

# 고성능강 적용 교량의 진동사용성 평가

## Vibration Serviceability Assessment of High-performance Steel Bridge

김 태 민\* · 김 동 환\*\* · 김 문 검\*\*\*

Kim, Tae Min · Kim, Dong Hwan · Kim,, Moon Kyum

### 요 약

본 논문에서는 교량의 주부재에 교량용 고성능강을 적용하여 설계해 본 후, 이러한 적용이 교량의 진동 사용성에 어떠한 영향을 미치는지 그 영향을 분석해 보고자 한다. 최근들어 교량상의 구조적인 결함이 없더라도 진동에 의해 교량을 통행하는 운전자나 보행자에게 불안감을 주는 경우가 빈번히 발생하기 때문에 진동사용성이란 문제는 보다 부각되고 있다. 특히 고성능강이 개발되고 이를 교량에 적용하게 되면 허용응력의 증가로 이어져 거더의 형고감소를 가능하게 한다. 그러나 이러한 형고의 감소는 교량의 휨강성을 저하시켜 사용성의 악화를 초래할 것이라 예측이 있었다. 따라서 본 연구는 차량-교량의 상호작용에 의해 발생하는 진동영향의 분석을 위해 유한요소해석 프로그램인 Abaqus 6.10을 이용해 수치해석을 수행하였고 이때의 진동영향을 평가했다. 차량-교량 상호작용의 해석을 위해 ASSHTO 기준의 HS 20-44 차량을 해석대상교량 위로 주행하도록 하였다. 해석대상교량은 인장강도가 각각 600MPa와 800MPa인 교량용 고성능강재(HSB, High-Performance Steel for Bridge)를 적용하여 주거더를 설계한 강플레이트 거더교를 대상으로 삼았다. 차량이 교량을 통과하면서 발생하는 교량의 경간 중앙부에서 발생하는 수직진동의 시간이력을 분석하여 진동평가의 기준으로 삼았다. 해석결과 HSB600과 HSB800으로 각각 설계된 교량은 가속도이력에서는 큰 차이가 없었으나 변위이력에서는 HSB800적용 교량이 진동사용성 측면에서 매우 불리한 거동을 보였다. 따라서 고성능강 적용에 따른 교량의 진동사용성을 평가하기 위해서는 변위를 기준으로한 평가가 이루어져야하며, 변위의 진동을 제어하기 위한 방안이 모색되어야 할 것으로 판단된다.

**keywords** : 교량용 고성능 강재(HSB), 차량-교량 상호작용, 진동사용성, 수직진동

### 1. 서 론

도심지역 교량이나 차량 정체가 심한 교량에서 통행자들이 진동으로 인한 불안감을 호소하는 경우가 많다. 구조적인 안전성에는 큰 문제가 없지만 진동으로 인한 불쾌감이 주요 원인으로 분석된다. 고성능강재의 교량 적용은 단면의 슬림화를 가능케 함으로써 진동영향이 더욱 불리하게 작용할 것으로 예상된다. 그러나 현재 시방서나 설계기준 등에서는 이러한 진동에 대한 규준이 없는 실정이며, 이에 대한 대안으로 인체의 영향을 평가하기 위해서 Reiher-Meister 등감각곡선, Dieckmann's K value, ISO(international standard organization) 진동 기준 등을 적용하려는 연구 등이 있다.

\* 학생회원 · 연세대학교 토목공학과 통합과정 taemin@yonsei.ac.kr

\*\* 연세대학교 토목공학과 석사과정 kasancrw@yonsei.ac.kr

\*\*\* 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 applymkk@yonsei.ac.kr

본 연구에서 연구대상으로 삼고 있는 차량주행에 의한 교량진동은 차체에서의 진동이 타이어를 통해서 교면에 전달되어 교량이 강제진동하는 것이므로 진동의 크기나 특성, 노면이나 지반 상태에 따라서 영향을 받고 그 중에서도 교량의 구조적 특성에 따른 영향이 크다고 알려져 있다. 따라서 이러한 조건들을 고려하여 해석모델을 만들고 수치해석을 통해 진동 영향을 분석해보았다.

## 2. 차량-교량 상호작용을 위한 해석모델 선정

### 2.1. 차량 해석 모델

교량의 동적 거동에 중요한 영향을 미치는 차량은 그 종류가 다양하다. 국내 도로교설계기준에는 표준트럭하중을 DB 하중을 통해 표현하였으며, ASSHTO 기준에는 3축 트럭하중을 HS 하중을 통해 표현하였는데 이는 국내의 DB 하중과 그 조건이 비슷하다. 본 연구에서는 ASSHTO 기준인 HS 20-44 차량을 기준 모델로 삼았으며, 해외의 연구문헌의 참고 및 비교가 용이하도록 하였다.

