

# 교량의 진동사용성 평가를 위한 모델링에 관한 연구

## A Study on Modeling for Vibration Serviceability Evaluation

이 후 석\* · 하 신 용\*\* · 황 인 호\*\*\* · 이 중 세\*\*\*\*

Lee, Hu Seok · Ha, Sin Yong · Hwang, Inho · Lee, Jong Seh

### 요 약

최근 보행자가 교량의 진동에 의한 불안감을 느끼는 경우가 발생되면서 설계 단계에서 진동에 대한 고려하고 있다. 그러나 설계자는 범용유한요소프로그램에 이동하중을 적용하여 동적응답해석을 하는 것에 어려움을 느끼고 있으며 그 결과 Meister감각곡선에 의한 진동사용성 평가도 정확히 수행되지 않고 있다. 본 연구에서는 설계자들이 수행하는 교량의 진동사용성 평가방법의 간편한 적용을 위하여 이동하중모델 생성틀을 연구하였으며, 범용유한요소프로그램으로 모델링 된 교량의 매개변수를 변화해가며 진동사용성 평가를 수행하였고 연구 결과 중 매개변수의 하나인 보요소의 길이에 따른 진동사용성 평가결과만을 작성하였다. 평가결과 보요소의 길이에 따라 교량에 발생하는 진동과 가속도의 응답치가 다르게 나타났으며, 발생하는 주요주파수 범위도 다르게 해석되었다. 이러한 동적응답의 결과가 다르게 해석되면서 Meister 감각곡선에 의한 평가등급이 차이도 발생되었다. 따라서 정확한 진동사용성 평가를 위해서는 동적응답해석 시 다양한 매개변수에 의한 동적응답의 결과에 대한 연구는 물론 다양한 교량 형식과 그에 맞는 모델링에 대한 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

**keywords** : 교량 진동, 진동사용성 평가, Meister 감각곡선, 유한요소법

### 1. 서 론

최근 국내에서 공용중인 교량에서 보행자가 진동으로 인해 불안감을 느끼는 경우가 발생되고 있다. 이런 문제가 발생된 교량에 실제 진동 계측 및 안전점검을 수행한 결과 구조적인 안전성은 문제가 없으며 발생하는 진동에 의해서 보행자에게 단순한 불쾌감을 주는 경우로 확인되었다. 이에 설계자는 교량의 설계 시 차량하중의 모델링을 통해 교량의 동적응답해석을 수행하고, 그 결과를 Meister 감각곡선(Reiher와 Meister, 1931)과 같은 평가방법에 적용하여 교량의 사용성을 평가하고 있다. 이러한 진동사용성 평가를 위해서는 수치해석을 통한 교량의 변위와 가속도 데이터가 필요하고, 정확한 수치해석을 위해 Fryba(1970)가 이동하중모델과 이동질량모델을 Green과 Cebon(1997)은 차량과 교량의 상호작용에 의한 연구 등을 수행하였다. 그러나 정밀한 차량하중모델은 설계자들이 사용하는 범용유한요소프로그램 적용하기에 어려움이 많아 간편하게 적

\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과, 박사과정

\*\* 한양대학교 토목공학과, 석사과정

\*\*\* 정회원 · 한양대학교 토목공학과, 박사후연구원

\*\*\*\* 정회원 · 한양대학교 건설환경시스템공학과, 교수

용할 수 있는 이동하중모델이 요구되고 있다. 범용유한요소프로그램의 경우 하중의 입력이 모델의 절점에만 입력되므로 이동하중모델은 이를 고려하여 요소 위를 지나가는 하중을 각 절점으로 분배하여 치환하는 과정이 반드시 고려되어야 한다. 또한 계산된 이동하중에 의한 교량의 동적응답은 교량 모델의 다양한 매개변수에 의해 다르게 나타날 수 있으므로 이와 관련된 연구가 요구된다. 본 연구에서는 범용유한요소프로그램에 이동하중모델 간단하게 적용할 수 있는 툴을 연구하였으며, 모델링 된 교량의 매개변수를 변화시키며 진동사용성평가를 위한 교량의 동적응답해석을 수행하였다. 수행결과에 따라 발생하는 변위와 가속도를 Meister 감각곡선에 적용하여 교량의 진동사용성 평가를 하였다.

