

레일이음매에 의한 주행면 불규칙성을 고려한 판형교의 동적거동 Dynamic Behavior of a Open-Deck Steel Bridge considering Surface Irregularities of Rail Joints

김성일*
Kim, Sung-Il

김현민**
Kim, Hyun-Min

오지택*
Oh, Ji-Taek

ABSTRACT

The open deck steel bridge is the most common type in railway bridges. Steel I-shaped girders are connected with sleepers directly without ballast and moving train loads are transmitted directly to the girder, so this bridge has weak characteristics on impact. Therefore, considerable accelerations can cause unsatisfactory dynamic behavior of the open deck steel bridge. Especially, Impact created at rail joints can increase the dynamic response of the bridge and this phenomenon would be injurious to passenger comfort. In the present study, dynamic behavior of the open deck steel bridge which has a rail joint is estimated through experimental studies and bridge-train interaction analysis considering surface irregularities by rail joints.

1. 서론

국내 철도교량의 약 47%를 차지하는 판형교는 도상이 없이 주형에 침목이 직결되는 구조로 열차 주행하중이 도상층 없이 교량에 직접적으로 전달되어 동적하중에 대한 응답에 매우 민감한 특징을 갖고 있다. 따라서 타 형식의 교량에 비해 열차하중에 의한 동적응답이 클 수 있다. 특히 교량 상에 레일이음매가 존재할 경우 교량에 추가적인 충격하중을 유발하여 교량의 동적응답을 증폭시키고 승차감을 나쁘게 하는 원인이 되고 있다^[1]. 본 논문에서는 이러한 레일이음매가 존재하는 판형교에 대한 현장실험 및 레일이음매에 의한 주행면 불규칙성을 고려한 교량-열차 상호작용해석을 통하여 레일이음매가 판형교의 동적거동에 미치는 영향을 분석하였다.

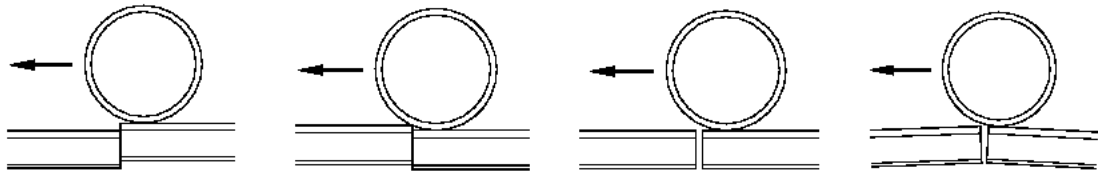
2. 레일이음매에 의한 주행면 불규칙성

인접 레일과의 기하학적 불연속 구간을 갖는 레일이음매는 그 형태가 크게 단차와 유간으로 구분된다. 레일이음매에 의한 주행면 불규칙성은 그림 1과 같이 상향단차, 하향단차, 유간, 꺾임이 있는 단차로 구분되며 이러한 불연속 형태에 따라 충격력의 증가 양상은 다르게 나타난다^[2]. Jenkins(1974)등은 궤도의 기하학적 불연속점으로 인해 발생하는 충격력을 수치적으로 분석하기 위해 타격에 의한 순간적인 충격력과 레일 힘에 의해 지속되는 충격력으로 제안하였다.^[2] 본 연구

* 한국철도기술연구원, 선임연구원, 공학박사, 정회원

** 한국철도기술연구원, 주임연구원, 정회원

에서는 주행면 불규칙성을 고려한 교량-열차 상호작용 해석 시 상향단차(step-up joint)의 경우를 가정하여 동적거동을 분석하였다.



(a) 하향단차 (b) 상향단차 (c) 유간 (d) 꺾임각이 있는 단차
그림 1. 레일이름대로 인한 레일의 불연속 형태

3. 열차 및 교량의 수치해석 모델링

본 연구에서 사용된 철도 차량의 감쇠 및 하중에 대한 동적 강성행렬은 교량과 수직방향 및 종방향 동특성을 포함한 차량 시스템간의 동적 상호작용을 고려하고 있으며, 차량의 본체 및 대차에 x, y, z 각방향의 병진 및 회전자유도를 모두 고려하며, 윤축에서 병진자유도를 고려한 모델이다. 다양한 열차 종류에 대하여 6축 디젤 동력차 및 4축 새마을 동력차, 4축 객차에 대한 시뮬레이션이 가능하도록 수치모델을 구성하였으며, 이 연구에서는 6축 동력차 1량과 4축 객차 7량으로 구성된 열차 편성에 대한 교량-열차 상호작용해석을 수행하였다.

