

# 건축구조물의 시스템 식별을 통한 무리보행하중 평가

## Estimation of Group Walking Loads by System Identification of Building Structures

김 태 호<sup>\*</sup>                      민 경 원<sup>\*\*</sup>                      이 동 근<sup>\*\*\*</sup>  
Kim, Tae Ho                      Min, Kyung Won                      Lee, Dong Guen

### 국문요약

이 연구의 목적은 무리보행하중을 받는 구조물의 주요 지점에 대한 응답을 계속하고 분석하여 하중의 특성을 파악하는 것이다. 이를 위하여 먼저 건축구조물의 동 특성을 파악하였으며 이를 바탕으로 무리보행하중의 주파수 특성을 파악할 수 있는 식을 유도하였다. 그리고, 단위보행하중의 주파수 특성을 바탕으로 무리보행하중의 크기를 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 유도된 식은 무리보행하중의 진동수 및 크기를 잘 나타내었으며, 단위보행하중을 기준으로한 무리보행하중의 크기를 평가 하는 경우에는 고차모드형상을 포함하여야 좋은 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

주요어 : 무리보행하중, 시스템 식별, 진동, 전달함수

### ABSTRACT

The objective of this study is to estimate the frequency characteristics of group walking loads based on the information of measured responses. At first, dynamic properties such as natural frequencies and modes are obtained from input/output relation for building structures by heel drop test. Second, a method to estimate group walking loads by the transfer functions from measured responses to group walking loads is proposed. The method turned out to estimate the group walking loads accurately. Higher modes could be important in estimating the amplitude of group walking loads with the information of single walking load.

Key words : walking load, system identification, vibration, transfer function

## 1. 서 론

최근 고강도 재료의 사용으로 구조부재를 강도에 맞추어 설계할 경우에는 구조부재의 크기나 단면적이 작아져서 처짐과 진동이 과도하게 발생하는 경우가 많다. 그러므로 건축물에서 구조부재의 처짐과 진동을 규준치 이하로 제한함으로써 건축물의 사용성을 확보하게 된다. 따라서 과거에 시공된 건축물보다 최근에 시공된 건축물은 사용성이 보다 중요하게 인식되고 있으며 또한 거주자들의 환경에 대한 인식의 변화로 진동과 소음과 같은 환경문제가 보다 중요한 문제로 대두되고 있다. 따라서 건축 구조물의 정확하고 실용적이며 효율적인 진동해석이 요구되고 있다.

사람의 움직임에 의하여 야기되는 동적하중과 이러한 동적 하중으로 인한 건축 구조물의 진동에 대한 연구 사례를 살펴보면, 사람의 움직임에 의하여 야기되는 동적하중에 대한 연구는 70년대와 80년대에 독일과 영국에서 활발히 진행되었으며<sup>(1)-(3)</sup> 최근에는 미국과 캐나다에서 보행하중에 대한 연구와 거주자의 움직임에 의한 건축 구조물의 진동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>(4),(5)</sup> 그러나 국내에서는 보행하중에 대한 연구와 사람의 움직임에 의한 구조물의 진동에 대한 연구가 매우 미비한 실정이다.<sup>(6)</sup>

보행하중에 의한 진동 문제는 주로 육교나 연결통로와 같

은 보행전용 구조물, 그리고, 경간이 큰 철골 구조물에서도 발생하고 있다. 보행하중에 큰 영향을 미치는 요소들은 보폭 및 보폭의 특성, 보행속도, 몸무게, 성별, 신발의 유형, 바닥의 표면조건 등이며 이 중 영향이 가장 큰 요소로 알려진 것은 보폭과 보행 속도이다.

일반인의 평균적인 걷는 주기는 1.5~2.5Hz이며, 천천히 달리는 경우는 2.4~2.7Hz 그리고, 빨리 달리는 경우는 5.0Hz 이상이 되는 경우도 있다. 보통 구조물에 작용하는 보행 진동수는 3.5Hz미만인 것으로 알려져 있다.<sup>(2)</sup> 앞서 살펴본 내용은 모두 일인보행을 중심으로 하여 보행자의 거동을 평가한 것이며 무리보행의 경우에 대한 기존의 연구 결과<sup>(1)</sup>를 살펴보면 다음과 같다. Schulze, H.는 무리 보행의 경우에 최대 보행밀도는 1.6~1.8인/m<sup>2</sup>이고, 단위 면적당 무게는 약 110~140kgf/m<sup>2</sup> 정도로 파악되었으며 평균적으로는 1.0인/m<sup>2</sup>인 것으로 나타났다. 보행자들의 보행성향은 무리보행시 무의식적으로 스텝을 맞추는 경향이 있어 구조물의 진동을 크게 할 수 있는 요소임이 밝혀졌다. 그 외에도 Matsumoto<sup>(6)</sup> 등은 도착확률과 출발확률을 포아송 분포로 가정하여 동적확대계수를 제시하였으며 그 식은 다음과 같다.

$$m = \sqrt{\lambda T_0} \quad (1)$$

$\lambda$  : 평균흐름(인/sec), 최대 1.5인/sec · m

$T_0$  : 통과시간(구조물의 길이/통과 속도)

$\lambda T_0$  : 평균흐름에 의하여 구조물을 통과하는 사람수

그리고, Eriksson<sup>(2)</sup>은 1차 고유진동수가 낮은 바닥판일 경우에

\* 학생회원 · 성균관대 건축공학과 대학원, 박사과정(대표저자 : tahz91@yahoo.co.kr)

\*\* 정회원 · 단국대 건축공학과, 교수

\*\*\* 정회원 · 성균관대 건축공학과, 교수

본 논문에 대한 토의를 2003년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2003. 1. 15 / 심사종료일 : 2003. 2. 14)

대하여 구조물의 1차모드만( $\phi_1$ )을 사용하여 무리보행하중의 크기를 바닥판 중심에 작용하는 하중( $S_{F,center}$ )으로 치환하는 식을 제시하였다.

$$S_{F,center} = \frac{S_F}{L_{path}} \int_0^{L_{path}} \Phi_1^2(x) dx \quad (2)$$

이 경우는 구조물 전체에 보행하중이 작용하는 것으로 가정한 것이다.  $S_F$ 는 한사람의 하중에 대한 파워 스펙트럴밀도 함수(PSD : Power Spectral Density),  $L_{path}$ 는 무리이동경로이다.

