

가속도 크기 변수에 따른 수직진동에 대한 인지수준 고찰

Investigation for the Characters of Human Perception Level according to Acceleration Value Parameters

이 민 정† · 한 상 환*

MinJung Lee and SangWhan Han

(Received July 24, 2014 ; Revised September 12, 2014 ; Accepted September 12, 2014)

Key Words : Floor Vertical Vibration(바닥 수직진동), Acceleration Value Parameter(가속도 크기 변수), Perception Level(인지수준), Walking(보행), Heel Drop(뒤꿈치 충격)

ABSTRACT

Occupants induced floor vertical vibrations may cause other occupant's annoyance and lead to social loss. To help control such floor vibrations, several criteria have been developed mostly based on human perception tests and floor vibration tests. Floor vibration is evaluated by comparison with criteria and vibration parameters of subject floor, such as frequency, damping ratio, acceleration value, vibration duration time and occurrence frequency. Three acceleration value parameters are used in criteria; peak acceleration, rms acceleration and VDV, when a floor vibration serviceability is evaluated. Meanwhile rms acceleration and peak acceleration are adopted as vibration limit value in criteria and researches of human perception for vibration. Occupants induced floor vibration is transient rather than steady state. However, rms acceleration is not reliable parameter for evaluating transient vibration. The objective of this study is to investigate the characters of human perception level according to acceleration value parameters for vibration induced by heel impacts and walking activities.

기 호 설 명

- $a(t)$: 가속도의 시간함수
- a_p : 최대가속도
- a_{rms} : 제곱평균제곱근(rms)가속도
- $a_{rms(1s)}$: 제곱평균제곱근(rms)가속도(T=1sec)
- f_n : 진동수(Hz)
- t : 시간(sec)

- VDV : 진동량(vibration does values)
- T : 진동의 지속시간(sec)
- ζ : 감쇠비

1. 서 론

구조물의 외부로부터 전달되거나 또는 내부에서 발생한 진동은 구조물에 크고 작은 영향을 미친다. 특히 거주자들의 거동으로 발생하는 바닥 수직진동

† Corresponding Author ; Member, Department of Architectural Engineering, Hanyang University
E-mail : ajax3@naver.com
Tel : +82-02-2220-0566, Fax : +82-02-2291-1716

* Member, Department of Architectural Engineering, Hanyang University

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

은 구조물의 안전에 영향을 주지 않더라도 거주자들의 정신적 신체적 건강에 영향을 미치며 나아가 경제적 사회적 손실을 야기 시킬 수 있는 문제이다. 2011년 서울의 한 고층 건물에서는 피트니스센터에서의 단체 태보 활동으로 발생한 진동을 느낀 거주자들이 불안감을 호소한 사례가 있었다. 정밀 진단 결과 구조적 안전에는 문제가 없음으로 밝혀졌으나, 사용자들의 불안감은 한동안 지속되었으며 진단 기간 동안 건물 사용 중지 등으로 인하여 큰 경제적 손실이 발생하였다. 뿐만 아니라 최근 심각한 사회 문제로 대두된 공동주택의 층간소음 또한 거주자의 거동으로 발생하는 바닥 수직진동이 주요 요인으로 작용한다. 거주자의 거동으로 발생하는 바닥 수직진동의 경우 외부에서 전달되거나 기계 장치 등에 의해 발생하는 진동과 달리 진동원을 제거하거나 분리할 수 없으므로 적절한 평가 기준 및 대처 방안 마련이 필요하다. 그러나 현재까지 국내 기준은 마련되어 있지 않으며, 바닥 수직진동 평가에 해외 기준을 사용 해 왔다. 국내에 소개된 해외 기준에는 ISO 2631-2⁽¹⁾, CSA 기준⁽²⁾, BS 6472⁽³⁾ 등이 있다.

