

교량구조물의 진동영향평가를 위한 동하중 이상화모델링 기법 연구

A Study of Load Modeling Method for Vibration Estimation of Bridge Structures

박 연 수* / 홍 혜 진** / 공 강 주** / 김 정 주**

Park, Yeon Soo / Hong, Hye Jin / Kong, Kang Joo / Kim, Jung Ju

Abstract

Structures of Civil Engineering have been designed with a safety as their main purpose. However recently, the greenness side of the technology of civil engineering regarded as most important and also utility values and stability of the structures. Also developments in the technology make materials to be higher strength and they shortened scales and stiffness of the structural members. This means that it brings an immoderate deflection and vibration of bridge structures simultaneously. Accordingly, this study aimed to find and estimate the most idealized structure models on the effects of the deflection and vibration of bridges from the traffic lane load and human vibration - the main pass of bridge structures.

key words : traffic lane load, human vibration, idealized models, vibration effect estimate

요 지

토목구조물은 주로 안전성을 위주로 설계되어 왔으나 최근 들어 토목기술에 대한 환경친화적 측면이 중시되어지는 가운데 구조물의 사용성과 안정성의 비중이 커져가고 있다. 또한 기술의 발달로 재료의 고강도화가 이루어져 구조부재 자체의 크기나 단면적이 줄어들었는데 이는 교량구조물의 과도한 처짐과 진동을 동시에 야기했다. 따라서 본 연구에서는 교량 구조물의 통과주체가 되는 차량동하중과 인체보행하중이 교량에 미치는 처짐과 진동에 대한 영향을 적용 가능한 가장 이상화 된 모델링을 찾아내어 진동영향평가 할 수 있도록 하기 위한 연구를 수행하였다.

핵심용어 : 차량동하중, 인체보행하중, 이상화, 진동영향평가

1. 서 론

지금까지 인체진동의 경우 차량, 선박, 항공기 등과 같은 탑승환경과 주거 환경, 그리고 작업환경에서 발생하는 진동이나 충격이 인체에 미치는 물리적, 심리적 영향을 측정, 평가하는 것을 주로 연구해왔다.

또한 교량에 있어 차량진동은 다른 건설진동에 비해 반복작용의 횟수가 비교할 수 없을 만큼 많아서 기존의 해석적 모델의 경우 시뮬레이션을 통한 교량 구조물의 동적 응답 혹은 충격계수를 주행시험결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였으나 교량 구조물의 실제 진동을 유발하는 차량의 동적 윤택중, 인체의

* 정희원 · 전남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail : parkys@chonnam.ac.kr)

** 전남대학교 대학원 토목공학과 박사과정

무리하중에 대한 시뮬레이션과 이에 대한 검증은 거의 이루어지지 않았다.

또한 교량의 교통 및 인체진동을 대상으로 하는 연구에 있어, 현장실험은 과도한 시간, 장비와 더불어 교통 차단 등이 필요하므로 구조해석 모델링을 통해 실측데이터가 없이 프로그램 해석만으로도 교량 구조물에 대한 진동영향평가를 할 수 있도록 하중모델링 기법에 대한 연구의 필요성이 대두되어졌다.

따라서 본 연구에서는 차량·인체하중이 유발시킬 수 있는 진동에 대해 실험을 실시하였으며, 조건변이에 따라 활하중의 일관성 있는 평가 방법을 도출할 수 있도록 하였다. 또한 해석결과의 검증을 위해 객관적인 값으로만 평가하기 어려운 인체하중의 경우 쾌감~불쾌감 곡선을 이용하여 해석값과 실제값의 결과를 비교하였고, 교량의 동적 응답 해석치를 선정된 실험대상교량의 재하시험을 통한 측정결과와 비교분석하여 적용 가능한 가장 이상화 된 모델링을 찾아내는 연구를 수행하였다.

