

개인별 시간지연효과를 고려한 확률론적 군중 하중모형 개발

Development of Time Lag Considered (TLC) Crowd Load Model Based on Probabilistic Approach

김 성 용¹⁾ · 이 철 호²⁾
Kim, Sung Yong · *Lee, Cheol Ho*

요약: 군중하중을 받는 현행 바닥진동 설계절차의 한계를 극복하기 위해서는 개인별 운동의 시간차와 운동성분에 내재된 위상의 불확실성이 고려되어야 한다. 개인의 운동에 관한 연구는 통계적 자료를 토대로 많은 연구가 진행되고 있는 반면, 군중 행동패턴에 관한 연구는 그 복잡성으로 인해 연구가 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 다양하고 복잡한 군중의 행동패턴을 개인 간의 위상을 반영한 하중모형을 제안한다. 모의실험을 통해 개인의 시간지연 값들을 난수로 발생시킨 후, 기준시간에 대한 시간 지연효과를 합산하였다. 본 연구에서 제안하는 위상의 합산으로 이루어진 계수는, 완전히 동기화된 군중의 경우에 대한 동기화 정도의 비를 나타낼 수 있다. 정의된 계수를 바탕으로 실제 일어날 수 있는 군중의 행동패턴을 분석하여 각각의 경우에 대한 계수 값을 제안하였다. 본 연구의 결과를 토대로 기존의 설계방식이 다를 수 없었던 군중의 운동시 바닥구조의 응답을 합리적으로 반영할 수 있다.

ABSTRACT: To overcome the limitations of current evaluation procedures for floor vibration under crowd loading, two kinds of uncertainties associated with individual time lag differences and the complex behavior of crowd should be taken into account. The complex behavior of crowds has yet to be fully described, even though individual differences can be dealt with statistically. This paper proposes time lag considered (TLC) crowd model based on a probabilistic approach. The load reduction factor, which reflects the effect of a general degree of synchronization among crowd, is proposed. Extensive Monte Carlo simulations were carried out to determine various crowd behaviors by using the TLC crowd model proposed. The TLC crowd model can rationally treat the energy loss of various crowd patterns. This indicates that it may be used as a theoretical basis in refining dynamic load factor of crowd loading.

핵심어: 바닥진동, 군중하중 모형, 자기스펙트럼밀도함수, 몬테카를로 시뮬레이션

KEYWORDS: floor vibration, crowd load model, spectral density function, Monte Carlo simulations

1. 서론

최근 들어 건물의 고층화, 장경간화, 층높이 비내력벽 등의 감소에 따른 건물 감쇠비의 약화 등에 의해 건물 내의 군중의 활동(가령 에어로빅)에 의해 해당 바닥 자체 또는 건물내 진동예민 공간의 거주자에게 불쾌감 내지는 불안감을 야기하는 문제가 심심찮게 대두되고 있다. 군중의 운동은 크게 두 가지 불확실함을 가지고 있다. 첫 번째는 개인 운동의 불확실성으로서, 개인마다 통계적으로 무게, 동적 하중의 크기 및 하중에 내재한 위상차가 각기 다르기 때문에 나타난다. 두 번째는 군중 행동패턴의 불확실성으로서, 군중에 속해있는 각

개인의 움직임이 간단하게 예측할 수 없는 어려움이 있다.

개인 운동에 의한 하중은 실험 및 측정을 통해 얻어진 통계적 수치를 토대로 실제 하중을 모사할 수 있지만, 군중행동의 특성은 해석 및 실험 등을 통해 규명하기 어렵기 때문에 전자에 비해 상대적으로 연구가 미흡한 실정이다. 또한, 군중을 이루는 사람이 모두 동기화되어 운동하는 경우의 확률은 극히 미약하여, 현재 사용하고 있는 군중 동적 하중에 의한 설계는 실제에 비해 과다설계가 될 가능성이 있다.

본 연구는 기존의 설계에서 반영하지 않던 군중의 운동을 개인 간의 위상개념을 도입한 후 기술한다. 군중이 실제로 바닥에 가하는 하중은 군중을 구성하는 개인 간 시간차로 인해

1) 서울대학교 건축학과 박사과정(sungyong.kim7@gmail.com)

2) 교신저자, 서울대학교 건축학과 교수

(Tel: 02-880-8735, Fax: 02-871-5518, E-mail: ceholee@snu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

군중이 동시에 움직이는 경우에 비해 저감된다. 제안하는 모형을 바탕으로 실제 일어날 수 있는 군중의 운동방식을 분석하며, 다양한 운동 유형을 반영하는 구체적인 계수 값들을 제안한다.

군중의 행동패턴을 효과적으로 모형화하기 위해 본 연구에서는 몬테카를로방법(Monte Carlo Method)을 통해 개개인의 시간지연 값들을 확률적인 난수로 발생시킨 후, 시간지연에 의한 효과를 합산하였다. 제안하는 모형을 검증하기 위해, 개인간 상호무관한 운동을 하는 경우의 모의실험 결과를 보행자가 상호무관한 진입시간을 가질 때를 가정한 군중모형인 Matsumoto모형(1978)과 비교하였다. 검증된 결과를 바탕으로, 정성적으로 연구된 많은 군중 형태의 유형들에 관한 모의실험을 시행하였다. 이를 바탕으로 기존의 방식이 한 사람의 운동으로 인한 하중만을 구할 수 있었던 한계에서 벗어나 다양한 운동패턴을 가지는 군중의 운동으로 인한 하중을 산정하는 방법 및 예를 제시한다.

2. 선행 연구

2.1 개인하중 모형

여러 하중유형의 동적하중계수 및 위상각에 관한 다양한 연구가 수행되었다. 개인의 행동으로 인한 하중은 푸리에 급수를 통해 아래와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$F(t) = q \left\{ 1.0 + \sum_{\alpha=1}^M \eta_{\alpha} \sin(2\pi\alpha\lambda t + \phi_{\alpha}) \right\} \quad (1)$$

여기서, q 는 운동하는 사람의 체중, M 은 고려하는 푸리에 항의 총 개수, η_{α} 는 α 번째 모드의 동적하중계수, ϕ_{α} 는 α 번째 모드의 위상각이며 λ 는 1차모드 성분의 진동수(즉 디딤주파수, step frequency)이다. 정적하중은 공진에 영향을 미치지 않기 때문에 개인의 운동으로 인한 동적인 하중만을 고려하여 다음과 같은 형태로 쓸 수 있다.

$$F(t) = q \sum_{\alpha=1}^M \eta_{\alpha} \sin(2\pi\alpha\lambda t + \phi_{\alpha}) \quad (2)$$

Blanchard 등(1977)은 보행교의 동적응답을 계산하기 위해 1차모드 성분 동적하중계수로 0.257을 사용할 것을 제안하였다. Young(2001)은 동적하중계수와 다양한 운동의 진동수 영역대 간의 관계에 주목하여, 실험을 통해 동적하중계

수를 1차모드 성분의 진동수에 관한 식으로 제시하였다. 이와 더불어 동적하중계수 및 진동수 영역대의 평균 및 표준편차 등 통계치 역시 제시되었다. Matsumoto 등(1978)은 505명의 보행자를 대상으로 보행 진동수 평균 및 표준편차를 조사하였다. Zivanovic 등(2007) 역시 보행 중 진동수의 통계치를 제시하였는데, 이러한 연구결과들은 표본의 인종, 성별 및 지역적 편향성 때문에 약간씩 다른 것으로 보고되고 있다. 동적하중계수를 결정론적 및 통계적으로 접근한 각 연구결과들을 표 1에 요약하였다.

