

무리하중을 받는 바닥구조물의 최대응답 추정

The Estimation of Maximum Responses Subjected to Group Loads in Floor Structures

김 태 호* 민 경 원** 이 동 근***
Kim, Tae-Ho Min, Kyung-Won 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. 서 론

최근 고강도 재료 및 구조설계법의 발전으로 보와 슬래브와 같은 구조부재는 얇고 가벼워지고 있다. 이것은 과도한 처짐과 진동의 원인이 되기도 하므로 구조부재의 처짐과 진동을 규준치 이하로 제한함으로써 건축물의 사용성을 확보하게 된다. 그리고 과거보다 최근에 시공된 건축물은 사용성 문제가 보다 중요하게 인식되고 있고 거주자들의 환경에 대한 인식의 변화로 진동과 소음과 같은 사용성 문제가 보다 중요한 문제로 대두되고 있다. 따라서 건축 구조물의 정확하고 효율적인 진동해석이 요구되고 있고 거주자의 움직임에 의하여 발생하는 진동문제에 대하여 많은 연구가 수행되어 왔다. 사람의 움직임에 의하여 야기되는 동적하중에 대한 연구는 70년대와 80년대에 독일과 영국에서 활발히 진행되었으며 최근에는 미국과 캐나다에서 보행하중 및 거주자의 움직임에 의한 건축 구조물의 진동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들 연구결과에 따르면 사람의

* 정회원, 성균관대 건축공학과 박사과정

** 정회원, 단국대 건축공학과 교수

*** 정회원, 성균관대 건축공학과 교수

움직임에 의한 대표적인 하중들로는 보행하중, 춤과 같은 울동하중 등이 있으며 우선 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. 보행자들의 평균적인 걷는 주기는 1.5~2.5Hz이며, 달리는 경우는 2.4~2.7Hz 정도로 알려져 있으며 보통 구조물에 작용하는 보행 진동수는 3.5Hz미만인 것으로 알려져 있다.

무리보행의 경우에 대한 기존의 연구 결과는 다음과 같다. Schulze H.¹⁾는 무리보행의 경우에 최대 보행밀도는 1.6~1.8인/m²이고, 단위 면적당 무게는 약 110~140kgf/m² 정도로 파악되었으며 평균적으로는 1.0인/m²인 것으로 밝혔다. 또한 그는 무리보행시 무의식적으로 발걸음을 맞추는 경향이 있어 그 응답을 증폭시킨다고 밝히고 있다. Lam 등은 홍콩지역의 보행시설에 대한 보행흐름에 대한 연구에서 보행자들의 보행속도가 약 60~80m/min 정도인 것으로 밝혔다. 이는 성인의 보폭이 60~80cm인 것을 감안할 경우 약 1.3~2.3Hz 정도의 보행속도이다.

Tuan과 Saul은 다양한 형태의 사람의 활동을 구분하고 로드셀을 이용하여 사람의 활동에 대응하는 하중을 계측하였다. Ebrahimpour²⁾는 다양한 사람에 의한 하중을 1인, 2인, 4인일 경우에 대하여 계측하고 계측한 각각의 하중을 이용하여 무리하중을 모사하고 이를 단위면적당 하중으로 표현하였다. 1991년에 발표한 연구³⁾에서는 무리하중을 비선형 운동방정식을 이용하여 모델링하였으며 이때에는 주요 저차(1,2,3차)하중에 대한 크기를 제시하였다. 이들은 또한 두 사람의 울동에 대한 상관성을 확률밀도함수로 제안⁴⁾하였다. Kerr 등은 계단 및 바닥에 가해지는 보행하중을 측정하고, 계단에 가해지는 하중이 바닥에 가해지는 하중보다 클 수 있음을 보였다.

