

고속철 속도변화에 대한 PSC박스 교량의 경간길이 별 동적해석

A Dynamic Analysis of PSC Box Bridge Varying Span Lengths for Increased Speeds of KTX

오 순 택¹⁾ 이 동 준^{2)*} 심 영 우³⁾ 윤 준 관⁴⁾
Oh, Soon Taek Lee, Dong Jun Shim, Young Woo 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 various bridge span lengths running KTX railway locomotive up to increasing maximum speed(450km/h).

Three dimensional frame element is used to model the simply supported pre-stressed concrete (PSC) box bridges for four span lengths(40~25m). 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- β and Runge-Kutta methods which are able to analyse considering the dynamic impact factors are compared and contrasted.

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

1. 서론

1964년 동경과 오사카 구간 515km를 최고 운행속도 210km/h의 신간선을 개통한 이래 프랑스와 독일에 이어 우리나라도 2004년 4월에 서울과 부산 구간 412km를 설계속도 330km/h KTX 고속열차를 개통하였다. 현재 8개국 16개구간에서 고속철이 운영되고 있다. 특히 1986년 영국과 프랑스정부가 순수 민자를 유치하여 건설된 50km Euro tunnel은 2005년 상용화된 Euro star로 인하여 국가 간 고속철시대를 열고 Global시대에 적용된 대륙간 철도의 제 2 전성시대를 기대케 한다. 또한 수송능력과 안전성 그리고 환경 친화적인 철도교통에 운송속도를 더하여 새로운 시대변화에 부합되는 교통수단으로 부각되고 있다. 현재 진행 중인 고속철의 운행속도 증가경

향은 국가경쟁력을 대표하고 있다. 프랑스 TGV는 1989년 상용속도 300km/h에서 2010년 350km/h로 업그레이드 하였고 우리나라의 2009년 상용화된 KTX의 경우 최고속도 450km/h를 목표로 개발 중에 있다. 한편, 1970년 일본과 독일에서 개발된 자기부상열차는 1979년 517km/h, 1999년 552km/h 실험속도를 기록하였고, 상하이 공항과 도심 간 30km구간을 최고속도 430km/h로 운행하고 있어 철도 운송속도의 끝을 가늠키 어렵게 하고 있다(Profillidis, 2006).

이와 같이 고속으로 운행하는 고속철은 철도공학적 측면에서 궤도와 차량 그리고 동력전달과 자동제어부분에서 해결해야 하는 많은 기술적 문제점을 가지고 있으며, 토목 기반구조물 역시 속도증가에 따른 구조물의 엄격한 안정성이 설계에 반영되어야 한다. 따라서 축적된 고속열

1) 정회원, 서울과학기술대학교 건설공학부 교수
2) 정회원, 서울과학기술대학교 건설공학부 강사
3) 정회원, 서울과학기술대학교 철도전문대학원 박사과정
4) 정회원, 서울과학기술대학원 구조공학과 석사과정

* Corresponding author : djlee@snut.ac.kr 02-970-6576
• 본 논문에 대한 토의를 2011년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 9월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

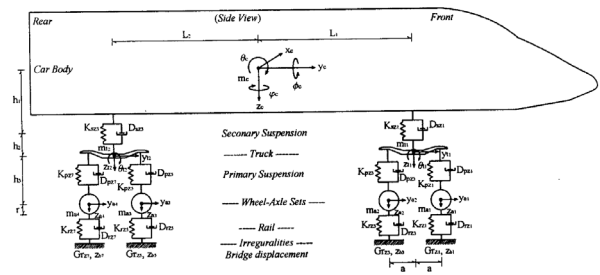
차운행을 통하여 안정된 운행관리, 보완된 설계기술 확보, 설계속도 450km/h를 목표로 향상된 운행속도를 위한 제반 기술개발 및 상용화 등등의 사회, 경제, 공학적 부가효과를 기대할 수 있을 것으로 전망하고 있다. 따라서 효율적이고 부가효과가 높은 고속열차 운행과 관련하여 운행구간 중 가장 중요도가 높은 교량과 고속열차의 상호작용을 통합하여 고려한 연구가 부각되고 있다. 특히, 고속운행으로 인한 구조물의 거동과 고속철과 궤도 그리고 교량을 통합하여 고려한 동적 상호작용력 해석이 보다 현실성 있는 초고속철 운영을 위한 교량의 안정성을 평가하는 방법으로 판단되어 보다 정밀한 해석기술의 개발이 요구된다.