차량하중은 질량중심에 집중시키며, 현가 장치는 선형 탄성으로 거동하고 그 위치에서 댐퍼와 쌍으로 이루어져있다. 각각 강체 사이의 연결부는 Coulomb 마찰력에 대응하는 선형 점성 댐퍼와 평행한 선형 스프링으로 모델링하였다. 각 차량은 커플러(coupler)에 의한 차체의 연결로 이루어져 있다. 커플러는 전진 방향의 종방향 운동을 고려하기 위해서 스프링과 댐퍼로 모델링된다.

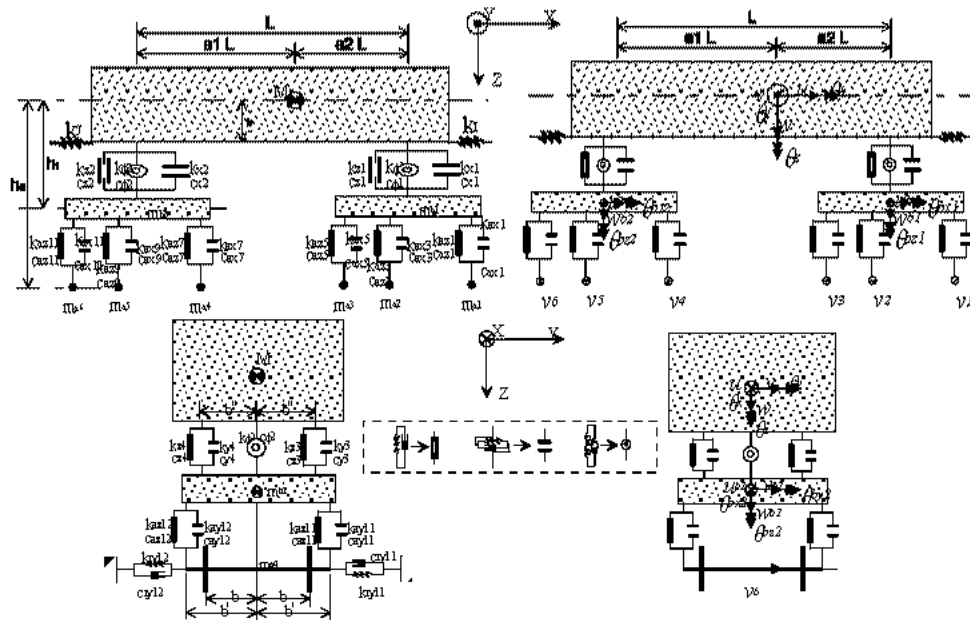


그림 2. 적용된 6축 디젤 동력차의 모델링

그림 2는 동력차의 수치 모델을 보여주고 있다. 차량의 운동에너지 T 는 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$T = T_M + \sum_{i=1}^3 T_{i1} + T_a \quad (1)$$

여기서, T_M , T_{i1} , 그리고 T_a 는 각각 차체, i 번째 대차, 그리고 축들에 관한 운동에너지를 의미한다.

차량의 포텐셜에너지 E_p 는 식(2)와 같이 쓸 수 있다.

$$E_p = E_1 + E_2 + E_3 \quad (2)$$

여기서, E_1 , E_2 그리고 E_3 각각 차체와 대차사이, 대차와 차축사이 그리고 차축과 레일사이에 위치한 현가 장치에 저장되는 변형에너지이다. 라그랑지안 운동방정식을 이용하여 유도한 2축 대차를 갖는 열차의 질량과 강성행렬을 구할 수 있으며, 다음과 같은 열차에 대한 운동방정식을 구성할 수 있다. 열차의 제원은 실제 운행 되는 열차를 참고하였다^[6].