본 연구의 목적은 무리하중의 크기를 파악할 수 있는 간단한 식을 제안하여 기존 또는 설계될 구조물에 발생하는 변위나 가속도와 같은 구조물의 응답을 쉽게 추정하기 위한 것이다. 이를 위하여 진동수 방정식을 이용하여 무리하중을 받는 구조물의 응답을 산정하고 각각의 무리하중간의 상관계수를 식과 실험을 통하여 구하였다. 간단한 구조실험 또는 구조해석을 통하여 구조물의 모드형상을 파악하고 이를 이용하여 보행자 수 및 하중간의 상관관계를 고려한 경우에 대하여 구조물의 응답을 쉽게 추정할 수 있는 식을 제안하였다. 실제 사용중인 구조물에 무리하중을 가하여 구한 응답을 제안된 식과 비교하여 그 효율성을 검증하였다.

2. 보행하중간의 상관관계

보행하중과 같이 사람의 활동에 의하여 야기되는 하중은 구조물의 임의 부분에 고정된 경우이기보다는 움직이는 경우이다. 본 논문에서는 보행자들의 몸무게와 이동속도가 서로 다르지만 무리지어 이동할 경우에 대부분 보행흐름에 좌우되는 경향이 있으므로 무리하중의 진동수를 단위하중의 진동수와 같다고 가정하였다. 구조물의 응답에 대한 주요 진동수 성분은 적용하중의 진동수성분에 의하여 주로 결정되므로 보행하중에 의한 응답의 상관관계도 하중의 상관관계를 알면 정의할 수 있다. 두 개의 사람에 대한 보행하중 $F_a(t)$ 와 $F_b(t)$ ⁷⁾를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_a(t) = Q_a \left(1 + \sum_{n=1}^k \beta_n \sin(2\pi n f_a t + \Psi_{an}) \right), \quad F_b(t) = Q_b \left(1 + \sum_{n=1}^k \beta_n \sin(2\pi n f_b t + \Psi_{bn}) \right) \quad (1)$$

여기서 β_n 은 n번째 조화함수에 대한 상수이고, Q는 보행자의 몸무게, f는 보행진동수이고 Ψ_n 은 n번째 조화항의 위상각을 나타낸다. 시간에 대한 상관관계식은 식 (2)과 같다.

$$Y_{F_a F_b} = \frac{\mu_{F_a F_b} - \mu_{F_a} \mu_{F_b}}{\sigma_{F_a} \sigma_{F_b}} \quad (2)$$

여기서 μ_{F_a} , μ_{F_b} 은 하중 $F_a(t)$ 와 $F_b(t)$ 의 평균이고, $\mu_{F_a F_b}$ 는 $F_a(t)$ 와 $F_b(t)$ 의 곱의 평균이다. 그리고 σ_{F_a} , σ_{F_b} 는 각각 하중 $F_a(t)$ 와 $F_b(t)$ 의 표준편차이다. 식 (1)의 하중을 이용하여 상관계수를 얻는 데 필요한 평균과 표준편차를 구하면 다음과 같다. 우선 하중 $F_a(t)$ 와 $F_b(t)$ 의 평균은 각각 Q_a , Q_b 이다. 이는 두 하중이 정적인 몸무게를 중심으로 조화운동하기 때문이다. 두 하중의 곱의 평균은 $Q_a Q_b + \frac{Q_a Q_b}{2} \sum_{n=1}^m \beta_n^2 \cos(\psi_{an} - \psi_{bn})$ 이고 $F_a(t)$ 와 $F_b(t)$ 의 표준편차는 각각 $\sigma_{F_a} = Q_a \left(\sum_{n=1}^m \beta_n^2 / 2 \right)^{1/2}$, $\sigma_{F_b} = Q_b \left(\sum_{n=1}^m \beta_n^2 / 2 \right)^{1/2}$ 이다. 이들 평균과 표준편차를 식 (2)에 대입하면 다음과 같다.