제1단계 경부고속철 구간에 적용된 일관된 PSC 박스교량은 적합한 설계기준이 정착되지 않은 고속철의 초기 도입 시기에 적절한 조치였던 것으로 평가되고 있다. 또한 고속철이 운행되는 PSC 박스교량의 설계기준으로 최대 처짐, 처짐 가속도, 단부회전각 그리고 횡변위각에 대한 제한은 현재까지 운행된 고속철 운행실적을 바탕으로 매우 합리적인 결과를 도출한 것으로 평가되고 있다. 그러나 고속철을 위한 최대 40m 경간 외 3가지 PSC 박스교량 형식만으로 모든 자연환경조건을 충실하게 만족시키기에 현실적으로 부족하기 때문에, 여러 형식의 교량의 적용과 그에 합당한 설계기준의 개발이 요구된다. 또한 교량의 거동을 기준으로 한 현행 설계기준에 반해 차량의 운하중 분포와 같은 통합적인 구조설계요소 분석이 다양하게 연구되어야 한다. 따라서 교량의 동적해석과 더불어 차량의 진동특성을 고려한 적절한 수치해석을 통하여 중요 구조 매개변수에 관한 기준들을 확보하고자 한다.

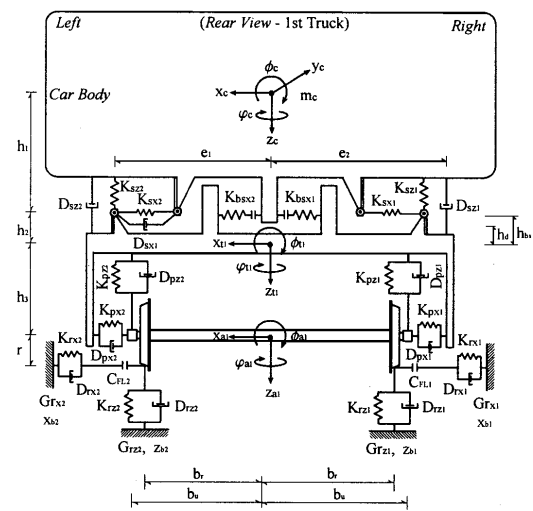
본 연구에서는 고속열차와 교량의 동적거동을 해석할 수 있는 유한요소프로그램을 이용하여 세밀하게 구성된 고속열차모형과 열차의 진동원인 궤도의 불규칙성을 포함하여 3차원 해석모형의 교량구조물을 총괄적으로 해석하고자 한다. 특히 고속철의 속도에 따른 불규칙한 궤도와 교량구조물의 상호작용으로 발생하는 동적구조응답특성을 차량의 진동특성을 고려한 4차 직접적분법인 Runge-Kutta 기법을 각각 적용하여 해석하고, 경부고속철에 적용된 교량의 경간 길이 25m, 30m, 35m, 40m에 대하여 동적특성을 분석하여, 기존 경부선의 설계기준과 발표된 실험을 통한 동적변위 값을 비교분석하고, 그 차이를 경간길이와 운행속도에 대한 매개변수별 설계기준으로 확보하고자 한다.

2. 고속주행열차의 모형화

경부고속철도에 도입하여 공용중인 고속 열차 KTX의 1편성 20량의 통과 시 상대적으로 중량(대차와 윤축을 포함하여 총 64 ton)인 동력차의 하중집중도가 가장 크기 때문에(송명관 한인선, 2004), 본 연구에서는 동력차를 38 자유도로 모형화 하였다(박홍석, 1999). Fig. 1에 단일열차의 모형화된 38자유도를 측면도와 후면도로 나타내었다. 일반적으로 100km/h 내외속도의 일반열차의 연직방향 거동에는 횡방향 및 종방향 운동의 영향이 작다는 가정 하에 연직변위와 피칭, 롤링만을 고려하여 모형화 하였다. 그러나 300km/h의 고속으로 운행하는 4개의 윤축과 2개의 대차를 가진 KTX 동력차는 보다 정밀한 모형화 기법이 필요하여 대차를 포함한 연직변위, 피칭, 롤링뿐만 아니라 횡변위, 종변위 및 요잉에 의한 운동효과도 동시에 고려할 수 있도록 열차를 세밀하게 모형화 하였다. KTX 동력차의 강체질량은 1개의 차체질량, 2개의



(a) Side view



(b) Rear view

Fig. 1 38 degree of freedom model of locomotive

대차 질량 및 4개의 윤축장치질량으로 나타내었다. 차체와 대차에는 6가지 변위; 연직변위, 횡변위, 종변위, 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).

교량과 열차 사이의 상호작용에 의한 차륜과 교량 사이의 상호 작용력은 궤도의 스프링강성 및 감쇠와 상대변위의 함수가 되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_i(t) = K_{ti} \cdot u_{ti} + D_{ti} \cdot \dot{u}_{ti} \quad (1)$$

여기서, $F_i(t)$ 는 상호작용력, K_{ti} 는 궤도의 스프링강성이고, D_{ti} 는 궤도의 감쇠이다. u_{ti} 는 차륜과 교량 사이의 상대변위이고, \dot{u}_{ti} 는 시간에 대한 변위의 미분으로 상대속도를 나타낸다. 특히 스프링강성은 고속주행 열차하중에 의한 교량의 동적응답에 영향을 크게 미치는 주요변수로서 일반철도의 경우보다 우수한 성능의 궤도를 적용하므로 해당 물성치를 참조하여 반영하였다(김상호 등, 2003).

