

고속열차하중 하의 강합성형 철도교의 동적거동에 관한 연구

A Study on the Dynamic Behavior of Steel Composite Railway Bridges subject to High Speed Train

장 승 필*, 곽 중 원**, 하 상 길***, 김 성 일****
Chang, Sung Pil, Kwark, Jong Won, Ha, Sang Gil, Kim Sung Il

ABSTRACT

The influences of high speed train on the dynamic responses of steel composite railway bridges are investigated. The bridge system which has two I-girder and several cross beams is modeled with plate and frame elements. With assumption of concrete slabs are fully connected with steel girders, the offset between slabs and girders is modeled using rigid link. The track system is modeled using beams on elastic foundation theory. And, the TGV train is modeled in 2-dimension considering bouncing and pitching motion. And, braking action of vehicle is considered using speed dependent braking function. To investigate the behavior of bridges due to moving trains, parametric studies are performed.

1. 서론

21세기의 새로운 교통수단으로 신속안전하고 대량수송이 가능한 고속철도 건설사업은 국가 정책사업의 일환으로 대단위 사회간접자본에 대한 투자로 진행되고 있다. 이에 따라 현재 경부고속철도가 건설 중에 있다. 교량에 작용하는 다양한 활하중 중, 고속철도 교량의 경우 증량, 고속으로 운행하는 고속열차에 의한 차량하중의 영향이 일반적으로 가장 크다.

본 연구에서는 고속주행 열차하중이 작용하는 2개의 I형 주형을 가진 강합성형 교량에 대하여 다양한 차량하중 동적해석 연구를 수행하여 그 동적거동을 파악하고자 하였다.

차량하중을 받는 교량의 동적거동에 관한 이론적, 실험적 연구는 Willis와 Stokes(1849)^[1]의 연구 등을 시작으로 1백년 이상 실행되어 왔다. Inglis(1934)^[2]는 철도교에 대한 다양한 연구를 수행하였다. Fryba^[3]는 이동하중에 대해 많은 경우에 관련된 해석해를 얻어냈다. 차량이 교량위를 주행하게 되면 많은 매개변수들에 의해 상호동적으로 거동하게 되며, 그 매개변수들은 차량의 주행속도와 차량의 각 동적특성, 교량의 동적특성, 노면조도 등이다. 근래에 와서도 차량하중이 교량에 미치는 영향에 대한 다양한 연구가 Gupta(1978)^[4], O'Connor(1984)^[5], Cantieni(1984)^[6], Yang(1995)^[7], Kwark(1997)^[8] 등에 의하여 수행되고있다.

1940년대에 독일에서 개발된 강합성형 교량은 해석기술의 발달과 더불어 현재에 이르러 상당한 발전을 이룩하였다. 현재 세계적으로, 트러스교, 아치교, 케이블이 걸린 현수교나 사장교, 혹은 고속열차 등의 가혹한 기능적인 요구사항들을 만족시키기 위한 교량에 널리 사용되고있다.

현재 경부고속철도 교량의 전구간이 콘크리트 교량만으로 구성되는데, 이는 강합성형 교량의 많

* 서울대학교 토목공학과 교수
** 한국건설기술연구원 선임연구원
*** 포항산업과학연구원 주임연구원
**** 서울대학교 토목공학과 박사과정

은 장점에도 불구하고, 고속철도 운행특성상 증량의 열차가 고속운행됨으로서 교량에 작용하는 활하중에 의한 동적거동, 소음 등이 콘크리트 교량에 비하여 상대적으로 불리하기 때문에 계획단계 시부터 강합성형 교량의 적용은 고려되지 않았다. 그러므로, 국내연구실적이 미비한 고속열차하중하에서의 강합성형 교량의 동적거동 연구는 반드시 필요하다고 하겠다.

2 교량시스템

본 연구에서 다루어지는 교량시스템은 그림 1과 같이 프랑스 TGV 북부선에서 전형적으로 사용되고 있는 2개의 I형 주형을 가진 강합성형 교량이다. 본 연구에서는 상판을 판요소를 이용해 이상화하였으며, 강주형, 가로보 및 교각은 공간뼈대요소를 이용하여 모델링하였으며, 상판과 주형의 연결은 완전합성을 가정하여 기하학적 구속방정식(Rigid Link)을 이용하여 고려하였다. 또한, 힌지 연결부 모델링을 위해 경계조건에 형상함수를 적용한 모멘트 엔드-릴리즈를 정식화하였다^[13].