이들 기준들은 건물 내부에서 인체로 전달되는 진동에 대한 평가 기준과 평가 방법을 제시하고 있다. 건물 내부에서 인체로 전달되는 진동은 진동수, 감쇠비, 진동 크기, 진동 지속시간 및 발생 빈도 등의 진동 특성을 종합하여 평가한다. 여기서 진동 크기는 변위, 속도, 가속도로 나타낼 수 있는데, 바닥 수직진동에 대한 사용성 평가 기준에서는 주로 가속도를 최대값(peak), 제곱평균제곱근(root mean square, *rms*), 진동량(vibration dose value, *VDV*) 등의 형태로 사용하고 있다. 가속도의 *rms* 및 *VDV*는 가속도의 진폭의 크기에 진동의 지속 시간 및 발생 빈도를 고려한 진동 크기 변수이다.

해외 기준의 제한치는 진동에 대한 사람의 인지 수준 및 바닥 진동 실험 연구를 바탕으로 마련되었다. 건물 내부 바닥에서 진동 특성은 전형적으로 두 가지 형태로 가정할 수 있다⁽⁴⁾. 하나는 Fig. 1(a)와 같이 기계의 동작 등이 원인이 되는 지속적으로(continuous) 발생하는 정상진동(steady state) 형태이고, 다른 하나는 Fig. 1(b)와 같은 충격하중 등으로 발생하여 점점 소멸하는 과도진동(transient) 형태이다. Fig. 1과 같은 두 가지 형태의 진동에 대하여 각국의 많은 연구자들이 사람의 인지수준에 대한 연

구를 수행해왔다. 다방면으로 수행된 연구에서 사람의 인지수준은 대부분 진동수, 진동원, 감쇠비, 진동 크기 및 지속 시간 등을 변수로 그래프 형태로 제시되어 있으며, 진동 크기 변수는 주로 *rms*가속도 및 최대가속도값을 사용하고 있다.

그러나 거주자의 거동으로 발생하는 진동은 지속적이지 않으며, Fig. 1(a)의 사인곡선 형태보다 Fig. 1(b)의 과도진동 특성에 가깝다. Griffin⁽⁵⁾에 따르면 *rms*가속도는 Fig. 1(b)와 같은 과도진동의 경우 신뢰할 수 있는 평가 지표가 되지 못하며, 간헐적으로 발생하는 진동의 경우 누적된 응답을 사용하여 평가하는 것이 보다 신뢰도가 높다. Ellis⁽⁶⁾는 보행진동을 간헐진동(intermittent)으로 규정하고 보행진동 평가 시 누적된 진동응답을 고려하기 위하여 진동 크기 변수로 *VDV*를 사용하였다. 평가 기준으로는 BS 6472⁽³⁾에서 간헐진동 평가 시 제한값을 *VDV*로 제시하고 있다. 그러나 BS 6472⁽³⁾의 제한값은 사인곡선 형태의 응답을 가정하여 마련된 것으로 과도진동의 특성을 반영한 기준으로 보기 어렵다.

따라서 거주자의 거동으로 발생하는 바닥 수직진동 평가를 위하여 각 기준에서 사용되고 있는 진동

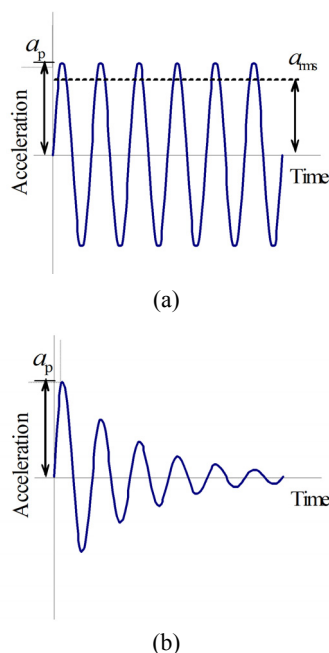


Fig. 1 Acceleration waveform: (a) continuous steady-state response, (b) transient response⁽⁴⁾

