한 하중선도를 설정하기 위해 새마을 PMC는 15회, 디젤기관차는 47회 측정된 결과를 평균 처리하였다. 교량의 레일선상으로 통과하는 열차하중의 시간이력을 구현하기 위하여 레일에 재하되는 축중을 시간에 따른 등가절점하중으로 치환하였다. 여기서는 축중에 의한 수직하중과 이로 인한 모멘트하중만을 고려하였으며 직선교에서 큰 영향을 미치지 않는 비틀림하중과 횡압은 고려하지 않았다. 다수의 집중하중으로 재하되는 열차하중의 시간이력을 해석상에 적용하기 위해 먼저 각 윤중의 요소내위치를 요소길이에 대해 무차원화하여 계산한다.

$$x_n = \frac{V_T \times T_n}{L_e} \quad (n = \text{Time Step}) \quad (1)$$

여기서, x_n 은 절점*i*로부터의 윤중위치

V_T 는 열차속도

T_n 은 절점*i*로부터의 윤중위치

L_e 은 요소의 길이

임의요소의 양단절점 i, j 에서의 치환되는 절점 수직하중 및 절점 모멘트하중은 식 (2)와 같이 축중과 요소의 Shape Function[2]의 곱으로 나타낼 수 있으며 Time step별로 각 절점별로 하중을

합산하여 시간이력을 나타낸다.

$$P = Q_v \times N_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

여기서,

$$N_1 = 2x_n^3 - 3x_n^2 + 1 \quad N_2 = -2x_n^3 + 3x_n^2 \quad N_3 = x_n \times L_e \times (x_n - 1)^2 \quad N_4 = x_n^2 \times L_e \times (x_n - 1) \quad (0 \leq x \leq 1)$$

이상과 같은 과정으로 생성된 열차하중을 해석프로그램상에서 이동하중으로 재하시켜 동적해석을 수행하게 된다.

3. 해석결과분석

3.1 동적수직변위

서로 다른 경간길이에 대해 차량유형별로 속도대역에 따른 수직변위의 변화양상과 공진의 발생 여부 등을 분석하여 보았다. 그림2~그림4는 각 경간길이에 대한 열차유형별 속도대비 최대수직변위를 나타내었다. 각각의 경간길이에 대해서 속도대역의 차이는 있지만 모든 열차유형에서 수직방향변위가 속도대역에 따라 큰 편차를 보이지 않으며, 뚜렷한 공진현상은 나타나지 않음을 알 수 있다. 차량유형별로 발생하는 최대 수직변위를 비교해보면 디젤 2량 전인 무궁화의 경우가 가장 크고 디젤 1량 전인 무궁화의 순으로 나타나고 있다. 즉, 9m, 12m, 18m의 경간길이를 갖는 판형교의 동적처짐은 180km/h까지의 열차주행 속도대역 내에서는 열차의 주행속도보다는 동력차의 중량이 더 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 그리고 수직변위의 크기를 살펴보았을 때, 모든 경우 중에서 발생하는 최대수직변위가 설계기준상의 처짐한계 범위내에 존재함을 알 수 있다.[4]

3.2 동적증폭계수

동적증폭계수는 정지상태의 열차에 의한 처짐과 속도대역별로 주행중인 열차에 의한 처짐의 비로서 표현된다. 즉, 동적증폭계수가 1보다 크다는 것은 차량의 주행에 의한 동적증폭효과가 발생하여 정적재하에 의한 처짐보다 큰 동적처짐이 발생된다는 것을 의미한다. 실제차량의 속도증가에 따른 동적처짐의 증폭효과를 알아보기 위하여 각 차량종류별로 속도대역에 따라 동적증폭계수를 산정하여 설계기준상의 동적 증폭계수와 비교하여 보았다.[4] 그림5~그림7은 각각의 경간길이에 대한 열차유형별 속도대비 동적증폭계수를 표현한 것이다. 이 결과에서 보면 각 경간길이의 교량에 대하여 열차 유형별 속도에 따른 동적증폭계수가 대부분 1에 근접한 값을 보이고 있어, 모든 경우에 대하여 차량의 주행효과에 의한 동적처짐의 증가량이 정적처짐의 값과 거의 비슷한 크기로 나타남을 의미하고 있다. 그리고 동적증폭계수의 크기 또한 설계기준상에서 제시하고 있는 동적 증폭계수의 값보다 매우 작은 값을 나타내고 있으므로 동적인 주행효과에 의한 처짐의 증가량은 거의 없다고 판단된다. 그런데 본 연구에서 수행한 해석은 레일이 장대화되어 교량상에서 이음매가 존재하지 않고, 궤도틀림이 없고, 교대와 교대배면과의 강성이 연속화 되어 있는 이상적인 궤도환경과, 교량의 구성요소, 즉 거더를 포함한 주부재와 부부재들의 손상이 없고, 교좌장치의 손상이 없는 상태로 가정하고 해석을 수행하였기 때문에 실제 궤도 및 구조물의 유지관리 상태가

고려된다면 해석결과보다는 다소 큰 동적증폭계수를 보일 수 있다. 그러나 현재 발생되는 동적증폭계수의 크기가 설계기준에 의한 동적증폭계수보다 매우 작게 나타나고 있으므로 실제 궤도 및 교량의 상태를 고려하더라도 설계허용범위내에 있을 것으로 판단된다.