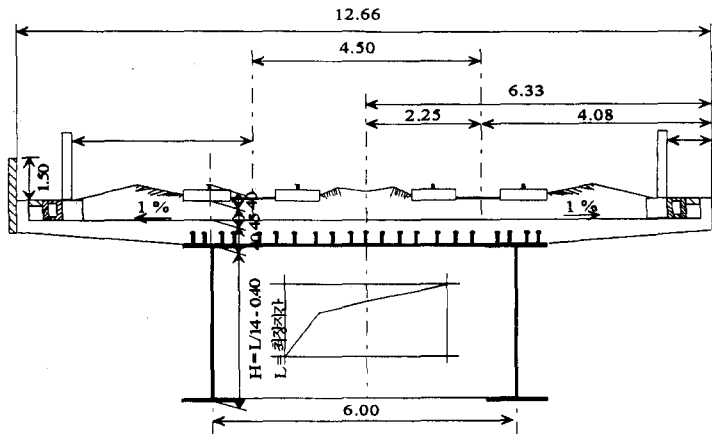


그림 1. 프랑스 TGV 북부선의 전형적인 강합성형 교량

3. 트랙시스템

철도교에서의 힘은 레일, 침목(또는 슬리퍼), 도상으로 이루어진 트랙구조를 통하여 교량의 상판으로 전달된다. 트랙구조는 크게 레일, 정착기구, 침목으로 이루어진 상부구조와 도상, 하부도상, 보조층으로 이루어진 하부구조로 대별된다.

열차하중에 의한 트랙의 거동을 해석하기 위해 많은 트랙모델이 수치적으로 제안되었으나, 고전적인 탄성지반위의 보 모델이 효율성과 응용성의 측면을 고려하여 널리 사용되어왔다. 본 연구에서도 침목은 도상에 의해서 연속적으로 지지되고, 레일은 침목위에, 즉, 촘촘한 탄성지반대 위에 놓여있다고 보고, 트랙시스템을 탄성지반위의 보 이론을 사용하여 고려하였다^[13].

또한 주행면의 조건은 교량-차량 시스템의 부가적인 진동에 매우 중요한 요소이다. 철도교에서는 트랙에 의해서 생기는 표면의 불규칙성이 포장조건에 의한 도로교와는 차이가 있다. 즉, 철도교의 표면 불규칙성의 영향에 관한 해석에 있어서는 바퀴의 편마모, dipped joint, 종구배 등이 고려되어야 한다^[13].

4. 차량시스템

국내 고속철도에 이용되는 TGV 열차는 일반 열차와는 다른 구조를 갖는 열차이다. 즉, 각 객차마다 독립적인 대차시스템을 갖고 있는 일반 열차와 달리 TGV 열차는 객차와 객차사이에 대차가 존재하는 시스템이다. 국내에서 사용되는 TGV 열차는 2PC+2MT+16IT 시스템으로 2량의 동력차와

2량의 동력객차, 16량의 객차로 구성되어 있다. 동력차는 각 2개의 대차로 구성되며 동력객차는 한개의 독립적인 대차와 객차와의 연결부에 한개의 대차가 존재하며, 객차와 객차 사이에 역시 한개의 대차가 존재한다. 대차는 각 대차당 2개의 윤축을 가지고 있다. 이와같이, 총 23개의 대차와 46개의 윤축으로 구성되어 있다.

본 연구에서는 TGV 열차를 이동집중하중(Moving Constant Force), 단자유도 시스템의 조합 (Single-d.o.f System), 그리고, 2차원 모델링(TGV 2-dimensional System)의 세가지 방법으로 수치모델링을 구현하였다.

그림 2는 TGV 2차원 동적모델과 활성화자유도를 나타낸다. 본체에서 수직방향 처짐(bouncing)과 pitching 회전을 고려하였으며, 대차에서 수직방향 처짐을 고려하여 TGV 2PC+2MT+16IT 열차는 총 63개의 자유도로 표현된다. 사용된 열차의 특성치는 참고문헌[13]과 같다.