크기 변수에 대한 인지수준 특성 파악이 필요하다. 국내에서 한상환 등⁽⁷⁻⁹⁾이 국내 거주자에 대한 인지 실험을 수행한 바 있다. 그러나 이들 연구에서 고려하고 있는 진동 크기 변수는 최대가속도로 다른 진동 크기 변수에 따른 인지수준 특성은 규명된 바가 없다. 이 연구에서는 가속도 크기 변수에 따른 보행 및 뒤꿈치 충격 진동에 대한 인지수준의 특성을 파악하고자 한다. 가속도 크기 변수로 최대가속도, rms 가속도 및 VDV 를 선택하였으며, 한상환 등⁽⁹⁾의 연구에서 가속도 크기 변수를 rms 가속도와 VDV 로 바꾸어 인지수준을 재분석하고, 각 가속도 크기 변수에 따른 인지수준을 비교하였다.

2. 가속도 크기 변수

2.1 최대가속도

진동 가속도의 크기를 나타내는 가장 간단한 값은 최대값(peak acceleration, a_p)으로 Fig. 1에서와 같은 시간에 대한 가속도 곡선에서 가속도의 최대 진폭값을 말한다. Wiss와 Parmelee⁽¹⁰⁾ 보행진동을 한 걸음의 보행 시 뒤꿈치 충격으로 발생하는 과도 진동(transient vibration)으로 규정하고, Fig. 1(b)와 같은 형태의 진동을 사용하여 과도진동에 대한 인지 실험을 수행하였다. 그 결과 Wiss와 Parmelee⁽¹⁰⁾는 진동수, 감쇠비, 최대가속도값을 매개변수로 하여 인지수준을 5단계로 나타내었다.

CSA기준⁽²⁾은 Allen과 Rainer⁽¹¹⁾의 42개 장스펜 바닥 진동실험을 바탕으로 바닥진동에 대한 제한치를 감쇠비에 따라 진동수와 최대가속도 관계 그래프로 제시하고 있다.

2.2 rms 가속도

최대가속도는 가속도의 크기를 빠르게 구할 수 있으나, 진동 평가 시 진동의 지속시간을 반영하기 어렵다. 진동의 지속시간을 고려한 제곱 평균 제곱근 값인 rms 가속도는 식 (1)로 계산된다.

$$a_{rms} = \left[\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} a^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (1)$$

여기서, $T = t_2 - t_1$ 로 진동의 지속시간이다.

ISO 2631-2⁽¹⁾는 rms 가속도를 가속도 크기 변수

로 사용한 대표적인 기준으로 건물 진동과 관련하여 엔지니어와 연구자들이 가장 빈번하게 인용하는 기준 중 하나이다. ISO 2631-2⁽¹⁾은 건물 내 진동에 대한 인체의 반응과 불편을 느끼는 진동 수준을 전신진동에 대한 인체의 노출평가 기준인 ISO 2631-1⁽¹²⁾의 기본곡선의 배수로 제시하고 있다.

과도진동의 경우 rms 가속도는 지속시간 길이에 영향을 크게 받는다. 보행진동에 대하여 Eriksson⁽¹³⁾은 rms 가속도 산정 시 10초의 지속시간을 적합한 값으로 제안하였으나 뒤꿈치 충격이나 보통의 주거 및 사무용 건물에서 몇 걸음의 보행의 경우 진동 지속시간이 10초 미만이다. 바닥 수직진동 평가 시 rms 가속도 산정에 사용되는 평균 지속시간에 관한 연구는 수행된 바 없으나 과도진동 형태의 뒤꿈치 충격진동과 뒤꿈치 충격의 중첩으로 발생하는 보행 진동의 특성을 고려하여 1초의 지속시간을 선택할 수 있다. 이 연구에서는 진동신호의 전체 지속시간 T 에 대한 rms 가속도 a_{rms} 와 1초의 지속시간을 적용한 rms 가속도 $a_{rms(1s)}$ 을 구분하여 진동 크기 변수로 사용하였다.