위의 무리보행 연구들은 무리보행자의 평균밀도, 동적 확대계수와 1차 모드만을 고려한 하중 추정 등에 관한 것이다. 본 연구에서는 Eriksson의 연구를 발전시켜 해석 및 실험에 사용될 구조물의 시스템 식별을 하고 이를 바탕으로 구조물의 고차모드를 포함한 일반적인 무리보행하중의 산정식을 제안하고자 하는 것이다. 이를 위하여 발뚨꿈치 충격하중을 계측하고, 이를 해석에 적용하였다. 그리고, 입력하중과 출력응답의 관계를 통하여 구조물의 특성을 나타내는 전달함수를 구하고 이를 기초로 하여 구조물의 주요 진동수 및 모드 형상 그리고, 감쇠비를 추정하였다. 이를 바탕으로 하여 구조물에 가해지는 등가의 무리보행하중의 추정식을 제안하였으며, 해석 결과와 비교하였다.

## 2. 실험을 통한 구조물의 시스템 식별

### 2.1 전달함수 및 위상각 산정

보행하중의 정확한 평가를 위해서는 구조물 고유의 동특성을 나타내는 전달함수를 구하는 것이 필수적이다. 정확한 전달함수가 산정되면 보행진동의 응답을 계측하여 입력하중의 평가를 할 수 있게 된다. 입력에 대한 출력의 전달함수는 다음 식에 의해 계산된다.

$$H_{yu}(j\omega) = \frac{S_{yy}(\omega)}{S_{uu}(\omega)} \quad (3)$$

상기 식은 연속시간영역의 전달함수이며, 지정된 시스템 입력의 연속시간 기록과 반응 결과는 시간 간격  $N$ 으로 표본화된다. 입력과 출력신호는 각각  $u(nT)$ ,  $y(nT)$ 이며 주파수영역의 파워스펙트럼밀도함수로 표현된 것이  $S_{yy}(\omega)$ 와  $S_{uu}(\omega)$ 다. 여기서  $T$ 는 시간간격이고  $n=0, 1, \dots, N$ 는 정수이다. 주기적으로 표현되는 신호(주기  $NT$ )는 다음과 같이 나타낸다.

$$u_p(nT) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} u(nT + rNT) \quad (4)$$

$N$ 개의 데이터 수에 대한 FFT는 다음 식에 주어진 이산 푸리에 변환으로 계산된다.

$$U(jk\Omega) = \sum_{n=0}^{N-1} u_p(nT)W^{-nk} \quad k=0, \dots, N-1 \quad (5)$$

여기서  $W = e^{2\pi j/N}$ ,  $\Omega = \omega_s/N$ ,  $\omega_s$ 는 표본 진동수다.

위와 같이 실험에 의하여 계측되는 응답은 변위, 속도, 가속도에 대하여 각각 식(6)에서 (8)과 같은 관계를 가진다.

$$\frac{X(s)}{F(s)} = H(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (6)$$

속도에 대한 전달함수는

$$\frac{sX(s)}{F(s)} = sH(s) = \frac{s}{ms^2 + cs + k} \quad (7)$$

가속도에 대한 전달함수는

$$\frac{s^2X(s)}{F(s)} = s^2H(s) = \frac{s^2}{ms^2 + cs + k} \quad (8)$$

여기서,  $s = i\omega$ 이다.

### 2.2 감쇠 및 모드형상 추정

보행하중이 작용하는 구조물의 고유진동수는 입력하중과 이에 의한 응답을 관계짓는 전달함수를 통하여 파악할 수 있다. 감쇠가 적은 경우에 감쇠율은 그림 1과 같이 구할 수 있으며, 식 (9)와 (10)의 관계에 의하여 감쇠율이 결정된다.

$$|H(\omega_a)| = |H(\omega_b)| = \frac{|H(\omega_d)|}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

여기서  $\omega_d$ 는 공진할 경우에 감쇠비가 적용된 진동수이고  $\omega_b - \omega_a = 2\xi\omega_d$ 인 관계를 이용하면, 식 (10)과 같이 감쇠율을 결정할 수 있다.

$$\xi = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_d} \quad (10)$$

모드형상의 추정식은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(8),(9)</sup>

$$|\phi_r \phi_r^T|_{ij} = |2\xi_r \omega_r^2| H_{ij}(\omega_r) \quad (11)$$

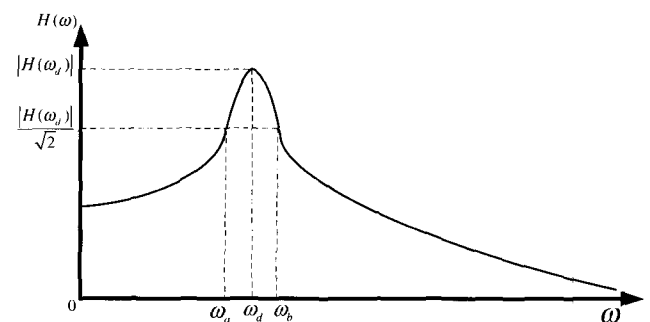


그림 1 전달함수를 이용한 감쇠비의 산정

이 식은 구해진 전달함수에 대하여 각 모드의 최대값을 찾아 이를 기초로 하여 모드형상을 추정하는 방법이다. 이때, 모드형상의 부호는 전달함수에 대한 위상각의 부호를 따른다. 본 연구의 경우에는 모드의 값들이 제곱이 되어 큰 의미가 없기 때문에 산정하지 않았다.

### 3. 무리보행하중의 평가

#### 3.1 무리보행하중의 정식화

본 논문의 목적은 구조물의 임의지점에 대한 응답을 예측하고 분석하여 작용하는 무리보행하중의 특성을 파악하는 것이다. 이를 위하여 우선 다음과 같은 운동방정식을 고려하였다.