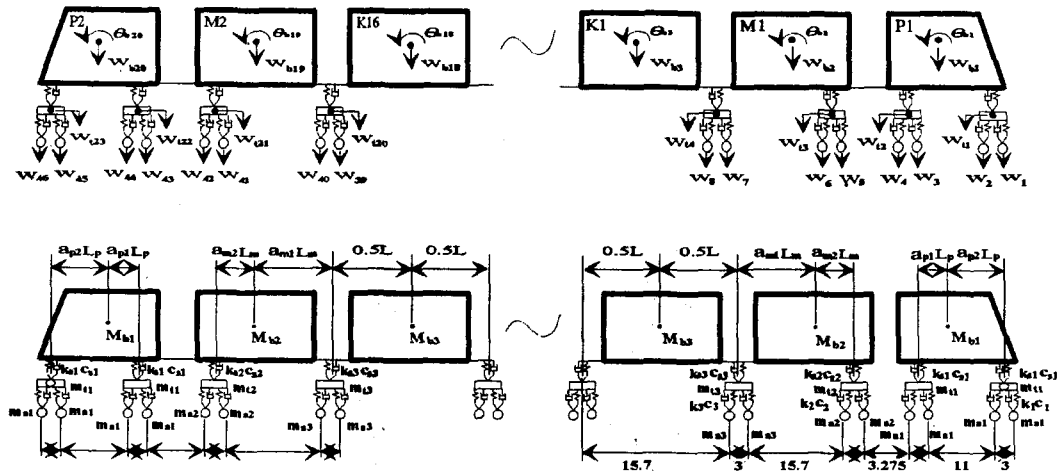


그림 2. TGV 2차원 동적해석모델

차량의 운동방정식은 Hamilton의 원리에서 유도된 Lagrange 방정식을 이용하여 유도하였다. 다음은 일반화된 Lagrange 방정식이다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = 0$$

여기서, 차량의 전체 운동에너지 T는 차량시스템요소의 질량 및 수직변위의 속도와 피칭회전의 속도를 이용하여 구하며, 위치에너지 V와 분산에너지 D는 본체와 대차, 대차와 윤축사이의 상대변위를 고려하여 구할 수 있다^[13].

일정한 주행속도로 움직이는 차량에 대한 연구는 많이 이루어졌으나, 등속도가 아닌 제동이나 가속에 의한 비등속 운동에 대한 연구가 최근 이루어지고 있다. 제동의 영향은 수치해석에서 제동함수를 사용하여 수학적으로 고려되어진다.

제동에 관한 기존연구에서는 TRRL(Transport and Road Research Laboratory)의 실험결과에 바탕을 둔 계단형 함수(Step-type function)가 사용되어져 왔다^[4]. 계단형 제동함수는 교량에 작용하는 종방향 힘이 한계치에 도달할 때까지는 선형적으로 증가한 후, 차량이 멈출 때까지 이를 유지한다.

그러나, 일부 연구자들은 동적마찰계수가 속도에 의존한다는 것을 바탕으로 하여 제동거리를 전 개시시키기 위해서 여러가지 속도를 가진 제동에 관한 실험을 행하였다. 본 연구에서는 ASTM의 실험결과에 바탕을 둔 속도의존형 제동함수(Speed-dependent braking function)를 이용하여 제동하중을 계산한다^[8]. 철도교에서 사용되는 제동함수는 차량의 종류에 따라 제안되며, 각 마찰계수는 열차의 종류와 레일의 상태에 따라 다르게 된다^[9].

5. 예제 및 매개변수연구

본 연구에서 사용된 교량모델은 2개의 주형을 가진 I-거더 단순교와 3경간 연속교이다. 각 교량의 제원은 프랑스 TGV 북부선에서 실제 사용되고 있는 교량의 제원^[11]을 기준으로 변화시키며 고찰하였다. 사용된 교량의 형식 및 제원은 표 1과 같다.

표 1 교량모델의 형식 및 제원

지간		단순교			연속교
		30m	35m	40m	
주형	높이(m)	2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8	2.7, 3.0, 3.3, 3.5	2.9, 3.3, 3.5, 3.7, 4.0	3.5
	플랜지폭(cm)	60, 80, 100	60, 80, 100	60, 80, 100	80
	플랜지두께(cm)	5.0, 6.2, 7.5	5.0, 6.5, 8.0	5.5, 8.0, 12.0	7.5
가로보	갯수	5, 6, 7	6, 7, 8	6, 7, 8	7
상판	폭(m)	12.6	12.6, 13.2, 13.6, 14.0	12.6, 13.2, 13.6, 14.0	14.0
	두께(cm)	35, 40	35, 38, 40, 42, 45	35, 38, 40, 42, 45	40

해석에 사용된 교량은 감쇠비를 2%로 가정하였다. 또한, 트렉구조의 모델링을 위한 도상의 물성치에서 기초상수(k_0)의 결정은 Hctényi^[10]의 연구를 참고하였으며, 레일과 침목에 대한 물성치는 참고문헌[12]에 제시된 값을 사용하였다.

