고속철도 상 교량의 정밀 동적해석을 위한 개선된 수치적분법

An Improved Integral Method for Dynamic Analysis of Bridge on the High Speed Railway

오순택* · 심영우** · 이동준*** · 윤준관****

Oh, Soon Teak · Shim, Young Woo · Lee, Dong Jun · Yun, Jun Kwan

Abstract

A dynamic analysis procedure is developed to provide a better estimation of the dynamic responses of bridge during the passage of high speed railway vehicles. Particularly, a three dimensional numerical model including the structural interaction between high speed vehicles, bridges and railway endures to analyse accurately and evaluate with in-depth parametric studies for dynamic responses of bridge running high speed railway vehicles. Three dimensional frame element is used to model the prestressed concrete box bridge(40 m simply supported) Track irregularity employed as a stationary random process from the given spectral density functions and irregularities of both sides of the track are assumed to have high correlation. The high-speed railway vehicle (KTX) is used as 38-degree of freedom system. Three displacements (vertical, lateral, and longitudinal) as well as three rotational components (pitching, rolling, and yawing) are considered in the 38-degree of freedom model. The dynamic amplification factors are evaluated by the developed procedure under various traveling conditions, such as track irregularity camber, train speed and ballast. The dynamic analysis such as Newmark and Runge-Kutta methods which are able to analyse considering the dynamic impact factors are compared and contrasted.

Key words : 38-degree of freedom, Dynamic responses, High-speed railway vehicle, PSC box bridges, Runge-Kutta method

요 지

고속철도상 교량의 동적응답을 보다 정밀하게 해석하기 위한 동적해석방법을 개발하였다. 고속으로 주행하는 동력차에 의한 교량의 동적거동을 면밀한 속도변수분석과 고속철, 교량 그리고 궤도구조물의 상호작용을 포함한 수치모델로 구성하였다. 40미터 단순지간의 PSC박스거더교를 3차원 유한 프레임요소로 모델링 하였다. 스펙트럼 밀도함수로 산출된 궤도불규칙값과 궤도간 상이한 거리차이를 고려하여 고속철 차량은(KTX) 38자유도로 구성하였다. 38자유도 모델은 3방향 변위와 상응하는 회전각을 고려하였다. 동적증폭계수는 다양한 궤도의 불규칙성, 챔버, 주행속도, 자갈도상과 같은 주행조건에 의해 결정된다. 이와 같은 동적증폭계수를 해석하기 위하여 Newmark- β 기법과 Runge-Kutta 기법을 적용하여 비교분석하였다.

핵심용어 : 38자유도, 동적응답, 고속철차량, PSC박스거더교량, Rungekutta 기법

1. 서 론

우리나라는 2004년 4월에 고속열차를 개통함으로써 세계 5 번째 고속열차 보유국이 되었다. 2008년 5월 경부고속철도 2 단계 사업이 시작된 고속열차의 운행은 속도 및 운송능력 그리고 안전성 면에서 가장 효율적인 수송수단이 되었다. 또한 축적된 고속열차 운행경험을 통하여 안정된 운행관리, 보완된 설계기술 확보, 450 km/h를 목표로 향상된 운행속도를 위한 제반 기술개발 및 상용화 등등의 높은 사회, 경제, 공학적 부가효과를 기대할 수 있을 것으로 전망되고 있다. 따라서 효율적이고 부가효과가 높은 고속열차 운행과 관련하여 운행

구간 중 가장 중요도가 높은 교량과 고속열차의 상호작용을 통합하여 고려한 연구가 부각되고 있으며 특히 고속운행으로 인한 구조물의 거동과 고속철과 궤도 그리고 교량을 통합하여 고려한 동적 상호작용력 해석이 보다 현실성 있는 초고속 철 운영을 위한 교량의 안정성을 평가하는 방법으로 판단되어 보다 정밀한 해석기술의 개발이 요구된다.