표 1. 다양한 연구자들이 제안한 동적하중계수 및 보행주파수

	동적하중계수 및 보행주파수
Blanchard 등 (1977)	$\eta_1 = 0.257$
Young (2001)	$\eta_1 = 0.37(\lambda - 0.95) \leq 0.5$ $\eta_2 = 0.054 + 0.0044\lambda$ $\eta_3 = 0.026 + 0.0050\lambda$ $\eta_4 = 0.010 + 0.0051\lambda$
Matsumoto 등 (1978)	$\mu_{\lambda} = 1.99 Hz$ (평균) $\sigma_{\lambda} = 0.173 Hz$ (표준편차)
Zivanovic 등 (2007)	$\mu_{\lambda} = 1.84 Hz$ (평균) $\sigma_{\lambda} = 0.186 Hz$ (표준편차)

2.2 군중하중 모형

군중의 행동패턴은 크게 '도래시간(arrival time)'과 개인간 위상의 '집단적 동기화(collective synchrony)'의 두 가지 방향으로 연구되었다. Matsumoto 등(1978)은 보행교에 진입하는 개인별 도래시간이 상호무관 가정(곧 개인별 도래가 푸와송 프로세스를 따른다는 가정)과 대부분의 하중이 1차모드 성분에 집중된다는 가정 하에 아래와 같은 모형을 제안하였다.

$$F_N(t) = q\sqrt{N}\eta_1 \sin(2\pi\lambda t) \quad (3)$$

여기서, N 은 보행자의 수, q 는 보행자 한 명의 무게, η_1 는 1차모드 성분의 동적하중계수이며 λ 는 1차모드 성분의 진동수이다.

Mouring과 Ellingwood(1994), Ebrahimpour(1989)은 Matsumoto 등이 제안한 모형이 적합함을 실험을 통해 검증하였다. 하지만 위의 도래시간을 통한 접근은 보행교와 같이 하나의 경로를 통해 보행자에는 적합하나, 서로 연관된 도래시간을 가지는 군중의 경우에는 이를 바로 적용할 수 없는

단점이 있다.

‘집단적 동기화’는 처음에는 무관해 보이는 군중의 위상이 시간이 지남에 따라 하나의 위상으로 동기화되는 과정을 모형화한 개념이다. Ermentrout와 Rinzel(1984)이 반딧불의 발광리듬이 동기화되는 현상을 수학적으로 기술한 것을 토대로, Kuramoto는 위상이 동기화되는 과정을 아래와 같은 일반적 모형으로 제시하였다(Juan 등, 2005).

$$\dot{\theta}_i = \omega_i + \sum_{j=1}^N K_{ij} \sin(\theta_j - \theta_i) \quad (4)$$

여기서, $\dot{\theta}_i$ 는 i 번째 개인 위상의 변화율, θ_i 는 i 번째 개인의 위상, ω_i 는 i 번째 개인의 진동수이고 K_{ij} 는 i 번째와 j 번째 개인 간의 위상이 동기화되는 정도를 결정하는 동기화강도계수이다. 즉 Kuramoto모형은 계수 K_{ij} 를 조절하여 군중을 이루는 i 번째와 j 번째 사람의 위상 변화를 모사한다. 계수 K_{ij} 가 클 때 i 번째와 j 번째 사람 간 위상이 빠르게 동기화된다.

군중이 동기화하는 과정은 대개 군중이 일체화된 정도가 시간에 따라 변화하는 양상을 보인다. 따라서 동기화되는 패턴을 의미하는 동기화강도계수 역시 시간에 따라 변화하도록 주어진다. Strogatz 등(2005)은 보행진동으로 문제가 되었던 런던의 밀레니엄 다리의 계측결과를 활용하여 식(4)에 의한 동기화 과정의 모형화를 시도하였다.

하지만 이러한 과정을 모두 구하는 것은 많은 시간과 노력을 낭비한다. 따라서 동기화강도계수를 상수로 택하여 시간이 충분히 지나 군중이 동기화된 상태를 다루는 것이 편리하다. 본 연구에서는 군중이 동기화 정도가 시간에 따라 변하지 않는 상태 즉, 동기화강도계수가 상수에 도달한 상태를 전제로 확률론적 군중하중 모형을 전개하였다.

3. TLC 모형 제안

3.1 TLC 모형의 가정

무작위한 특성을 지닌 개인의 시간지연을 다루기 위해서는 추계적(stochastic) 접근을 통한 분석이 선행되어야 한다. 또한 수많은 경우의 수로 주어지는 군중운동 양상(ensemble average)을 구하는 것은 통계자료의 부족으로 매우 어렵고 현실적이지도 않다. 본 연구에서는 양상(ensemble average)을 충분히 긴 시간동안 주어진 한 표본의 시간평균으로 대체하는 ‘에르고딕 과정(ergodic process)’ 가정을 전제하였다.

3.2 TLC 모형 유도

시간지연(time lag)과 위상각(phase angle)을 고려한 개인의 운동으로 인한 하중은 푸리에급수 전개를 통해 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$F_i(t) = q \sum_{\alpha=1}^M \eta_{\alpha} \sin\{2\pi\alpha\lambda(t + \delta_i) + \phi_{\alpha}\} \quad (5)$$

여기서, δ_i 는 i 번째 사람의 시간지연, ϕ_{α} 는 α 번째 모드 성분의 위상각이다.

군중이 충분히 동기화되어 정상상태가 되었다고 가정하면, i 번째와 j 번째 사람사이의 상호상관함수(cross correlation function)는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} R_{ij}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T F_i(t) F_j(t + \tau) dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T q^2 \sum_{\alpha=1}^M \sum_{\beta=1}^M \eta_{\alpha} \eta_{\beta} \sin\{2\pi\alpha\lambda(t + \delta_i) + \phi_{\alpha}\} \\ &\quad \times \sin\{2\pi\beta\lambda(t + \tau + \delta_j) + \phi_{\beta}\} dt \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, τ 는 i 번째 사람과 j 번째 사람의 시간 간격이다. 삼각함수의 등식에 의해 다음과 같이 뒀을 쉽게 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{ij}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{q^2}{2T} \sum_{\alpha=1}^M \sum_{\beta=1}^M \eta_{\alpha} \eta_{\beta} \int_0^T \cos\{2\pi\lambda(\alpha - \beta)t - \beta\tau + \alpha\delta_i - \beta\delta_j + \phi_{\alpha} - \phi_{\beta}\} \\ &\quad + \cos\{2\pi\lambda(\alpha + \beta)t + \beta\tau + \alpha\delta_i + \beta\delta_j + \phi_{\alpha} + \phi_{\beta}\} dt \end{aligned} \quad (7)$$

윗 식은 두 cosine항이 주기 T에 대해 적분되어야 한다. 그러나 $\alpha \neq \beta$ 인 경우의 적분은 식(8)과 같이 0이 된다.

$$\begin{aligned} &\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \cos(2\pi\lambda(\alpha - \beta)t + B) dt \\ &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left[\frac{\sin 2\pi\lambda(\alpha - \beta)T + B}{2\pi\lambda(\alpha - \beta)} - \sin B \right] = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

따라서 $\alpha = \beta$ 인 경우만 남기고 식(7)을 적분하면

$$\begin{aligned} R_{ij}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{q^2}{2T} \sum_{\alpha=1}^M \eta_{\alpha}^2 \int_0^T \{\cos 2\pi\lambda(-\alpha\tau + \alpha\delta_i - \alpha\delta_j) + \phi_{\alpha} - \phi_{\alpha}\} dt \\ &= \frac{q^2}{2} \sum_{\alpha=1}^M \eta_{\alpha}^2 \cos\{2\pi\alpha\lambda\tau - \alpha(2\pi\lambda\delta_i - 2\pi\lambda\delta_j)\} \end{aligned} \quad (9a)$$