$$[M_V]\{\ddot{u}_V\} + [C_V]\{\dot{u}_V\} + [K_V]\{u_V\} = \{P\} \quad (3)$$

한편, 강 판형교는 3차원 뼈대요소를 이용하여 모사하였다. 식 (4)와 같은 교량의 운동방정식이 구성되며, 식 (3)과 식(4)에 대하여 교량과 열차의 상호작용력 벡터를 통해 열차-교량 상호작용에 대한 동적해석을 수행할 수 있다^{[3],[4]}.

$$[M_H]\{\ddot{u}_H\} + [C_H]\{\dot{u}_H\} + [K_H]\{u_H\} = \{F\} \quad (4)$$

레일이름대에 의한 주행면 불규칙성은 가정된 변위를 통하여 교량 및 열차의 상호작용력 벡터에 추가되어 불규칙성 효과를 고려할 수 있다.

4. 현장실험

레일이름대가 교량의 진동에 끼치는 영향을 분석하기 위하여 동일 제원의 교량에 대해 레일이름대가 설치된 구간과 설치되지 않은 구간의 수직, 수평 진동가속도를 측정, 비교하였다.

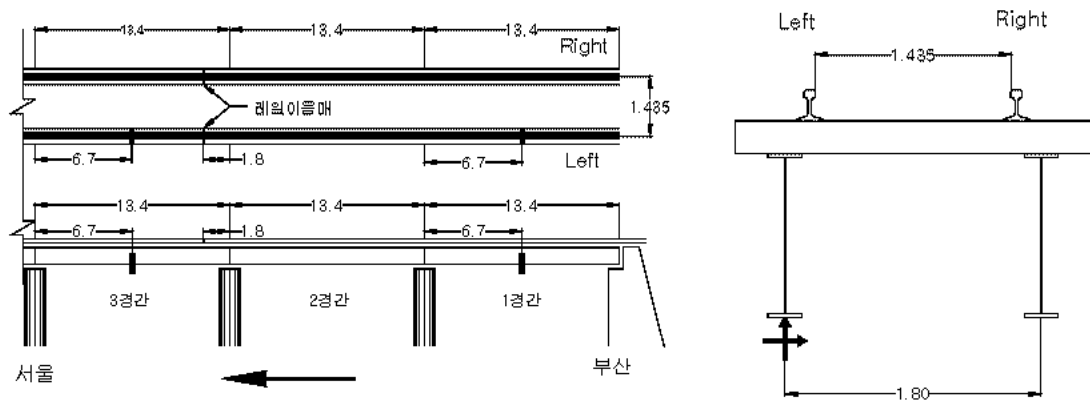


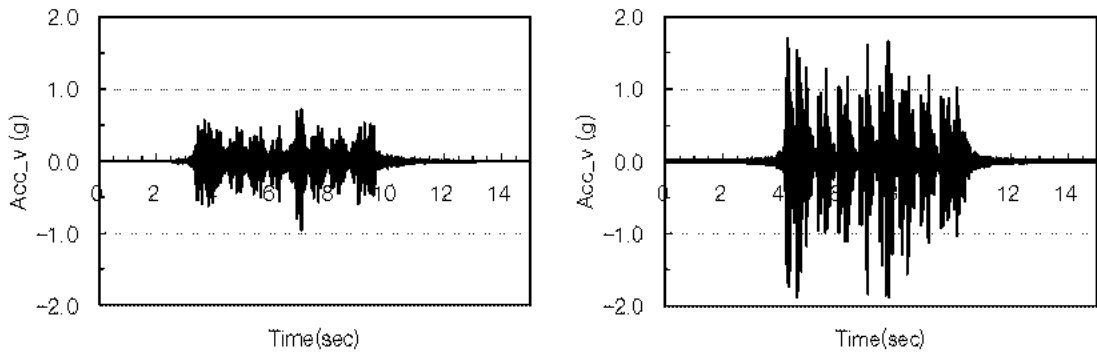
그림 3. 레일이름대 및 센서 부착위치

측정 대상 교량은 경부선에 위치한 설계하중 LS-22로 설계된 12m형 판형교로 단순지지된 4개의 경간으로 구성되어 있다. 레일이름대는 3경간의 진입부 지점으로부터 1.8m에 위치하고 있다. 센서는 그림 3과 같이 각 경간 중앙의 좌측 거더 하부에 부착하였다. 원칙적으로 시험열차의 속