2. 시간이력해석법과 이상화모델링

시간이력해석법은 강제응답을 계산하기 위한 가장 일반적인 해석 방법으로써 구조물이 시간에 따라 변화하는 하중을 받고 있을 때 구조물의 응답을 구하는 해석이라고 할 수 있다. 이중에서도 본 연구에서는 진동 영향평가를 위한 시간이력해석법 중 이상화모델링에 대해 알아보고자 한다(박선준, 2000).

2.1 이상화파형의 종류

이상화파형은 구조물의 동적해석시 비감쇠 단자유도계 구조물의 응답(Chopra)을 아래와 같이 최대하중과 ~ 지속시간의 관계로 그래프화(김기철, 2001)하여 실제 값에 가장 적용하기 알맞은 상태로 이상화시킨 모델링이다.

하중에 의해 발생되는 진동 응답을 예측할 수 있도록 하중모델링을 간단하면서도 신뢰성 있는 해석을 위하여 아래 표 1과 같이 3가지 형태(박선준, 2000)로 이상화하였다.

2.2 인체에 적용한 이상화파형

인체진동 평가에서는 양방향에서 교행하며 걷기, 뛰기, 중앙에서 무작위 뛰기 등 여러 가지 방법으로 실험을 하였는데 그중에서 대표적으로 피실험자수는 총 5명(대한민국 성인 남성 평균몸무게 : 68kg/1인)인

무작위 뛰기를 한 경우에 대하여 그림 1~그림 3과 같이 이상화모델을 제시하였다(김태호 등, 2003).

2.2.1 하버사인파(haversine pulse)

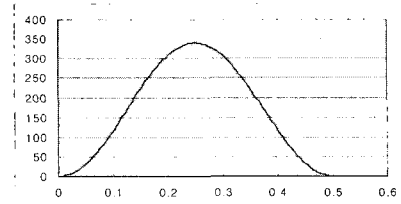


그림 1. 인체하중의 하버사인파

haversine pulse force

$$0.5 \times \sin(2\pi \times 0.5 - \pi/2) + 1 \times 340 \quad (1)$$

2.2.2 반사인파(half-cycle sine pulse)

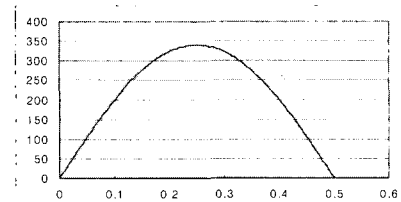


그림 2. 인체하중의 반사인파

half-cycle sine pulse force

$$\sin(2\pi \times 0.25t) \times 340 \quad (2)$$

2.2.3 삼각파(symmetrical triangular pulse)

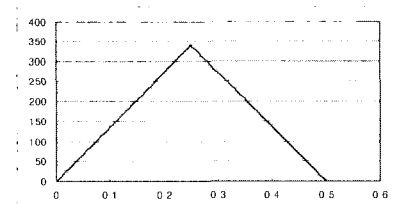


그림 3. 인체하중의 삼각파

symmetrical triangular pulse force

상향 ; 1360t

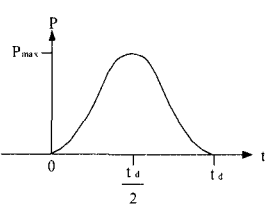
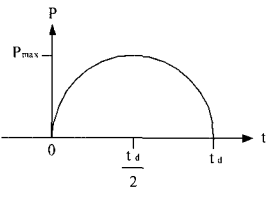
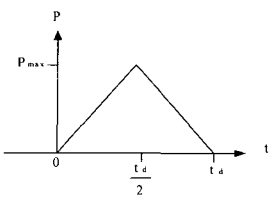
하향 ; 680 - 1360t

(3)

2.3 차량에 적용한 이상화파형

차량진동 평가에서는 20km/hr, 60km/hr, 80km/hr 3가지 경우를 실험 하였는데 여기서는 대표적으로 60km/hr에 대하여 그림 4~그림 6과 같이 이상화 파형 모델링을 제시하였다. 본 실험에 사용한 재하차량은 총중량이 19.38tonf 이었다.

