

## 무리보행하중이 작용하는 건축물의 간편한 응답추정

# SIMPLE AND EFFICIENT METHODS FOR THE RESPONSE ESTIMATION BY GROUP WALKING LOADS

김 태 호<sup>1)</sup>  
Kim, Tae Ho

민 경 원<sup>2)</sup>  
Min, Kyung Won

이 동 근<sup>3)</sup>  
Lee, Dong Guen

### ABSTRACT

Long span structures with low natural frequencies such as shopping malls, large offices, and assembly rooms may experience significant dynamic responses due to human activities. In this study, equations to estimate the magnitudes of group walking loads are derived and a simple procedure to estimate and evaluate the corresponding response of the existing and new building structures subjected to human loads is proposed. The effectiveness of the proposed method is verified analytically using a simple floor and experimentally on a footbridge measuring the structural response induced by group pedestrians. Results indicate that the amplitudes of group walking loads can be easily estimated if the mode shapes are available, and that the corresponding structural responses can be estimated easily by the simple response measurement using the proposed method.

### 1. 서론

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.

사람의 움직임에 의하여 야기되는 동적하중에 대한 연구는 70년대와 80년대에 독일과 영국에서 활발히 진행되었으며<sup>1,2)</sup> 최근에는 미국과 캐나다에서 보행하중에 대한 연구와 거주자의 움직임에 의한 건축 구조물의 진동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>3,4)</sup> 대표적인 하중들로는 보행하중, 춤과 같은 울동하중 등이 있으며 우선 보행하중에 큰 영향을 미치는 요소들은 보폭과 보행 속도이다. 일반인의 평균적인 걷는 주기는 1.5~2.5 Hz이며, 천천히 달리는 경우는 2.4~2.7 Hz 정도로 알려져 있으며 보통 구조물에 작용하는 보행 진동수는 3.5 Hz미만인 것으로 알려져 있다.<sup>5)</sup> 무리보행의 경우에 대한 기존의 연구 결과<sup>1)</sup>를 살펴보면 다음과 같다. Schulze H.는 무리보행의 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. Ebrahimpour<sup>6)</sup> 등은 실험을 통하여 보행하중을 예측하고 이를 통계적으로 분석하여 보행자의 수에 따른 보행밀도를 제안하였으며 이를 바탕으로 구조물의 사용성 평가에 적용할 수 있는 식도 제안하였다. 그리고 울동하중에 대하여 두사람 사이의 위상을 분석하여 무

1) 학생회원 · 성균관대 건축공학과 대학원, 박사과정(대표저자 : tahz91@skku.edu)

2) 정회원 · 단국대 건축공학과, 교수

3) 정회원 · 성균관대 건축공학과, 교수

리지어 울동을 할 경우에 대한 상호연관성에 대한 확률밀도함수를 제안하였다. 이 밖에 Bishop<sup>11,12)</sup>은 계단구조물에 가해지는 보행하중을 계측하고 이를 분석하여 일반적인 보행하중의 경우보다 큰 하중이 발생할 수 있음을 밝혔다.

본 연구의 목적은 무리보행하중이나 무리울동하중의 크기를 파악할 수 있는 간단한 식을 제안하여 기존 또는 설계될 구조물에서의 용이한 진동량의 추정 및 평가를 수행할 수 있도록 하기 위한 것이다. 이를 위하여 간단한 구조실험 또는 구조해석을 통하여 구조물의 모드형상을 파악하고 이를 이용하여 진동량을 추정할 수 있는 식을 제안하고 또 보행자의 보행응답을 가속도계로 계측하여 제안된 식의 효율성을 검증하였다.

## 2. 무리하중에 대한 구조물의 응답평가

### 2.1 무리하중에 대한 구조물 응답의 정식화

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

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{y}} + \mathbf{K}\mathbf{y} = \mathbf{F} \quad (1)$$

여기서,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$ 는 각각 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬이고,  $\mathbf{F}$ 는 구조물에 가해지는 무리보행하중벡터로  $m$ 개의 하중으로 구성되어 있다. 응답  $\mathbf{y}$ 는 식 (2)와 같은 모드의 조합으로 표현이 가능하다.

$$\mathbf{y} = z_1\phi_1 + z_2\phi_2 + \cdots + z_i\phi_i + \cdots + z_n\phi_n = \sum_{s=1}^n z_s\phi_s \quad (2)$$