## 2. 차량하중 및 교량의 모델링

설계단계에서 교량의 진동사용성 평가를 하기 위해서는 차량이동하중을 모델링하는 것이 가장 중요한 과정으로 도로교 설계기준의 3축 트럭하중(DB-24)를 모델링하여 사용한다(그림 1). 범용유한요소프로그램에 3축의 이동하중을 적용하기 위해서는 모델링 된 교량의 각 절점으로 하중을 재하하는 과정이 필요하다. 범용유한요소프로그램으로 모델링 된 교량의 보강형은 주로 보요소를 사용하므로, n번째 보요소에 재하되는 이동하중  $F_n$ 은 보요소의 절점에 대하여 그림 2와 같이 치환하여 나타낼 수 있다.

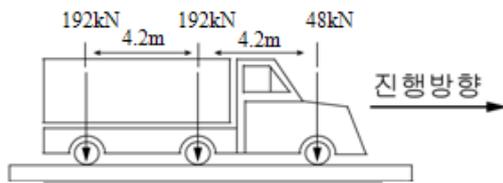


그림 1 3축 트럭하중(DB-24)

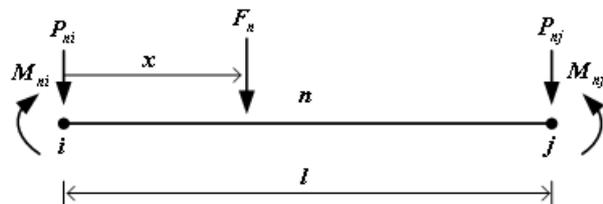


그림 2 n번째 보요소의 하중 치환

이 때 치환되는 등가의 이동하중은 식 (1), (2)와 같다.

$$P_{n,i} = \frac{F_n(l-x)^2(l+2x)}{l^3}, \quad P_{n,j} = \frac{F_n x^2(3l+2x)}{l^3} \quad (1)$$

$$M_{n,i} = \frac{F_n x^2(3l-x)}{l^2}, \quad M_{n,j} = \frac{F_n(l-x)x^2}{l^2} \quad (2)$$

여기서,  $P_{n,i}$ ,  $P_{n,j}$ 과  $M_{n,i}$ ,  $M_{n,j}$ 는 보요소의 절점  $i$ 와 절점  $j$ 에서 치환된 연직하중과 모멘트이며,  $l$ 은 보요소의 길이,  $x$ 는 차량 축하중이 작용하는 위치를 나타낸다.

본 연구에서는 식 (1), (2)를 기본으로 이동하중을 계산하여 간편하게 적용하는 툴을 연구하였다. 계산툴은 차량의 주행속도와 유한요소로 모델의 절점 정보, 하중의 시간간격 등을 입력하면 연직하중과 모멘트를 자동 생성한다. 생성된 연직하중과 모멘트는 범용유한요소프로그램에 입력이 가능한 모든 정보를 가지고 출력이 되므로 프로그램에 입력한 후 즉시 해석이 가능하다. 그림 3은 모델링된 교량의 보강형 구간 중 절점 20과 60에 입력된 연직하중과 모멘트이고, 모든 보강형 구간 절점에는 생성된 이동하중이 그림과 같이 각각 입력된다.