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F \quad (12)$$

여기서,  $M$ ,  $C$ ,  $K$ 는 각각 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이고,  $F$ 는 구조물에 가해지는 무리보행하중벡터이다. 응답  $y$ 는 식 (13)과 같은 모드의 조합으로 표현이 가능하다.

$$y = z_1\phi_1 + z_2\phi_2 + \dots + z_n\phi_n = \sum_{r=1}^n z_r\phi_r \quad (13)$$

위의 식에서  $z_r$ 와  $\phi_r$ 는 각각  $r$ 번째 모드계수와 모드형상이다. 식 (12)에 모드의 직교성을 적용하면 각 모드에 대하여 분리된 방정식을 얻을 수 있으며 임의의  $s$ 차 모드방정식은 식 (14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_s\ddot{z}_s + c_s\dot{z}_s + k_s z_s = \phi_s^T \mathbf{F} \quad (14)$$

여기서 일반화된 좌표  $z$ 에 대한 식을 스펙트럼 밀도함수로 표현하기 위하여  $z = z_0 e^{i\omega t}$ ,  $F = F_0 e^{i\omega t}$ 로 설정해 라플라스 변환을 하면 식 (15)와 같다. 참고로  $\omega$ 는 외력에 대한 진동수로서 하중  $F$ 의 가력 진동수가  $\omega$ 로 동일하다고 가정한다.

$$-\omega^2 m_s z_0 + i\omega c_s z_0 + k_s z_0 = \phi_s^T \mathbf{F}_0 \quad (15)$$

식 (15)는 시간  $t$ 의 영향이 없는 정상상태 진동에서의 진폭  $F_0$ 와  $z_0$ 의 관계식으로  $s$ 번째 모드에 대한 응답  $z_0$ 에 대하여 쓰면 식 (16)과 같다.

$$z_{s,0} = \frac{\phi_s^T \mathbf{F}}{-\omega^2 m_s + i\omega c_s + k_s} \quad (16)$$

실제 좌표계와 모드좌표의 관계는 식 (13)에 나타내었으며, 이를 파워 스펙트럼에 관계된 식으로 바꾸면 식 (17)과 같이 쓸 수 있다.

$$S_A = \left| \sum_{r=1}^n z_r \phi_r \right|^2 \quad (17)$$

위 식은 모드간의 상관성이 적다면 각 모드가 서로 분리된 것으로 생각할 수 있으며, 식 (18-a)과 같이 다시 표현이 가

능하다. 그리고, 식(16)을 (18-a)에 대입하면 식 (18-b)와 같이 쓸 수 있다.

$$S_A = (|z_1\phi_1(i)|^2 + |z_2\phi_2(i)|^2 + \dots + |z_n\phi_n(i)|^2) = \left( \sum_{s=1}^n |z_s\phi_s(i)|^2 \right) \quad (18-a)$$

$$S_{A,ij} = \left( \sum_{s=1}^n \left( \frac{\phi_{is}\phi_{js}}{m_s(-\omega^2 + 2i\xi_s\omega\omega_s + \omega_s^2)} \right) \right)^2 S_{F,j} \quad (18-b)$$

실제로 보행하중과 같은 문제는 구조물의 임의 절점에 고정되어 가해지는 하중이 아니라 이동하중의 형태이고, 대체로 여러 사람이 이동하는 무리보행의 형태이다. 본 논문에서는 실제 이동하는 사람의 몸무게나 보행속도 등이 서로 다르지만 동일 성향의 무리보행이라고 판단하여 일인보행하중의 주파수특성이 동일하다고 가정한다. 이때, 구조물에 가해지는 하중은 보행자가 위치하는 여러 절점에 동일한 하중이 가해지는 것으로 볼 수 있으며 이에 대한 해석은 각 절점에 대하여 독립적으로 응답해석을 수행하고 다시 이를 조합함으로써 구할 수 있고 이는 식 (19)에 나타내었다.

$$S_{A,i} = \left( \sum_{l=1}^m \sum_{s=1}^n \left( \frac{\phi_{is}\phi_{ls}}{m_s(-\omega^2 + 2i\xi_s\omega\omega_s + \omega_s^2)} \right) \right)^2 S_F \quad (19)$$

여기서,  $l$ 은 작용한 하중의 수이며  $S_F$ 는 일인보행하중의 주파수 파워 스펙트럼 밀도함수이다. 이 식을 구하고자 하는 하중의 식으로 정리하면 식 (20)과 같이 쓸 수 있다.

$$S_F = \frac{S_{A,i}}{\sum_{l=1}^m \sum_{s=1}^n \left( \frac{\phi_{is}\phi_{ls}}{m_s(-\omega^2 + 2i\xi_s\omega\omega_s + \omega_s^2)} \right)^2} \quad (20)$$

#### 3.2 무리보행하중의 평가

전 절에서는 구조물의 임의 부분의 응답계측 등을 통하여 무리보행하중을 산정하는 식을 유도하였다. 실제 구조물의 설계시에 보행하중에 대한 사용성 평가를 위해서는 어느 정도의 무리보행하중이 가해질 것인지 파악하는 것이 중요하다. 이를 위하여 무리보행하중과 단위보행하중과의 관계를 유도하고자 한다.

식 (18)에서 편의상 단위크기를 가지는 백색잡음인  $S_F = 1$ 이라고 가정하면 무리보행의 경우는 구조물에  $S_F = 1$ 인 하중이 균일하게 가해지는 경우이며, 제자리 보행의 경우는  $S_F = 1$ 인 하중이 특정 지점에 가해지는 것이다. 우선, 무리보행의 경우 구조물의 응답에 대한 파워 스펙트럼 밀도함수는 식 (21)과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$S_{A,i} = \left( \sum_{l=1}^m \sum_{s=1}^n \left( \frac{\phi_{is}\phi_{ls}}{m_s(-\omega^2 + 2i\xi_s\omega\omega_s + \omega_s^2)} \right) \right)^2 = \left( \sum_{l=1}^m \sum_{s=1}^n \left( \frac{\phi_{is}\phi_{ls}}{A_s} \right) \right)^2 \quad (21)$$

제자리 보행하중이  $i$ 절점에 가해지는 경우는 다음 식과 같다.