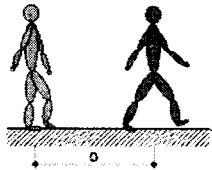
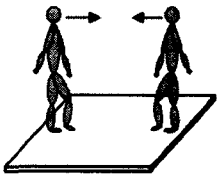
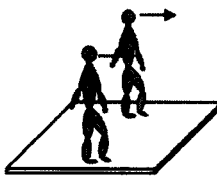
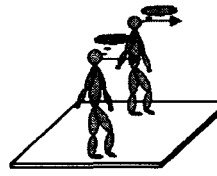
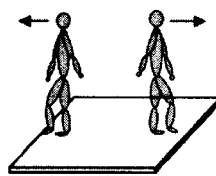
$$Y_{F_a F_b} = \frac{\sum_{n=1}^m \beta_n^2 \cos(\psi_{an} - \psi_{bn})}{\sum_{n=1}^m \beta_n^2} \quad (3)$$

이 결과는 하중간의 상관관계는 하중 사이의 위상차에만 관계되며 이는 cosine함수로 표현되는 것을 알 수 있다.

또한 상관관계를 실험적으로 구하기 위하여 제자리 보행실험을 다음과 같은 서로 다른 두 가지 경우에 대하여 실시하였다.

- (1) 두 사람이 서로의 발소리를 듣고 보행하는 모습을 볼 수 있을 경우
- (2) 발소리를 들을 수 없는 경우

표 1. 두 사람이 제자리보행하는 경우에 대한 실험조건

거리 실험조건		1m	2m	3m	4m	5m	
실험조건 1	case 1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Test time: 3 minutes ▪ Test Condition: Non-synchronized stand walking ▪ Sampling rate: 100Hz ▪ Total sampling data: 20sets <ul style="list-style-type: none"> - 60s sampling: 5sets - 30s sampling: 5sets - 10s sampling: 10set 					
	case 2						
	case 3						
실험조건 2	case 1						
	case 2						
	case 3						
							
case 1 & case 4		case 2 & case 5		case 3		case 6	

두 사람 사이의 거리는 1m에서 5m까지 1m간격으로 변화하였으며 자세한 실험조건은 표 1에 나타내었다. 각 케이스별로 20회씩 실험은 수행되었으며 총 120개의 데이터를 수집하였다. 식 (2)를 이용하여 얻은 상관계수는 그림 1과 2에 나타내었다. 결과를 보면 어떠한 경우에도 두 사람사이의 거리는 상관계수에 큰 영향을 주지는 않았다. 하지만 첫 번째 경우에 대한 상관계수가 두 번째에 비하여 30%이상 높게 나타났다. 이는 청

각적인 영향이 무시하지 못할 정도로 큼을 말한다. 그러나 보통 보행자들은 다른 보행자들의 발소리 등에 대하여 무관심하고 주변 환경 또한 정숙한 상태가 아니므로 시각적인 효과만을 고려한 경우가 보다 현실적인 것으로 판단된다. 이 경우의 상관계수는 평균적으로 0.1이하이고 신뢰도가 84.1%인 평균+표준편차의 경우에도 0.2보다 적은 것으로 나타났다. 만약 청각적인 조건을 고려해야 한다면 하중간의 상관계수를 0.6으로 정하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