위의 식에서  $z_i$ 와  $\phi_i$ 는 각각  $i$  번째 모드계수와 모드형상이다. 식 (1)에 모드의 직교성을 적용하면 각 모드에 대하여 분리된 방정식을 얻을 수 있으며 이를 질량에 관하여 일반화시키면 임의의  $s$ 차 모드방정식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{z}_s + 2\xi_s\omega_s\dot{z}_s + \omega_s^2 z_s = \Phi_s^T \mathbf{F} \quad (3)$$

여기서, 일반화된 좌표  $z$ 에 대한 식을 스펙트럼 밀도함수로 표현하기 위하여  $z_s = z_{s0}e^{i\omega t}$  라 두자. 그리고 무리보행하는 사람들의 하중을 대표할 수 있는 평균적인 하중을 취하고 이들의 흐름에 의하여 진동수가 지배된다고 가정하면 보행자들의 보행진동수도 대체로 비슷할 것으로 가정할 수 있으며 단지 보행진동의 위상차  $\psi$  만 존재하는 것으로 식 (4)와 같이 단순화가 가능하다.

$$F_s = F_0 e^{i(\omega t + \psi_s)} \quad (4)$$

참고로  $\omega$ 는 외력에 대한 진동수로서 하중  $F$ 의 가력 진동수가  $\omega$ 로 동일하다고 가정한다.

$$-\omega^2 z_{s0} + i\omega 2\xi_s\omega_s z_{s0} + \omega_s^2 z_{s0} = \phi_s^T F_0 \{0, \dots, e^{i\psi_1}, 0, \dots, e^{i\psi_2}, \dots, e^{i\psi_n}\}^T \quad (5)$$

위 식 (5)에서  $s$ 차 모드의 응답을 구하면 식 (6)과 같이 정리할 수 있다.

$$z_{s0} = \left( \sum_{j=1}^m \phi_{sj} e^{i\psi_j} / (-\omega^2 + i2\xi_s\omega_s\omega + \omega_s^2) \right) F_0 = H_s(\omega) \cdot F_0 \quad (6)$$

실제 좌표계와 모드좌표의 관계는 식 (2)에 나타내었으며 이를 파워 스펙트럼에 관계된 식으로 바꾸면 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$S_{z_{s0}}(\omega) = |H_s(\omega)|^2 S_{F_0}(\omega) \quad (7)$$

식 (2)를 고려하여  $k$ 번째 절점의 응답 진폭을 구하면 식 (8)과 같고 이에 대한 PSD는 식 (9)와 같다.

$$y_{k0} = \left[ \sum_{s=1}^n \phi_{sk} H_s(\omega) \right] F_0 \quad (8)$$

$$S_{y_{k0}} = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n \phi_{ak} \phi_{bk} H_a(\omega) H_b^*(\omega) S_{F_0} = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n \phi_{ak} \phi_{bk} \left| \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \phi_{ai} \phi_{bj} \cos(\psi_i - \psi_j)}{(\omega_a^2 + i2\xi_a\omega_a\omega - \omega^2)(\omega_b^2 + i2\xi_b\omega_b\omega - \omega^2)} \right| S_{F_0} \quad (9)$$

위 식 (9)는 모드간의 상관성과 무리하중들 간의 상관관계를 고려한 식이다. 이 식의 상호 연관된 항들을 무시하면 식 (10)과 같이 SRSS기법을 적용할 수 있다.

$$S_{y_{ks}} = \sum_{\alpha=1}^n \phi_{\alpha}^2 |H_{\alpha}(\omega)|^2 S_{F_{\alpha}} \quad (10)$$

실제 사람에 의한 하중의 진동수대역은 2Hz내의이므로 이 하중이 구조물에 영향을 줄 수 있는 경우는 대체로 구조물의 주요 저차 모드에서이다. 우선 구조물의 1차모드만 고려하면 식 (11)과 같이 간단히 쓸 수 있다.

$$S_{y_{ks}} = \phi_k^2 |H_1(\omega)|^2 S_{F_1} = \phi_k^2 \left| \sum_{j=1}^m \phi_{1j} e^{i\psi_j} / (-\omega^2 + i2\xi_1\omega_1\omega + \omega_1^2) \right|^2 S_{F_1} \quad (11)$$