$$S_{A,i} = \left( \sum_{s=1}^n \left( \frac{\phi_{is} \phi_{is}}{m_s (-\omega^2 + 2i\xi_s \omega \omega_s + \omega_s^2)} \right) \right)^2$$

$$= \left( \sum_{s=1}^n \left( \frac{\phi_{is} \phi_{is}}{A_s} \right) \right)^2 \quad (22)$$

먼저, 이 구조물의 1차 진동수가 낮아서 보행하중과 동조될 가능성이 있을 경우는 1차 모드가 지배되는 것으로 생각할 수 있다. 따라서, 식 (21)과 (22)는 각각 식 (23)과 (24)로 단순화시킬 수 있다.

$$S_{A,i} = \left( \sum_{l=1}^m \left( \frac{\phi_{il} \phi_{il}}{A_l} \right) \right)^2$$

$$= \frac{\phi_{i1}^2 \phi_{i1}^2}{A_1^2} + \frac{\phi_{i2}^2 \phi_{i2}^2}{A_2^2} + \dots + \frac{\phi_{im}^2 \phi_{im}^2}{A_m^2} \quad (23)$$

$$S_{Ai} = \frac{\phi_{i1}^2 \phi_{i1}^2}{A_1^2} \quad (24)$$

위 식에서  $A_i$ 는  $m_s (-\omega^2 + 2i\xi_s \omega \omega_s + \omega_s^2)$ 이다.

무리보행하중과 제자리 보행하중의 동특성이 동일하다면 식 (23)과 (24)를 나눔으로서 그 차이를 확인할 수 있다. 이때, 이 차이를 "증폭계수",  $\alpha$ 라 하고 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{\phi_{i1}^2} \sum_{l=1}^m \phi_{il}^2, \quad \phi_{i1} \neq 0 \quad (24)$$

마찬가지로 각 모드가 지배할 경우에 대하여도 동일한 방법으로 유도가 가능하고, 인접모드간의 관계가 미미할 경우, 여러 모드에 대해서는 식 (25)와 같다.

$$\alpha = \sum_{s=1}^n \frac{1}{\phi_{is}^2} \sum_{l=1}^m \phi_{il}^2, \quad \phi_{is} \neq 0 \quad (25)$$

#### 4. 예제 해석

##### 4.1 2차원 골조 해석 모형

제안된 시스템 식별과정의 정확성을 평가하기 위하여 우선 해석모형을 이용하여 검증하였다. 해석대상 구조물은 단순 지지보로서 단면은 H-400×200×8×13이며, 중심간 거리가 3m, 단위면적당 고정하중은 350kgf/m<sup>2</sup>로 가정하였다. 고유치 해석을 통하여 구한 고유진동수는 표 1과 같다. 구조물의 동특성을 파악하는 방법은 여러 가지가 있으나 본 논문에서 사용한 방법은 발뒷꿈치 충격하중에 의한 방법이다. 이는 순간적인 충격을 가하는 해머 테스트에 비해서는 충격의 지속 시간이 길지만 파악하고자 하는 주요 진동수 대역에 대하여 충분히 표현하고 있으며 또한 실제 실험의 경우에 대형 구조물에 큰 하중을 적용시켜야 하는 등의 문제 등을 고려하여

발뒷꿈치 충격 하중을 하게 되었다. 발뒷꿈치 충격하중은 사람이 로드셀에 올라서서 뒤꿈치를 들고 있다가 갑자기 떨어뜨릴 때 발생하는 충격하중을 직접 계측한 것이다. 전달함수의 산정은 그림 2의 예제 구조물에 그림 3과 같은 발뒷꿈치 충격하중을 1번과 2번 절점에 각각 가하고 이때에 여러 절점들의 응답을 통하여 산정된 것이다. 해석모델에 대한 감쇠율은 모든 모드에 대하여 5%로 하였다.

감쇠율 추정은 식 (9)에 의하여 수행되었으며, 1차, 2차, 그리고 3차 모드의 감쇠율은 각각 4.9%, 4.8%, 4.8% 정도로 추정되었다. 대체로 고유치 해석에 의한 결과와 전달함수기법에 의한 결과가 비슷하다는 것을 알 수 있다. 그림 4는 단순보 구조물의 2번지점 또는 3번지점에 발뒷꿈치 하중을 가하고 각각 해당 지점의 응답을 구하여 나타낸 전달함수이다. 중앙인 2번 지점에 가했을 때에는 비대칭모드인 2차 모드가 나타나지 않으며 3번 지점을 가했을 경우 중앙에서는 마찬가지로 비대칭모드의 영향이 없는 것을 알 수 있다.

표 1 고유진동수

	진동수(Hz)	
	고유치 해석	전달함수 추정
1차모드	4.68	4.64
2차모드	16.08	16.11
3차모드	29.98	29.98

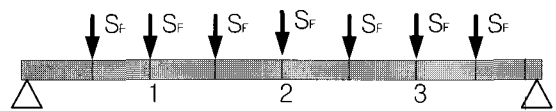
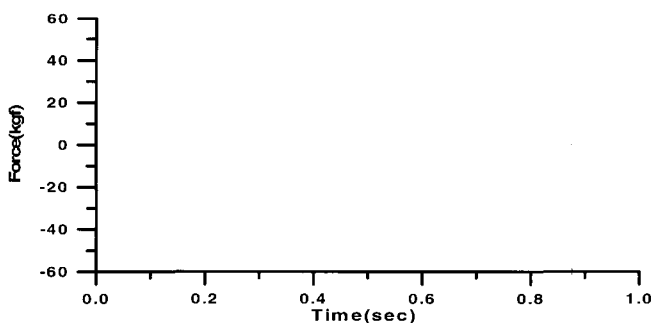
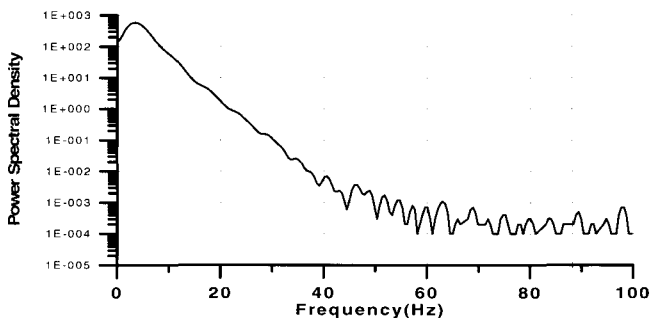