◆ 교량의 고유진동수에 따른 동적거동

열차하중에 의한 교량의 동적거동은 교량의 고유진동수, 차량의 속도와 유효타격간격(effective beating interval)에 의해 교량의 공진현상을 예측할 수 있다. 교량의 고유진동수와 차량의 크로싱진동수(crossing frequency)가 일치하게 되면 공진현상이 발생하게 된다. TGV 열차의 유효타격간격은 18.7m로 볼 수 있으므로 교량이 설계속도 350km/h를 초과해서 공진이 일어나도록 유도하려면 교량의 첫번째 고유진동수 ω_1 은 약 5.2Hz를 상회하여야 함을 예측할 수 있다.

그림 3은 단순교 지간 40m 교량들에 대해 교량의 고유진동수 변화에 따른 최대 DMF, 최대 단부회전각, 상판의 최대수직가속도의 변화를 보여준다. 5.2Hz 미만의 첫번째 고유진동수를 갖는 교량의 경우에는 공진을 일으키는 한계속도가 설계속도인 350km/h 이하에 존재하며, 이 때 시방규정을 초과하는 큰 응답을 보인다. 그러나, 고유진동수가 5.2Hz를 초과하는 교량들의 경우 설계속도 350km/h에서의 응답으로, 시방규정을 만족시키는 매우 안정적인 거동을 나타냄을 알 수 있다.

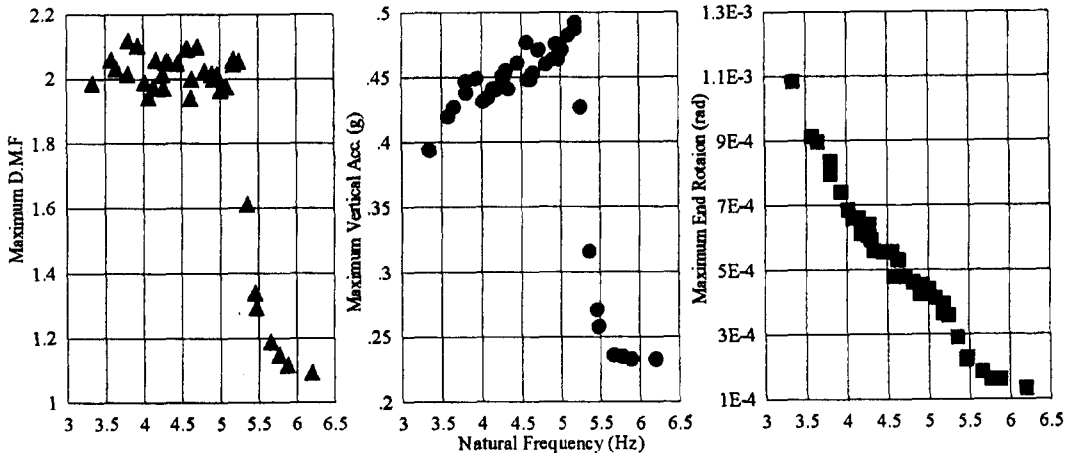


그림 3. 교량의 고유진동수 변화에 따른 동적응답

본 연구에서 사용된 2개의 I형 주형을 가진 강합성형 교량의 경우, 고유진동수는 상판의 폭이나

두께, 가로보의 갯수나 물성치의 변화보다는 주형의 물성치, 그 중 형고에 가장 민감한 변화를 보이며, 설계속도 내에서 공진을 피할 수 있는 5.2Hz 이상의 고유진동수를 가지려면, 지간 30m 교량의 경우 형고가 2.4m 이상이어야 하며, 지간 35m 교량의 경우에는 3.0m 이상, 지간 40m 교량은 형고 3.7m 이상이어야 하는것으로 판단되었다.

