

차량-교량 상호작용을 고려한 동적해석 프로그램 개발

Development of Dynamic Analysis Program Considering Vehicle-Bridge interaction

조 은 상*, 구 형 우**, 황 원 섭***
Cho, Eun-Sang, Koo, Hyoung-Woo, Hwang, Won-Sup

Abstract

Analysis program to estimate the dynamic characteristics of bridge is investigated by using three-dimensional analytical model considering vehicle-bridge interaction. A dynamic interaction models of the vehicle-bridge system are established, which is composed of a vehicle element model and a finite element bridge model. The vehicle models are established according to the structure and suspending properties of vehicle. The dynamic responses of the bridge are calculated. But the computer simulation program is being verified with field tests results, it must be corrected according to them.

1. 서 론

국내 철도교량 2,594개소 중 판형교가 차지하고 있는 비율이 46.8%로 단일 형식의 교량으로서는 상당히 높은 비율을 차지하고 있다. 그러나 현재 공용중인 철도 판형교의 상당수가 부설시기가 오래된 노후화된 교량이며, 도상 없이 거더에 침목이 직결되는 되는 형태로 열차하중이 직접적으로 교량에 전달되고, 운행되는 열차하중에 비해 상대적으로 작은 중량의 상부구조로 인하여 유도상 교량에 비해 충격 및 진동에 의한 교량의 손상이 크게 발생하게 된다. 또한 판형교는 횡방향 진동이 수직방향 진동과 동일한 수준이거나 상회하는 진동특성을 나타내고 있어 이에 대한 적절한 대책이 요구된다. 진동가속도의 크기가 현재 사용 중인 교량 구조시스템의 구조적 안전성과 직결되지는 않으나 장기적으로 피로손상의 문제를 야기시킬 수 있으며 차량의 주행안전성과 승차감에 영향을 미치게 된다. 특히 횡방향의 변위 및 진동가속도는 차량의 주행안전성과 밀접한 관계가 있기 때문에 차량과 교량의 상호작용을 고려한 동적 안정성 검토를 수행하여야 할 필요성이 있다. 기존선 판형교의 증속 및 기존선 판형교의 고속철도 목표속도 운행을 위한 적합성 판정과 적정개량기술 확보를 위한 실험적 연구는 계속 수행되고 있으며, 새로 부설된 고속철도 교량에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 그러나, 기존선 판형교에 대한 동적 안정성 평가에 대한 연구는 미흡한 실정이며, 고속철도의 기존선 통과 따른 동적 특성에 대한 연구는 거의 이뤄지지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 우선적으로 기존선 판형교의 증속을 위한 동적 안정성 평가를 위해 새마을호와 무궁화에 대한 3차원 동적 해석모델 작성을 목적으로 한다.

2. 교량 및 차량의 운동방정식

2.1 교량 운동방정식

무한개의 자유도를 가진 실구조물의 동적응답을 얻기 위해서는 유한개의 자유도를 가지고 있는 수치 모델로 분할 하여하므로 본 연구에서는 변위법에 기초한 유한요소법을 통하여 수치 모델을 구성하였다. 해석시 고려된 교량 모델은 절점당 6자유도를 갖는 공간 뼈대 요소를 사용하였다. 침묵과 레일도 동일한 요소를 사용하여 수치모델을 작성하였다. 상술된 바와 같이 기존선 판형교에서는 횡방향 진동가속도가 수직방향 진동가속도 수준을 상회하기 때문에 향후 횡방향 거동 특성을 반영할 수 있는 요소를 사용하여 수치모델을 작성할 필요가 있다. 그러나 본 연구에서는 개발된 프로그램의 검증 단계이므로 간단한 수치모델로 작성하였다. 레일은 거더에 rigid link를 사용하여 연결하였으며, 교량의 질량과 감쇠 행렬은 각각 일관질량(consistent mass matrix)과 Rayleigh damping을 사용하였다. 일반화된 교량의 운동방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\overline{M}_b] \{ \ddot{a} \} + [\overline{C}_b] \{ \dot{a} \} + [\overline{K}_b] \{ a \} = \{ \overline{f} \} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} [\overline{M}_a] &= [\Phi]^T [M_b] [\Phi] \\ [\overline{C}_b] &= [\Phi]^T [C_b] [\Phi] \\ [\overline{K}_a] &= [\Phi]^T [K_b] [\Phi] \\ \{ \overline{f} \} &= [\Phi]^T \{ f \} \end{aligned}$$

$[M_b] [C_b] [K_b]$ 는 각각 교량의 질량, 감쇠, 강성 행렬이며, $\{ f \}$ 는 궤도틀림이 있는 레일 위를 주행하는 열차의 동적 운동이다. 향후의 연구에서는 열차에 의한 교량 가진시에 발생하는 부가 질량효과를 고려하기 위해서 직접적분법에 의해 운동방정식의 해를 구해야 한다.