표 1. 이상화파형의 종류

① 하버사인파 (haversine pulse)	② 반사인파 (half-cycle sine pulse)	③ 삼각파 (symmetrical triangular pulse)
		
$P(t) = 0.5 P_{\max} \left\{ \sin\left(-\frac{2\pi t}{t_d} - \frac{\pi}{2}\right) + 1 \right\}$	$P(t) = P_{\max} \sin\left(\frac{\pi t}{t_d}\right)$	$P(t) = \frac{2 P_{\max}}{t_d} t \quad (\text{상향})$ $P(t) = \frac{2 P_{\max}}{t_d} (t_d - t) \quad (\text{하향})$

2.3.1 하버사인파(haversine pulse)

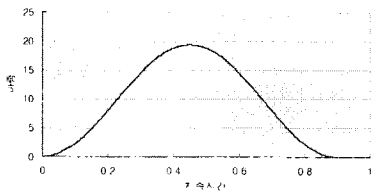


그림 4. 차량하중의 하버사인파

haversine pulse force
 $0.5 \times (\sin(2\pi \times 1.1111t - \pi/2) + 1) \times 19.38 \quad (4)$

2.3.2 반사인파(half-cycle sine pulse)

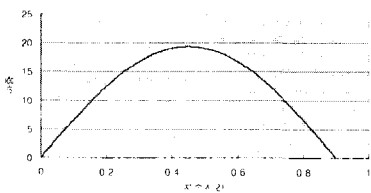


그림 5. 차량하중의 반사인파

half-cycle sine pulse force
 $\sin(2\pi \times 0.55556t) \times 19.38 \quad (5)$

2.3.3 삼각파(symmetrical triangular pulse)

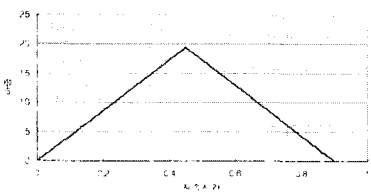


그림 6. 차량하중의 삼각파

symmetrical triangular pulse force

상향 ; 43.06667t

하향 ; 38.76 - 43.06667t

(6)

2.4 쾌감~불쾌감 곡선

구조물의 진동은 그 진동에 따라 보행자가 받는 생리적 현상이나, 심리적 반응이 다르다고 알려져 있다. 구조물의 진동에 따른 인체공학적인 영향은 동적하중 및 충격하중에 의한 진폭과 고유진동수를 이용하여 평가를 할 수 있는데 진폭과 고유진동수의 변화에 따른 인체공학적인 영향은 그림 7의 쾌감~불쾌감 곡선과 같다.

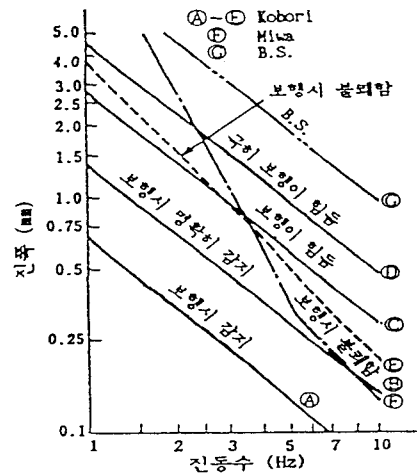


그림 7. 쾌감~불쾌감 곡선

본 연구의 목적은 교량 구조물의 진동치 추정을 통한 이상화 모델링 기법을 제시하고자 하는 것으로 아래와 같이 현장 실험을 통하여 교량 구조물의 동적 응답 해석치를 해석결과의 검증에 위해 구조해석 모델링과 비교·분석하였다.

3. 교량구조물 진동실험

3.1 인체진동실험

3.1.1 실험방법

아래 그림 8과 같이 인체진동실험을 위한 대상 교량을 육교로 선정하였으며, 인체 무리의 무작위로 뛰는 동안 여러 가지 실험 데이터를 얻을 수 있는 방법을 선택하였다.