3. PSC박스거더교의 모형화

본 연구에서는 기존 PSC 박스교량을 대상으로 모형화하고, 고속 주행 열차 하중을 속도별로 적용하여 교량의 중앙부에서 변위와 응력을 해석하여 동적응답을 정적응답과 비교 분석하였다. 선정된 PSC 박스교량은 40m 경간의 변단면의 단순교이며 교량의 폭은 14m이고, 복선궤도를 가진 유도상 교량으로서 대표단면을 Fig. 2에 나타내었다.

해석모형에서는 휨, 전단, 비틀림 모두를 파악할 수 있고 교량을 보요소가 강결절점에 의하여 상호 연결된 것으로 이상화한 3차원 뼈대요소모형을 사용하였다. 교량의 횡방향 요소는 4m 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 철근

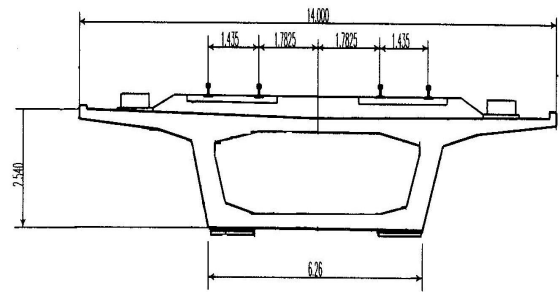


Fig. 2 Section properties of PSC girder bridge (units: mm)

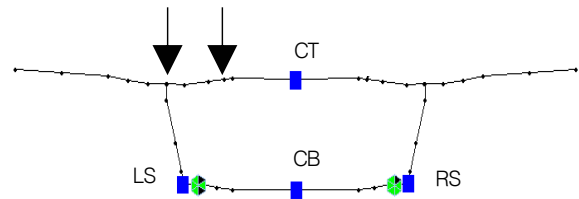


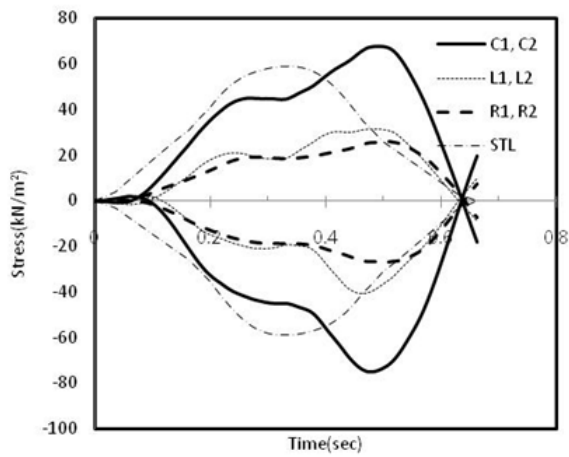
Fig. 3 Modelling of PSC girder bridge (MIDAS GEN)

콘크리트의 단위중량은 $2.5t/m^3$ 이다(최성락 등, 2002).

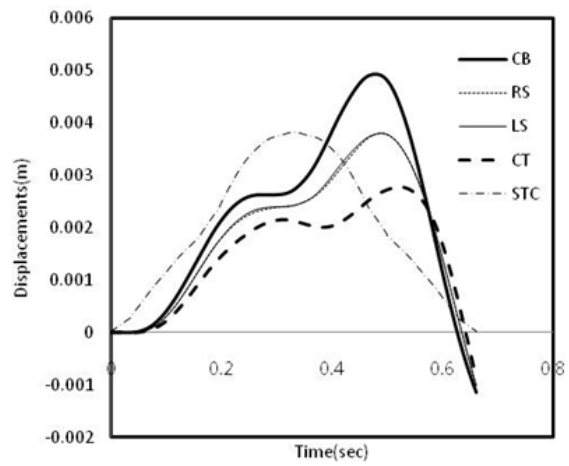
Fig. 3은 PSC 박스교량을 3차원 뼈대요소로 모형화한 것을 나타내었다. 교량의 양단부에 단순지지 점을 표시하였고 열차하중의 고속주행 시 작용하는 변위를 경간 중앙부에서 중앙상하단부와 좌우측 하단부 절점에서 수집하였으며 아래 방향의 화살표로 교량 상부 중앙점을 CT(Center Top), 궤도하중이 재하되는 교량 좌측 하부 점을 LS(Left Side), 교량 우측 하부 점을 RS(Right Side), 교량 하부 중앙점을 CB(Center Bottom)으로 표시하였다. 각 절점에서 교량의 축방향으로 연결되는 두 부재를 절점 LS를 기준하여 부재 L_1 , 부재 L_2 , CB를 중심으로 부재 C_1 , 부재 C_2 , RS를 중심으로 부재 R_1 , 부재 R_2 로 규정하였다. 단면도에서 화살표로 재하된 궤도위치를 표시하였다.