◆ 속도매개변수(Speed Parameter)

차량-교량 간의 상호작용을 고려한 동적해석에서는 교량 및 차량의 동적특성, 차량의 속도, 노면 조도 등 수많은 매개변수가 작용하게 된다. 근래의 연구자들은 이와 같은 수많은 매개변수간의 관계를 간단화하기 위하여 노력의 일환으로 속도매개변수(α)가 1960년대 말에 처음으로 사용이 되었다. 속도매개변수는 연구자들마다 약간씩 변형시켜 사용되고 있지만, 결과적으로는 공진의 개념에서 도출된 것으로 다음과 같은 무차원 계수이다.

$$\alpha = \frac{V}{\omega_1 S_{eff}}$$

V : 차량의 속도

ω_1 : 교량의 첫번째 고유진동수

S_{eff} : 유효타격간격

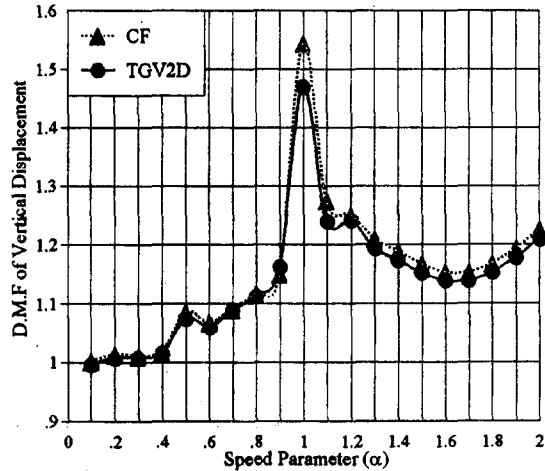


그림 4 속도매개변수(α)의 변화에 따른 수직처짐 D.M.F의 변화

공진의 개념과 같이 속도매개변수(α)가 1.0이 되면 공진이 발생하게 되어 가장 큰 응답이 나타남을 예상할 수 있다. 그러나, 속도매개변수는 차량의 동특성을 고려하지 않는다는 단점이 있으므로 이에대한 보완이 필요하다.

◆ 차량모델링 방법에 따른 동적거동

열차하중의 모델링 방법에 따른 동적응답 결과를 비교하였다. 즉, 열차하중을 이동집중하중(CF), 단자유도 시스템(SDOF), 2차원 시스템(TGV2D)의 세가지로 모델링한 후 그 결과를 비교하였다.

그림 5는 단순교와 3경간 연속교 두번째 경간의 중심부에서의 수직처짐의 차량모델링 방법에 따른 D.M.F의 변화를 나타낸다. 그림에서 보듯이, 대부분의 속도구간에서 차량모델링 방법에 따른 교량의 동적응답의 크기는 비슷한 경향을 보이나, 가장 큰 응답이 발생하는 한계속도(Critical Velocity)부근에서는 이동집중하중에 의한 응답이 큰 것으로 나타났다.

◆ 차량의 동속운동과 제동운동

열차의 제동에 의한 동적응답을 고찰하기 위하여 속도의존형 제동함수를 이용하여 제동하중을 모사하여 동속운동과 제동운동에 의한 응답을 비교하였다.

그림 6은 차량의 제동위치에 따른 3경간 연속교의 세번째 경간 중심부에서의 수직처짐의 D.M.F를 보여준다. 그래프에서 보듯이 차량의 제동위치를 변화시키며 시작속도 250km/h와 350km/h에 대하여 응답을 고찰하였다. 본 연구의 예제해석 결과, 수직처짐의 D.M.F는 제동하중에 의하여 단순교의 경우 최대 7.83%, 3경간 연속교의 경우 최대 16.82%의 증가가 발생하였다. 종방향 부재력의 경우, 교량에 진입하기 전에 제동이 시작될 경우 제동위치에 따른 변화가 작으나, 제동위치가 교

량 중점에 가까워질수록 그 응답이 커짐을 알 수 있었다^[13].