식(9a)에서 $2\pi\lambda\delta_i$ 는 i 번째 사람의 시간지연에 디딤주파수를 곱한 값으로, 물리적으로 위상각을 의미한다. 따라서 $2\pi\lambda\delta_i = \theta_i$ 로 정의하고 식(9a)를 다시 쓰면 다음의 식(9b)과 같다.

$$R_{ij}(\tau) = \frac{q^2}{2} \sum_{\alpha=1}^M \eta_{\alpha}^2 \cos\{2\pi\alpha\lambda\tau - \alpha(\theta_i - \theta_j)\} \quad (9b)$$

식(9b)의 상호상관함수를 토대로 군중이 형성하는 총 하중의 자기상관함수(autocorrelation function)를 유도하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_{FF}(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{i=1}^N F_i(t) \sum_{j=1}^N F_j(t+\tau) dt \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T F_i(t) F_j(t+\tau) dt \\ &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N R_{ij}(\tau) \\ &= \frac{q^2}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{\alpha=1}^M \eta_{\alpha}^2 \cos\{2\pi\alpha\lambda\tau - \alpha(\theta_i - \theta_j)\} \quad (10) \end{aligned}$$

위너-킨친 정리(Wiener-Khinchin theorem)를 통해 정상과정(stationary process)에서의 자기상관함수를 푸리에 변환하면 진동수 대역별 파워를 보여주는 자기스펙트럼밀도 함수(auto spectral density function)를 얻을 수 있다 (McConnell, 1995). 따라서, 식(10)을 푸리에 변환한 군중 하중의 자기스펙트럼밀도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi_{FF}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} R_{FF}(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \\ &= \frac{q^2}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{\alpha=1}^M \eta_{\alpha}^2 \int_{-\infty}^{\infty} [\cos\{2\pi\alpha\lambda\tau - \alpha(\theta_i - \theta_j)\}] e^{-i\omega\tau} d\tau \\ &= q^2 \sum_{\alpha=1}^M \eta_{\alpha}^2 \delta(\omega - 2\pi\alpha\lambda) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \cos\{\alpha(\theta_i - \theta_j)\} \\ &= q^2 N^2 \sum_{\alpha=1}^M \eta_{\alpha}^2 \delta(\omega - 2\pi\alpha\lambda) \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \cos\{\alpha(\theta_i - \theta_j)\} \quad (11) \end{aligned}$$

여기서, $\delta(*)$ 는 디랙 델타 함수이다.

식(11)에서 $\frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \cos\{\alpha(\theta_i - \theta_j)\}$ 은 군중을 이루는 개인 간 시간차를 반영한다. 시간지연의 차이를 나타내는 계수 κ_{α} 를 다음과 같이 정의한다.

$$\kappa_{\alpha} \equiv \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \cos\{\alpha(\theta_i - \theta_j)\}} \quad (12)$$

여기서, 모든 i, j 에 대하여 $\cos\{\alpha(\theta_i - \theta_j)\} \leq 1$ 이므로, 계수 κ_{α} 는 1보다 작은 값을 갖는다. 또한 자기스펙트럼밀도 함수는 에너지차원의 함수이므로 하중 차원의 계수 κ_{α} 를 정의하기 위해 제곱근을 취했다. 식(12)의 정의를 바탕으로 식(12)를 정리하면 다음과 같다.

$$\Phi_{FF}(\omega) = q^2 N^2 \sum_{\alpha=1}^M (\kappa_{\alpha} \eta_{\alpha})^2 \delta(\omega - 2\pi\alpha\lambda) \quad (13)$$

식(13)이 의미하는 요체는, 시간지연의 차이로부터 정의된 κ_{α} 는 α 번째 모드의 동적하중계수 η_{α} 를 저감시키는 역할을 한다는 것이다. 이러한 결과들을 바탕으로 개인의 하중을 나타낸 식(5)를 사람의 수만큼 합산하여 군중 하중을 구하면 아래와 같다.

$$F(t) = q \sum_{i=1}^N \sum_{\alpha=1}^M \eta_{\alpha} \sin\{2\pi\alpha\lambda(t + \delta_i) + \phi_{\alpha}\} \quad (14)$$

앞에서 유도한 바와 같이 시간지연 δ_i 대신 동적하중계수 η_{α} 를 저감시키는 계수 κ_{α} 를 도입하면

$$\begin{aligned} F(t) &= q \sum_{i=1}^N \sum_{\alpha=1}^M \kappa_{\alpha} \eta_{\alpha} \sin(2\pi\alpha\lambda t + \phi_{\alpha}) \\ &= qN \sum_{\alpha=1}^M \kappa_{\alpha} \eta_{\alpha} \sin(2\pi\alpha\lambda t + \phi_{\alpha}) \quad (15) \end{aligned}$$

결과적으로 식(15)는 군중이 보행교를 걷는 경우에 적용할 수 있는 식(3)에 계수 κ_{α} 를 도입하여 보다 다양한 군중 운동에 적용할 수 있도록 확장한 개념이다.

4. TLC모형을 이용한 다양한 군중운동패턴 분석

군중은 일반적으로 군중 속의 개인들이 특정한 의도에 적합한 방식으로 ‘군집(cluster)’을 형성한다. Milgram과 Toch (1969)은 이러한 현상을 ‘군중내 하위구조(crowd internal substructures)’라 정의하고 군중이 몇 개의 하위구조(군집)를 이루는 현상을 설명하였다. 또한 Blumer(1975)는 군중 내에서 각 군집끼리는 비슷한 운동특성을 보임을 연구한 바 있다. 본 연구는 군집 내의 어떤 특정한 성질이 있어 개인 간 위상이 동기화된다는 가정 하에 개인의 위상을 군집의 시간지연과 군집 속에서 생겨나는 위상의 두 가지 난수의 합으로

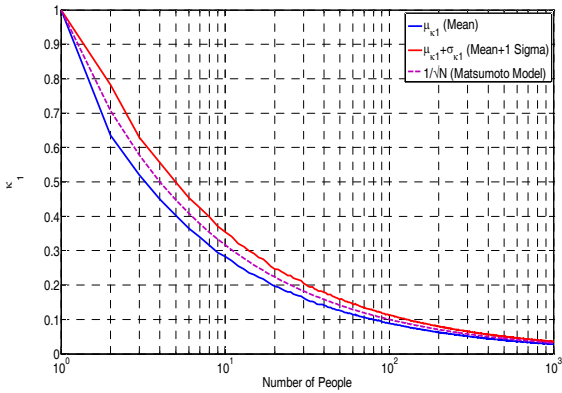


그림 1. 군중이 상호무관한 운동을 하는 경우의 계수 κ_1

구성하였다. 즉, 개인의 총 위상은,

$$\theta = \theta_C + \theta_I \quad (18)$$

여기서, θ 는 개인의 총 위상, θ_C 는 군집의 위상 그리고 θ_I 는 군집 내의 개인 위상으로 모두 확률변수이다.

군중 내의 군집이 하나의 대푯값으로서 군집의 위상을 가지고(θ_C), 해당 군집 내에서 개개인이 또한 위상을 가지는(θ_I) 경우를 다루었다. 이러한 위상을 바탕으로 다양한 군중 운동에 대해 모의실험을 통하여 식(12)에서 정의한 계수 κ_α 를 구하였다. 개인의 위상은 확률밀도함수로부터 발생하는 확률변수이기 때문에 이들로부터 계산되는 계수 κ_α 의 통계적인 특성을 파악해야 한다. 본 연구에서는 1~1000명의 사람으로 이루어진 군중에 대해 각각 1000번의 모의실험을 시행하였다.