차량의 모델링 기법에는 그림 2와 같이 spring-dashpot 시스템을 6 개의 질량 양쪽에 연결하여 구성하였다. 11 개의 자유도를 갖는 차량의 운동방정식을 유도하기 위하여 중력( $M_{1g}, M_{2g}, m_{ig}, i = 1 \dots 6$ ), 질량에 발생하는 관성력과 모멘트( $M_j \ddot{Z}_j, I_{\theta_j} \ddot{\theta}, I_{\alpha_j} \ddot{\alpha}_j, j = 1, 2; m_i \ddot{z}_i, i = 1 \dots 6$ ), 서스펜션에 의한 힘( $F'_i, i = 1 \dots 6$ ), 그리고 타이어에 의한 힘( $F_i, i = 1 \dots 6$ )을 이용하여 동적 평형을 직접 구성하는 가상일의 원리를 이용하였다.

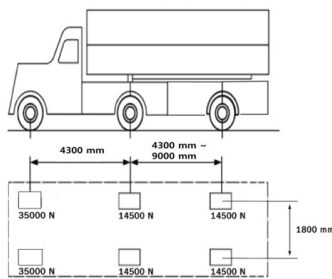


그림 1 AASHTO LRFD의 트럭하중(AASHTO, 2002)

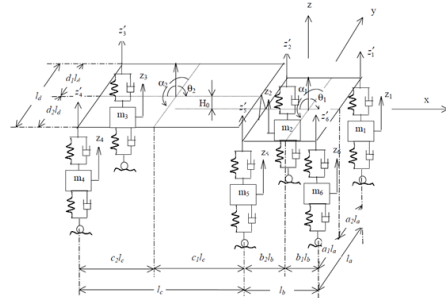
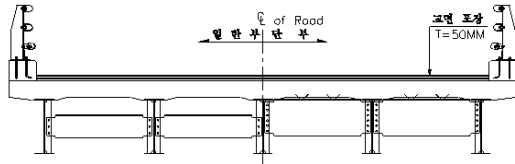


그림 2 3축을 갖는 차량 모델(Li, 2005)

### 2.2. 교량 해석 모델

고성능강의 적용 교량을 위해 그림 3과 같은 경간 54m의 단경간 강플레이트 거더교를 대상 교량으로 삼아 HSB600 강종과 HSB800 강종으로 표 1과 같이 도로교설계기준에서 제시된 허용응력에 맞게 거더를 설계하여 그 영향을 분석하였다. 교량의 설계는 1등급을 기준으로 삼았으며 설계과정에서 발생하는 고정하중부터 활하중까지 고려하여 설계를 하였다. HSB600과 HSB800 적용 교량에서 거더의 형태는 형고만을 제외하고 나머지 제원은 같게 설계하였다. 상부플랜지의 폭은 508mm, 두께 29mm, 하부플랜지의 폭은 610mm, 두께 29mm로 설계하였다. 복부판의 경우 두께는 29mm로 하고, 높이의 경우 HSB600적용 교량은 2100mm,

HSB800 적용 교량은 1700mm로 설계하였다. 허용응력의 증가에 따라 400mm의 형고절감 효과가 있었으며, 거더의 중량의 약 10% 감소하는 효과를 볼 수 있었다.



등급 : 1등교 (DB-24 또는 DL-24)  
 교폭 : 15m (거더간격 3m)  
 경간 : 54m  
 설계 차선수 : 4차선  
 교량형식 : 강플레이트 거더교, 단순교

그림 3 해석 대상 교량 제원

표 1 허용휨압축응력(도로교설계기준, 2010)

강종	HSB600	HSB800
강재판두께(mm)		
80 이하	270MPa	380MPa
80 초과 100 이하		-

또한 Dodds와 Roboson(1973)이 제안한 노면계수를 사용하여 보통인 상태를 고려하여 해석을 수행하였다. 이들이 제안한 노면조도의 생성 방식은 지수스펙트럴밀도함수(PSD, power spectral density)를 사용하여 평균값이 0인 정상확률분포로 가정하여 노면조도를 생성한 것이며, 본 연구에 이를 인용하였다.