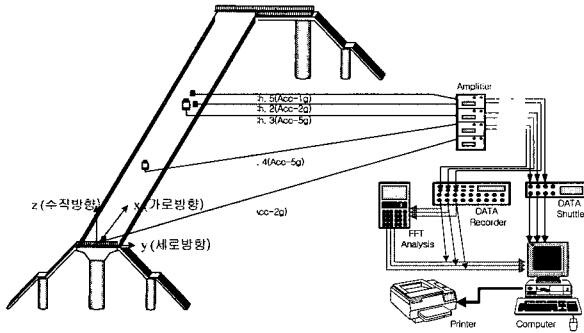


그림 8. 인체에 의한 진동 측정 실험(육교)

3.1.2 인체진동측정

본 논문에서는 수직방향의 처짐을 중심으로 고려하여 실험 및 연구를 하였으므로 CH3의 육교 정중앙부를 주로 비교·분석하였다.

3.1.3 인체진동측정 결과

육교에서 무작위로 뛰는 방법을 선택하여 그림 9와 같이 실험한 결과 아래 표 2와 같은 결과를 얻을 수

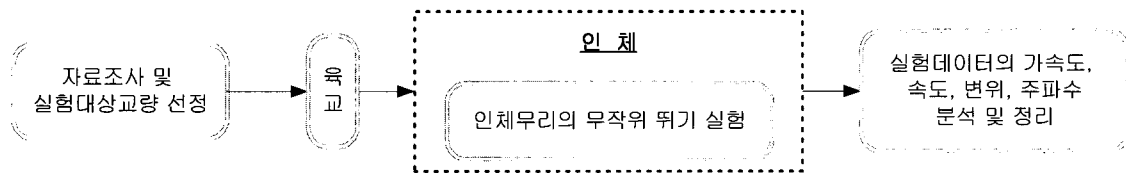


그림 9. 인체진동 측정을 위한 실험 흐름도

표 2. 무작위로 뛰었을 경우

진동 측정위치	측정방향	최대변위 (mm)	최대가속도 (g)	최고주파수 (Hz)
육교 정중앙부 (CH 3)	상하	1.659	0.26	2.502
육교 중앙부 난간 (CH 5)	상하	1.587	0.19	2.502
육교 1/4 지점 (CH 4)	상하	1.332	0.15	2.502
육교 지점부 중앙 (CH 1)	상하	0.985	0.02	2.502
육교 정중앙부 (CH 2)	좌우	-	0.02	2.502

있었다.

3.2 차량진동실험

3.2.1 실험방법

그림 10과 같이 차량진동실험을 위한 1Span의 길이가 15m이고 교폭이 5.9m인 대상 교량을 선정하였으며, 19.38tonf의 트럭 한대를 재하하여 각각 20, 60, 80km/hr로 주행하는 동안 여러 가지 실험 데이터를 얻을 수 있는 방법을 선택하였다.

3.2.2 차량진동측정(그림 10 참조)

3.2.3 차량진동측정 결과

대상교량에서 동적 재하시험을 그림 11과 같이 실시한 결과 표 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

4. 구조해석

선정한 대상 구조물은 모델링을 통하여 그림 12와 같이 상시미동을 포함하는 경우와 상시미동을 포함하지 않는 경우로 가정하여 앞에서 제시한 이상화 파형을 적용하였으며, 이에 따른 결과 값을 가지고 비교·분석하였다.