그림 2 예제 구조물

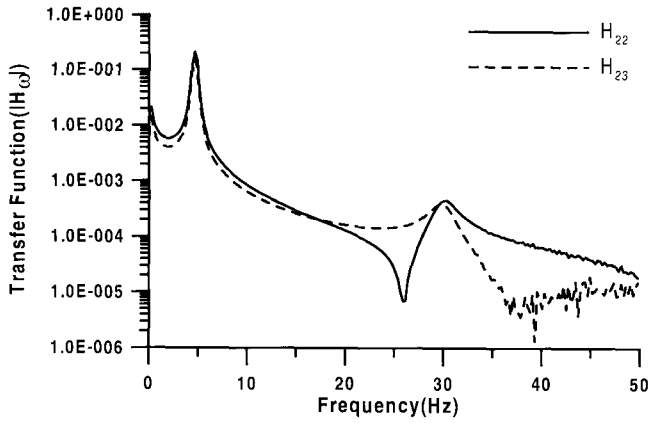


(a) 발뒷꿈치 충격하중의 시간이력

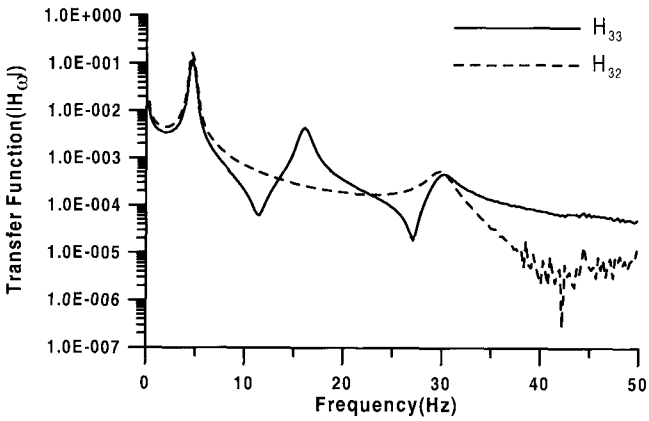


(b) 발뒷꿈치 충격하중의 응답스펙트럼

그림 3 뒷발꿈치 충격하중



(a) 절점 2에 가진한 경우



(b) 절점 3에 가진한 경우

그림 4 응답을 통한 예제구조물의 전달함수

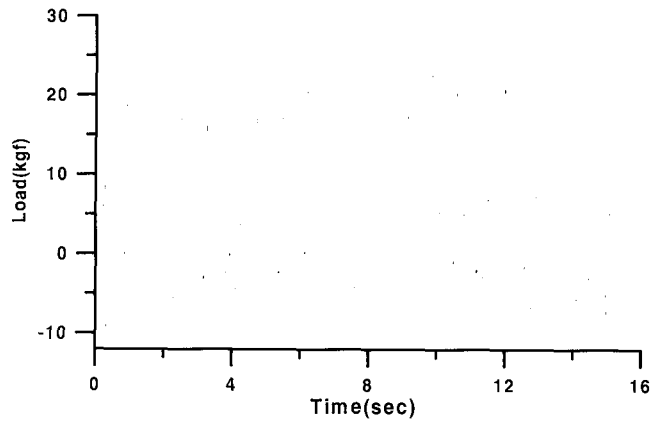


그림 5 제자리 보행하중

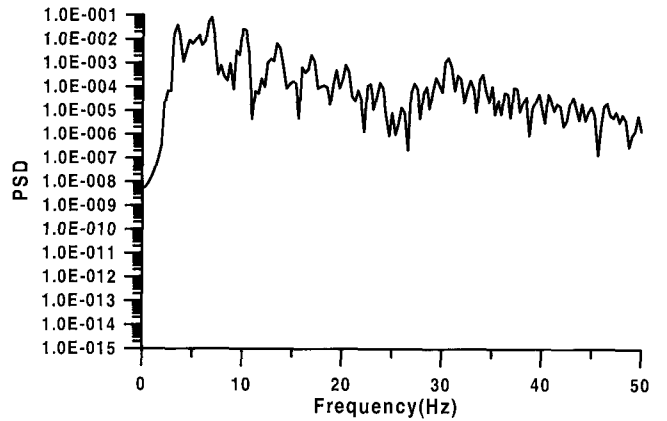


그림 6 제자리 보행하중의 파워스펙트럼밀도

무리보행을 하여 구조물 전체에 보행하중이 작용할 경우에는 이들이 등분포 하중으로 작용한다. 본 예제의 경우에는 등분포 하중의 효과를 얻기 위하여 그림 2와 같이 보를 세분화하였으며 각 절점에 그림 5의 일반적인 68kgf 성인남자의 제자리 보행하중을 택하였다. 이때의 하중은 정적인 부분을 제외한 동적인 하중만을 나타낸 것이다. 그림 6은 제자리 보행하중의 파워 스펙트럼 밀도이다. 이 그림에서 나타난 보행하중의 특성은 일반적인 여러 참고문헌<sup>(1)-(3)</sup>에 제시된 것과 동일하게 주요 보행진동수인 2Hz부근과 이에 배수의 진동수들이 큰 값을 가지는 것으로 나타났다.