4. Runge-Kutta기법을 이용한 고속열차의 속도별 동적거동 분석

본 절에서는 교량과 고속열차의 상호작용을 고려한 이동하중해석으로 고주파특성의 구조물해석에 우수한 성능을 보이는 Runge-Kutta 기법을 적용하여 대표적인 세가지 차량속도에 따른 교량의 동적거동을 분석하였다. 그 결과를 각 속도별로 Fig. 4, 5, 6에 나타내고 각각의 속도

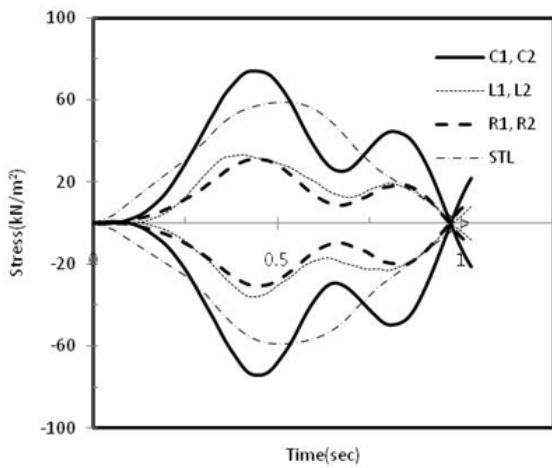


(a) Stress

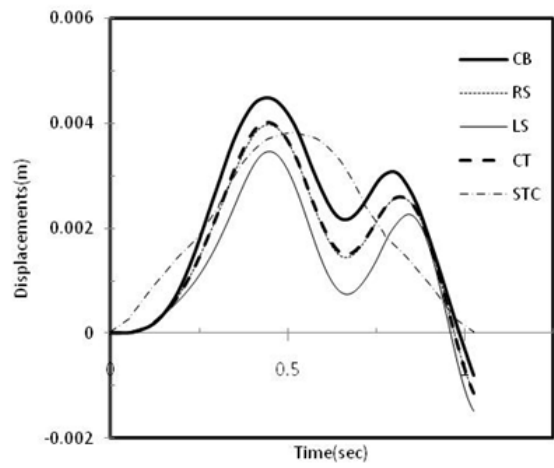


(b) Displacement

Fig. 4 Bridge responses under full speed

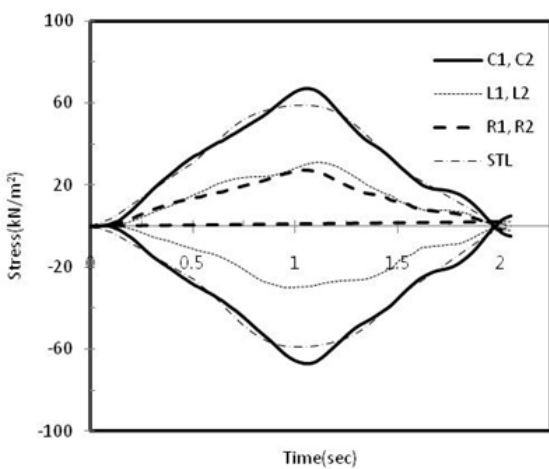


(a) Stress

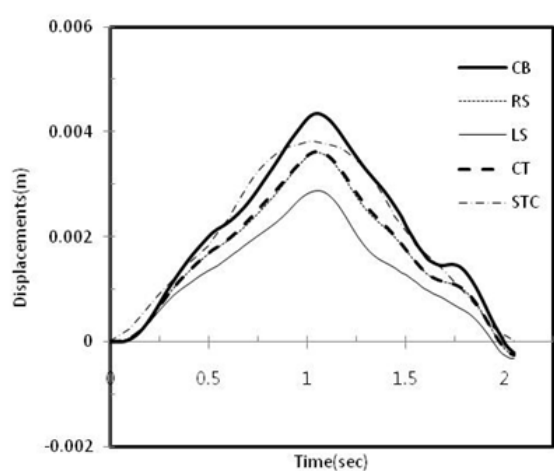


(b) Displacement

Fig. 5 Bridge responses under 60% speed



(a) Stress



(b) Displacement

Fig. 6 Bridge responses under 30% speed

별 특성을 비교분석하였다.

4.1 최고속도 운행 시 동적거동분석

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 계측위치에 따라 그 크기가 결정됨을 알 수 있다. 교량단면의 중앙하단부에 위치한 부재 C_1, C_2 는 최대응력 75.2kN/m^2 을 나타내며 이 결과는 동일부재에서 정적재하 결과 최대응력 59.1kN/m^2 과 비교하여 27% 증폭되는 것으로 조사된다. 측정위치별 응답비는 최대 54%에서 최소 35%로 조사되었다.