4.1 이상화파형모델링

4.1.1 인체진동 모델링

인체 진동관계를 알아보기 위하여 유한요소 구조해석 범용 프로그램인 Midas를 이용하여 그림 13의 육

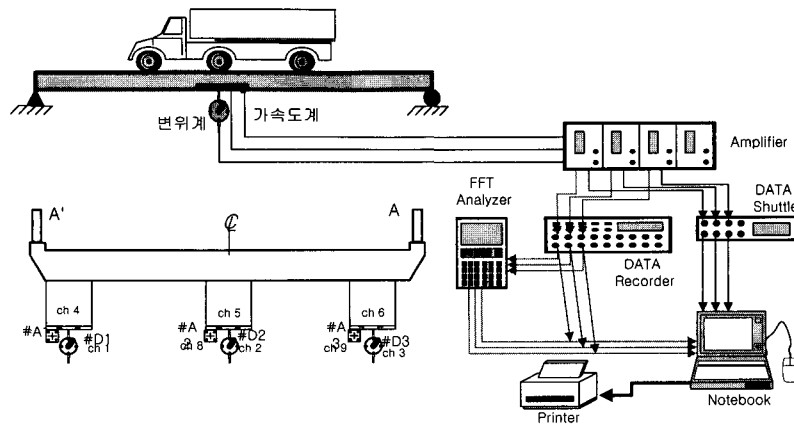


그림 10. 차량에 의한 진동 측정 실험(교량)

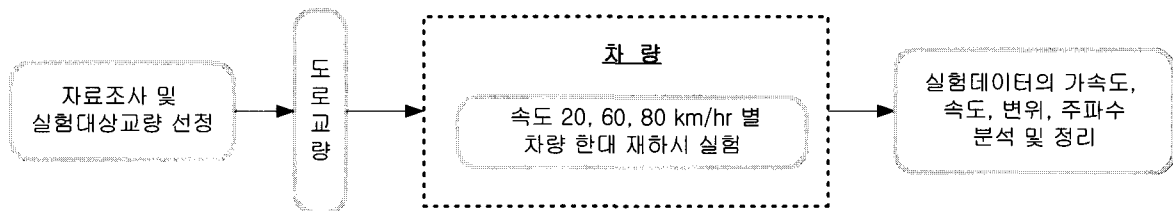


그림 11. 차량진동 측정을 위한 실험 흐름도

표 3. 동적 재하시험 결과 값

속 력	각 거더의 최대변위 (mm)			최대가속도 (g)		
	#D1	#D2	#D3	#A1	#A2	#A3
20km/hr	1.143	1.134	1.118	0.0146	0.0094	0.0104
60km/hr	1.262	1.381	1.223	0.0296	0.0206	0.0178
80km/hr	1.389	2.070	1.368	0.0328	0.0298	0.0248
*20km/hr	1.094	1.202	1.062	0.0126	0.0084	0.0091
*60km/hr	1.201	1.543	1.185	0.0426	0.0334	0.0310
*80km/hr	1.443	2.159	1.410	0.0287	0.0182	0.0151

* 는 역방향 주행 실험 결과

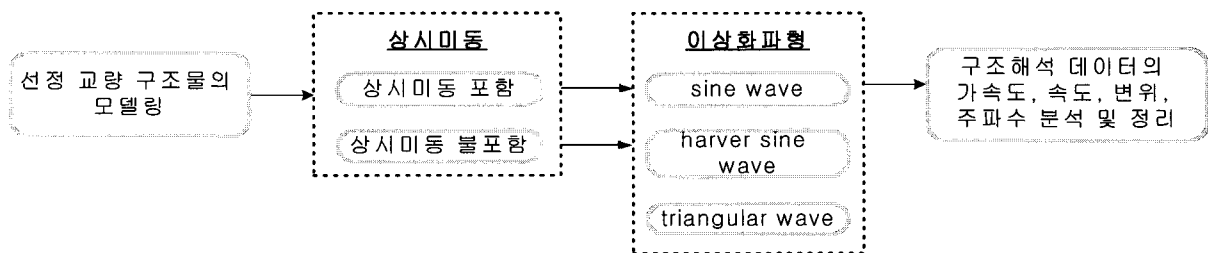


그림 12. 교량구조물의 구조해석을 위한 흐름도

교를 그림 14와 같이 1Span의 길이가 37.55m이고 절점을 75개로 등분하여 모델링 하였으며, 앞에서 보인 반사인파, 하버사인파, 삼각파하중과 지속시간의 관계를 입력하였다.