도대역별 계측을 수행하여야 하지만 현장여건상 운행열차에 대해 계측하였다. 운행열차는 차량 편성에 따라 다양하게 분류될 수 있으나 본 실험에서는 교량의 동적 거동에 지배적으로 작용되는 열차 유형인 디젤 기관차 편성열차(동력차 1량+객차 7량)를 대상으로 하였다. 계측된 열차의 속도대역은 19.1 ~ 123.9km/hr로 총 46회의 계측을 수행하였다.

5. 레일이음때 효과에 의한 동적거동 분석

그림 4는 디젤 1량 편성(동력차 1량+객차 7량)의 속도 120.16km/h에 대한 현장계측의 일례로 100Hz Low pass Filtering 결과이다.



(a) 이음때 미설치 구간

(b) 레일이음때 구간

그림 4. 현장실험에 의한 수직진동가속도 시간이력

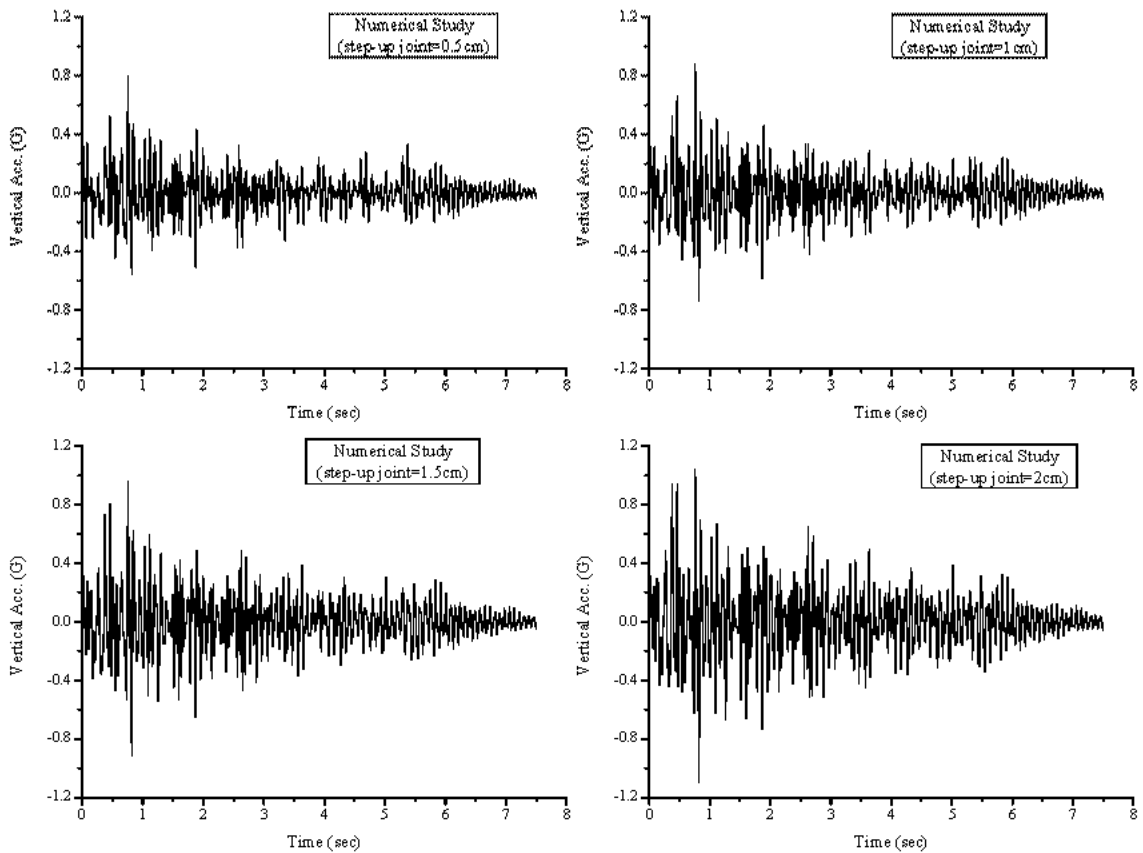


그림 5. 상향단차(step-up joint)에 따른 수직가속도의 시간이력

실험결과로부터 레일이음매가 설치된 경간의 진동가속도가 이음매 미설치 구간에 비해 현저하게 증가하는 것을 알 수 있다. 그림 5는 수치해석에 의한 결과이며 상향단차(step-up joint)의 크기를 변화시키며 속도 120.16km/로 주행시킨 해석 결과이다. 