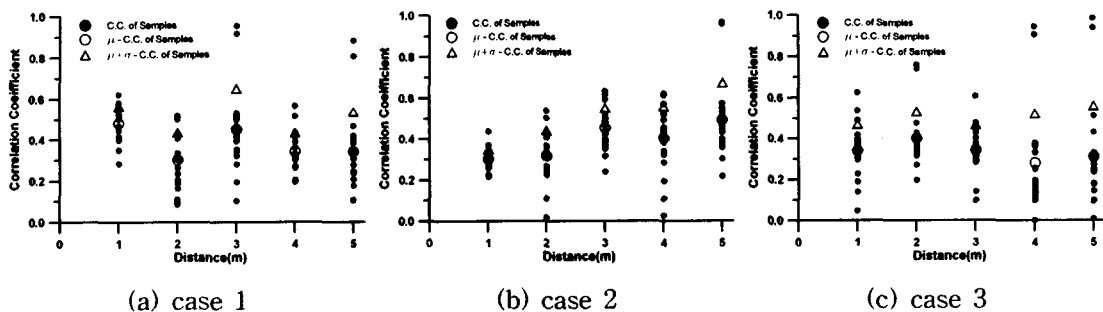


그림 1. 실험조건 1의 경우에 대한 상관계수

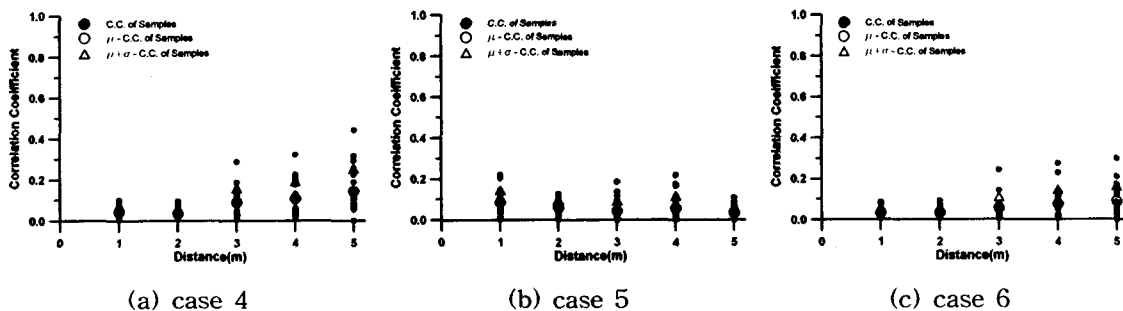


그림 2. 실험조건 2의 경우에 대한 상관계수

그림 1과 2의 실험결과는 두 피실험자가 각각 자유롭게 보행한 경우에 대한 것이다. 다음은 두 실험자가 정해진 진동수에 따라 걸을 때의 경우에 대한 상관계수를 구한 것이다. 보행진동수는 1.5, 1.75, 2.0, 2.5Hz로 하였고 각각의 진동수에 대하여 메트로놈으로 신호를 주었다. 각각의 진동수에 대하여 20회의 실험이 실시되었으며 각각에 대하여 상관계수를 구하였으며 이들의 평균 및 평균+표준편차를 그림 3에 제시하였다. 그림 3

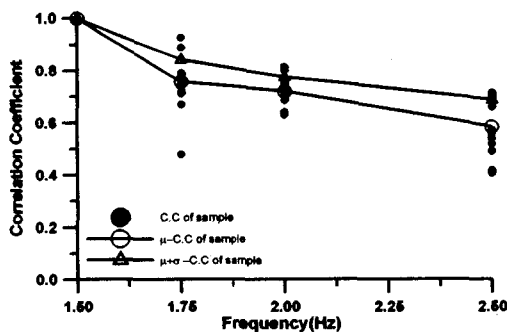


그림 3. 신호에 맞추어 걸을 경우의 상관계수

을 보면 보행진동수가 높아질수록 상관계수가 떨어지는 것으로 나타났으며 이는 진동수가 높아짐에 따라 신호를 피실험자들이 잘 따라가지 못함을 말한다. 하지만 약간 천천히 걷는 형태인 1.5Hz인 경우는 거의 완전히 동조되고 있으며 1.75Hz의 경우도 80%이상 동조됨을 나타내고 있다.