기존의 교량의 설계기준을 고속철이 운행되는 교량에 적용하는 것은 현실상황과 부합하기에 부족하며, 제 1단계 경부 고속철 구간에 적용된 일관된 PSC교량은 적합한 설계기준이 정착되지않은 고속철의 초기 도입 시기에 적절한 조치였던 것으로 평가되고 있다. 또한 고속철이 운행되는 PSC교량의

*정회원 · 서울과학기술대학교 정교수 (E-mail : alicia@snut.ac.kr)

**서울과학기술대학교 건설공학부 겸임교수, 철도전문대학원 박사과정 (교신저자)

***서울과학기술대학교 건설공학부 강사

****서울과학기술대학교 구조공학과 석사과정

설계기준으로 최대치짐, 치짐가속도 그리고 횡변위각에 대한 제한은 현재까지 운행된 고속철 운행실적을 바탕으로 매우 합리적인 결과를 도출한 것으로 평가되고 있다. 그러나 고속철을 위한 최대 40 m 경간 외 3가지 PSC교량 형식만으로 모든 자연환경조건을 충실하게 만족시키기에는 현실적으로 부족하기 때문에, 다양한 형식의 교량의 적용과 그에 합당한 설계기준의 개발이 요구된다. 또한 교량의 거동을 기준으로 한 현행설계기준에 반해 차량의 유효중분포와 같은 통합적인 구조설계요소분석이 다양하게 연구되어야 한다. 따라서 교량의 동적해석과 더불어 차량의 진동특성을 고려한 적절한 수치해석을 통하여 중요 구조매개변수의 기준들을 확보하고자 한다.

본 연구에서는 고속열차와 교량의 동적거동을 해석할 수 있는 유한요소프로그램을 이용하여 세밀하게 구성된 고속열차모형과 열차의 진동원인 궤도의 불규칙성을 포함하여 3차원 해석모형의 교량구조물을 총괄적으로 해석하고자 한다. 특히 고속철의 속도에 따른 불규칙한 궤도와 교량구조물의 상호작용으로 발생하는 동적구조응답특성을 보편적으로 적용되는 Newmark- β 기법과 차량의 진동특성을 고려한 4차 직접적분법인 Runge-Kutta 기법을 각각 적용하고 비교하여 해석의 정밀도를 높이고자 한다.

2. 동적해석 모델

2.1 고속주행열차의 모형화

경부고속철도에 도입하여 공용중인 고속 열차(KTX)의 1편성 20량의 통과 시 상대적으로 중량(대차와 윤축을 포함하여 총 64 ton)인 동력차의 하중집중도가 가장 크기 때문에(송명관 등, 2004), 본 연구에서는 동력차를 38 자유도로 모형화하였다(박홍석, 1999). 일반적으로 100 km/h 내외속도의 일반열차의 연직방향 거동에는 횡방향 및 종방향 운동의 영향이 작다는 가정 하에 연직변위와 피칭, 롤링만을 고려하여 모형화하였다. 그러나 300 km/h의 고속으로 운행하는 4개의 윤축과 2개의 대차를 가진 KTX 동력차는 보다 정밀한 모형기법이 필요하여 대차를 포함하여 연직변위, 피칭, 롤링뿐만 아니라 횡변위, 중변위 및 요잉에 의한 운동효과도 동시에 고려할 수 있도록 열차를 세밀하게 모형화하였다. KTX 동력차의 강체질량은 1개의 차체질량, 2개의 대차질량 및 4개의 윤축장치질량으로 나타내었다. 차체와 대차에는 6가지 변위; 연직변위, 횡변위, 중변위, 피칭, 롤링 및 요잉을 고려하였고, 4개의 윤축장치에는 각각 피칭을 제외한 5가지 변위만을 고려하였다. 차륜의 회전만으로 인해 발생하는 차체의 동적응답은 미미하므로 윤축장치에서의 피칭에 대한 자유도를 고려하지 않았다. 즉, 차체와 대차에는 각각 6개의 자유도, 윤축장치에는 5개의 자유도가 할당되어, KTX 동력차의 전체 자유도 수는 38이다(오순택 등, 2010).

2.2 PSC박스거더교의 모형화

본 연구에서는 기존 PSC 박스 교량을 대상으로 모형화하고, 고속 주행 열차 하중을 속도 별로 적용하여 교량의 중앙

부에서 변위와 응력을 해석하여 동적응답을 정적응답과 비교 분석하였다. 선정된 PSC 박스 교량은 40 m 경간의 변단면의 단순교이며 교량의 폭은 14 m이고, 복선궤도를 가진 유도상 교량을 선정하여 모델링하였다.