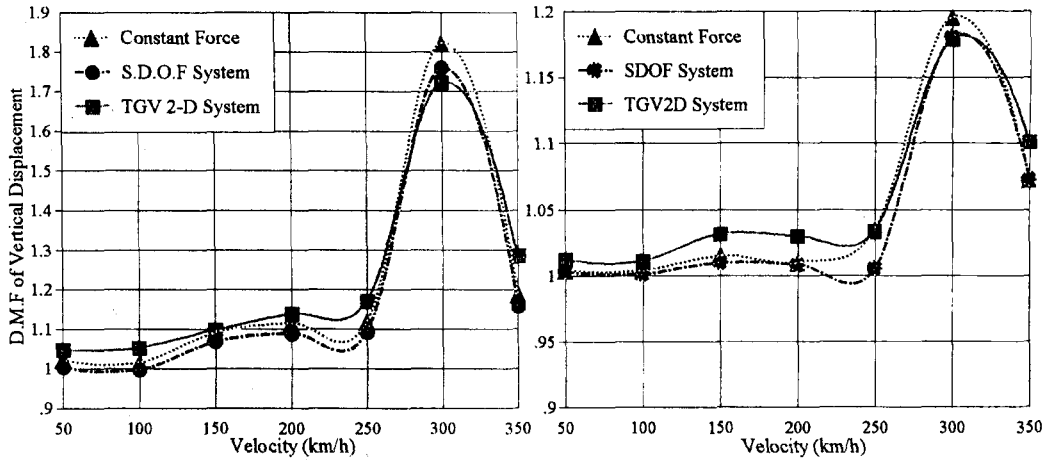


그림 5. 차량모델링 방법에 따른 수직처짐 D.M.F.의 변화

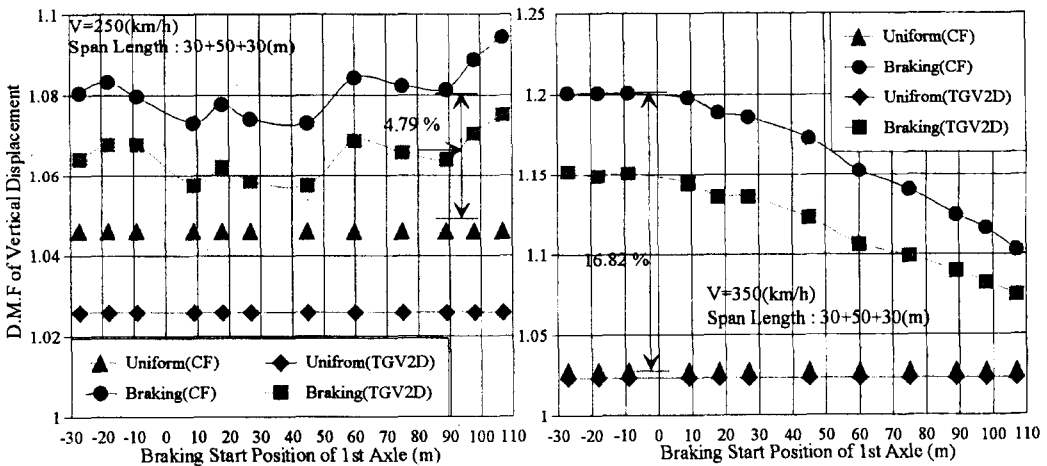


그림 6. 제동위치에 따른 연속교 세번째 경간 중앙부 수직처짐 D.M.F.의 변화

◆ 도상의 영향

도상이 교량의 응답에 미치는 영향을 파악하기 위하여 동적응답을 분석하였다. 그림 7은 그 결과를 보여준다. 교량에 전달되는 차륜하중의 완화와 재분배 효과가 저속에서는 발생하였으나, 그 이상의 속도에서는 이런 효과가 발생하지 않았다. 이 결과로 볼 때, 자갈도상은 고속 열차하중에서 동적하중 분배에 큰 기여를 하지않는 것으로 판단되며, 최근 해외에서 유지보수비 등, 경제적으로 유리한 이유로 많이 이용되고 있는 슬래브 도상에 대한 고려도 필요하다고 판단된다.

◆ 주행면의 불규칙성

중구배, dipped joint, 바퀴의 편마모에 의한 교량의 응답에 미치는 영향을 파악하기 위한 해석을 수행하였다. 그림 7과 같이 중방향 구배는 차량에 지지점 운동(support motion)과 같이 바퀴에 반복운동(cyclic motion)을 발생시키고 차량-교량 상호작용에 의해서 추가적인 하중이 교량에 가해지게 되므로 중방향 구배는 주행면 불규칙성을 고려하지 않았을 때에 비하여 최고 7.47% D.M.F. 증가를 보였다. Dipped joint와 바퀴의 편마모에 의한 교량의 동적변화는 미세한 증가를 나타냈다.