각 계측절점들(CB, LS, RS, CT)에서 중앙 하단부의 절점 CB가 최대변위를 나타내며, 양측 하단부 LS와 RS는 유사한 응답을 중앙상단부에 위치한 절점CT는 최소 변위값을 나타내고 있다. 고속주행하중에 의한 동적 응답은 중앙 하단부 CB에서 최대 변위 4.94mm 이상을 기록하였으며 동일절점의 정적재하 변위 값과 비교하여 29% 증폭되었다. 상기 절에서 언급된 동적응력해석에서 0.50초 이후 발생한 부(-)변위를 보여주고 있으나, 총 차량의 교량통과시간 0.66초에 대하여 거의 말미인 0.64초 이후에 작용하였다. 열차가 교량의 중앙부를 통과할 것으로 예측되는 시간대 0.33초를 지나서 0.48초에서 최대변위를 나타내어 대칭이 아닌 이형응답의 다차모드의 변위가 조사되었다.

4.2 60% 주행 시 동적거동분석

Fig. 5에서는 고속열차가 최고속도의 60% 즉 200km/h 로 주행 시 계산된 각 절점과 부재의 동적응답결과와 정적하중재하로 인한 최대응력을 STL, 최대변위를 STC로 함께 표시하였다.

고속열차의 주행속도가 감소됨에 따라 Fig. 4와 비교하여 응력과 변위의 크기가 크게 완화됨을 발견할 수 있다. 다만 동적응력과 변위해석 모두 최고속도의 열차운행결과에 비하여 후행모드의 크기가 크게 감소하여 상대적으로 선행모드의 응력과 변위 값이 우선하고 최고결과 값 역시 열차가 교량의 중앙부를 통과하는 0.50초보다 선행된 시점에서 조사되었다. 또한 부응력과 부변위가 응답의 말기에 나타났다.

4.3 30% 주행 시 동적거동분석

Fig. 6은 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 Fig. 8과 Fig. 9를 비교하여 응력과 변위의 크기가 크게 완화됨을 발견할 수 있다. 또한, 정적재하 결과와 비교된 차이거의 유사한 결과를 보이고 있다. 또한, 조사된 절점과 부재의 응답 크기의 비는 선행조사결과들과 일치하였으며 최대응력과 최대변위 역시 중앙 하단부 CB점과 그 절점에 연결된 부재에서 발생하는 것으로 조사되었다. 최대응답의 시간은 Fig. 5의 결과와 상이하게 열차가 교량중앙부를 통과하는 1.0초와 거의 일치하는 것으로 조사되었다. 또한 부응력이나 부변위는 최고속도 30% 주행 시에는 거의 발행하지 않는 것으로 판단된다.

5. 해석결과 비교분석

5.1 정적해석결과와 비교한 상대변위를 통한 속도별 동적거동분석

KTX 열차의 주행 시 교량에 미치는 변위를 정적재하시 최대 변위를 기준으로 동적해석 변위를 상대변위로 나타내고 열차의 속도별 변위의 변화를 분석하여 각 속도별 특성을 Runge-Kutta 기법으로 해석하여 조사하였다. 조사 속도는 최고속도와 60% 그리고 30% 주행속도에서 동적변위와 정적변위간의 비를 D.M.F.로 나타내고 상대

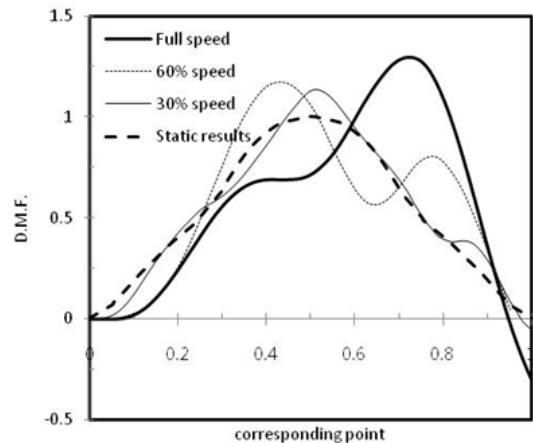
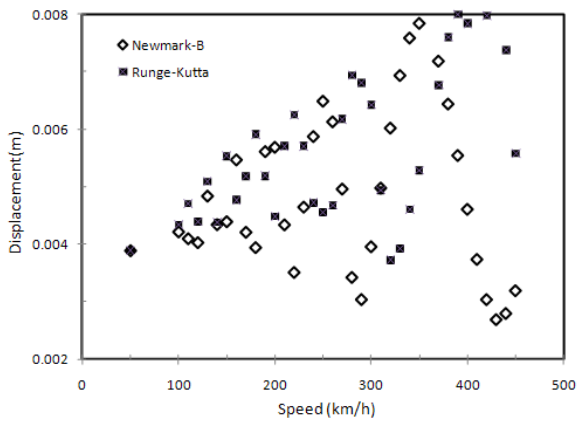
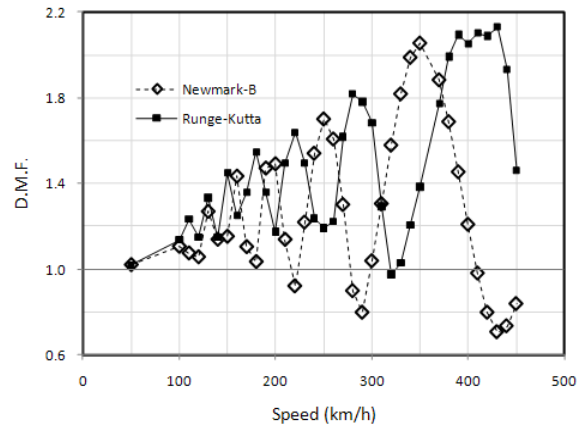