4.1 군중을 구성하는 개인이 상호무관한 경우

군중을 구성하는 모든 개인이 상호무관한 시간지연 값을 가지는 경우로 이는 무관한 도래시간을 가정하여 군중에 의해 보행교에 가해지는 경우를 다룬 Matsumoto모형과 동일한 가정을 한 경우이다. 하나의 개인이 인접한 개인과 어떠한 상호작용도 이뤄지지 않는 경우이므로 군집이 형성되지 않는다. 따라서 식(18)에서 군집의 위상 θ_C 를 무시한 채 개인의 위상 θ_I 을 균등분포(uniform distribution)로부터 확률변수로 발생시킨 후 식(12)를 통해 κ_α 를 계산하였다.

주목할 것은 1차모드의 시간지연효과를 반영하는 계수 κ_1 과 고차모드의 시간지연효과를 반영하는 계수 $\kappa_\alpha, \alpha > 1$ 가 비슷한 값을 가진다는 점인데 그 이유는 다음과 같다. 위상 θ 가 $[-\pi, \pi]$ 구간에서 균등분포를 확률밀도함수로 하는 확률

변수이면, 위상에 정수배를 한 확률변수 $\alpha\theta$ 는 $[-\alpha\pi, \alpha\pi]$ 구간에서 균등분포를 확률밀도함수로 하는 확률변수이다. 여기에서 $[-\pi, \pi]$ 구간 바깥에 있는 위상의 경우 적절한 $2n\pi$ 를 가감하면 $[-\pi, \pi]$ 구간에 있는 위상과 동일하다. 확률밀도함수가 균등분포이므로 $[-\pi, \pi]$ 구간 안에 있는 경우와 $[-\pi, \pi]$ 구간 바깥에 있는 경우 모두 같은 확률밀도함수값을 가지기 때문에 확률변수 $\alpha\theta$ 역시 $[-\pi, \pi]$ 구간에서 균등분포를 확률밀도함수로 갖는다. 따라서 본 연구에서는 1차 모드의 시간지연효과를 반영하는 계수 κ_1 만을 제시한다.

그림 1은 군중이 상호무관한 운동을 하는 경우의 κ_1 계수를 모의실험을 토대로 구한 결과로, 파란색 선은 모의실험 결과의 평균값이며 빨간색 선은 모의실험 결과의 변동폭을 고려해 평균에 표준편차를 더한 값을 나타낸 것이다. 보라색 점선은 Matsumoto모형이 제시한 $1/\sqrt{N}$ 를 나타낸 것이다.

모의실험의 결과에 따르면 상호무관한 경우 Matsumoto모형의 경우와 동일하게 $\kappa = 1/\sqrt{N}$ 수준임을 확인할 수 있다. 군중의 운동으로 인한 하중을 구하기 위해 사람 수를 단순히 곱할시 실제 하중을 과대평가 할 우려가 있다. 예를 들어, 300명의 군중이 상호무관한 운동을 한다고 가정할 경우 완전히 동기화된 경우의 $\kappa_1 = 1$ 에 비해 상당히 낮은 $\kappa_1 = 0.05$ 수준으로 저감되어야 한다.

하지만 이러한 결과는 군중이 상호무관하다는 가정 하에서 나타난 것으로, 실제로 군중의 수가 커짐에 따라 했을 때 이들이 완전히 무관한 행태를 보이며 운동할 확률은 매우 작을 것이다. 따라서 군중의 동기화 정도에 따라 시간지연으로 인해 어느 정도의 하중이 저감될 것인가를 다음 절에서 다루었다.

4.2 군중의 동기화 정도를 반영한 경우

다음은 군중이 군집을 이루지 않은 채 전체적으로 동기화하여 운동하는 경우를 고려하자. 동기화된 군중은 다음과 같은 특징을 가진다. 1) 비록 상호무관한 운동을 하는 군중을 가정한다 하더라도, 무의식적으로 사람들은 인접 사람의 운동과 동기화될 수 있다. 즉, 군중이 상호무관하다는 가정은 군중을 이루는 사람의 수가 많아질수록 타당하지 않은 가정일 수 있으며, 위상의 확률밀도함수가 균등분포가 아닌 대푯값을 기준으로 산포를 가지는 경우를 생각할 수 있다. 이러한 경우는 상호무관한 경우에 비해서는 위상이 하나의 값에 집중되는 양상을 보이나, 완전히 동시에 운동하는 경우에 비해서는 위상이 넓은 범위에 걸쳐 분포되는 양상을 보인다. 이러한 양상을 본 연구에서는 ‘약한 동기화’라고 일컫는다.

2) 군중이 하나의 신호에 맞추어 동시에 운동하는 경우라

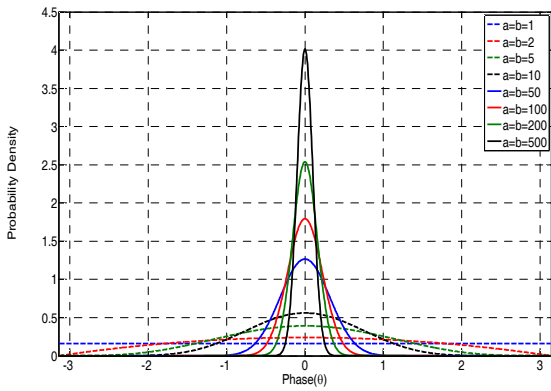


그림 2. 여러가지 파라미터(a=b=1, 2, 5, 10, 50, 100, 200, 500)에 대한 베타분포 확률밀도함수

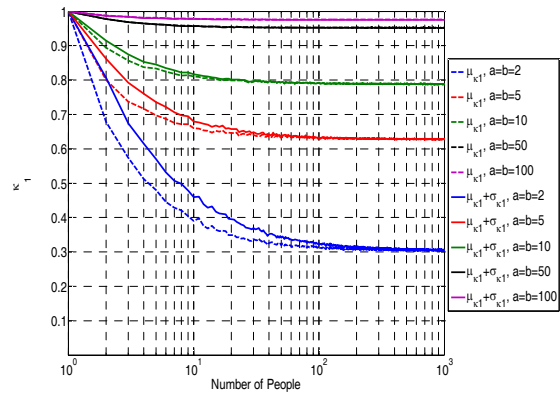


그림 3. 군중의 동기화를 반영한 경우의 계수 κ_1

도(가령, 공연장), 개성이나 나이 및 성별 등의 다양한 차이로 인해 위상은 완전히 동일한 값이 아닌 하나의 위상을 중심으로 작은 산포를 가진 채 집중된 양상을 보인다. 이러한 양상을 본 연구에서는 ‘강한 동기화’라고 일컫는다.

군중이 군집을 이루지 않은 채 동기화되는 경우에는 하나의 커다란 군집을 이루는 경우와 동일하게 다를 수 있으므로, 식(18)에서 군집의 위상 θ_C 를 무시한 채 개인의 위상 θ_I 이 하나의 대푯값에 집중된 분포의 확률밀도함수를 다루어야 한다.

실제로 나타나는 현상들은 그 편리성으로 인해 대개 정규분포(normal distribution)를 가정하지만, 본 연구에서 다루는 위상의 경우 $[-\pi, \pi]$ 구간을 벗어나지 않기 때문에 정규분포를 바로 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 $[-\pi, \pi]$ 구간을 정의역으로 가지면서 위상이 집중되는 현상을 반영하기 위해 베타분포(beta distribution)를 사용하였다.