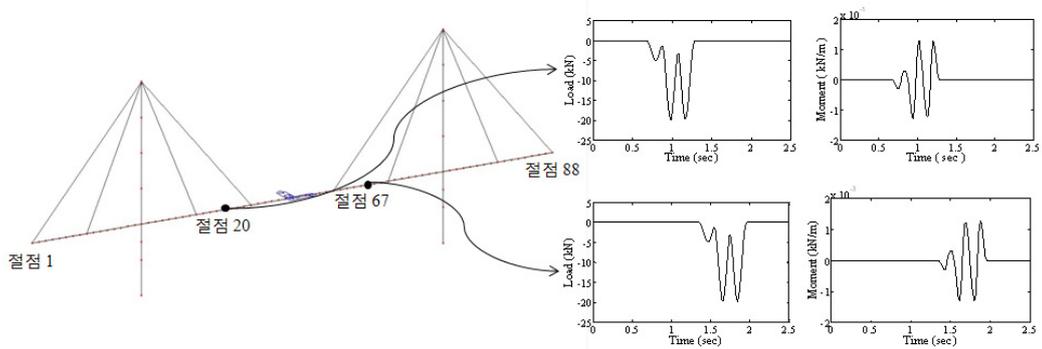


그림 3 이동하중의 입력

### 3. 수치해석 결과

범용유한요소프로그램으로 모델링 된 교량에 차량이동하중을 입력하여 수치해석을 수행하였다. 본 논문에서는 수치해석 시 매개변수 중 하나인 보요소의 길이와 동적응답과의 관계만을 비교하여 작성하였다. 교량모델의 보요소 길이는 차량이동하중의 총 길이 8.4m 보다 약 두 배 큰 15m, 비슷한 길이의 10m, 두 개의 축하중이 재하될 수 있는 5m, 오직 한 개의 축하중만 재하되는 2.5m의 네 가지 경우로 나누어 각각 해석을 실시하였다. 진동사용성 평가를 위해서는 교량에 발생하는 진폭과 가속도의 동적응답이 필요하며, 변위와 가속도 결과값은 하중의 진행방향으로 시점부터 교량의 중앙경간을 삼등분하여 세 부분의 결과값을 측정하여 진동이 가장 크게 발생된 경간중앙부에서의 값을 선택하였다. 변위응답의 경우 보강형 요소의 길이가 긴 15m일 때 이동하중의 입력주기에 따른 고주파의 변위가 교량의 주요주기와 합성되어 나타났으며, 보요소의 길이가 짧아질수록 입력주기에 따른 주파수 합성이 일어나지 않은 진동곡선이 나타났다(그림 4). 가속도의 경우에는 요소의 길이가 짧아지면서 응답의 크기가 일정값에 수렴해 갔으나 보요소의 길이가 가장 짧은 2.5m의 경우 응답의 크기가 커지며 주파수 범위도 고주파로 나타났다(그림 5). 이는 보요소의 크기가 작아지면서 발생한 가속도 응답의 크기가 전체 가속도 응답보다 큰 역전현상이 발생된 것으로 판단된다. 그러므로 이 때 발생하는 고주파의 응답은 로우 패스 필터를 이용하여 제거한 후 사용해야 할 것으로 사료된다.