해석모형에서는 휨, 전단, 비틀림 모두를 파악할 수 있고 교량을 보요소가 강결절점에 의하여 상호 연결된 것으로 이상화한 3차원 뼈대요소모형을 사용하였다. 교량의 횡방향 요소는 4 m 간격으로 배치하였으며 교축방향 요소는 박스단면의 현치부를 고려하여 보다 합리적으로 나타낼 수 있도록 배치하였다. 교량의 질량은 일관성 질량(Consistent Mass)으로 모형화 하였다. 그리고 교량의 감쇠는 Rayleigh 감쇠로 모형화 하였으며, 감쇠비는 2%를 사용하여 교량의 동적특성을 분석하였다. 사용된 철근콘크리트의 단위중량은 25 kN/m³(최성락 등, 2002)

경부고속철 구간내 공용 중인 PSC 박스 교량을 3차원 뼈대요소로 모형화하였다. 교량의 양단부의 교좌장치를 단순지점을 설정하고 열차하중의 고속주행 시 작용하는 변위를 경간 중앙부에서 중앙 상하단부(CT, CB)와 좌우측 하단부(LS, RS) 절점에서 변위를 해석하고 각 하단부 절점과 교축방향으로 연결되는 두 연결부재에서 작용응력을 해석하였다.

3. Newmark- β 기법을 이용한 고속열차의 속도 별 동적거동 분석

본 절에서는 교량, 궤도와 고속열차의 상호작용을 고려한 동적거동을 Newmark- β 기법으로 해석하여 지정된 절점의 변위와 각 절점의 교축방향으로 연결된 부재의 응력을 구하였다. 고속열차의 최고 속도를 310 km/h로 가정하고 30%와 60% 감속 운행 시 각각의 교량의 거동을 열차의 속도에 따라 분석하였다. 그 결과를 각각의 속도별, 동적응답과 정적응답을 그림 1, 그림 2, 그림 3에 나타내고 각 속도별 특성을 비교분석하였다.

3.1 최고속도 운행 시 동적거동 분석

KTX 열차가 최고 운행속도로 교량을 통과할 때 동적해석결과와 정적해석 결과를 응력과 변위의 영향선을 통과시간별로 그림 1에 표시하였다. 교량의 중앙경간 하단부 3개 절점에 대하여 교축방향으로 연결된 양측의 총 6개의 부재에 대한 응력 및 변위 해석결과와 경간 중앙부 4개의 절점에 대한 해석 각각 나타내었다.

교량 중앙부의 각 계측절점에 연결된 교축방향 부재들(C_1 , C_2 , L_1 , L_2 , R_1 , R_2)의 KTX 열차 주행에 따른 변화를 조사하여보면, 각 방향별로 양과 음의 값을 나타내고 있고 계측 위치에 따라 그 크기가 결정됨을 알 수 있다.

교량단면의 중앙하단부에 위치한 부재 C_1 , C_2 는 동적해석결과 최대응력 83.8 kN/m²을 나타내며 이 결과는 동일부재에서의 정적해석 결과인 최대응력 59.1 kN/m²과 비교하여 42% 증가하는 것으로 조사되었다. 교량의 횡단면상에서 차량하중이 재하되는 좌측부의 하단 절점 LS와 연결된 부재 L_1 , L_2 는 중앙부에서 계산된 최대응력의 약 절반 값을 기록하였으

그림 1. Bridge responses under full speed

그림 2. Bridge responses under 60% speed

며, 우측부 하단 절점 RS와 부재 R_1 , R_2 역시 유사한 응력 값을 나타내고 있다. 또한, 동력열차의 길이 17 m와 교량의 길이 40 m를 포함하여 최대속도에서 통과시간은 0.66초를 기록하였고 동적해석결과 0.5초 이후 약 75% 감소된 부응력을 나타내었다.