베타분포는 $[0, 1]$ 구간에서 정의되며, 다음의 확률밀도함수를 갖는다(Nathabandu, Renzo, 1997).

$$f_{\Psi}(\psi; a, b) = \frac{\psi^{a-1}(1-\psi)^{b-1}}{\int_0^1 u^{a-1}(1-u)^{b-1} du} \quad (16)$$

베타분포로부터의 확률변수는 $[0, 1]$ 구간에서만 정의되므로, 위상과 같이 실제로는 $[-\pi, \pi]$ 구간에 정의된 경우에 주의가 필요하다. 따라서, 식(15)로부터 확률변수를 추출한 후, 식(17)을 통해 변환하여 이를 위상으로 사용하였다.

$$\theta = 2\pi(\Psi - 0.5) \quad (17)$$

그림 2는 파라미터 a=b=1, 2, 5, 10, 50, 100, 200, 500에 대한 위상의 확률밀도함수를 나타낸 것이다. 그림 2

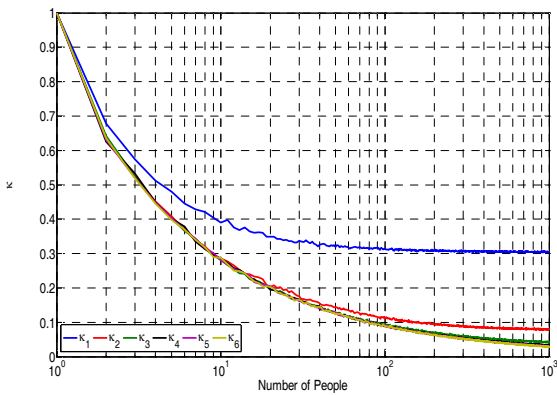
에서 볼 수 있듯이 파라미터 a,b가 작을수록 $[-\pi, \pi]$ 구간에 걸쳐 고르게 위상이 분포된 형태를 가지며(약한 동기화), 파라미터 a,b가 클수록 하나의 위상을 중심으로 군중의 위상이 집중된 형태를 가진다(강한 동기화).

그림 3은 위에서 열거한 파라미터와 이에 대응되는 베타분포에서 추출된 위상을 바탕으로, 군중을 이루는 사람의 수를 증가시켜가면서 계수 κ_1 을 계산 후 이를 그래프로 나타낸 것이다. 모의실험에 결과에 따르면 1) 군중이 강하게 동기화되어 운동을 하는 경우 계수 κ_1 은 1에 근접한 값을 가진다. 즉, 강하게 동기화될수록 시간지연으로 인한 하중저감이 발생하지 않는다. 2) 군중을 구성하는 개인이 약하게 동기화된 경우, 처음에는 군중을 구성하는 사람의 수가 많아질수록 계수 κ_1 이 단조감소하는 경향을 띠나, 사람의 수가 어느 시점을 넘어서게 되면 사람의 수가 증가하더라도 계수 κ_1 이 일정한 상수에 머무는 현상을 관찰할 수 있다.

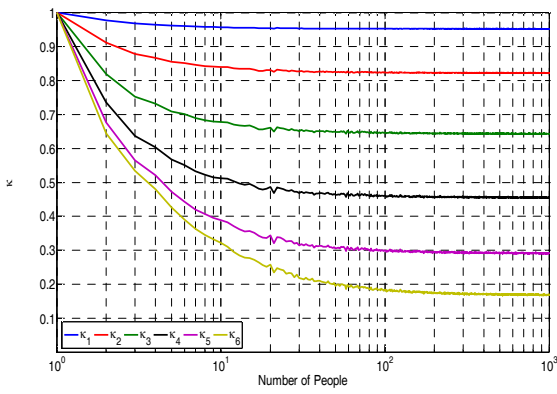
특정한 파라미터를 갖는 베타분포를 토대로 사람의 수를 점차 늘려가며 군중의 특성을 판단하는 건 한계가 있다. 일반적으로 사람의 수가 많아지면 많아질수록 군중의 위상은 넓은 범위에 걸쳐 분포될 가능성이 있다. 즉, 일반적인 경우에 위상의 분포를 결정짓는 파라미터는 사람의 수에 의존할 가능성이 있다. 또한, 실제적으로 군중의 동기화된 정도에 대한 통계적 자료가 미흡한 상황이므로, 이에 대한 추가적인 논의가 필요할 것으로 보인다. 다만, 위상의 분포를 토대로 군중의 하중 특성을 파악하는 이론적 틀을 제공한다는 점에서 이러한 논의는 충분한 가치가 있을 것으로 사료된다.

다음은 군중이 동기화된 정도가 α 번째 모드의 동적하중계수를 저장하는 계수 κ_α 에 주는 영향을 살펴보았다. 그림 4는 베타분포 파라미터 a=b=2(약한 동기화, 그림 4(a))와 a=b=50(그림 4(b)), a=b=100(그림 4(c))와 a=b=200(강한 동기화, 그림 4(d))에 대한 계수 κ_α 값들을 나타낸 것이다.

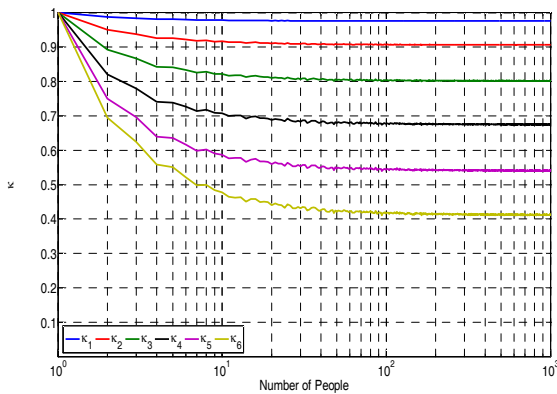
첫 번째로, 군중이 강하게 동기화된 경우(즉, 베타분포의



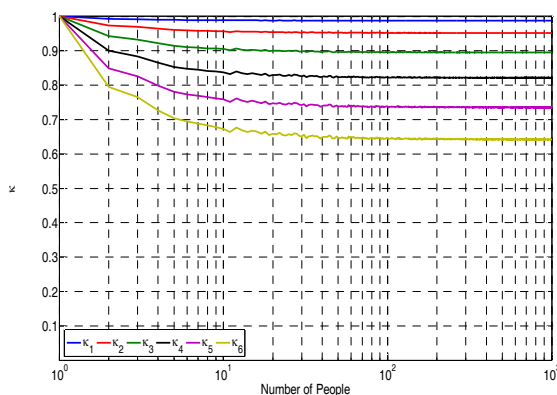
(a) a=b=2



(b) a=b=50



(c) a=b=100



(d) a=b=200

그림 4. 베타분포 파라미터 2, 50, 100, 200에 대한 계수 κ_α

파라미터가 큰 경우로 이는 곧 위상의 산포가 작은 경우는 고차모드의 동적하중계수를 저감하는 계수 κ_α 가 상대적으로 커서 개인의 시간지연으로 인한 영향이 미비한데 반해, 군중이 약하게 동기화된 경우(즉, 베타분포의 파라미터가 작은 경우로 이는 곧 위상의 산포가 큰 경우)는 동적하중계수를 저감하는 계수 κ_α 가 강하게 동기화된 경우에 비해 더 작은 값을 가지게 된다. 즉, 군중의 동기화된 정도가 약할수록 고차 모드에서의 시간지연으로 인한 영향이 작아진다.