3.3 수직진동가속도

각 경간길이별 관형교에 대하여 차량유형별로 속도대역에 따른 교량의 수직진동가속도를 그림 8~그림10과 같이 분석하여 보았다. 이 결과에서도 현장측정에 의한 결과와 마찬가지로 전반적으로 수직진동가속도가 크게 발생하는 것을 알 수 있고, 경간길리와 차량의 유형에 따라 다르지는 않지만 속도 대역에 따른 증폭현상을 보이는 경우도 나타나고 있다. 발생되는 진동가속도의 크기를 분석하여 보면, KTX차량에 의해 발생하는 진동가속도가 다른 차량에 의해 발생하는 진동가속도보다 상대적으로 작고, 절대량을 비교하더라도 최고 0.8g정도이므로 궤도틀립 등을 고려할 경우에도 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다. 그러나 KTX의 유도상교량에서 수직진동가속도 제한치인 0.35g의[5] 2배이상 발생되고 있고, 토노반-교대 접속부에서의 충격효과나 레일의 이음매, 궤도틀립에 의한 동적충격효과 등이 고려되지 않은 이상적인 경우에 대해서 수행된 해석결과이므로 실제 주행시에는 해석에 의한 경우보다는 큰 진동가속도를 유발시킬 것으로 예견된다.

4. 결론

관형교의 동적거동특성과 증속운행에 따른 동특성의 변화를 변화를 알아보기 위하여 경간길리와 열차의 종류, 주행속도를 매개변수로 한 유한요소해석을 해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 각 경간길이에 대한 열차유형별 속도대비 최대수직변위를 분석한 결과, 각각의 경간길이에 대해서 속도대역과 열차유형에 따른 공진현상은 발생되지 않은 것으로 나타났으며, 180km/h까지의 열차주행 속도대역 내에서는 열차의 주행속도보다는 동력차의 중량이 더 큰 영향을 주고있음을 알 수 있다.
- 2) 속도증가에 따른 동적처짐의 증폭효과를 분석한 결과, 각 경간길리의 교량에 대하여 열차 유형별 속도에 따른 동적증폭계수가 대부분 1에 근접한 값을 보여 차량의 주행효과에 의한 동적처짐의 증가량이 정적처짐의 값과 거의 비슷한 크기로 나타났으며, 그 크기 또한 설계기준상에서 제시하고 있는 동적 증폭계수의 값보다 작은 값을 나타내고 있으므로 동적인 주행효과에 의한 처짐의 증가량은 거의 없음을 알 수 있었다.
- 3) 수직진동가속도의 분석결과, 경간길리와 차량의 유형에 따라 다르지는 하지만 속도 대역에 따른 증폭현상을 보이고 있고, 실제 180km/h대로 주행가능한 KTX 차량의 경우, 최대수직진동가속도가 0.8g정도로 유도상교량의 KTX 운행시 제한값인 0.35g의 2배 이상 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 연구는 철도청에서 지원한 철도기술개발과제의 일환으로 수행되었으며, 연구의 수행에 많은 도움을 주신 철도청 관계자 여러분께 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

1. 서사범, 선로공학, 1999
2. R.D.Cook, Concepts and Application of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, 3rd Ed., 1989
3. 오지택 외, 열차유형에 따른 판형교의 정적거동에 대한 연구, 한국철도학회 추계학술대회, 2001
4. 철도청, 철도설계기준(철도교편), 1999
5. 고속전철사업기획단, 고속철도 강교량 및 합성형교량 설계표준시방서 해설(안), 1991,