◆ 교량의 감쇠에 따른 동적응답

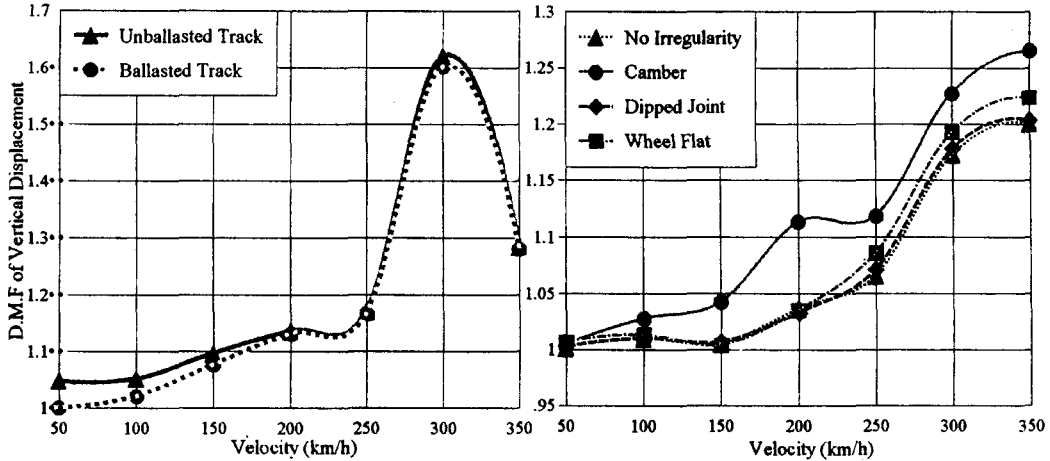


그림 7. 주행속도에 따른 도상의 영향과 주행면 불규칙성의 영향

교량의 감쇠는 진동제어에 주된 역할을 하게된다. 실 구조물의 감쇠란 매우 다양할 뿐 아니라 감쇠값 산정에 어려운 점이 많다. 본 연구에서는 교량의 감쇠를 비례감쇠(proportional damping)인 Rayleigh damping으로 가정하여 연구를 수행하였다. 그림 8은 단순교에 대하여 감쇠비를 1%, 2%, 5%, 10%, 20%로 변화시키며 그 동적응답의 차이를 비교한것이다. 한계속도와 350(km/h), 두가지 속도에 대하여 수직처짐의 D.M.F, 상판의 최대수직가속도, 최대 단부격임각의 응답을 도시한 것이다. 그림에서와 같이 공진이 발생하는 한계속도의 경우 교량의 감쇠에 따라 그 응답이 급격히 줄어들었으며, 350km/h 주행의 경우는 상대적으로 감소의 폭은 작았다. 한계속도에서도 교량의 감쇠비가 5%이상일 경우 매우 안정적인 응답을 보였다. 이 결과에서 알 수 있듯이 교량의 감쇠는 동적응답에 매우 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

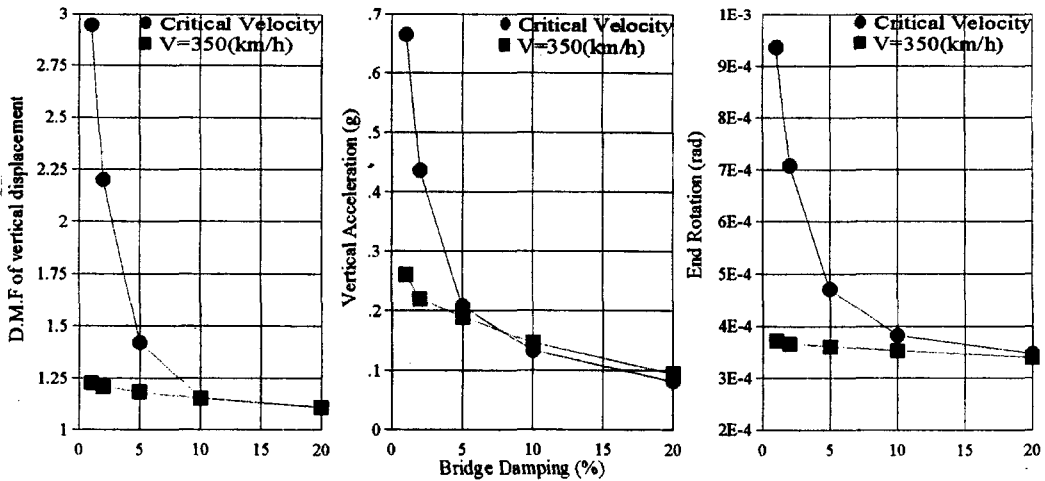


그림 8. 교량의 감쇠에 따른 동적응답의 변화

6. 결론

위의 예제해석과 매개변수연구를 통하여 다음 결론을 도출하였다.