그림 7은 구조물 전반에 걸쳐 제자리 보행하중이 가해졌을 때, 일인 제자리 보행하중의 파워 스펙트럼 밀도함수를 나타낸 것이다. 앞 절의 유도된 식을 이용하여 1차 모드만 고려한 경우와 고차모드의 영향을 고려한 경우를 구하였으며 모두 거의 동일한 결과를 보이고 있다. 이는 구조물의 고유진동수대역이 비교적 낮은 관계로 1차모드의 영향이 지배적인 이유로 판단된다. 또한 실제의 밀도함수(그림 7에서 실선으로 나타나 있음)와 비교하였을 때 저차모드에서 상당히 서로 근접하는 것을 확인할 수 있었다. 고차모드의 기여를 살펴보기 위하여 구조물의 절반에만 하중을 가하였다. 그림 8은 그림 7과 마찬가지로 보행하중의 파워 스펙트럼 밀도함수를 나타낸 것이며, 나타난 결과를 보면 2차모드 이상의 영향에 의하여 1차 모드만을 고려한 형상과는 약간 차이는 있

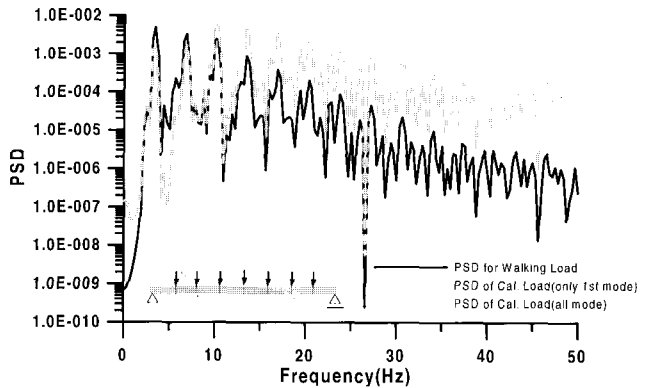


그림 7 보행하중의 PSD - 구조물 전체에 재하

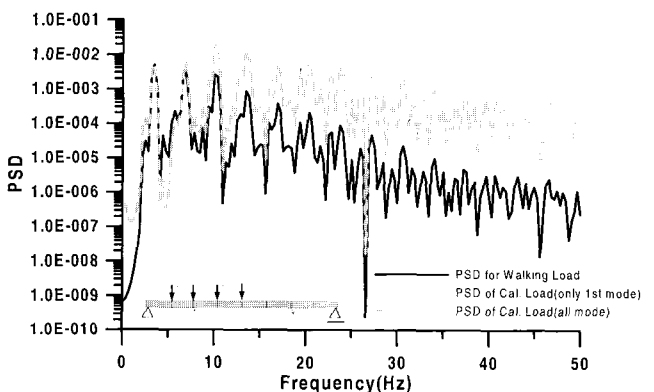


그림 8 보행하중의 PSD - 구조물 절반에 재하

으나 근본적인 오차를 극복할 정도의 것은 아니었다. 따라서, 구조물의 주요 진동수가 낮아 보행하중의 주된 주파수와 근접할 경우에는 고차모드의 영향은 미미한 것으로 판단된다.

무리보행하중과 제자리보행하중과의 관계에 대하여 나타내었던 3.2절의 정식화 과정에 의하여 무리보행하중을 예측한 것이 그림 9이다. 1차 모드만을 고려한 경우에 증폭계수  $\alpha$ 는 5.99정도로 추정되었으며, 고차모드까지 고려한 경우는 12.60정도로 추정되었다. 무리보행하중을 의미하는 등분포하중은 보 중앙부의 응답을 전달함수로 나누어 산정한 것이다. 그림 9에 나타난 결과를 보면 많은 모드를 고려한 경우가 실제 무리보행하중의 파워 스펙트럴 밀도함수에 접근함을 알 수 있다. 그림 7과 8과 같이 응답을 이용하여 실제 보행하중을 추정할 경우에는 1차 모드만을 고려하는 것과 여러 모드를 고려하는 것이 큰 차이를 보이지 않았으나 무리보행을 대표할 수 있는 단위보행하중을 안다면 그림 9와 같이 무리보행을 훨씬 정확하게 추정할 수 있음을 확인할 수 있었고, 이때에는 반드시 여러 모드를 고려해야 좀 더 정확한 결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 참고로 그림 10은 무리보행하중이 가해진 경우의 하중과 집중하중과의 비를 나타낸 것이다. 하중의 진동수에 대략 3배에서 4배 정도까지는 비교적 일정한 비율을 가지고 있음을 알 수 있다. 보행하중의 주요 진동수 대역은 기존연구결과에서 3.5Hz 미만으로 알려져 있어 제시한 방법이 보행하중의 특성 추정에는 충분히 적용 가능함을 확인할 수 있다.

위의 연구 결과를 바탕으로 보행하중에 대한 응답을 계측하여 단위하중과의 비를 알 경우에 보행밀도가 어느 정도인

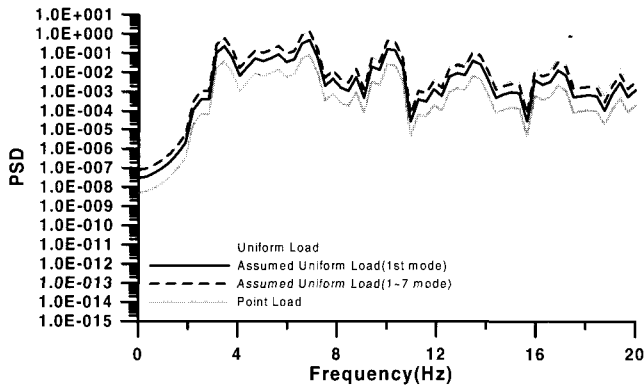


그림 9 무리보행하중의 추정

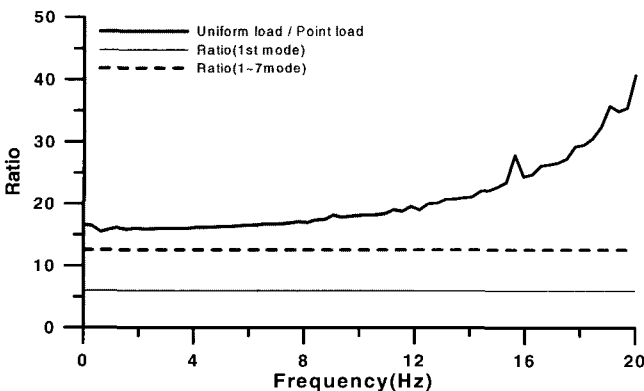


그림 10 무리보행하중의 증폭계수

지도 파악할 수 있다. 이를 위해서는 시스템 식별을 통하여 구조물의 주요 모드형상을 파악하여야 한다. 주요 모드에 대하여 가장 정확한 모드형상을 주는 경우를 16개의 요소분할을 한 경우로 하고, 8개, 4개에 대하여 각각의 모드형상에 의한 증폭계수의 차이를 검토하였다. 이는 정확한 모드형상에 의한 모드의 크기와 계측하지 못하는 부분에 대한 보간값의 차이를 파악하기 위한 것으로 그림 11(a)는 재하된 하중보다 더 많이 분할한 것이고, (b)는 하중의 수만큼 분할한 것이며, (c)는 하중의 수보다 더 적게 분할하여 보간값을 취하는 경우이다.