거주자가 위상의 차이 없이 똑같이 움직인다면  $\psi_j = 0$  이고 이 경우가 식 (12)와 같이 응답이 구조물에 나타날 수 있는 최대응답이 된다. 반면에 하중간의 상관관계가 전혀 없는 경우는 식 (13)과 같이 SRSS(Square Root of Sum of the Squares)한 형태가 된다.

$$S_{y_{ks}} = \phi_k^2 \left| \sum_{j=1}^m \phi_{1j} \times 1 / (-\omega^2 + i2\xi_1\omega_1\omega + \omega_1^2) \right|^2 S_{F_1} \quad (12)$$

$$S_{y_{ks}} = \phi_k^2 \left( \sum_{j=1}^m \phi_{1j}^2 / |-\omega^2 + i2\xi_1\omega_1\omega + \omega_1^2|^2 \right) S_{F_1} \quad (13)$$

하중간의 상관관계를 파악하기 위하여 두 사람이 제자리 보행할 경우에 대한 상관관계를 보행자간의 거리와 상대방을 볼 수 있을 경우와 상대방의 발소리를 들을 수 있는 경우 등을 변수로 두어 실험을 실시하였다. 두 사람의 거리는 1m에서부터 시작하여 최대 5m까지의 거리를 두고 두 사람의 보행하중을 측정하였으며 실험조건은 표 1과 같다.

표 1 보행하중 사이의 상관관계 추정을 위한 제자리 보행 실험조건

조건		D					
		100cm	200cm	300cm	400cm	500cm	
발소리를 들을 수 있는 경우	마주 본 경우	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 보행시간 : 3분</li> <li>· 보행조건 : 제자리 자유보행</li> <li>· 데이터 sampling 간격 : 0.01초</li> <li>· 데이터 분석조건 - 20회</li> </ul>					
	나란히 선 경우						
	이야기하는 경우						
발소리를 들을 수 없는 경우	마주 본 경우						
	나란히 선 경우						
	등을 돌린 경우						

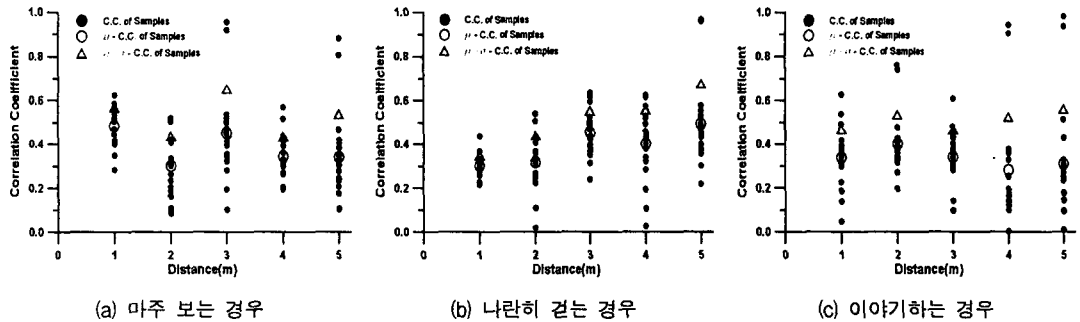


그림 1 상대방의 발소리를 들을 수 있는 경우의 상호상관계수

실험조건은 상대방의 발소리를 들을 수 있을 경우와 없는 경우로 나누어 실시하였으며 각각의 실험조건에 대하여 20회의 표본데이터를 추출하여 통계 처리하였으며 이들 각각에 대하여 식 (10)을 이용하여 상호상관계수를 구하였다. 두 조건에 대한 상관계수의 분포는 그림 1과 2에 나타내었다.