3. 무리하중에 의한 응답평가

무리보행하중, 댄스, 응원과 같이 사람에 의하여 생기는 무리하중의 진동수 성분은 대부분 3Hz이하이고, 이들 하중은 동일한 진동수 성분으로 동조되는 경향을 가진다. 따라서 이를 무리하중을 나타내기 위하여 무리하중과 동일한 동적특성을 가지는 하나의 단위하중으로 표현할 수 있다. 무리하중을 받는 구조물의 응답 $S_w^g(\omega)$, 하나의 하중을 받을 경우의 응답을 $S_w^s(\omega)$ 이라 하면, 두 값을 나누어 응답비 α 를 구할 수 있다. 구조물의 주요 모드의 진동수가 낮다면 사람의 활동에 의하여 공진을 일으킬 수 있다. 응답 $S_w^g(\omega)$ 와 $S_w^s(\omega)$ 을 각각 구하면 다음 식과 같다.

$$(\sigma_{y_k}^g)^2 = \int_0^{\infty} \phi_k^2 |H_1(\omega)|^2 S_{F_o} d\omega = \phi_k^2 S_{F_o} \int_0^{\infty} |H_1(\omega)|^2 d\omega = \phi_k^2 S_{F_o} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \phi_i \phi_j \cos(\psi_i - \psi_j) \frac{\pi}{\xi_i \omega_i^3} \quad (4)$$

$$(\sigma_{y_k}^s)^2 = \int_0^{\infty} \phi_k^2 |H_1(\omega)|^2 S_{F_o} d\omega = \phi_k^2 S_{F_o} \int_0^{\infty} |H_1(\omega)|^2 d\omega = \phi_k^2 S_{F_o} \phi_k^2 \frac{\pi}{\xi_i \omega_i^3} \quad (5)$$

여기서, 보통 바닥구조물의 감쇠율이 작고 하중의 영향을 받는 주요 저차모드 사이의 간격도 크기 때문에 하중의 PDF인 S_{F_o} 는 진동수에 종속적인 함수이지만 상수로 볼 수 있다. 따라서 응답비 α 는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{S_w^g(\omega)}{S_w^s(\omega)} = \left(\sum_{j=1}^m \phi_j \times e^{i\psi_j} \right)^2 / \phi_k^2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \phi_i \phi_j \cos(\psi_i - \psi_j) / \phi_k^2 \quad (6)$$

위 식 (6)의 분자부분은 다음과 같은 하중간의 상관함수를 포함한 행렬식으로 표현이 가능하다.

$$\{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_m\} \begin{bmatrix} 1 & \cos(\psi_1 - \psi_2) & \dots & \cos(\psi_1 - \psi_m) \\ \cos(\psi_2 - \psi_1) & 1 & \dots & \cos(\psi_2 - \psi_m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \cos(\psi_m - \psi_1) & \cos(\psi_m - \psi_2) & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_m \end{Bmatrix} \quad (7)$$

사람의 활동조건에 따라 비대각항의 상관계수(cosine항)는 달라진다. 만약 무리하중이 동조될 경우 ($\psi_i - \psi_j = 0$)와 동조되지 않을 경우의 증폭계수는 각각 식 (8)과 (9)에 나타내었다.

$$\alpha = \left(\sum_{j=1}^m \phi_j \right)^2 / \phi_k^2, \quad \phi_k \neq 0 \quad (8)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^m \phi_j^2 / \phi_k^2, \quad \phi_k \neq 0 \quad (9)$$

동조되지 않을 경우에 대하여 앞서의 상관계수에 대한 실험결과를 이용하면 시각 및 청각적인 조건이 모두 고려될 경우는 비대각항의 값이 0.6이 되며 시각적인 조건만 고려하였을 경우에는 0.2가 될 것이다. 위에서 제안한 식들은 오직 모드형상만의 함수로서 정확한 시스템 식별을 필요로 하지 않는다. 따라서 제안한 식은 발뚧꿈 충격시험과 같이 간단한 실험만으로 주요모드형상을 구하고 이를 통하여 무리하중에 의한 구조물의 응답을 구할 수 있는 장점을 가진다.