그림 10에서 보행하중의 진동수에 3배정도인 12Hz 범위 내의 증폭계수들에 대한 평균값은 16.94이며, 식 (24)와 (25)를 이용하여 얻은 증폭계수는 표 4와 같다. 표 4의 결과를 살펴보면 보행밀도보다 더 세밀하게 모드 값을 얻어내는 것은 큰 의미가 없음을 확인하였고, 작용하는 보행밀도에 비하여 적은 요소분할은 모드형상의 추정이 어려워 증폭계수가 낮게 평가되는 것으로 나타났다. 따라서, 증폭계수 산정시에는 가능한 보행하중의 밀도만큼 요소분할이 필요하며, 이에 의하여 발생할 수 있는 모드들을 고려하는 것이 바람직한 것으로 생각된다.

기존 연구자의 연구결과에 의하면 통상적인 보행밀도는 1m<sup>2</sup>당 1인이므로, 예제의 구조물의 경우에는 최대 7명 정도의 보행이 예상된다. 따라서, 예제 구조물에 1인, 3인, 5인, 7인이 등간격으로 보행할 경우 식 (25)에 의하여 산정된 증폭계수를  $\alpha_1$ 이라 하고 응답계측에 의한 실제 증폭계수를  $\alpha_2$ 라 할때 각각의 증폭계수는 표 5와 같다. 여기서, 사용된 하중은 그림 5의 하중과 유사한 것으로 동일한 사람이 제자리보행한 것을 계측한 것이다. 나타난 결과를 살펴보면 응답을 이용하여 산정한 증폭계수와 식 (25)에 의하여 제시된 증폭계수가 거의 비슷함을 알 수 있다. 따라서, 시스템 식별을 통하여 구조물의 모드형상을 알고 있을 경우에 식 (25)를 이용하여 보행 밀도별 증폭계수를 계산하여 두면, 임의 응답의 계측을 통하여 해당 구조물에 가해지는 보행밀도를 근사적으로 추정이 가능할 것으로 사료된다.

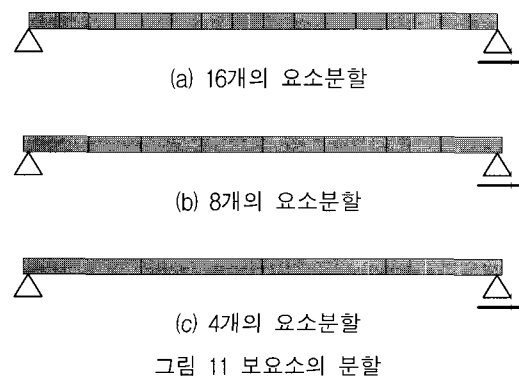


그림 11 보요소의 분할

표 4 요소분할에 따른 증폭계수 비교

	16 분할	8 분할	4 분할
$\alpha$	12.60	12.60	6.00

표 5 보행밀도에 따른 증폭계수 비교

	$\alpha$	
	$\alpha_1$	$\alpha_2$
1인	1.00	1.00
3인	5.58	4.17
5인	10.06	9.16
7인	12.60	15.97

4.2 3차원 골조 해석 모형

이 절에서는 앞서 연구된 내용을 그림 12와 같은 예제 구조물에 적용시켜 보았다. 예제 구조물은 콘크리트 구조물로서 보의 단면은 30cm×50cm 이고, 기둥의 단면은 50cm×50cm 이다.

이 구조물의 감쇠비는 모든 모드에 대하여 5%로 하였다. 그림 13의 전달함수는 발뽀굽 하중을 1번 절점에 가진하고, 1번, 2번, 3번 절점에서의 응답을 수집하여 얻은 것이다. 이를 통하여 얻은 구조물의 진동수와 감쇠율은 표 6과 같으며, 고유치 해석 결과와 비교할 때, 고유진동수는 비슷하나 감쇠율은 전체적으로 낮게 평가되는 것으로 나타났다. 추정된 고유진동수는 1번 절점의 모드 값이 큰 모드를 중심으로 비교한 것들이다. 고유진동수 및 감쇠비 추정을 통하여 이들 모드형상을 추정할 수 있었으며, 이를 기준으로 표 7과 같은 보행밀도별 증폭계수를 산정하였다.

예제 구조물에 나타낸 바와 같이 보 중앙에 7인이 제자리 보행하는 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. 해석에 사용



그림 12 예제 구조물

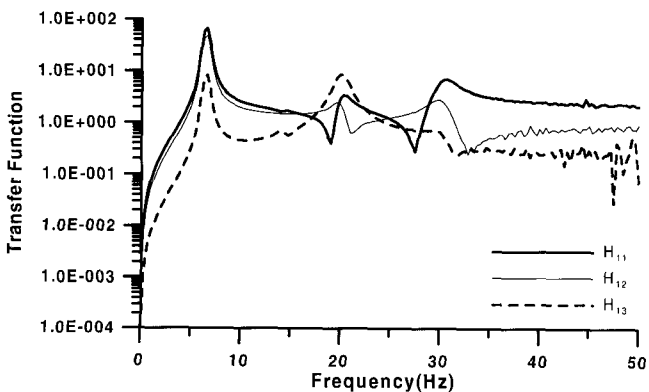


그림 13 전달함수

표 6 고유진동수(Hz) 및 감쇠비(%) 비교

주요연직모드	고유치해석		전달함수추정	
	진동수	감쇠율	진동수	감쇠율
1차모드	6.43	5.00	6.56	4.63
9차모드	20.03	5.00	20.30	3.98
14차모드	30.16	5.00	30.60	3.83

표 7 보행밀도별 증폭계수

보행밀도	$\alpha$
3인	4.7
5인	5.8
7인	9.7

한 보행하중은 그림 5의 것이며, 식 (20)에 의하여 추정된 보행하중과 해석에 사용한 보행하중의 파워 스펙트럴 밀도함수는 그림 14에 나타내었다. 추정된 보행하중은 실제의 것과 진동수 대역 및 크기가 거의 비슷함을 확인할 수 있다.