2.2 차량 운동방정식

차량의 운동방정식은 Hamilton 원리로부터 유도된 Lagrange 방정식을 이용하였다. 다음 식(2)는 일반화된 Lagrange 방정식을 나타낸다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U_e}{\partial q_i} + \frac{\partial U_d}{\partial q_i} = 0 \quad (2)$$

여기서, T 는 운동에너지이고, U_e 는 위치에너지, U_d 는 분산에너지를 나타낸다.

3차원 차량의 운동방정식 정식화를 위해서 차체 전·후방에 각각 2개의 축을 갖고 각각의 축에 2개의 현가 장치가 있는 모형을 설정하였다. 차량 하중은 차량 질량중심에 집중시켰다.

수치모델의 검증 단계에서 사용된 차량 모델은 요잉(yawing) 자유도가 생략된 차체의 rolling, pitching, bouncing, 차축의 parallel hop, windup motion, axle tramp의 9자유도 모델로 이상화 하였다. 그러나 차량의 사행동 또한 교량의 동적응답에 큰 영향을 미치므로 실속치와의 검증단계를 거치면서 차량 모델의 정밀도를 개선할 것이다. 또한 차량과 차량의 연결부위에서 발생하는 종방향 운동 특성을 반영한 모델의 작성이 요구된다.

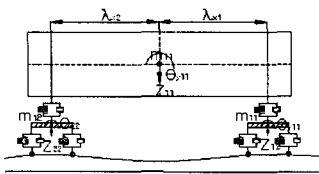


그림 1. 새마을호 모델

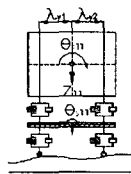
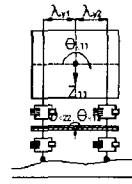
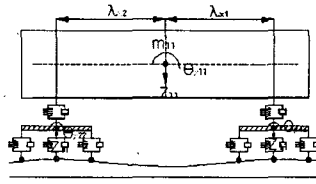


그림 2. 무궁화 모델



2.3 궤도틀림

궤도틀림은 차량통과시에 발생하는 교량진동에 영향을 미치는 주요한 인자로 궤도에 있어서 불가피하게 발생하며, 궤도구조, 열차하중 및 보수작업의 패턴에서 그 특성이 정하여 진다. 이것에 대하여는 그 크기 외에 파장의 특성이 그 위를 주행하는 차량의 주행안전, 승차감에 관계하여 중요하게 된다. 이 파장 성분을 나타내는 방법으로서 공간 주파수에 대한 파워 스펙트럴밀도(Power Spectral Density)가 이용된다. 실제의 계측이 이뤄진 교량의 검측 자료를 해석에 적용하는 것이 타당하나 현장 조건상 실제의 검측을 통한 데이터 획득이 용이하지 못하며, 국내에는 궤도틀림에 대한 정형화된 PSD 함수가 존재하지 않기 때문에 교량의 동적응답에 영향을 미치는 하나의 인자로서 미국의 FRA(Federal Railroad Administration) 규정을 적용하였다.

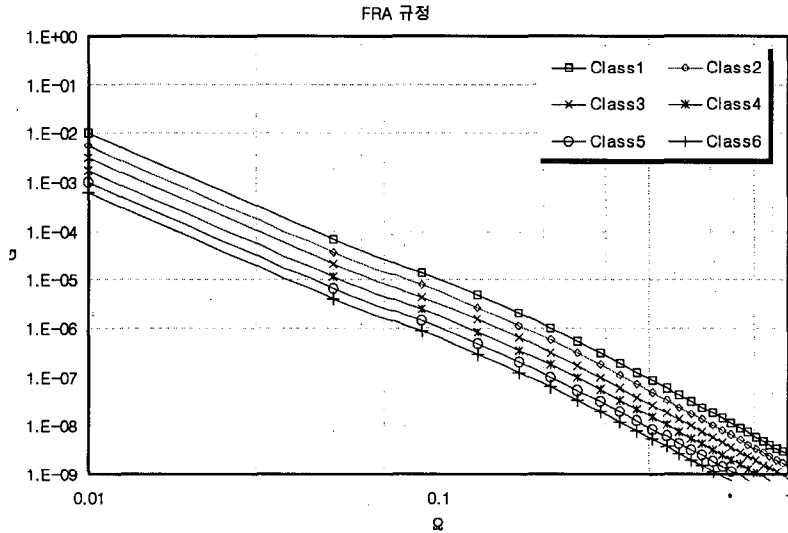


그림 3. FRA 궤도틀림 PSD함수

그림 3은 미국 FRA PSD(Power spectral density) 함수를 나타낸 것으로 총 6개의 등급으로 궤도의 품질을 나타내고 있다. FRA에서는 연직틀림(elevation irregularity) 및 줄방향 틀림(alignment irregularity)에 적용되는 PSD 함수와 레일 높이틀림(superelevation irregularity) 및 궤간틀림(gauge irregularity)에 적용되는 PSD 함수를 다르게 제시하고 있다.

$$G_{rr}(\Omega) = \frac{A \Omega_1^2 (\Omega^2 + \Omega_1^2)}{\Omega^4 (\Omega^2 + \Omega_2^2)} \quad (3)$$

$$G_{rr}(\Omega) = \frac{A \Omega_2^2}{(\Omega^2 + \Omega_1^2)(\Omega^2 + \Omega_2^2)} \quad (4)$$

식 (3)은 연직틀림과 줄방향 틀림에 적용되는 PSD 함수이며, 식 (4)는 레일 높이틀림 및 궤간틀림에 적용되는 PSD 함수를 나타낸 것이다.