Fig. 7 Dynamic Magnitude Factor for speed ratio

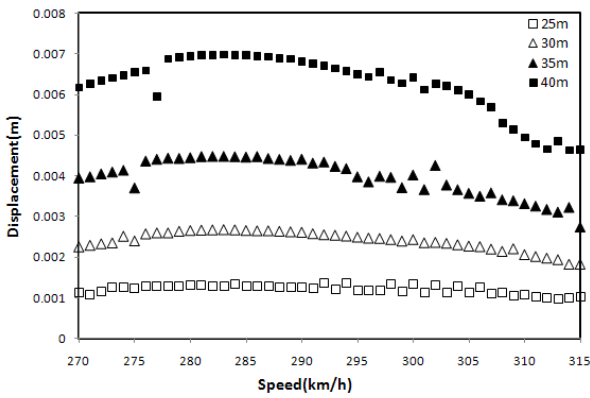


(a) Displacement

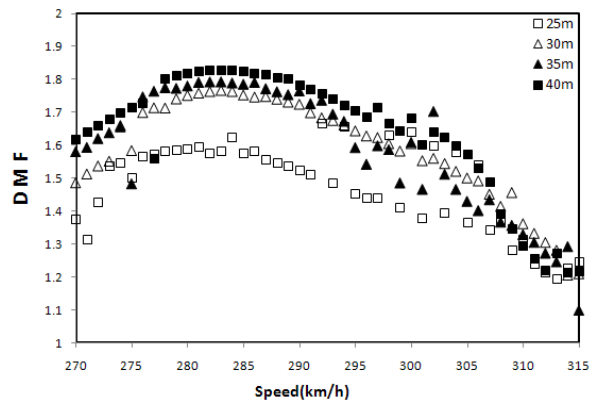


(b) D.M.F.

Fig. 8 Maximum response for speed



(a) Displacement



(b) D.M.F.

Fig. 9 Dynamic responses for bridge length

교량통과시간을 기준으로 Fig. 7에 표시하였다.

KTX 열차의 최고속도를 기준하여 상대속도별 동적 변위비를 함께 나타내었다. 열차의 교량통과시간은 1로 표현하고 열차가 중앙부를 통과하는 시간을 0.5로 규정하여 각 속도별 정적해석 최대 변위와의 상대 변위비를 모두 기록하였다. 주행속도별 동적/정적 최대 변위비 D.M.F.는 각각 1.29배, 1.17배 그리고 1.14배로 계산되었으며, 최대변위가 발생한 시점이 열차가 교량의 중앙부를 통과하는 시점보다 우선하거나 후행하였다. 단, 최고속도 주행 시에는 후행하여 발생하였다.

교량의 중앙하단부에서 발생하는 최대 변위비는 열차가 최고속도로 주행할 경우 가장 크게 조사 되었고 속도별로 변위비가 증가됨을 알 수 있었다. 그 발생시점은 교량경간의 75% 지점에 발생하였다. 상대적으로 정적해석 시 최대 변위는 50% 지점에서 발생한 반면, 20km/h운행 시 40%

지점에서 선행하여 발생됨을 알 수 있다. 그리고 최고속도의 30% 주행 시 동적변위유형은 대칭이며 3차함수형태의 정적변위에 비해 크게 차이를 나타내지 않고 있으나 복잡한 다차 함수 유형이 시작되는 것이 발견된다. 반면, 최고속도의 60% 주행인 경우부터 명백한 5차 함수 유형을 보이며 교량통과종료시점에서 부변위를 나타내는 현상이 속도가 증가됨에 따라 부각됨을 알 수 있다.

5.2 고속열차의 속도별 교량의 동적증폭계수

고속열차 주행속도별 PSC 박스 교량의 최대 변위비를 Newmark- β 기법과 Runge-Kutta 기법으로 각각 해석하였다. Newmark- β 기법은 보편적 방법으로 대부분의 기존 연구결과들에 적용된 직접적분법이다. 다만, 저진동 특성을 갖는 교량의 거동만을 고려해 볼 때는 큰 무리가

없으나 38자유도로 세밀하게 모델링한 동력차의 고주파 특성과 궤도 구조물의 불규칙성을 함께 고려한 본 연구에서 Runge-Kutta 기법의 해석이 보다 정밀도를 확보할 것으로 판단된다. 해석결과의 정도를 향상하기 위하여 주행속도를 10km/h별로 최대변위와 동적/정적 최대변위비를 Fig. 8에 기록하였다.