수치해석 결과는 실제 현장계측에 의한 결과보다 작은 응답을 나타내고 있으나, 레일이음매에 의한 주행면 불규칙성, 즉, step-up joint의 가정된 크기가 증가함에 따라 수직가속도 응답이 증가하는 것을 알 수 있다. 실험값과의 차이는 열차의 휠플랫, 궤도틀림, 국부적인 진동 등 기타 실제 현장 상황과의 차이로 인하여 나타난 결과로 사료된다.

그림 6의 (a)는 실험에서 계측된 모든 열차유형과 속도대역에서의 수직가속도 응답의 최대값을 나타내고 있으며, (b)는 본 연구에서 사용된 수치해석에 의한 step-up joint의 크기 및 속도별 최대 수직가속도응답을 나타낸다. 타 형식 교량에 비하여 상대적으로 진동에 취약한 판형교는 레일이음매에 의한 추가적인 충격에 의해 더욱 동적응답이 증가됨을 실험 및 이론적 분석을 통해 분명히 알 수 있으며, 가정된 상향단차의 크기에 따라 가속도 응답이 더욱 증가됨을 알 수 있다. 또한, 일반적인 교량에 비하여 첫 번째 휨 고유진동수가 상대적으로 큰 판형교의 경우 운행속도구간에서 속도가 증가할수록 레일이음매에 의한 가속도 응답도 추가적으로 증가함을 알 수 있다.

이러한 실험 및 수치해석 결과로 볼 때, 일반적으로 교량에서 제시되는 수직가속도에 대한 기준인 0.35g~0.5g를 초과하는 응답이 발생할 수 있으므로, 기존선 속도향상에 대비하여 이에 대한 보완이 필요할 것으로 판단된다.