두 번째로, 군중이 약하게 동기화되는 경우 고차모드의 계수 κ_α 는 앞선 절에서 다룬 상호무관한 경우와 비슷한 양상을 띤다. 이는, 개인의 위상이 $[-\pi, \pi]$ 구간에서 충분히 큰 산포를 가지고 분포해있다면, 이 위상의 정수배에 해당하는 값들은 더 큰 산포를 가지게 되어 결과적으로 상호무관한 경우와 비슷한 양상을 띠게 되기 때문이다. 이에 따르면 상호무관한 경우의 계수 $\kappa = 1/\sqrt{N}$ 은 저감계수 κ_α 의 하한(lower bound)을 형성한다. 즉, 고차모드에 의해 바닥이 공진을 일으키는 현상을 설계에 반영하고자 할 때 시간지연에 대한 효과를 반영하지 않으면 과다설계가 될 가능성이 있음을 시사한다.

4.3 개인이 군중 내에서 군집을 이루는 경우

군중 속의 개인은 다양한 방식으로 주변의 영향을 받는다. 군중 전체가 강하게 동기화되어 운동하는 경우에도 실제로는 주변의 영향을 받게 되기 때문에, 주변의 영향으로 인한 위상 분포를 고려해야 한다. 즉, 실제 군중의 운동은 군중 내 군집의 형성으로 인해 앞서 제시한 상호무관한 군중이나 군중 전체가 동기화된 경우와는 다를 수 있다.

이러한 현상을 모사하기 위해 식(18)과 같이 주어진 개인의 총 위상이 군집의 위상 θ_C 과 개인의 위상 θ_I 의 합으로 주어지며, 이들이 서로 독립이라고 가정하였다. 식(18)에 따르면 개인의 총 위상 역시 확률변수이고, 두 독립적인 확률변수의 합으로 이루어진 확률변수의 확률밀도함수는 중첩적분(convolution integral)에 의해 식(18)의 확률밀도함수를 갖는다(Nathabandu, Renzo, 1997).

$$f_\theta(\theta; a_C, b_C, a_I, b_I) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{\theta_C}(\theta - \theta_I; a_C, b_C) f_{\theta_I}(\theta_I; a_I, b_I) d\theta_I \quad (19)$$

여기서, $f_\theta(\theta; a_C, b_C, a_I, b_I)$ 는 a_C, b_C, a_I, b_I 를 파라미터로 가지는 개인 총 위상의 확률밀도함수, $f_{\theta_C}(\theta_C; a_C, b_C)$ 와 $f_{\theta_I}(\theta_I; a_I, b_I)$ 는 각각 a_C, b_C 와 a_I, b_I 를 파라미터로 가지는 베타분포의 확률밀도함수로, 군집과 군집 내 개인의 위상의

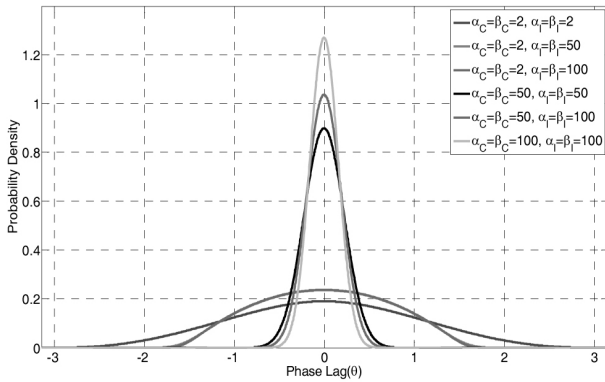


그림 5. 베타분포 파라미터 $aC=bC=2, 50, 100$ 과 $a_l=b_l=2, 50, 100$ 에 대한 개인 총 위상의 확률밀도함수

확률밀도함수이다. 만일 군집과 군집 내 개인 위상 분포의 파라미터를 가정할 수 있다면, 식(19)의 개인 총 위상의 확률밀도함수를 토대로 계수 κ_α 를 구할 수 있다.

군중이 동기화되지 않은 채 상호무관한 운동을 한다고 해도 군중 내 개인은 군집을 이루며 군집 내 개인들은 비슷한 운동특성을 보일 수 있다. 이러한 현상을 모사하기 위해 군집의 위상 θ_C 는 확률변수로서 균등분포를 따르고, 개인의 위상 θ_I 는 군집 내에서 동기화되는 정도를 반영하여 베타분포를 따른다고 가정하였다.

모의실험을 수행한 결과 군집의 개수(C_n)가 많아질수록 앞에서 다룬 군중이 상호무관한 경우와 유사한 성향을 보이는데 반해 군집의 개수가 적어질수록 동기화되는 경우와 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있었다(그림 6). 이러한 결과는 ‘군집을 이룬다’라는 군중 운동의 행태를 가정할 경우 상호무관한 운동을 하는 군중을 가정한 모형에 비해 보다 큰 하중이 가해질 수 있음을 의미한다.

군집의 위상 θ_C 와 군집 내의 개인 위상 θ_I 가 각각 독립이라는 특성을 이용하여 군중의 동기화 정도를 반영한 계수 κ_α 를 다음과 같이 근사적으로 구할 수도 있다. θ_C 와 θ_I 의 산포로 인해 저장되는 정도를 반영한 계수를 각각 κ_{α_C} 와 κ_{α_I} 라고 하자. 그러면 군중의 동기화 정도를 반영한 계수 κ_α 는 군집의 산포와 군집 내 개인의 산포로 인한 효과를 반영하여 아래와 같이 구한다.

$$\kappa_\alpha = \kappa_{\alpha_C} \times \kappa_{\alpha_I} \tag{20}$$

만약 군집의 개수 C_n 가 주어지고 군집이 충분히 동기화되었다고 가정했을 때에는, 군집의 개수에 해당하는 등가의 사람이 상호무관한 운동을 하는 경우로 근사화될 수 있다. 이 경우의 κ_α 는 군집이 상호무관한 운동을 하는 경우의

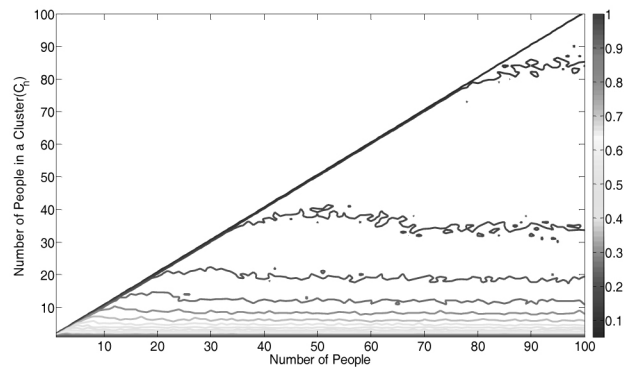


그림 6. 군집 간 상호무관한 운동을 보이는 경우의 κ 계수 등고선

$\kappa_{\alpha_C} = 1/\sqrt{C_n}$ 을 적용하여

$$\kappa_\alpha = \kappa_{\alpha_C} \times \kappa_{\alpha_I} = \frac{\kappa_{\alpha_I}}{\sqrt{C_n}} \tag{21}$$

여기서, κ_{α_I} 는 군집 내의 동기화 정도를 반영하는 저장계수이고, C_n 는 군집은 군집의 개수이다.

이 결과는 군중이 상호무관한 운동을 한다는 가정이 때에 따라서는(가령, 보행교나 복도 위를 걷는 군중이 가족이나 친구들과 같이 조그마한 군집을 이루어 약한 동기화가 일어나는 경우) 실제 주어질 수 있는 하중을 과소평가 할 수 있음을 의미한다. 다만, 실제적으로 군중의 동기화된 정도에 대한 통계적 자료가 미흡한 상황이므로, 이에 대한 추가적인 논의가 필요할 것으로 보인다.