두 해석결과는 고속철의 저속단계(100km/h)까지는 거의 유사한 응답을 나타내었으나, 중간속도단계인 200km/h부터 Newmark- β 기법을 이용한 해석결과는 큰 폭의 최대변위값의 차이를 속도별로 나타내고 Runge-Kutta 기법을 이용한 결과에 비해 20% 적은 주기로 최대응답을 표현하고 있다. 반면에 최대응답의 결과치는 두 해석기법 모두 유사한 결과값을 나타내었다.

Runge-Kutta 기법을 이용한 분석 결과, 일반적으로 연구된 280km/h 주행속도에서 최대동적응답이 발생하였으며, 주행속도를 450km/h까지 증가시키면 정적응답의 두 배 이상의 동적응답이 계산되었다. 또한 고속철의 주행속도가 증가할수록 동적증폭계수는 지속적인 최대값을 나타내고 있다.

5.3 교량 경간 길이 별 동적특성

현 고속철 차량의 주행속도에서 동적특성이 가장 크게 발생하는 구간에 대하여 기존 40m PSC 박스교량의 경간 길이 35m, 30m, 25m 인 경우로 모델링하여 각 경간 길이에 따른 교량의 동적특성을 분석하였다. Fig. 9(a)와 (b)에서 각 교량 별 최대 동적변위와 동적증폭계수를 주행속도 별로 각각 표시하였다.

최대 동적변위는 40m, 35m, 30m 교량에서 각각 6.9mm, 4.5mm, 2.7mm로 283km/h에서 최대 응답을 발생하였고, 25m 교량에서는 주행속도 292km/h에서 1.4mm로 조사되었다. 최대 동적증폭계수분포의 경우도 동일한 주행속도에서 발생하였으며, 경간 길이 별로 1.83, 1.79, 1.77 그리고 1.62를 기록하였다. 따라서 경간 길이가 길수록 최대동적증폭계수가 크게 발현되는 것으로 조사되었으나, 최대 주행속도인 310km/h에서는 경간길이 30m인 경우 가장 큰 동적증폭계수 값을 기록하였다.

5.4 설계기준 및 기존 교량 실험결과 비교 검토

본 절에서는 일반적인 고속철의 주행속도에 따른 기존

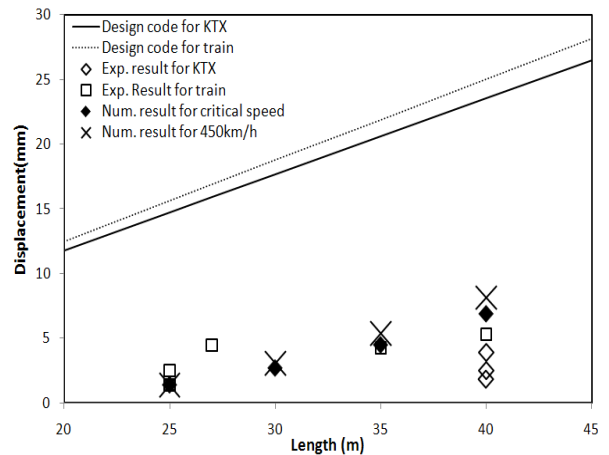


Fig. 10 Comparison with design codes and experimental results

경부선 일반철과 고속철 교량 별 현장 실험에 의해 조사된 최대 변위량(한국철도시설공단, 2008)과 수치 해석된 최대 변위량을 일반철도와 고속철도 설계기준에 대하여 비교 분석하였다.

경부고속철 교량별 동적변위의 실험값과 수치해석에 의해 해석된 현 고속철 주행속도 그리고 차후 고속선의 계획운행속도인 450km/h까지 증가시켜 해석된 최대동적변위를 Fig. 10에서 경부고속철도설계기준 (L/1700) 및 철도설계기준 (L/1600)과 비교하였다 (한국철도시설공단, 2004). 설계하중 및 실제운행하중의 하중조건이 상이하고 안전계수 등이 고려되어 있는 조건에서 본 결과를 통해 실제 교량의 응답수준을 평가할 수 있다. 측정된 결과로부터 경부고속선의 경우 기준대비 5.6~13.3%, 기존선의 경우 9.7~25.9% 수준의 응답이 조사되었고(한국철도시설공단, 2008), 수치해석법에 의한 결과는 기존 운행속도에서 기준대비 9.5~29.3%, 계획 운행 속도에서는 9.5~34% 수준의 응답을 나타나 설계기준 대비 지나친 여유도를 갖는 것으로 분석되었다.