### 3. 결과 분석

수치해석을 위해 상용유한요소 프로그램인 Abaqus 6.10을 이용해 해석을 수행하였다. 동적영향을 분석하기 위해 우선 모드해석을 수행하였으며, 그 결과 1차모드는 휨변형 양상으로 나타났다. 형고 저감과 중량 감소에 따른 영향으로 HSB600 적용 교량은 1.635Hz의 고유진동수를 나타냈으나, HSB800 적용 교량은 1.334Hz의 고유진동수를 보였다.

표 2 교량 모델별 고유진동수

교량 모델	1차모드 고유진동수(Hz)
HSB600 적용 교량	1.635
HSB800 적용 교량	1.334

#### 3.1. 시간이력결과 분석

경간 중앙부에서의 수직진동의 영향을 분석하기 위해 차량 모델을 교량 중앙차선을 따라 80km/h의 속력으로 주행시키고 그 때의 결과를 살펴보았다. 우선 변위이력을 살펴보면 HSB600 적용 교량에서는 차량하중이 통과하면서 발생하는 최대처짐의 크기가 12mm였으나 HSB800 적용 교량의 경우 이 값의 크기가 22mm로 증가하였다. 또한 잔류 진폭의 크기는 2mm에서 11mm 정도로 크게 증가한 것을 알 수 있었다. 그러나

가속도이력의 경우 두 강종의 적용시 큰 차이가 나지 않았으며 최대가속도의 크기는 오히려 HSB600에서 더 크게 관찰됐다. 이에 따라 고성능강 적용에 따른 형고의 변화는 가속도이력에 큰 영향을 발생시키지 않지만 변위이력에는 상당히 안좋은 영향을 발생시킨다는 것을 알 수 있었다.

### 3.2. 사용성평가

해석대상교량을 주파수에 따른 최대값으로 진동영향을 평가하는 Reiher-Meister 등감각곡선을 이용해 사용성을 평가해본 결과 HSB600 적용 교량은 C등급이었으나, HSB800 교량은 이보다 안좋은 B등급에 위치하게 되었다.

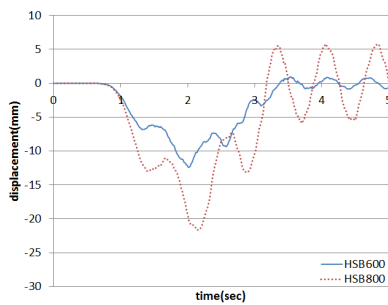


그림 4 경간 중앙부에서의 변위이력

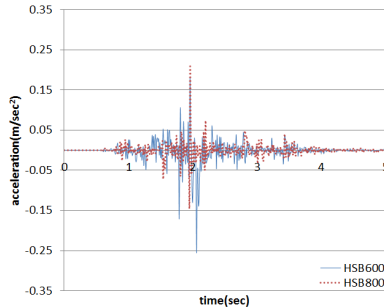


그림 5 경간 중앙부에서의 가속도이력

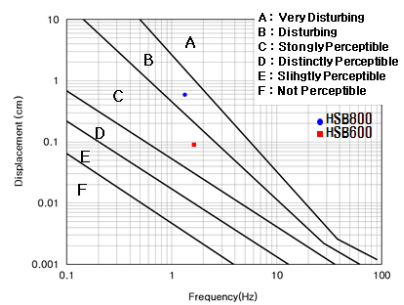


그림 6 Reiher-Meister 기준을 이용한 진동사용성평가

## 4. 결론

본 연구는 차량-교량의 상호작용을 고려한 수치해석 모델을 통해 교량의 진동영향을 분석해 보았다. 본 연구를 통해 고성능강의 교량 적용 설계시 변위에 의한 진동사용성의 문제가 발생할 수 있으며 이에 대한 설계기준 적립의 필요성을 인식할 수 있었다. 따라서 고성능강의 수요 확대를 위해 진동저감방안의 마련이 시급하며 이 부분에 있어 지속적인 연구중이다.

### 감사의 글

본 연구는 (주)포스코의 지원으로 이루어진 연구로, 본 연구를 가능케한 (주)포스코에 감사드립니다.

### 참고문헌

시설안전기술공단 (2000) 교량의 진동·처짐에 관한 사용성측면에서의 평가절차 수립, 최종보고서.  
 이일근, 안상섭, 박민석 (2003) 교량의 진동사용성 평가, 2003 대한토목학회 정기학술대회.  
 B. Chun (2010) Skewed bridge behaviors: Experimental, analytical, and numerical analysis, Ph.D. thesis, Wayne state University.  
 Hong, Li. (2005) Dynamic response of highway bridges subjected to heavy vehicles, Ph.D. thesis, the Florida state university famu-fsu college of engineering.