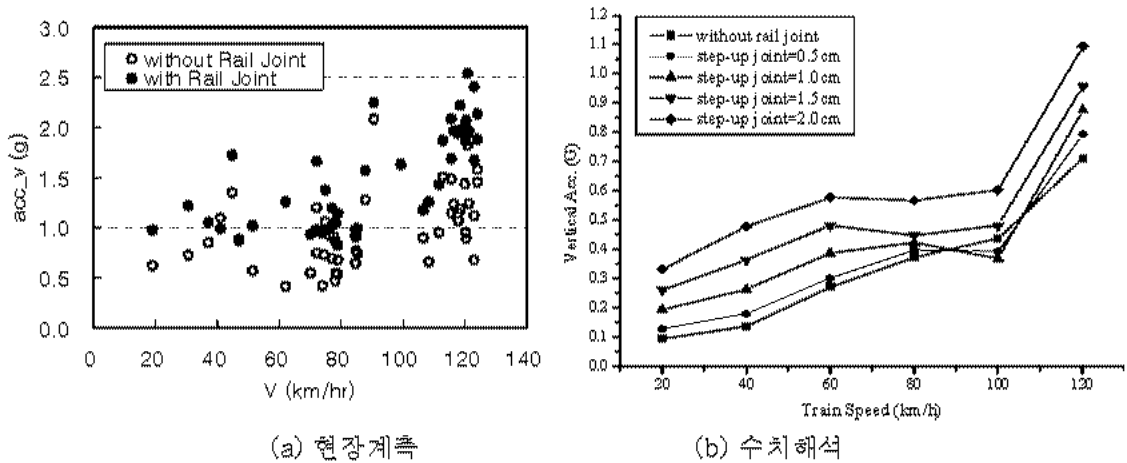


그림6. 속도별 최대 수직가속도 응답

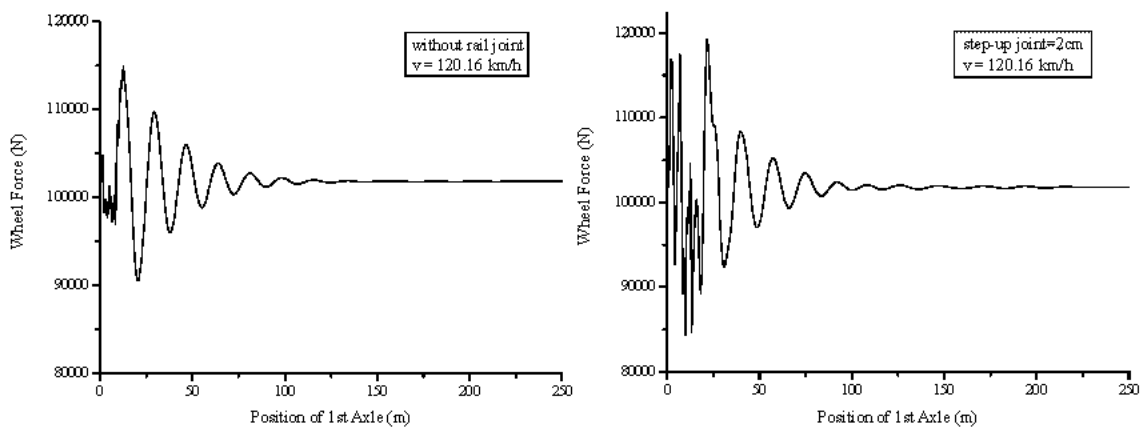


그림 7. 주행면 불규칙성에 의한 윤하중의 변화

그림 7은 레일이음매가 존재할 경우와 그렇지 않을 경우 동력차 첫번째 윤축의 하중 변화에 대한 시

간이력을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 레일 이음매가 존재할 경우 이음매에 의한 추가적인 충격 발생으로 인하여 윤하중의 크기가 상대적으로 크게 발생하는 것을 알 수 있으며, 하중변동의 폭도 증가하는 것을 볼 수 있다.

6. 결론

기존선의 교량 형식 중 가장 많은 부분을 차지하고 있는 강 판형교에서 레일이음매에 의한 주행면 불규칙성이 존재하는 경우에 대하여 현장실험 및 교량-열차 상호작용해석을 통하여 동적거동에 미치는 영향을 분석하였다.

교량 상판 수직가속도의 과다한 발생은 도상 자갈 비산 및, 궤도구조의 수직 및 횡방향 저항력 저하, 잠재적인 궤도블림 등 많은 문제점을 일으킬 수 있다.

본 연구에서 수행한 현장계측결과와 수치해석 결과 모두 열차주행 시 레일이음매에 의한 판형교 수직가속도 응답의 증가는 현저하여 일반적으로 교량에서 요구되는 동적성능 항목을 만족시키지 못하는 결과를 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 또한 실제 현장에서 파악된 바로 레일이음매가 설치된 경간이 그렇지 않은 경간에 비하여 교량의 손상부위가 많은 것으로 나타나고 있다.

진동특성이 일반적으로 타 교량형식에 비하여 취약한 판형교 상 레일이음매에 의한 주행면 불규칙성은 충격효과를 증가시킬 수 있으며 이는 결과적으로 승차감 저하 및 궤도와 교량의 성능 저하로 연결될 수 있으므로 교량 구간 내 설치 제한 등 이에 대한 대책이 수립되어야 할 것이다.

감사의 말

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

참고문헌

1. 김현민, 오지택, 황원섭, 조은상, "판형교 동적거동에 대한 레일이음매의 영향평가", 한국철도학회 춘계학술발표회 논문집, 2004.4
2. 서사범, "선로공학", 열과알, 2002
3. 김성일, "고속철도 교량의 교량-열차 상호작용해석", 박사학위논문, 서울대학교, 2000.
4. 포항산업과학연구원, "제동하중에 의한 강교량의 동적거동 연구", 연구기관 : 서울대학교, 1996.
5. Coenraad Esveld, "Modern Railway Track 2nd Edition", 2001.
6. 한국철도기술연구원, "철도교량 및 운행열차하중 원격모니터링 기술개발", 2002.