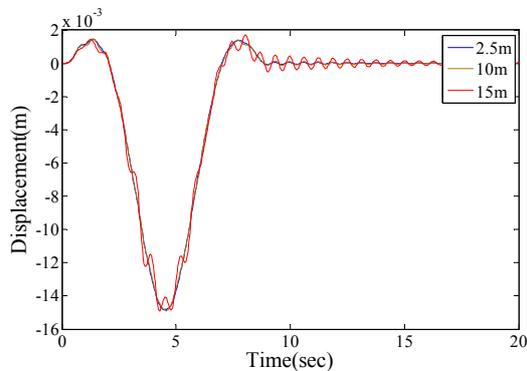


그림 4 변위응답 비교

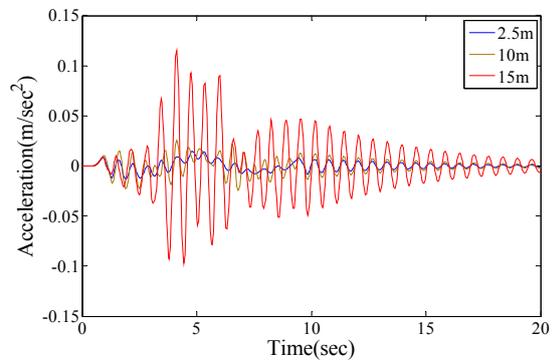


그림 5 가속도응답 비교

구해진 주요주파수와 최대진폭값들을 Meister 감각곡선에 적용하여 모델링의 진동사용성 평가를 수행하였다. 평가결과 변위의 평가는 E등급으로 동일했으나 가속도의 등급이 B, C, D의 세 등급이 나타났다(그림 6, 7). 그러므로 정확한 평가를 위해서는 수치해석의 결과에 대한 다양한 연구를 필요로 한다.

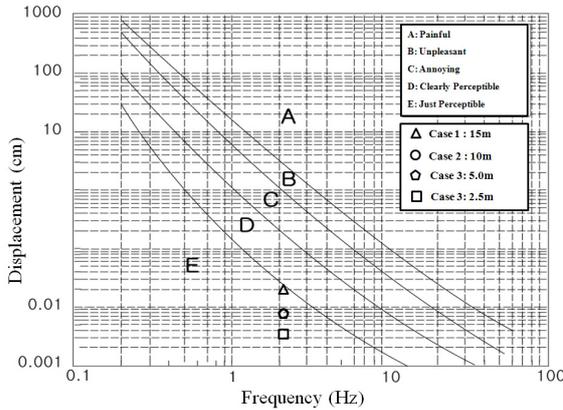


그림 6 Meister 감각곡선 평가(변위)

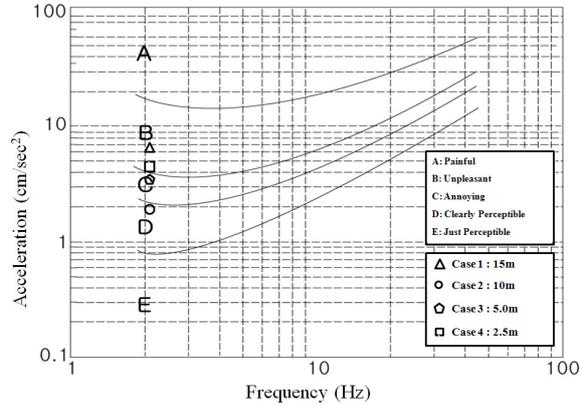


그림 7 Meister 감각곡선 평가(가속도)

#### 4. 결론

본 연구에서는 설계자들이 수행하는 교량의 진동사용성 평가를 위하여 이동하중모델 생성틀을 연구하였으며, 유한요소모델의 매개변수 중 하나인 보요소의 길이를 변화해가며 수치해석을 수행하였다. 해석 결과 보요소의 길이가 짧아질수록 이동하중에 의한 주파수 합성이 일어나지 않은 변위응답곡선의 결과가 얻어졌으며, 가속도 응답곡선의 요소의 길이가 2.5m로 짧은 경우 과도한 고주파 응답이 발생하여 로우 패스 필터의 사용이 필요할 것으로 판단된다. 요소의 길이에 따라 응답의 형태가 다르게 나타났으므로 사용성 평가결과 또한 일정하게 나타나지 않았다. 그러므로 사용성에 대한 정확한 평가를 위해서는 동적응답해석 시 다양한 매개변수에 대한 연구는 물론 다양한 교량 형식과 그에 맞는 모델링에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 교육인적자원부의 BK21 사업의 지원으로 이루어진 것으로, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

Fryba, L. (1970) *Vibration of Solid and Structures under Moving Loads*, Noorhoffs Internation Publishing.  
 Green, M.F., and Cebon, D. (1997) Dynamic interaction between heavy vehicles and highway bridges, *Computers&Structres*, Vol. 62, No.2, 253-264.  
 Reiher, H., and Meister, F.J. (1931) Human sensitivity to vibrations, *Forschung im Ingenieurwesen*, Vo 1.2, No.11, 381-386.