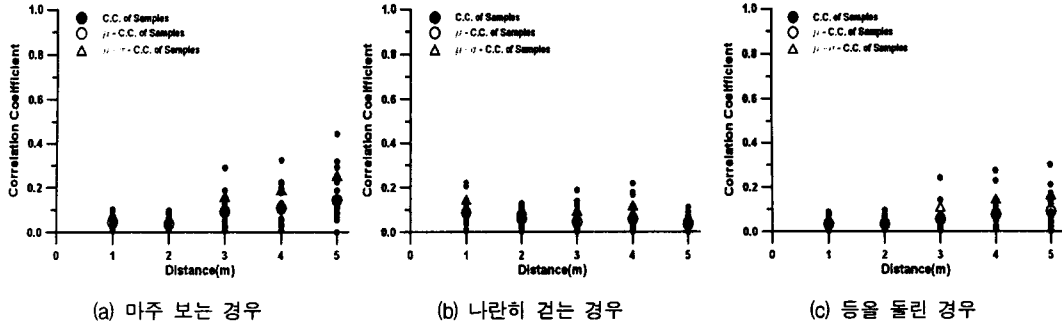


그림 2 상대방의 발소리를 들을 수 없는 경우의 상호상관계수

실험을 통하여 얻은 결과를 살펴보면 두 조건 모두 거리에 관한 관계는 없음을 알 수 있다. 그리고 상대방의 발소리를 들을 수 없는 경우에 비하여 들을 수 있는 경우가 대략 30%정도의 상관관계를 더 가지는 것을 알 수 있다. 그리고 실제로 여러 사람들이 보행하는 경우의 주변환경은 상대방의 발소리 등에 관심을 가지지 않으므로 상대방의 발소리를 들을 수 없을 경우의 상호상관계수가 본 연구에는 더 적합한 것으로 보인다. 이 경우의 결과를 보면 거의 모든 경우에 대하여 상호상관계수의 평균이 0.1이하인 것으로 나타나고 84.1%의 신뢰성을 가지는 (평균+표준편차)의 경우에도 거의 대부분이 0.2이하인 것으로 나타났다. 이는 앞서 간단히 증명 한 두 보행하중간의 관계가 없다는 것 과도 일치되는 결과이다. 따라서 무리보행하중에 대한 연구를 수행할 경우에 하중 사이의 진동수비를 통한 상호상관관계를 고려하는 것은 필요할 것으로 보이나 두 하중들 간의 시간에 대한 상호상관관계는 고려할 필요가 없을 것으로 판단된다. 다만 실험결과를 적용할 경우에는 두 하중간의 상호상관계수를 0.2정도만 고려하면 충분할 것으로 사료된다.

## 2.2 무리하중에 대한 응답의 평가

전 절에서는 구조물의 임의 부분의 응답계측 등을 통하여 무리하중을 산정하는 식을 유도하였다. 이 방법은 구조물의 정확한 시스템 식별을 필요로 하며 이것은 실제 구조기술자가 적용하기에는 어려운 면이 있다. 또한 실제 구조물의 설계시에 보행하중에 대한 사용성 평가를 위해서는 어느 정도의 무리하중이 가해질 것인지 파악하는 것이 중요하다. 따라서 복잡한 시스템 식별과정을 거치지 않고 간단한 구조물의 단위하중의 응답계측을 통하여 실제로 작용하는 무리보행 응답을 예측하는 것이 필요하다.

무리보행, 댄싱, 응원 등 무리하중의 특성상 사람이 만들어 낼 수 있는 진동수 대역은 대부분 3Hz이하이며, 이 하중들 대부분은 동조되는 경향을 가진다. 따라서 무리하중과 단위하중의 동특성은 유사하다고 할 수 있으며 이를 대표하는 단위하중을 들 수 있다. 따라서 한 사람의 거동에 대한 응답을  $S_{\omega}^s(\omega)$  라 하고 무리하중에 의한 응답인 (4)식을  $S_{\omega}^g(\omega)$  라 하면 두 응답을 서로 나누어 응답의 비 "α"를 구할 수 있다. 이때 사람에 의한 하중에 의하여 문제가 발생할 수 있는 구조물은 1차 진동수가 낮아서 사람에 의한 하중과 동조될 가능성이 있을 경우이므로 1차 모드가 지배하는 것으로 생각할 수 있다. 따라서 식 (11)을 이용하여 식 (16)과 같이 무리하중의 평균응답을 구할 수 있으며 단위하중에 의한 응답은 식 (16)과 동일한 방식으로 풀 수 있으며 이는 식 (17)에 나타내었다.