4. 예제해석

이 장에서는 우선 시스템 식별과정을 통하여 구조물에 가해지는 하중을 파악하는 방법의 정확성을 평가하고 다음으로는 간단한 실험 또는 해석과정을 통하여 구조물의 모드형상을 파악하고 이를 이용하여 무리보합의 크기를 파악하는 것에 관하여 알아보겠다. 해석대상 구조물은 그림 4와 같은 단순 지지보로서 단면은 H-400x200x8x13이며, 중심간 거리가 3m, 단위면적당 고정하중은 350kgf/m^2 로 가정하였다. 고유치 해석을 통하여 구한 고유진동수는 표 2와 같다. 구조물의 동특성을 파악하는 방법은 여러 가지가 있으나 본 논문에서 사용한 방법은 발뽀꿈치 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 발뽀꿈치 충격 가진을 하게 되었다. 발뽀꿈치 충격하중은 몸무게가 68kgf인 사람이 로드셀에 올라서서 뽀꿈치를 들고 있다가 갑자기 떨어뜨릴 때 발생하는 충격하중을 직접 계측한 것이다. 전달함수의 산정은 그림 4의 예제 구조물에 그림 5의 (a)와 같은 발뽀꿈치 충격하중을 1번과 2번 절점에 각각 가하고 이때에 여러 절점들의 응답을 통하여 산정된 것이다. 해석모델에 대한 감쇠율은 모든 모드에 대하여 5%로 하였다.

표 2. 주요 모드별 진동수

	Frequencies (Hz)	
	Eigenvalue analysis	Estimation of transfer function
1st mode	4.68	4.64
2nd mode	16.08	16.11
3rd mode	29.98	29.98

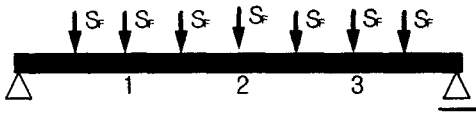
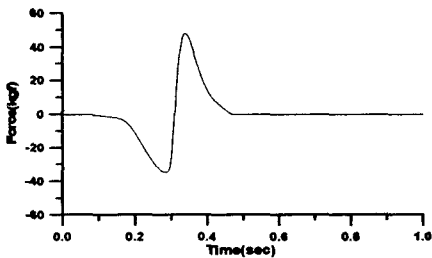
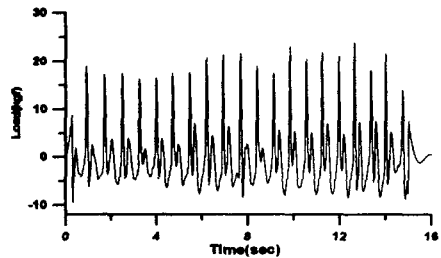