6. 결론

본 연구에서는 고속열차와 궤도구조물 그리고 PSC 박스교량의 구조적 거동을 수치모델을 이용하여 해석하고 열차의 속도에 따른 동적거동을 교량 경간길이와 증가될 최고속도를 포함한 운행속도 별로 분석하여 그 차이를 최대 동적증폭계수로 분석하였다. 수치해석결과 속도별 동적거동 분석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 교량의 최대응력과 변위는 KTX 열차의 주행속도가 증가 할 때, 정적해석 결과보다 30%이상 크게 증폭됨을 알 수 있다.
- (2) 동적해석결과 최대 응력과 변위는 열차가 교량의 중앙부 통과 시점과 일치하지 않으며 이는 고속철의 속도가 증가할 수록 크게 차이를 나타내었다.
- (3) Newmark- β 기법을 이용한 해석결과와 비교할 때 최대변위값은 유사하게 해석되었다. 다만, 주행속도를 10km/h별로 해석한 결과에서 Runge-Kutta 기법을 이용한 최대동적응답은 20% 정도 적은 진폭과 빠른 주기로 해석되었다.
- (4) 교량의 경간 길이에 따른 동적변위값은 경간 길이가 길수록 크게 발현되는 것으로 조사되었으나, 동적증폭계수는 경간 길이 30m에서 운행속도 310Km/h에서 최대 값을 기록하였다.
- (5) 경부고속철 교량의 경간 길이 별 동적변위에 대한 현장 실험값과 수치해석된 최대 동적 변위량을 일반 철도 및 고속철도 설계기준과 비교분석한 결과 계획 운행속도 450km/h에서도 최대 34% 수준의 응답을 나타내는 것으로 조사되었다.

현 고속철 설계기준에 준하여 현재 고속철의 운행 속도 (~310km/h)뿐만 아니라 계획운행속도(~450km/h) 주행 시 발생하는 동적응답해석결과 현 설계기준대비 과도한 여유값을 갖는 것으로 조사되었다. 따라서 차후 개발될 고속철에 대한 교량의 동적설계기준은 구조적인 안정

성과 경제적인 효율성을 고려한 보다 현실성 있는 설계기준이 필요하다고 판단된다.

참고문헌

1. 김상효, 이용선, 조광일, "주행차량에 의한 궤도 동적특성의 매개변수 분석", 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 2003, pp.337-342.
2. 김성일, "고속철도 교량의 교량-열차 상호작용해석", 서울대학교 대학원 토목공학과, 박사학위논문, 2000.
3. 박홍석, "개선된 고속철도열차모형을 사용한 교량의 동적해석에 관한 연구", 연세대학교 대학원 토목공학과, 박사학위논문, 1999.
4. 송명관, 한인선, "고속철도교량의 새로운 3차원 유한요소 해석모델의 개발", 대한토목학회논문집, 제24권, 제2호, 2004, pp.369-379.
5. 오순택, 심영우, 이동준, "개선된 38자유도 모델을 이용한 고속철 PSC교량의 동적거동해석", 콘크리트공학회논문집, 제22권, 제6호, 2010, 797-803.
6. 최성락, 이용선, 김상효, 김병석, "검증된 고속철도 차량의 20량편성 정밀모형에 의한 철도교량의 동적응답 분석", 전산구조공학회 논문집, 제15권, 제4호, 2002, pp.693-702.
7. 한국철도시설공단, "철도교량 동적안정성 및 동적설계기준에 관한 연구", 한국철도시설공단 보고서, 2008, pp.263.
8. 한국철도시설공단, "경부고속철도 설계지침(노반편)", 한국철도시설공단, 2004.
9. V. A. Profillidis, "Railway Management and Engineering", Ashgate, 3rd. Edition, 2006.

(접수일자 : 2011년 4월 15일)
 (수정일자 : 2011년 6월 8일)
 (심사완료일자 : 2011년 6월 13일)

요 지

고속철 교량의 동적응답을 보다 정밀하게 해석하기 위한 동적해석방법을 개발하였다. 차후 증가될 초고속(450km/h)을 포함하여 고속 주행하는 KTX 동력차에 의한 교량의 동적거동을 면밀한 속도변수분석과 정밀한 해석을 위한 고속철, 교량 그리고 궤도구조물의 상호작용을 포함한 수치모델을 구성하였다. 네 가지 40~25미터 단순시간의 PSC 박스교를 3차원 유한 프레임요소 모델로 개발하였다. 스펙트럼밀도함수로 산출된 궤도불규칙값과 궤도간 상이한 거리차이를 수치모델화 하였다. 고속철차량은 (KTX) 38자유도로 구성하였다. 38자유도 모델은 3방향 변위와 상응하는 회전각을 고려하였다. 동적증폭계수는 다양한 불규칙 궤도, 캠버, 주행속도, 자갈도상과 같은 주행조건에 의해 결정된다. 이와 같은 동적증폭계수를 해석하기위한 Newmark- β 기법과 Runge-Kutta기법을 적용하여 고속철 속도별과 경간별로 면밀하게 비교 분석하였다.

핵심 용어 : 38자유도, 동적응답, 고속철차량, PSC박스교, Runge-Kutta기법