5. 율동활동에 대한 기존 하중 산정 방식

영국 강구조협회(SCI)에서 출판한 Design of Floors for Vibration: A New Approach(Smith 외, 2009)는 바닥 진동산정의 적용예제로 율동하중에 대해 다음의 절차를 토대로 하중을 산정하도록 제안하고 있다.

우선 용도에 부합하는 군중밀도에 평균체중을 곱하여 군중에 의한 단위면적당 하중을 구한다(본 문헌에서는 Bachmann과 Ammann(1987)에 기초하여 에어로빅이나 운동장에서는 $0.25\text{명}/m^2$, 사교활동에 대해서는 $2\text{명}/m^2$ 의 군중밀도를 사용하도록 제안하고 있다)..이를 바탕으로 각 모드 성분의 동적증폭계수를 도입하여 시간 t에서 단위면적당 바닥의 안전성 검토를 위한 하중을 아래와 같이 구한다.

$$F(t) = q \left\{ 1.0 + \sum_{\alpha=1}^M D_\alpha \eta_\alpha \sin(2\pi\alpha\lambda t + \phi_\alpha) \right\} \tag{22}$$

여기서, 공진에 의해 증폭되는 정도를 의미하는 동적증폭계수 D_α 는 다음의 식으로 주어진다:

$$D_\alpha = \frac{1}{\sqrt{(1 - \alpha^2 \gamma^2)^2 + (2\alpha\gamma\zeta)^2}}$$

여기서, α 는 α 번째 모드 성분의 번호이고, γ 는 하중진동수와 고유진동수의 비율, ζ 는 감쇠비이다.

앞서 살펴본 바와 같이 일반적으로 균중하중은 균중을 이루는 개인 간의 시간차로 인해 균중이 완전히 동시에 운동하는 경우에 비해 작다. 이 경우 동시운동이 적은 것을 반영하기 위해 SCI P354는 Ellis와 Ji의 연구(2004)에 기반하여, 동적하중계수를 균중을 이루는 사람의 수에 대한 함수로 보았다.

$$\eta_1 = 1.61N^{-0.082}, \eta_2 = 0.94N^{-0.24}, \eta_3 = 0.44N^{-0.31}$$

여기서, N은 울동에 참여하는 인원(<64명)을 나타낸다. 만약 균중을 이루는 사람수가 10명이라면, 위 식에 의해 푸리에계수 1차항의 계수는 $\eta_1^{10} = 1.61(10)^{-0.082} = 1.332$ 이며, 만약 30명의 균중에 대한 경우에는 $\eta_1^{30}/\eta_1^{10} = 3^{-0.082} = 0.91$ 즉, 10명에 대비해 91% 수준으로 저감된 계수를 사용한다.

6. TLC모형을 이용한 개선

단순히 사람의 수에 근거하여 동적하중계수를 낮추는 방식은 동적하중계수의 실제 의미를 왜곡한다. 또한, 사람의 수 외의 다른 요인을 설계에 반영하지 못함으로써 다양한 경우에 대한 적용가능성이 미비하다. 본 연구를 통해 제안하는 TLC모형은 이러한 현행 설계의 한계를 극복할 수 있는 차별성을 제공한다.

본 연구에서 제안하는 바에 따르면 균중의 시간지연 차이를 고려한 κ_α 를 도입하여 식(21)을 아래 식(23)으로 대체할 것을 제안한다.

$$F(t) = q \left\{ 1.0 + \sum_{\alpha=1}^M D_\alpha \kappa_\alpha \eta_\alpha \sin(2\pi\alpha\lambda t) \right\} \quad (23)$$

다음의 예제는 SCI-P354에서 제시한 것으로, 합성바닥에 대한 다수 참가자에 의한 에어로빅의 효과를 예시한다(그림 7). 이 예시를 통해, 주어진 바닥에 대한 균중밀도 및 균중의 패턴을 토대로, 실제로 어떻게 균중의 패턴을 고려할 수 있는가를 구체적으로 설명한다. 구체적인 바닥설계정보는 아래와 같다.

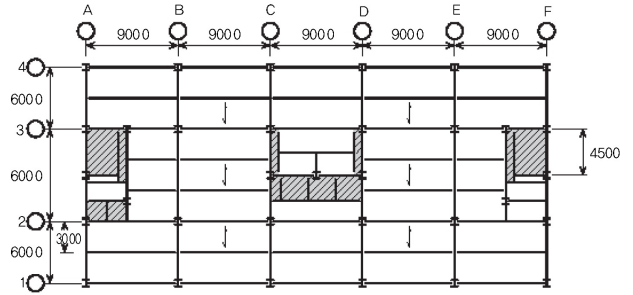


그림 7 울동활동에 대한 설계 예제 바닥 평면

바닥설계정보

- * 바닥의 고유진동수 $f_1 = 8.1\text{Hz}$
- * 감쇠비 $\zeta = 1.6\%$
- * 그룹의 운동진동수 범위 (1.5 ~ 2.8Hz)
- * 정적균중하중은 울동하중에 대한 균중밀도 $0.25\text{명}/\text{m}^2$ 을 적용
 - $q = 0.8\text{kN} \times 0.25\text{명}/\text{m}^2 = 0.2\text{kN}/\text{m}^2$ (평균 체중 0.8kN)
- * 보통의 도약운동에 대한 동적하중계수 (3차까지만 고려, SCI권장)
 - $\eta_1 = 1.800, \eta_2 = 1.286, \eta_3 = 0.667$

바닥의 진동수는 8.1Hz이고, 운동진동수는 가장 불리한 응답을 얻기 위해 바닥진동수를 정수배로 나누어 구한다. 소요 범위내의 공진을 일으킬 수 있는 디딤주파수는 다음과 같다.

$$\lambda = \frac{f_1}{h} = \frac{8.1}{3} = 2.7\text{Hz}$$

따라서 하중진동수와 고유진동수의 비율은 $\gamma = 2.7\text{Hz} / 8.1\text{Hz} = 1/3$ 이다. 이를 바탕으로 각 모드 성분에 대해 증폭되는 동적증폭계수를 구한다. 첫 번째 모드 성분에 대해 증폭되는 동적증폭계수는

$$D_1 = \frac{1}{\sqrt{(1 - 1^2 \times 1/3^2)^2 + (2 \times 1 \times 0.016 \times 1/3)^2}} = 1.12$$

두 번째 모드 성분에 대해 증폭되는 동적증폭계수는

$$D_2 = \frac{1}{\sqrt{(1 - 2^2 \times 1/3^2)^2 + (2 \times 2 \times 0.016 \times 1/3)^2}} = 1.80$$

세 번째 모드 성분에서 공진하므로, 이 경우의 동적증폭계수는

$$D_3 = \frac{1}{2\zeta} = 31.25$$

따라서 시간차를 고려하지 않은 하중은(곧 SCI P354의 방법에 의한 하중) 다음과 같다.

$$F_{peak,SCI} = 0.2(1 + 1.8 \times 1.12 + 1.286 \times 1.80 + 0.667 \times 31.25) = 5.235kN/m^2$$

군중밀도 0.25명/m²에 대해 각 모드 성분이 동시에 공진한다고 가정하면(보수적인 가정), 바닥은 5.235kN/m²의 하중에 대해 안전하게 설계되어야 한다.