각 계측절점들(CB, LS, RS, CT)에서 중앙 하단부의 절점 CB가 최대변위를 나타내며, 양측하단부인 LS와 RS는 유사한 응답을, 중앙상단부에 위치한 절점 CT는 최소변위 값을 나타내고 있다. 고속주행하중에 의한 동적 응답은 중앙 하단부 CB에서 최대 변위 4.98 mm를 기록하였으며 동일절점의 정적재하 변위 값 3.82 mm에 비교하여 30% 증폭된 것을 알 수 있었다. 마찬가지로, 동적응력 해석결과 조사된 0.50초 이후 역시 75% 감소된 부(-)변위를 보여주고 있다. 또한, 동적변위 해석 결과 열차가 교량의 중앙부를 통과할 것으로 예측되는 시간대인 0.3초와 0.45초 사이에서 최대변위를 나타내어 좌우 대칭인 정적응답과 상이한 이형응답의 다차모드 변위가 조사되었다.

KTX 열차가 최고속도로 해당교량을 주행할 경우 열차질량의 관성 값과 궤도의 불규칙성 그리고 교량의 고유진동수가 서로 상호작용하여 공진현상을 구현하고 그 결과 교량이 작

용하는 변위 및 응력이 크게 증폭된다(김성일, 2000; 정재운 등, 2004). 이러한 변위와 응력의 동적 증폭현상이 위의 조사내용들과 부합되는 것으로 판단된다.

3.2 60% 주행 시 동적거동 분석

그림 2에서는 고속열차가 최고속도의 60%인 210 km/h로 주행 시 계산된 각 절점과 부재의 동적응답 결과와 정적하중재하로 인한 최대응력을 STL, 최대변위를 STC로 함께 표시하였다.

고속열차의 주행속도가 감소됨에 따라 그림 4와 비교하여 동적해석결과 응력과 변위의 최대값이 각각 71.5 kN/m^2 , 4.34 mm로 계산되어 최고속도 주행 시 응답에 비해 크게 완화된 것을 발견할 수 있다. 또한, 정적재하 결과와 비교하면 역시 각각 14%와 21%로 증폭되어 그 차이가 크게 감소됨을 알 수 있다. 조사된 각각의 절점들과 부재들의 응답 역시 조사된 크기의 비는 약 50% 정도로 그림 4의 결과와 일치하였다. 또한, 최대응력과 최대변위는 중앙하단부 CB점과 그 절점에 연결된 부재에서 발생하는 것으로 조사되었다. 다만 동적응력과 변위해석 모두 최고속도의 열차운행결과에 비하여 선행모드의 크기가 크게 감소하여 상대적으로 후행모드의

(a) Stress

(b) Displacement

그림 3. Bridge responses under 30% speed

응력과 변위 값이 우선하고 최고결과 값 역시 열차가 교량의 중앙부를 통과하는 0.49초 보다 (총 통과시간 0.98초) 후행된 시점에서 조사되었다. 또한 부응력과 부변위가 응답의 후반부에 짧게 나타났다.

이러한 지배모드의 변화로 KTX 열차가 PSC 교량을 통과할 때 열차의 4개의 윤축과 2개의 대차간의 조합과 교량의 고유진동수가 상호작용하여 주행속도별로 복합적인 응답을 발생하는 것을 알 수 있다. 특히 주행속도가 최고속도에 이를 경우 상대적으로 2~3차 모드의 변위나 응답이 최고값을 나타내는 것을 알 수 있으며 210 km/h 정도의 속도에서는 이에 접근하는 초기 다차모드의 응답이 조사됨을 알 수 있다.

3.3 30% 주행 시 동적거동 분석

그림 3은 고속열차가 최고속도의 30% 정도일 경우, 즉 일반열차의 운행속도 주행 시 교량의 동적거동을 응력과 변위별로 나타내었고 정적해석결과도 역시 함께 표현하였다

고속열차의 주행속도가 최고속도의 30%일 경우 그림 4와 그림 5와 비교하여 동적해석 결과 응력과 변위의 최대값이 각각 66.4 kN/m², 4.22 mm로 계산되어 크게 완화된 것을 발견할 수 있다. 또한, 정적재하 결과와 비교된 차이도 각각 12%와 11%로 근사한 결과를 보이고 있다. 또한, 조사된 절점과 부재의 위치에 대한 응답 크기의 비도 50% 정도로 선행 조사결과들과 근사하였으며 최대응력과 최대변위 역시 중앙 하단부 CB점과 그 절점에 연결된 부재에서 발생하는 것으로 조사되었다. 차량의 교량통과시간 총 2.05초에 대하여 최대응답의 시간은 열차가 교량중앙부를 통과하는 1.03초 보다 약간 선행하여 발생한 것으로 조사되었다. 그러나 부응력이나 부변위는 최고속도 30% 주행 시에는 거의 발생하지 않았다.