- 수치해석 예제로 사용된 교량의 고유진동수는 각 물성치 중 형교에 가장 민감한 반응을 보이며, 설계속도 내에서 공진을 피할 수 있는 5.2Hz 이상의 고유진동수를 가지려면, 지간 30m 교량의 경우 형고가 2.4m 이상이어야 하며, 지간 35m 교량의 경우에는 3.0m 이상, 지간 40m 교량은 형고

3.7m 이상이어야 하는것으로 나타났다.

- 이동하중에 의한 교량의 동적거동에 관계되는 수많은 매개변수를 줄이기 위해 개발된 속도매개변수는 공진의 개념에서 도출된 것으로 교량의 고유진동수, 유효타격간격이 결정되면 동적응답의 예측에 활용할 수 있다.

- 열차하중 모델링 방법에 따른 동적응답은 대체적으로 2차원 모델링에 의한 응답이 이동집중하중이나 단자유도 시스템 조합의 경우와 비슷하거나 약간 큰 양상을 보이거나, 공진이 발생하는 한계 속도 부근에서는 응답이 작은것으로 나타났다.

- 본 연구에서의 수행된 예제의 경우, 차량의 제동에 의하여 등속운동에 비해 최대 16.82%의 응답 증가를 일으킬 수 있는 것으로 나타났으며, 제동의 시작위치 및 차량이 응답이 계산되는 점 근처에서 정지하게 될 때 교량의 응답에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다.

- 도상을 고려하는 경우에는 저속에서는 하중의 완화와 재분배 효과가 크나 고속에서는 그 영향이 미미한것으로 파악되었다.

- 주행면의 불규칙성 중, dipped joint와 바퀴 편마모는 그 영향이 작지만, 종방향 구배의 경우 이를 고려하여야 한다.

- 교량의 응답은 감쇠비에 따라 매우 다른 양상을 보였으며, 특히, 공진 발생시의 응답은 교량의 감쇠에 매우 민감한 변화를 보임을 알 수 있다. 따라서 적절한 감진장치 등의 배치로 교량의 감쇠비를 높이는 것이 필요하다.

향후 본 연구에서 수행된 다양한 매개변수해석을 보다 심도있게 수행하고, 보다 정확한 열차의 동특성치와 제동함수를 통한 더욱 정밀한 차량모델링을 위한 노력이 필요하며, 특히 실제 교량에 대한 실험연구는 절실하다고 하겠다.

본 연구는 포항산업과학연구원의 연구비지원으로 수행되었으며 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

1. Willis, R., et al, "Experiments for determining the effects produced by causing weights to travel over bars with different velocities", Reports of the commissioners appointed to inquire into the application of iron to railway structures, W. Clowes & Sons, London, 1849
2. Inglis, C.E., A mathematical treatise on vibration in railway bridges, The University Press., Cambridge, 1934
3. Frýba, L., Vibration of Solids and Structures under Moving Loads, Noordhoff International Publishing, Groningen, The Netherlands, 1971.
4. Gupta, R.K., "The Effects of Acceleration and Braking of Vehicles on the Dynamic Loading of Highway Bridges," Phd thesis presented to University of New South Wales, Australia, in 1978.
5. Kunjamoo, K.K.F. & O'Connor, C., "Truck Suspension Models". Journal of Transp. Eng., 109(5), pp.706-720, 1984.
6. Cantieni, R., "Dynamic Load Testing of Highway Bridges," IABSE, Proceedings P-75/84, 1984.
7. Y. B. Yang, S. S. Liao and B. H. Lin, "Impact formulas for vehicles moving over simple & continuous beams", ASCE, ST, Vol.121, No.11, pp.1644-1650, 1995.
8. 박종원, "차량의 제동을 고려한 교량의 동적거동", 박사학위논문, 서울대학교, 1997.
9. 이종득, 철도공학, 蘆海出版社, 서울, 大韓民國, 5月 1989. pp 324, 325.
10. Hetényi, M, Beams on Elastic Foundation, 6th. ed. Cushing-Malloy, INC., USA, 1961, pp. 10-96.
11. Bulletin Ponts Métalliques No. 16, OTUA, 1993
12. 한국고속철도건설공단, "천안역사 진동저감 관련 연구보고서 - 열차주행시 하부구조물에 작용하는 동하중의 산정", 1994.
13. 포항산업과학연구원, "고속철도 강교량의 동적응답", 1998.2