$$(\sigma_{y_k}^g)^2 = \int_0^{\infty} \phi_k^2 |H_1(\omega)|^2 S_{F_c} d\omega = \phi_k^2 S_{F_c} \int_0^{\infty} |H_1(\omega)|^2 d\omega = \phi_k^2 S_{F_c} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \phi_i \phi_j \cos(\psi_i - \psi_j) \frac{\pi}{\xi_i \omega_i^3} \quad (16)$$

$$(\sigma_{y_k}^s)^2 = \int_0^{\infty} \phi_k^2 |H_1(\omega)|^2 S_{F_c} d\omega = \phi_k^2 S_{F_c} \int_0^{\infty} |H_1(\omega)|^2 d\omega = \phi_k^2 S_{F_c} \phi_k^2 \frac{\pi}{\xi_k \omega_k^3} \quad (17)$$

두 응답의 비 "α"를 구하면 식 (18)과 같다.

$$\alpha = S_{\omega}^g(\omega) / S_{\omega}^s(\omega) = \left( \sum_{j=1}^m \phi_j \times e^{i\psi_j} \right)^2 / \phi_k^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \phi_i \phi_j \cos(\psi_i - \psi_j) / \phi_k^2 \quad (18)$$

만약 무리하중의 위상차가 없다면  $\psi_i = 0$  이면 식 (19)와 같이 간단히 쓸 수 있으며 하중간의 상호상관관계가 없다면 식 (20)과 같이 정리할 수 있다.

$$\alpha = \left( \sum_{j=1}^m \phi_j \right)^2 / \phi_{ik}^2, \quad \phi_{ik} \neq 0 \quad (19)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^m \phi_j^2 / \phi_{ik}^2, \quad \phi_{ik} \neq 0 \quad (20)$$

유도를 통하여 얻은 식 (18)에서 (20)은 단위하중에 대한 무리하중의 크기를 오로지 모드형상의 비로서만 파악하는 식으로 식 (12)와 같은 정확한 시스템 식별과정이 필요하지 않다. 즉, 구조물의 주요모드형상을 파악하는 데에는 발뚧꿈치 충격실험과 같은 간단한 실험 또는 해석을 수행하면 되기 때문에 실제 실무에서 적용이 매우 용이할 것으로 사료된다.

### 3. 예제 해석

이 장에서는 우선 시스템 식별과정을 통하여 구조물에 가해지는 하중을 파악하는 방법의 정확성을 평가하고 다음으로는 간단한 실험 또는 해석과정을 통하여 구조물의 모드형상을 파악하고 이를 이용하여 무리보행의 크기를 파악하는 것에 관하여 알아보겠다.

표 2 고유진동수

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

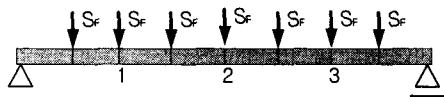
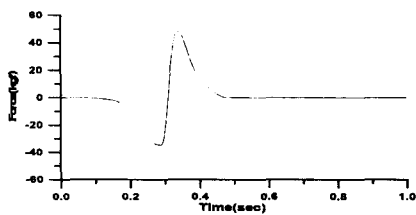
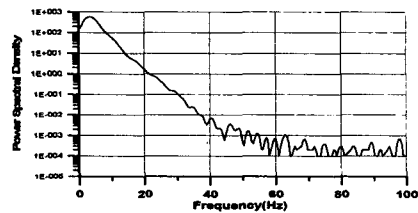


그림 3 예제 구조물

제안된 시스템 식별과정의 정확성을 평가하기 위하여 우선 해석모형을 이용하여 검증하였다. 해석대상 구조물은 그림 3의 단순 지지보로서 단면은 H-400x200x8x13이며, 중심간 거리가 3m, 단위면적당 고정하중은 350kgf/m<sup>2</sup>로 가정하였다. 고유치 해석을 통하여 구한 고유진동수는 표 1와 같다. 구조물의 동특성을 파악하는 방법은 여러 가지가 있으나 본 논문에서 사용한 방법은 발뚧꿈치 충격가진에 의한 방법이다. 이는 순간적인 충격을 가하는 해머 테스트에 비해서는 충격의 지속시간이 길지만 파악하고자 하는 주요 진동수 대역에 대하여 충분히 표현하고 있으며 또한 실제 실험의 경우에 대형 구조물에 큰 하중을 적용시켜야 하는 등의 문제 등을 고려하여 발뚧꿈치 충격 가진을 하게 되었다. 발뚧꿈치 충격하중은 사람이 로드셀에 올라서서 뒤꿈치를 들고 있다가 갑자기 떨어뜨릴 때 발생하는 충격하중을 직접 계측한 것이다. 전달함수의 산정은 그림 3의 예제 구조물에 그림 4와 같은 발뚧꿈치 충격하중을 1번과 2번 절점에 각각 가하고 이때에 여러 절점들의 응답을 통하여 산정된 것이다. 해석모델에 대한 감쇠율은 모든 모드에 대하여 5% 하였다.