4.1.2 차량진동 모델링

역시 마찬가지로 차량 진동관계를 알아보기 위하여 유한요소 구조해석 범용 프로그램인 Midas를 이용하여 1Span의 길이가 15m이고 교폭이 5.9m인 대상 교량을 모델링 하였으며, 앞에서 보인 반사인파, 하버사인파, 삼각파하중과 지속시간의 관계를 입력하였다.

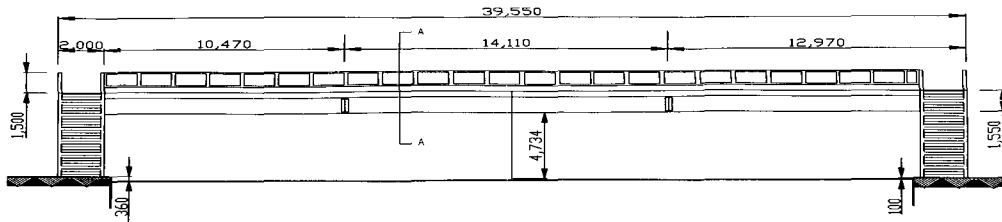


그림 13. 육교의 정면도

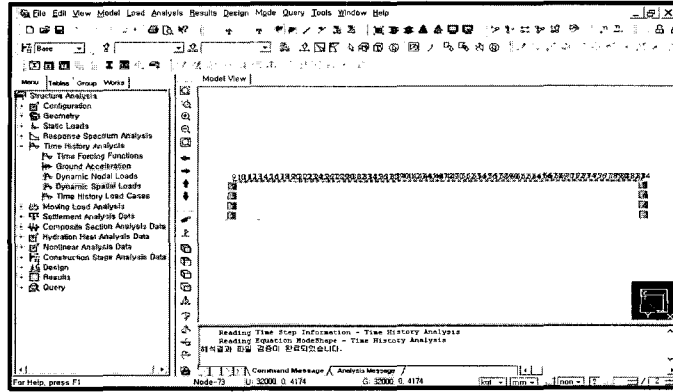


그림 14. 인체하중을 고려한 육교의 인체진동 모델링

표 4. 무작위로 뛰었을 경우의 해석 결과

과형	반사인파		하버사인파		삼각파	
	최대변위 (mm)	최고주파수 (Hz)	최대변위 (mm)	최고주파수 (Hz)	최대변위 (mm)	최고주파수 (Hz)
상시미동을 포함하는 경우 (0.5sec/1회)	1.596	2.451	1.209	2.051	0.964	2.051
상시미동을 포함하지 않은 경우 (0.5sec/1회)	1.582	2.451	1.192	2.051	0.949	2.051

표 5. 동적 재하 경우의 해석결과

과형	반사인파		하버사인파		삼각파	
	최대변위 (mm)	최대가속도 (g)	최대변위 (mm)	최대가속도 (g)	최대변위 (mm)	최대가속도 (g)
20km/hr	1.379	0.01582	1.17	0.01160	1.12	0.01848
60km/hr	1.381	0.02056	1.172	0.01090	1.121	0.02377
80km/hr	1.383	0.03613	1.173	0.01324	1.117	0.03447

4.2 모델링 해석결과

4.2.1 인체진동 모델링 해석결과

인체이상화하중 모델링을 구조물 이상화 모델링에 각각 반사인파, 하버사인파, 삼각파하중과 지속시간을 적용한 결과 표 4와 같은 값을 얻을 수 있었다.