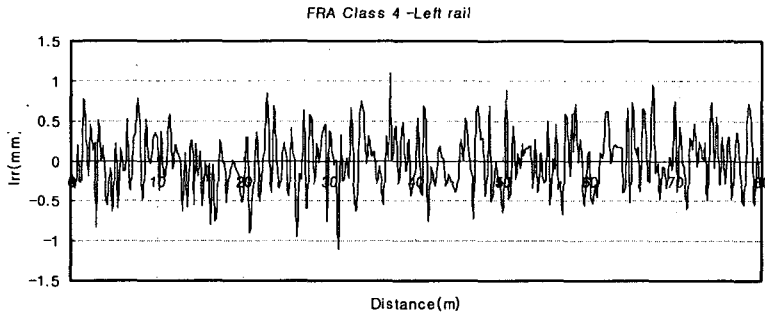


그림 4. 좌측레일 궤도틀림

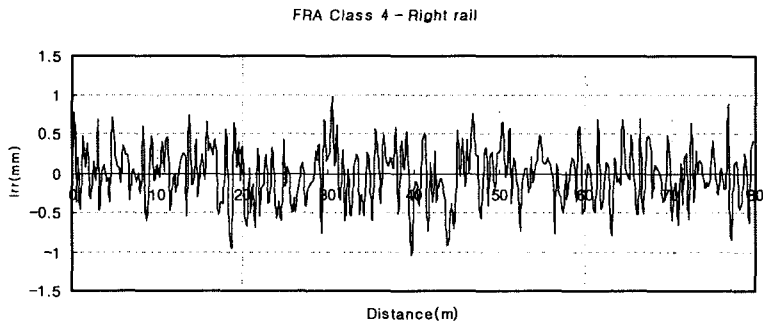


그림 5. 우측레일 궤도틀림

그림 4와 5는 Monte Carlo 시뮬레이션을 이용하여 랜덤하게 생성해낸 연직방향 궤도틀림 결과를 나타낸 것이다. 그림 4는 좌측레일의 궤도틀림을 나타낸 것이고, 그림 5는 우측레일의 궤도틀림을 나타낸 것이다. 각각은 시뮬레이션을 통하여 2000개의 데이터를 생성한 결과를 나타낸 것이다.

3. 해석 결과 및 결론

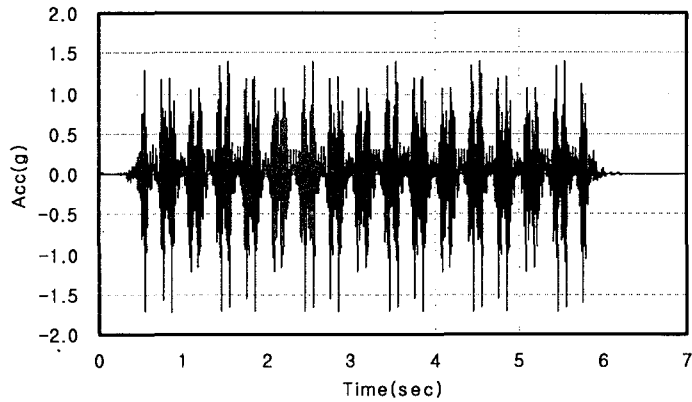


그림 6. 교량 중앙부 가속도 응답

본 연구에서는 교량상을 주행하는 열차에 의한 교량의 동적응답을 보다 정밀하게 추정하기 위해 3차원 동적 모델을 개발하였다. 실제 해석상 적용된 모델은 실 운행하중 모형이나 열차 편성은 프로그램 검증에 의하여 17량으로 편성하였다. 현재 개발된 프로그램은 검증 단계이며, 실측 데이터와 기타의 상용프로그램의 이동하중 해석과의 비교 검증을 통해서 수정될 것이다.

참 고 문 헌

1. V.A Profillidis, *Railway Engineering*, Avebury Technical, 1995
2. Esveld, *Modern railway track*, MRT-Production, 2001
3. L.Fryba, *Dynamics of railway bridges*, Thomas Telford, 1996
4. 김성일, "고속철도 교량의 교량-열차 상호작용해석, 서울대학교 박사학위 논문, 2000
5. Y.B.Yang, *Vehicle-Bridge Interaction Dynamics*, Sinotech engineering consultants, 2004
6. K.T.F. Au, "Impact study of cable-stayed railway bridges with random rail irregularities, *Engineering Structures*, 2002