(a) 발뚧꿈치 충격하중의 시간이력

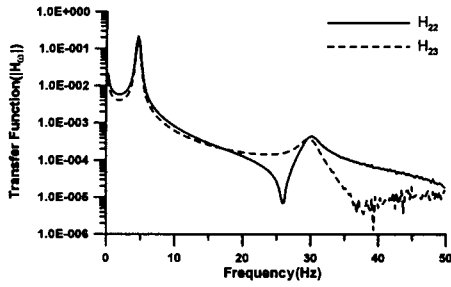


(b) 발뚧꿈치 충격하중의 응답스펙트럼

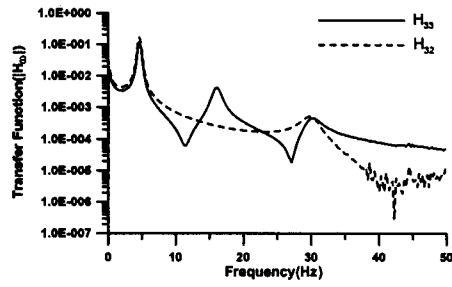
그림 4 발뚧꿈치 충격하중

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 5는 단순보 구조물의 2번지점 또는 3번지점에 발뚧꿈치 하중을 가하고 각각 해당 지점의 응답을 구하

여 나타난 전달함수이다. 중앙인 2번 지점에 가했을 때에는 비대칭모드인 2차 모드가 나타나지 않으며 3번 지점을 가했을 경우 중앙에서는 마찬가지로 비대칭모드의 영향이 없는 것을 알 수 있다.

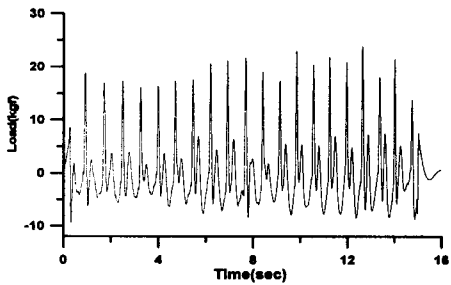


(a) 절점 2에 가진한 경우

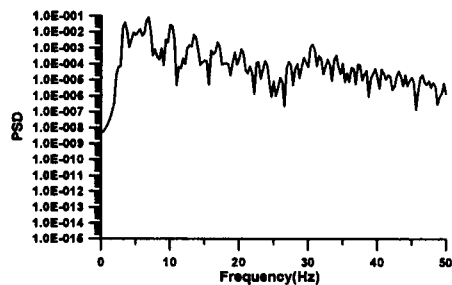


(b) 절점 3에 가진한 경우

그림 5 응답을 통한 예제구조물의 전달함수



(a) 제자리 보행하중의 시간이력



(b) 제자리 보행하중의 응답스펙트럼

그림 6 제자리 보행하중

무리보행을 하여 구조물 전체에 보행하중이 작용할 경우에는 이들이 등분포 하중으로 작용한다. 본 예제의 경우에는 등분포 하중의 효과를 얻기 위하여 그림 1과 같이 보를 세분하였으며 각 절점에 그림 6의 일반적인 68 kgf 성인남자의 제자리 보행하중을 가하였다. 이때의 하중은 정적인 부분을 제외한 동적인 하중만을 나타낸 것이다. 그림 6의 (b)는 제자리 보행하중의 파워 스펙트럼 밀도이다. 이 그림에서 나타난 보행하중의 특성은 일반적인 여러 참고문헌(1,2,3)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 스펙트럴 밀도 함수를 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 1차 모드의 영향이 지배적인 이유로 판단된다. 또한 실제의 밀도함수(그림 7에서 실선으로 나타나 있음)와 비교 하였을 때 저차모드에서 상당히 서로 근접하는 것을 확인할 수 있었다. 고차모드의 기여를 살펴보기 위하여 구조물의 절반에만 하중을 가하였다. 그림 8은 그림 7과 마찬가지로 보행하중의 파워 스펙트럴 밀도함수를 나타낸 것이며, 결과를 보면 2차 모드 이상의 영향에 의하여 1차 모드만을 고려한 형상과는 약간 차이는 있으나 큰