일반 철도차량의 주행속도와 유사한 KTX 열차의 최고속도 30% 주행 시 교량의 동적거동은 정적거동과 비교하여 매우 근사한 결과를 나타냈으며, 이는 일반열차와 비교하여 고속열차의 궤도 강성과 교량의 강성이 상대적으로 우수하기 때문에 교량의 동적특성을 크게 감소시킨 것으로 판단된다(김상효 등, 2003).

3.4 정적해석결과와 비교한 상대변위를 통한 속도별 동적거동 분석

KTX 열차의 주행 시 교량이 발생하는 변위를 분석하기 위해 동적증폭계수 D.A.F (Dynamic Amplification Factor)를 이용하여 각 속도별 특성을 조사하였다. 열차의 교량통과시간을 1로 표현하고 열차가 중앙부를 통과하는 시간을 0.5로 규정하여 정적해석 최대 변위와 함께 나타냈다(그림 4).

주행속도의 차이로 조사된 열차의 교량통과시간은 약 0.66초 0.98초 그리고 2.05초로 조사되었고 이를 상대시간으로 환산하여 표시하였다. 동적/정적 최대 변위비는 각각 1.30, 1.14 그리고 1.10으로 주행속도가 감소함에 따라 상대변위도 감소하였다. 단, 최대변위를 나타내는 시점이 열차가 교량의 중앙부를 통과하는 시점과 일치하지 않았으며, 최고속도 주행 시는 약간 선행하여 발생하였다.

교량의 중앙하단부에서 발생하는 최대 변위비는 열차가 최고속도로 주행할 경우 가장 크게 나타났으며 속도별로 변위비가 증가됨을 알 수 있었다. 그 발생시점은 교량을 통과하는 총 소요 시간의 0.47 시점에 발생하였다. 상대적으로 정적해석 시 최대변위는 0.5 시점에서 발생한 반면, 저속운행

그림 4. Dynamic Amplification Factor for speed ratio

(a) 속도별 동적변위

(b) 속도별 동적증폭계수

그림 5. 주행속도에 따른 동적해석

시 각각 0.43와 0.67 시점에서 선행 또는 후행하여 발생됨을 알 수 있다. 그리고 최고속도의 30% 주행 시 동적변위의 유형은 대칭이며 3차함수 형태의 정적변위에 비해 크게 차이를 나타내지 않고 있으나 복잡한 다차 함수 유형이 시작되는 것이 발견된다. 반면, 최고속도의 60% 주행인 경우부터 명백한 5차 함수 유형을 보이며 교량통과 종료시점에서 부변위를 나타내는 현상이 속도가 증가됨에 따라 부각됨을 알 수 있다. 또한 선행 피크점보다 후행 피크점의 변위비가 우세하게 나타나며 그 크기 역시 매우 증폭됨을 알 수 있다.

이와 같이 복잡한 유형을 나타내는 고속열차의 속도에 따른 교량의 최대 변위비는 교량의 내하율을 결정하는 중요한 요소로서 충격계수에 해당되며 기존의 최대값을 30% 이하로 규정한 평가 식은 보정이 필요할 것으로 판단된다.

4. 각 수치해석 기법에 따른 고속열차의 속도 별 동적거동 분석

고속열차 주행속도별 PSC 박스 교량의 최대 변위비를 Newmark- β 기법과 Runge-Kutta 기법으로 각각 해석하였다. 저 진동 특성을 갖는 교량의 거동만을 고려해 볼 때는 큰 무리가 없으나 38자유도로 세밀하게 모델링한 동력차의 고주

고속철도 상 교량의 정밀 동적해석을 위한 개선된 수치적분법

파특성과 궤도 구조물의 불규칙성을 함께 고려한 본 연구에서 Runge-Kutta 기법의 해석이 보다 정밀도를 확보할 것으로 판단된다. 해석결과의 정확도를 향상하기 위하여 주행속도를 10 km/h 별로 세분하여 해석하였다.