이제 군중에 의한 바닥응답을 계수 κ_a 를 도입하여 사람들의 시간차를 반영해 보도록 한다. SCI에서 제안하는 일반적인 울동시 군중밀도 0.25명/m²를 주어진 바닥에 대입하면 바닥에서 운동하는 사람의 수는 $N = 0.25\text{명}/m^2 \times (45m \times 21m) = 236.25\text{명}$ 이다.

본 예제에서는 총 군중이 하나의 신호에 의해 동시에 움직이는 경우와 공간을 분할하여 두 개의 독립된 공간을 쓰는 경우, 두 가지로 나누어 단위면적당 하중을 구하도록 한다.

Case A: 237명의 사람들이 동시에 운동하는 경우

동시에 움직일 경우 식(21)에서 $\kappa = 1/\sqrt{C_n} = 1$ 이다. 따라서, 237명으로 이루어진 군중이 시간차가 '전혀' 없다고 가정할 때의 설계하중은 $\kappa F_{peak,SCI} = 1 \times F_{peak,SCI} = 5.235kN/m^2$ 이다.

추가적으로 군중이 완전히 동기화되지 않는 경우를 고려할 경우에는 시간차의 산포를 가정하고 이를 토대로 그림 3과 같이 저감시켜 사용한다. 실제 울동활동에 대한 개인별 위상의 산포를 나타내는 실험결과가 아직 존재하지 않는다. 편의상 시간차의 확률변수가 $\alpha = \beta = 100$ 의 파라미터를 가지는 베타분포를 따른다고 가정하면(그림 1), 237명의 군중에 대한 계수 κ_a 는 그림 4(b)로부터, $\kappa_1 = 1$, $\kappa_2 = 0.8$, $\kappa_3 = 0.7$ 이다. 따라서 시간차를 고려한 하중은

$$F_{peak,case A} = 0.2(1 + 1 \times 1.8 \times 1.12 + 0.8 \times 1.286 \times 1.80 + 0.7 \times 0.667 \times 31.25) = 3.892kN/m^2$$

시간차를 고려한 경우 완전히 동기화된 경우에 비해 3.892/5.235=0.743 즉 74.3%의 단위면적당 하중을 바닥에 가한다.

Case B: 237명의 사람들이 두 군집으로 나뉘어 운동

바닥의 평면 구조 상 코어를 중심으로 두 개의 에어로빅 그룹으로 사람들이 나뉘어 이들이 각각 완전히 동시에 움직일 경우 식(21)에서 군집의 수 $C_n = 2$ 이고, $\kappa_C = 1/\sqrt{2} = 0.707$ 이다. 따라서, 이 경우의 하중은 $\kappa_C F_{peak,SCI}$

$= 0.707 \times F_{peak,SCI} = 3.701kN/m^2$ 을 적용해서 구한다.

앞선 예와 마찬가지로 군집이 완전히 동기화되지 않는 경우를 고려하자. 만약 시간차의 확률변수가 $\alpha = \beta = 100$ 의 파라미터를 가지는 베타분포를 따른다고 가정하면(그림 1), 계수 κ'_a 은 그림 4(b)로부터, $\kappa_1 = 1$, $\kappa_2 = 0.8$, $\kappa_3 = 0.7$ 이다. 따라서 시간차를 고려한 하중은 식(21)에 의해

$$\kappa_1 = \frac{\kappa'_1}{\sqrt{C_n}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$$

$$\kappa_2 = \frac{\kappa'_2}{\sqrt{C_n}} = \frac{0.8}{\sqrt{2}} = 0.566$$

$$\kappa_3 = \frac{\kappa'_3}{\sqrt{C_n}} = \frac{0.7}{\sqrt{2}} = 0.495$$

이다. 따라서 군중의 군집패턴과 시간차를 고려한 하중은 아래와 같다.

$$F_{peak,case B} = 0.2(1 + 0.707 \times 1.8 \times 1.12 + 0.566 \times 1.286 \times 1.80 + 0.495 \times 0.667 \times 31.25) = 2.8106kN/m^2$$

시간차와 군집의 패턴을 고려한 경우 완전히 동기화된 경우에 비해 2.811/5.235=0.537 즉 53.7%의 단위면적당 하중을 바닥에 가한다.

7. 결론

본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서는 개인별 시간지연의 영향을 고려하여 군중 활동을 에르고딕 과정으로 가정한 후, 다양한 하중조건을 모사할 수 있는 확률론적 모형을 제시하였다.
- (2) 본 하중모형의 요체는 군중활동이 유발하는 하중의 자기 밀도함수를 토대로 개인별 시간지연에 따른 하중저감계수를 해석적으로 도출한 것에 있다. 이와 더불어 본 연구에서는 단일군중 또는 군중 내에 형성된 여러 군집의 활동까지도 반영할 수 있는 이론적 틀을 제시하였다.
- (3) 본 연구의 적용예제에서 보듯이 본 모형은 그룹 보행은 물론, 건물 내의 다양한 군중활동(가령, 울동활동)에도 적용할 수 있는 일반성이 있다.

참 고 문 헌

- Bachmann H. and Ammann W. (1987) Vibrations in Structures: Induced by Man and Machines, *International Association for Bridge and Structural Engineering Proceedings*, pp. 1-176
- Blanchard J., Davies B.L., and Smith J.W. (1987) Design Criteria and Analysis for Dynamic Loading of Footbridges, Crowhorne, UK.
- Ermentrout, G.B. and Rinzel, J. (1984) Beyond a Pacemaker's Entrainment Limit: Phase Walk-through, *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, Vol. 246, pp. 102-106.
- Juan, A.A., Bonilla, L.L., Conrad, J.P.V., Felix, R., and Renato, S. (2005) The Kuramoto Model: a Simple Paradigm for Synchronization Phenomena, *Rev. Mod. Phys., The American Physical Society*, Vol. 77, pp. 137-185.
- Matsumoto, Y., Nishioka, T., Shiojiri, H., and Matsuzaki, K. (1978) Dynamic Design of Footbridges, *International Association for Bridge and Structural Engineering Proceedings*, No. P-17/18: pp. 1-15.
- McConnell, G.K. (1995) *Vibration Testing Theory and Practice*, John Wiley & Sons, Inc., USA.
- Nathabandu, T.K. and Renzo, R. (1997) *Statistics, Probability and Reliability for Civil and Environmental Engineers*, The McGraw-Hill Companies, Inc., USA.
- Rainer, J.H., Pernica, G., and Allen, D.E. (1988) Dynamic Loading and Response of Footbridges, *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, pp. 335-347.
- Shin K. and Hammond, J.K. (2008) *Fundamentals of Signal Processing for Sound and Vibration Engineers*, John Wiley & Sons Ltd., UK.
- Smith, A.L., Hicks S.J., and Devine, P.J. (2009) *Design of Floors for Vibration: A New Approach, Revised Edition*, The Steel Construction Institute, UK.
- Strogatz, S.H., Abrams, D.M., McRobie, A., Eckhardt, B., and Ott, E. (2005) Theoretical Mechanics: Crowd Synchrony on the Millenium Bridge, *Nature*, Vol. 438, pp. 43-44.
- Young, P. (2001) *Improved Floor Vibration Prediction Methodologies, Proceedings of Arup Vibration Seminar on Engineering for Structural Vibration - Current Developments in Research and Practice*, Institution of Mechanical Engineers, London, UK.
- Zivanovic, S., Pavic, A., and Reynolds, P. (2005) Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: a literature review, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 279, No. 1-2, pp. 1-74.

(접수일자 : 2011. 8. 22 / 심사일 2011. 8. 24 /
심사완료일 2012. 2. 3)