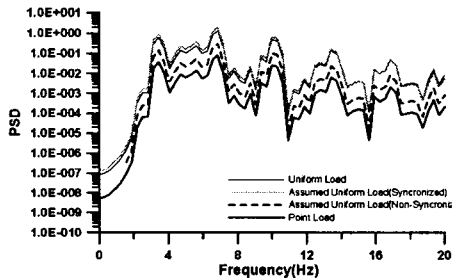


그림 9 무리보행하중의 추정

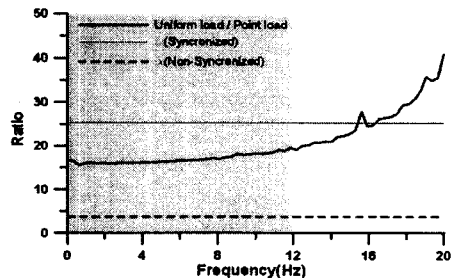


그림 10 무리보행하중의 증폭계수

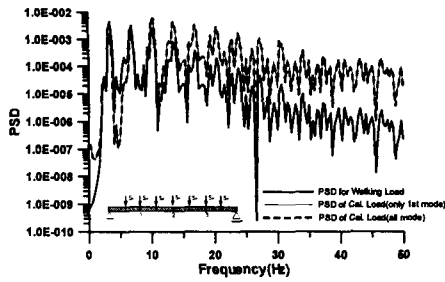


그림 7 보행하중의 PSD - 구조물 전체에 재하

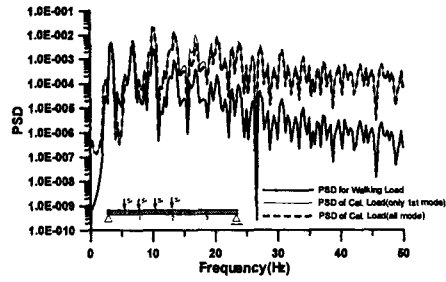
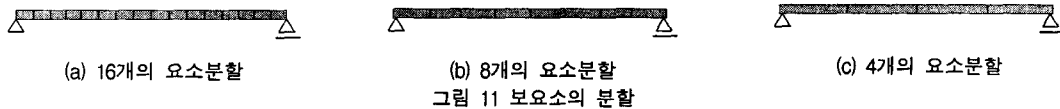


그림 8 보행하중의 PSD - 구조물 절반에 재하

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

무리하중과 단위하중과의 관계에 대하여 나타내었던 2.2절의 정식화 과정에 의하여 무리보행하중을 예측한 것이 그림 9이다. 하중이 동조되는 경우에 증폭계수  $\alpha$ 는 25.2정도로 추정되었으며, 동조되지 않는 경우는 3.99로 추정되었다. 무리보행하중을 의미하는 등분포 하중은 보 중앙부의 응답을 전달함수로 나누어 산정한 것이다. 그림 9에 나타난 결과를 보면 해석에 사용된 하중을 위상차 없이 적용하였기 때문에 동조되는 경우와 비슷한 결과를 주는 것을 확인할 수 있다. 그림 7과 8과 같이 응답을 이용하여 실제 보행하중을 추정할 경우에는 1차 모드만을 고려하는 것과 여러 모드를 고려하는 것이 큰 차이를 보이지 않았으며 무리보행을 대표할 수 있는 단위보행하중을 안다면 그림 9와 같이 무리보행을 비교적 정확하게 추정할 수 있음을 확인할 수 있었고, 이때에도 1차모드만을 가지고 하중의 위상을 통하여 응답을 파악할 수 있었다. 참고로 그림 10은 무리보행하중이 가해진 경우의 하중과 집중하중과의 비를 나타낸 것이다. 이는 무리하중이 완전히 상관되는 경우와 전혀 상관성이 없는 경우를 나타낸 것으로 나타난 결과는 다소 무리하중이 과대평가되고 있음을 알 수 있으나 사용성 평가의 측면에서 안전측의 값을 줄 것으로 판단된다.