두 기법을 이용한 해석결과는 고속철의 저속단계(150km/h)까지는 거의 유사한 응답을 나타내었으나, 중간속도 단계인 200 km/h부터 Newmark- β 기법을 이용한 해석결과는 큰 폭의 최대 변위값의 차이를 속도별로 나타내고 Runge-Kutta 기법을 이용한 결과에 비해 20% 적은 주기로 최대응답을 표현하고 있다. 반면에 최대응답의 결과값은 두 해석기법 모두 유사한 것으로 나타났다.

Runge-Kutta 기법을 이용한 결과를 분석한 결과, 일반적으로 연구된 280 km/h 주행속도에서 최대동적응답이 발생하였으며, 주행속도를 450 km/h까지 증가시키면 정적응답의 두 배 이상의 동적응답이 계산되었다. 또한 고속철의 주행속도가 증가할수록 동적증폭계수는 증가하였다(오순택 등, 2011).

5. 결 론

본 연구에서는 고속열차와 궤도구조물 그리고 PSC교량의 구조적 거동을 직접적분법인 Newmark- β 기법과 차량의 진동특성을 고려한 Runge-Kutta 기법을 적용하여 해석하였고, 열차의 속도에 따른 동적거동을 속도별로 분석하여 그 차이를 동적증폭계수로 나타내었다. 속도별 동적거동 분석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 교량의 최대응력과 변위는 KTX 열차의 주행속도가 증가 시 정적해석 결과보다 30% 이상 크게 증폭됨을 알 수 있다.
- 2) 동적해석결과 최대 응력과 변위는 열차가 교량의 중앙부를 통과하는 시점과 일치하지 않았으며 이는 고속철의 속도가 증가할수록 크게 차이를 나타내었다.
- 3) 이러한 차이는 단일응답과 복합응답으로 고속철의 속도별로 반복되는 것으로 나타났으며, 단일응답의 경우 최대동적응답을 나타내었으며, 이 반복현상의 주기와 진폭에서 두 해석기법의 결과가 차이를 나타내었다.
- 4) 주행속도를 10 km/h 별로 해석한 결과, Newmark- β 기법과 Runge-Kutta 기법을 이용한 최대 변위량은 유사하게 조사되었으나, 동적응답의 발생 주기가 Newmark- β 기법이 20% 정도 빠른 주기를 나타내는 것으로 해석되었다.
- 5) 고속철의 속도가 증가할수록 동적응답의 진폭이 증가하였고, 현 KTX 운행속도 내에서 280 km/h에서 최대 동적응답이 발생하였으며, 주행속도를 450 km/h까지 증가시켜 해석한 결과, 정적응답의 두 배 이상을 상회하는 동적증폭계수값을 나타내는 것으로 조사되었다.

참고문헌

김상호, 이용선, 조광일 (2003) 주행차량에 의한 궤도 동적특성의 매개변수 분석, 한국철도학회 춘계학술대회논문집, 한국철도학

회, pp. 337-342.
 김성일 (2000) **고속철도 교량의 교량-열차 상호작용해석**, 박사학위 논문, 서울대학교.
 박홍석 (1999) **개선된 고속철도열차모형을 사용한 교량의 동적해석에 관한 연구**, 박사학위논문, 연세대학교.
 송명관, 한인선 (2004) 고속철도교량의 새로운 3차원 유한요소해석모델의 개발, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제2호, pp. 369-379.
 오순택, 심영우, 이동준 (2010) 개선된 38자유도 모델을 이용한 고속철 PSC교량의 동적거동해석, **콘크리트공학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제22권, 제6호, pp. 797-803.
 정재운 (2004) **주행열차 질량을 고려한 철도교량의 동적응답 해석 기법 개발**, 박사학위논문, 인하대학교 대학원.

최성락, 이용선, 김상효, 김병석 (2002) 검증된 고속철도 차량의 20량편성 정밀모형에 의한 철도교량의 동적응답 분석, **전산구조공학회논문집**, 한국전산구조공학회, 제15권, 제4호, pp. 693-702.
 오순택, 이동준, 심영우, 윤준관 (2011) 고속철 속도변화에 대한 PSC박스 교량의 경간길이 별 동적해석, **구조물진단학회지**, 제15권, 제4호, pp. 204-211.

◎ 논문접수일 : 11년 09월 02일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 09월 05일
 ◎ 심사완료일 : 11년 09월 28일