무리보행하중의 평가를 위하여 1번 절점의 응답을 1번 절점에서의 전달함수로 나눈 등가의 무리보행하중과 단위보행하중의 파워 스펙트럴 밀도함수에 표 7에 나타낸 증폭계수를 곱하여 구한 무리보행하중을 비교한 것이 그림 15이다. 이 결과도 역시 주요 진동수 대역 및 크기를 비교적 잘 추정하고 있음을 알 수 있다. 따라서 보행하중에 대한 증폭계수를 이용하면 구조물에 예상되는 하중의 형태를 알 경우에 설계지수로서 사용이 용이할 것으로 예상된다.

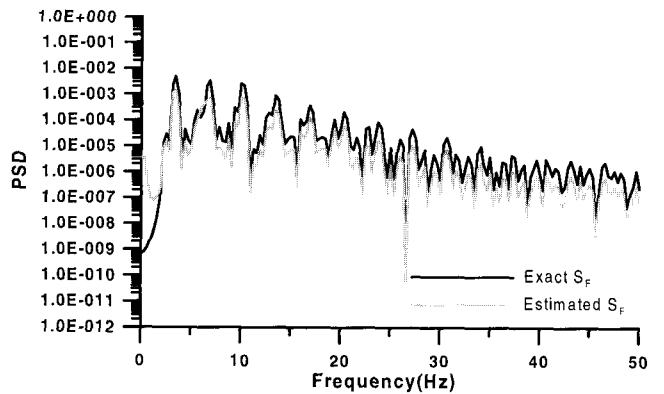


그림 14 보행하중의  $S_F$

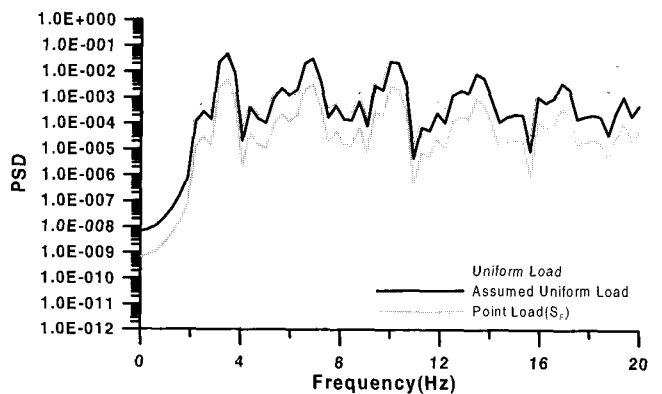


그림 15 무리보행하중의  $S_F$

## 5. 결론 및 추후연구과제

본 연구의 목적은 건축구조물에 가해지는 무리보행하중을 구조물의 응답을 통하여 추정하는 방법을 제안하는 것이다. 이를 위하여 구조물의 시스템 식별을 수행할 수 있는 방법을 설명하고 이를 바탕으로 하여 2차원 골조구조물과 3차원 골조 구조물에 대하여 가해진 무리보행하중의 동특성을 파악하였다. 최종적으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제시된 무리보행하중의 식을 이용하여 보행하중을 추정할 수 있고 이를 이용하여 보행밀도를 산정할 수 있었다. 이에 구조물에 가해지는 동적하중의 특성파악을 통하여 구조물의 설계시 사용성 평가에 용이하게 사용할 수 있을 것으로 사료된다.
- 2) 응답을 이용하여 단위 보행하중을 산정할 경우에 1차 모드만을 사용한 결과와 여러 모드를 고려한 결과는 크게 차이를 보이지 않았다. 따라서 여러 모드를 이용할 필요는 없을 것으로 사료된다.
- 3) 단위 보행하중을 이용하여 무리보행하중을 산정할 때에는 1차모드만을 고려하였을 경우가 여러 모드를 고려한 결과와 비교하여 무리보행하중의 크기를 충분히 나타내지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 단위 보행하중을 이용하여 무리보행하중을 산정할 경우에는 반드시 여러 모드의 영향을 고려해야 할 것으로 판단된다.
- 4) 본 논문에서 다룬 예제는 모두 골조구조물에 대한 경우로 실제 보행하중이 주로 작용하는 바닥판 구조물에 대한 적용이 필요할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC)의 “지원과제명-건축 구조물의 스마트 진동제어기술 개발”의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. Bachmann, H. and Ammann, W., *Vibration in Structures*, IABSE, 1987.
2. Eriksson, P. E., “Vibration of Low Frequency Floors,” Thesis for Ph. D., Chalmers University of Technology, 1994.
3. Ohlsson, S., *Floor Vibrations and Human Discomfort*, Chalmers University of Technology, 1982.
4. Ebrahimpour, A., “Modeling Spectator Induced Dynamic Loads,” Thesis for Ph. D., University of Idaho, 1987.
5. Rainer, J. H. and Pernica, G., “Vertical dynamic forces from footsteps,” Noise and Vibration Section, Division of Building Research, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, 1986, pp. 12-21.
6. Matsumoto, Y., Nishioka, T., Shiojiri, H., and Matsuzaki, K., “Dynamic design of foot-bridges,” *IABSE Proceedings*, Zürich, 1978, pp. 17-78.
7. 김기철, 이동근, “보행하중에 의한 구조물 진동의 효율적인 해석”, 한국지진공학회 논문집, 제5권, 제1호, 2001. 2.
8. Inman, D. J., *Engineering Vibration*, 2nd ed., Prentice Hall, 2001.
9. Ewins, D. J., *Modal Testing: Theory and Practice*, Research Studies Press, 1986.