그림 4. 예제 구조물

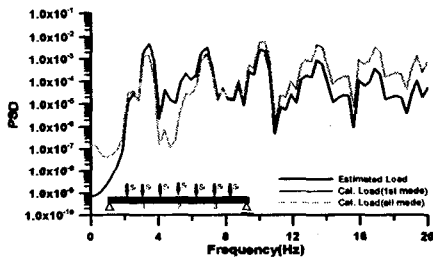


(a) 발뽀꿈치 하중

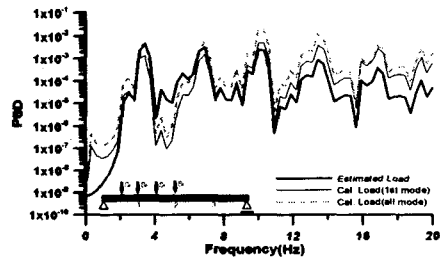


(b) 제자리 보행하중

그림 5. 발뽀꿈치 하중과 제자리 보행하중의 시간이력



(a) 구조물 전체에 가진한 경우



(b) 구조물 절반에 가진한 경우

그림 6. 보행하중의 PSD

그림 6 (a)는 전체 구조물에 걸쳐 등분포하게 가진 경우의 보행하중의 PSD를 나타낸다. 제안된 식에 의하여 구한 PSD는 해석에 의하여 구한 PSD(실선)와 비슷한 것을 볼 수 있다. 1차모드만을 사용한 경우와 여러개의 모드를 적용한 경우를 보면 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 이는 1차모드의 응답이 구조물의 전체 응답을 지배하기 때문인 것으로 판단된다. 고차모드의 기여를 알아보기 위하여 구조물의 절반에 하중을 가하여 보았으며 이는 그림 6 (b)에 나타내었다. 이 결과는 그림 6 (a)와 거의 비슷하게 나왔으며 고차모드의 영향은 미미한 것을 볼 수 있다. 따라서 낮은 고유진동수를 가지는 구조물에 보행하중이 가해질 경우에 고차모드의 영향은 거의 없음을 알 수 있다.

제안된 무리하중과 단위하중의 관계를 이용하여 구한 무리보행하중의 PSD는 그림 7에 나타내었다. 무리하중이 서로 동조될 경우의 증폭계수는 25.2로 평가되었고 동조되지 않을 경우는 3.99로 파악되었다. 무리하중을 나타내는 등분포하중은 보 중앙의 응답을 전달함수로 나누어 구한 것이다. 사람의 수에 따른 구조물의 응답에 대한 증폭계수의 변화를 그림 8에 나타내었다. 무리하중이 동조될 경우의 식 (8)과 동조되지 않을 경우에 대한 식 (9)를 이용하여 얻은 결과는 각각 상한 값과 하한 값을 나타내는 것으로 볼 수 있다. 이는 동조될 경우의 해석결과와 비교할 때 제시한 식을 통하여 구한 값보다 작은 값을 가지는 것으로 확인할 수 있다. 동조되지 않을 경우의 결과는 거의 일치하는 것으로 나타났으며 이는 무리하중 각각의 상관관계가 거의 없음을 나타낸다. 그리고 앞서 실험을 통하여 확인된 상관계수(동조된 경우에 0.8, 동조되지 않은 경우에 대하여 0.2)를 적용한 결과를 살펴보면 동조된 경우에 상관계수를 적용할 경우는 좀 더 해석결과에 접근하고 상관계수를 0.2를 적용한 경우는 동조되지 않은 경우에 대한 해석결과들에 비하여 항상 보수적인 결과를 주는 것을 알 수 있다. 그리고 Ebrahimpour[1996]은 무리하중을 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다고 밝혔다.

$$F_g(t) = W_g \left(1 + \sum_{n=1}^k \beta_n \sin(2\pi nft + \Psi_n) \right) \quad (25)$$

여기서 $F_g(t)$ 는 무리하중이고 W_g 는 무리하중의 정적 무게, β_n 은 n번째 조화항의 동적하중계수, f는 활동진동수로서 단위는 Hz이며 Ψ_n 은 n번째 조화항의 위상각, k는 고려하는 조화항의 수이다.

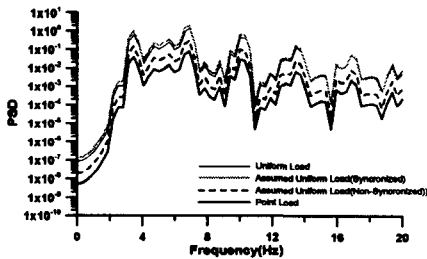


그림 7. 무리보행하중의 추정

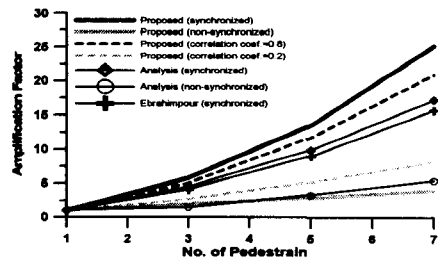


그림 8 사람의 수에 따른 증폭계수

그는 일반적인 보행의 경우에 동적하중계수 β 은 사람의 수에 따라 $0.25-0.20\log(m)$ 의 관계로 변한다고 밝혔다. 이 관계를 이용하여 식 (25)의 하중을 예제에 적용하여 구한 값 또한 그림 8에 나타내었다. 완전히 동조될 경우의 해석결과와 거의 비슷한 값을 주었으며 사람의 수에 대하여 저감계수를 적용한 결과가 상대적으로 큰 영향을 주지는 않는 것으로 보인다.