위의 연구 결과를 바탕으로 보행하중에 대한 응답을 예측하여 단위하중과의 비를 알 경우에 보행밀도가 어느 정도인지도 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 예측하지 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.



(a) 16개의 요소분할

(b) 8개의 요소분할

(c) 4개의 요소분할

그림 11 보요소의 분할

표 3 보행밀도에 따른 증폭계수 비교

보행지수	$\alpha$	
	동조	비동조
1인	1.00	1.00
3인	5.82	2.00
5인	13.53	2.93
7인	25.20	3.99

표 2 요소분할에 따른 증폭계수(a)

	16 분할	8 분할	4 분할
동조( $\alpha_{sync}$ )	25.21	25.20	23.21
비동조( $\alpha_{nync}$ )	3.99	3.99	3.69

그림 10에서 보행하중의 진동수에 3배정도인 12Hz 범위의 증폭계수들에 대한 평균값은 16.94이며, 식 (16)과 (19)를 이용하여 얻은 증폭계수는 표 2와 같다. 표 2의 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 (19)에 의하여 산정된 증폭계수를  $\alpha_{sync}$  이라 하고 동조되지 않을 경우의 증폭계수를  $\alpha_{async}$  라 할때 각각의 증폭계수는 표 3과 같다. 여기서, 사용된 하중은 그림 6의 하중과 유사한 것으로 동일한 사람이 제자리 보행한 것을 계측한 것이다. 나타난 결과를 살펴보면 무리하중의 위상차에 따라 구조물의 응답이 상당히 다를 수 있음을 알 수 있다. 따라서 이 방법을 사용하면 구조물의 응답계측을 통하여 구조물의 주요 모드형상을 알고 있을 경우에 식 (17)를 이용하여 보행 밀도별 증폭계수를 계산하여 두면, 임의 응답의 계측을 통하여 해당 구조물에 가해지는 보행밀도를 근사적으로 추정 가능할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론 및 추후연구과제

본 연구의 목적은 건축구조물에 가해지는 무리보행하중을 구조물의 응답을 통하여 추정하는 방법을 제안하는 것이다. 이를 위하여 발뽀검치 충격실험과 같은 간단한 실험을 통하여 구조물의 모드형상을 얻었다. 또한 제안된 식을 바탕으로 하여 예제 구조물과 실제 사용 중인 육교 구조물에 대하여 무리보행하중을 산정하였으며 최종적으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제시된 무리보행하중의 식을 이용하여 보행하중을 추정할 수 있고 이를 이용하여 보행밀도를 산정할 수 있었다. 이 식은 단지 구조물의 모드형상만을 필요로 하여 실제 구조물 또는 설계대상 구조물에 적용할 수 있는 하중을 평가할 경우에 매우 용이할 것으로 사료된다. 따라서 이를 기초로 하여 구조물의 보행진동평가를 수행할 경우에 보다 정확한 분석이 이루어질 것으로 기대한다.
- 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. 다만 단위 보행하중을 구하기 위해서는 구조물의 정확한 시스템 식별이 요구되는 문제를 가진다.
- 3) 시간에 대하여 보행하중간의 상관성을 파악한 결과 서로 상관관계가 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 무리보행하중에 의한 응답을 구할 경우에 각각의 절점에 가해지는 보행하중에 의한 응답의 PSD를 더하여 구할 수 있는 편리성을 가지는 것으로 파악되었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-041-D00542)

#### 참고문헌

- 1) Bachmann, H., Ammann, W., Vibration in Structures, IABSE, 1987
- 2) Sven Ohlsson, Floor Vibrations and Human Discomfort, Chalmers University of Technology, 1982
- 3) Ebrahimpour, A., "Modeling Spectator Induced Dynamic Loads," Thesis for Ph. Dr., University of Idaho, 1987
- 4) 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
- 5) Eriksson, P. E., "Vibration of Low Frequency Floors," Thesis for Ph. Dr., Chalmers University of Technology, 1994
- 6) Ebrahimpour, A., Sack, R. L., "Modeling Dynamic Occupant Loads," Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 6, 1989