중앙에서 무작위 뛰기의 경우 실측 데이터 (최대변위 1.659mm, 최대가속도 0.26g, 최고주파수 2.502

Hz)와 비교한 결과 이상화 모델링의 경우 반사인파하중의 이상화 과형을 적용한 해석값인 지속시간 0.5sec(상시미동을 포함하지 않은 경우)에서 최대변위 1.596mm와 주파수 2.451Hz가 실제측값과 가장 근접한 값을 보였다. 위의 경우도 실제값의 주파수가 이상화모델링의 주파수보다 약간 크지만 실측값과 쾌감~불쾌감곡선의 분석시 보행이 힘든 경우를 넘어 보행시 불쾌감을 느낀다는 점에서 거의 일치한다.

그리고 상시미동을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우의 분석값을 비교해 보면 차이가 아주 미비하므로 이상화 해석시 상시미동의 영향을 고려하지 않아도 된다고 판단된다. 또한 일정이상 지속시간이 길어지면 상시미동을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우의 분석값이 같아지므로 구조물에서 천천히 이동하는 경우에는 상시미동의 영향을 거의 받지 않는다고 판단된다.

4.2.2 차량진동 모델링 해석결과

차량하중 모델링을 구조물 이상화 모델링에 각각 반사인파, 하버사인파, 삼각파하중과 지속시간을 적용한 결과 표 5와 같은 값을 얻을 수 있었다.

대상교량에서 동적 재하시험을 실시한 60km/hr일 경우 실측데이터(최대변위1.381mm, 최대가속도 0.02060g)와 비교한 결과 이상화 모델링의 경우 반사인파하중 이상화 파형을 적용한 해석값이 실제측값과 가장 근접한 값을 보였다.

5. 결 론

교량 구조물의 통과주체가 되는 인체보행하중과 차량동하중이 교량에 미치는 처짐과 진동 등에 대한 영향을 적용 가능한 가장 이상화된 모델링을 찾기 위하여 연구한 결과는 다음과 같다.

1. 인체진동 실험대상 교량인 1Span의 길이가 37.55m인 육교에서 인체보행하중인 무작위위기의 경우를 비교한 결과 실측값과 반사인파하중의 경우가 가장 근접한 값을 보였다. 또한 이상화 모델링의 주파수가 실제 값보다 약간 크지만 실측값과 쾌감 ~ 불쾌감곡선의 분석시 거의 일치하므로 충분히 적용가능하다고 판단된다.
2. 차량진동 실험대상 교량인 1Span의 길이가 15m이고 교폭이 5.9m인 대상교량에서 동적 재하시험을 실시한 60km/hr일 경우 실측데이터와 비교한 결과 이상화 모델링의 경우 반사

인파하중을 적용한 해석값이 실제측값과 가장 근접한 값을 보였다.

3. 인체진동과 차량진동의 경우로 나눠 반사인파하중(half-cycle sine pulse), 하버사인파하중(haversine pulse), 삼각파하중(symmetrical triangular pulse)을 각각의 경우에 적용한 결과 반사인파(haversine pulse)하중이 가장 근접한 값을 보였다.

본 논문에서는 한정된 육교와 교량에 대해 실험 및 구조해석 실시를 하였으므로 좀더 많은 교량구조물에 대해 지속적인 실험 및 구조해석을 통하여 향후 이상화 모델링을 이용한 동하중해석에 대해 실측데이터가 없이 프로그램 해석만으로도 교량 구조물에 대한 진동영향평가를 할 수 있도록 연구가 필요하다고 생각된다.

감사의 글

본 논문은 2004년도 전남대학교 특별연구사업비 지원을 통해 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 전남대학교 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김기철, 이동근 (2001). 보행하중에 의한 구조물 진동의 효율적인 해석, 한국지진공학회
 김태호, 민경원, 이동근 (2003). 건축구조물 시스템 식별을 통한 무리보행하중 평가, 한국지진공학회
 박선준 (2000). 건설진동을 받는 가스관 구조물의 방진 연구. 박사학위논문, 전남대학교
 A. K. Chopra (1995). *Dynamics of Structures*, Prentice Hall

- ◎ 논문접수일 : 2005년 08월 29일
 ◎ 심사의뢰일 : 2005년 09월 01일
 ◎ 심사완료일 : 2006년 04월 26일