5. CONCLUSIONS

본 연구의 목적은 사람의 활동에 의한 하중과 이에 의한 구조물의 응답을 평가하기 위한 것이다.

제안된 식을 사용하여 무리하중과 그 응답을 간단히 구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

제안된 식을 통하여 단위하중을 평가할 수 있으며 이와 관계된 무리하중 또한 증폭계수를 이용하여 구할 수 있다. 이 식은 모드형상만을 필요로 하기 때문에 바닥구조물에 가해지는 하중 및 그 응답을 간단하고 효과적이다. 단위하중을 평가할 경우에는 구조물의 1차모드만 사용하여도 여러 모드를 사용한 경우와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타나 무리하중을 평가하는 데에는 구조물의 1차모드만 알아도 충분하다는 결론을 얻었다.

시간영역에서 두 보행자 간의 상호상관관계는 서로가 서로의 발소리를 듣지 못할 경우에 상당히 낮은 것으로 나타났다. 반면에 들을 수 있을 경우에는 30%정도 큰 것으로 나타났다. 실제로 보행자들은 보행시 다른 보행자들의 발소리에 크게 주의를 기울이지 않고 환경이 주로 소음에 노출된 경우가 많으므로 상관관계는 청각적인 효과를 무시한 경우가 합리적일 것으로 판단된다. 또한 두 사람이 임의의 진동수에 동조되어 걷는 경우의 상관계수는 정상적인 보행속도(2Hz 미만)에서는 0.8이상의 높은 동조를 나타내지만 빨리 걷는 경우에는 상관관계가 약한 것으로 나타났다.

또한 본 연구에서는 구조물의 응답을 구조물의 모드형상을 이용하여 간단하게 구하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 무리하중이 동조될 경우와 동조되지 않을 경우의 응답비를 나타낼 수 있고 실험에서 구한 하중간의 상관관계를 이용하면 좀 더 가까운 값을 얻을 수 있다. 또한 실험과 해석 모두에서 항상 제시한 값이 보수적인 결과를 주기 때문에 사용성 평가 등의 지표로 사용하면 적절할 것으로 판단된다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원(KRF 2002-041-D00542)과 스마트사회기반시설연구센터(SISTeC)의 지원으로 연구되었습니다.

REFERENCES

1. Eriksson, P. E., "Vibration of Low Frequency Floors," Thesis for Ph. Dr., Chalmers University of Technology, 1994
2. Ebrahimpour, A., Sack, R. L., "Modeling Dynamic Occupant Loads," Journal of Structural Engineering, Vol. 115, No. 6, 1989
3. Ebrahimpour, A., Sack, R. L., Van Kleek, P. D., "Computing Crowd Loads Using A Nonlinear Equation of Motion," Computer & Structures, Vol. 41, No. 6, 1991
4. Ebrahimpour, A., Sack, R. L., "Design Live Loads for Coherent Crowd Harmonic Movements," Journal of Structural Engineering, Vol. 118, No. 4, 1992
5. Ebrahimpour, A., Fitts, L. L., "Measuring Coherency of Human-Induced Rhythmic Loads Using Force Plates," Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 7, 1996
6. Ebrahimpour, A., Hamam, A., Sack, R. L., Patten, W. N., "Measuring and Modeling Dynamic Loads Imposed by Moving Crowds," Journal of Structural Engineering, Vol. 122, No. 12, 1996
7. ISO, "ISO 10137-bases for design of structures-serviceability of buildings against vibrations," Geneva, International Standardization Organization, 1992