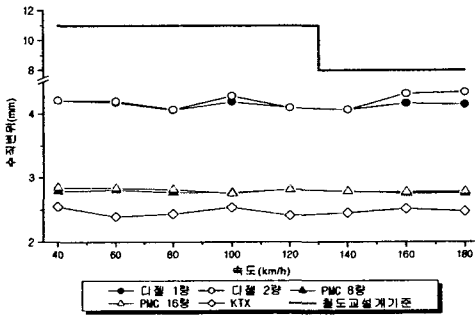


그림 2. 9m 판형교 열차유형별 속도대비 최대수직변위

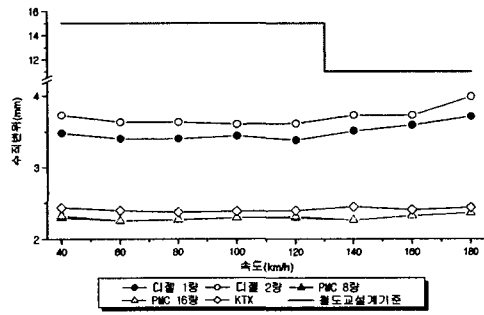


그림 3. 12m 판형교 열차유형별 속도대비 최대수직변위

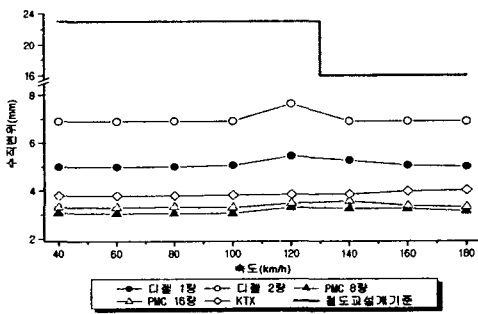


그림 4. 18m 판형교 열차유형별 속도대비 최대수직변위

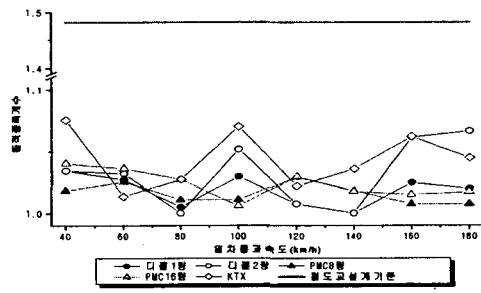


그림 5. 9m 판형교 열차유형별 속도와 동적증폭계수 비교

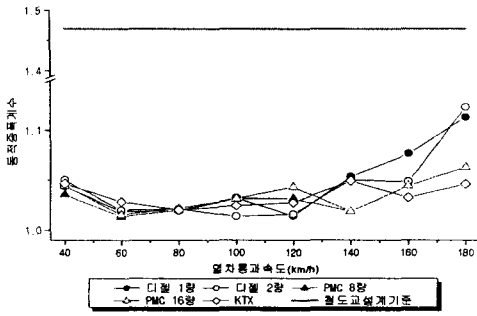


그림 6. 12m 판형교 열차유형별 속도와 동적증폭계수 비교

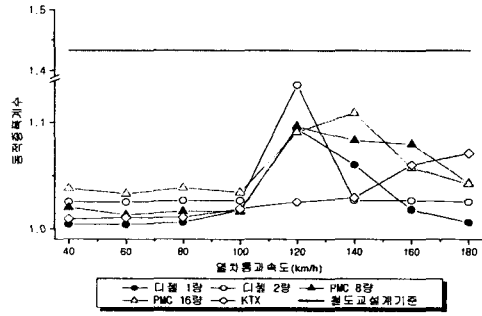


그림 7. 18m 판형교 열차유형별 속도와 동적증폭계수 비교

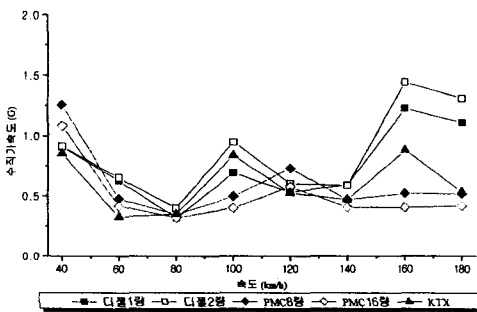


그림 8. 9m 판형교 열차유형별 속도와 최대 수직가속도 비교

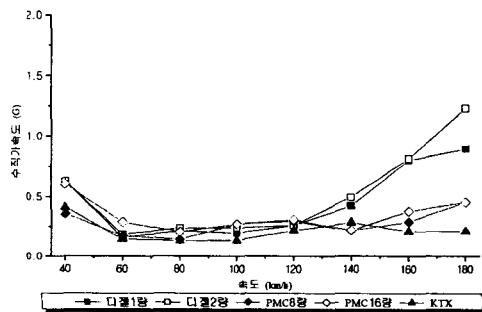


그림 9. 12m 판형교 열차유형별 속도와 최대 수직가속도 비교

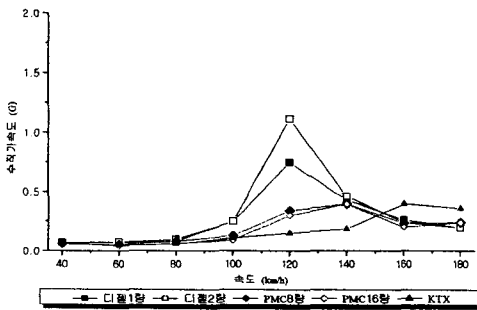


그림 10. 18m 판형교 열차유형별 속도와 최대 수직가속도 비교