2.3 VDV

Griffin과 Whitham⁽¹⁴⁾은 지속 시간이 30초 이내로 짧은 진동의 경우 rms 가속도 보다는 가속도의 4제곱합에 4제곱근 취한 값이 불쾌감의 변화를 더 잘 예측한다고 하였다. 가속도의 4제곱합에 4제곱근 취한 값을 진동량 VDV (vibration dose value)라 하며 가속도의 시간이력 데이터를 이용하여 식 (2)로 산정할 수 있다.

$$VDV = \left[\int_{t_1}^{t_2} a^4(t) dt \right]^{1/4} \quad (2)$$

BS 6472⁽³⁾에서는 간헐진동 평가 시 하루 동안의 총 진동량을 VDV 로 산정하여 평가하는데, 주간 16시간, 야간 8시간에 대하여 VDV 를 산정하도록 규정하고 있다. 그러나 주거 및 사무용 건물에서 보행 진동의 발생 빈도 및 각 보행의 지속 시간을 명확히 규명하기는 힘들다. 따라서 이 연구에서는 진동 크기 변수에 따른 인지수준 특성 파악을 위하여 각각의 진동신호에 대하여 1회 발생한 경우의 VDV 값을 산정하였다.

3. 인지실험 연구

국내에서는 한상환 등⁽⁷⁻⁹⁾이 Wiss와 Parmelee⁽¹⁰⁾의 연구를 바탕으로 국내 거주자의 인지수준 파악을 위하여 인지실험 연구를 수행한 바 있다. 뒤꿈치 충격과 보행을 가진원으로 진동대를 이용한 인지실험 수행하여 진동수, 감쇠비, 최대가속도를 매개변수로 국내 거주자들의 인지 수준을 4단계로 나타내었다. 한상환과 김도훈⁽⁷⁾은 뒤꿈치 충격으로 발생하는 과도진동에 대한 인지실험을 수행하여 국내 거주자들의 인지 수준을 규명하고자 하였다. 한상환과 이상욱⁽⁸⁾은 뒤꿈치 충격으로 발생하는 진동과 뒤꿈치 충격의 중첩의 형태인 보행으로 인한 진동을 구분하여 하중별 인지수준 차이를 규명하고자 하였다. 한상환 등⁽⁹⁾은 인지실험 결과 분석 과정에서 각 인지수준의 가속도 크기 분포에 큰 불확실성이 존재함을 발견하고, 인지단계의 가속도 수준 결정에 확률론적 방법을 도입하였다.

이 연구에서는 진동 크기 변수에 따른 인지수준의 차이 비교를 위하여 한상환 등⁽⁹⁾의 연구를 이용하였다. 한상환 등⁽⁹⁾의 인지실험에 사용된 진동 신호는 총 216개로 아래의 변수 종류와 범위로 형성되었으며, Fig. 2는 36개의 진동수와 최대가속도의 조합을 보여준다.

- ① Frequencies (f_n) : 3, 4.5, 7.5, 19 Hz (4)
- ② Peak acceleration (a_p) : 0.2~7 %gravity (9)
- ③ Damping ratios (ζ) : 0.02, 0.05, 0.1 (3)
- ④ Source types : walking, heel drop (2)

Fig. 3은 인지실험에 사용된 진동 신호 형태로 유효요소 해석으로 구한 뒤꿈치 충격과 보행에 대한 바닥의 진동 응답이다. 20명의 피험자는 임의의 순서로 전달된 진동에 대하여 ‘인지하지 못함(imperceptible)’, ‘약하게 인지(slightly perceptible)’, ‘분명하게 인지(distinctly perceptible)’, 강하게 인지(strongly perceptible)’의 4단계로 평가하였다.

확률론적 개념을 도입한 한상환 등⁽⁹⁾의 인지수준 분석은 각 진동 신호에 대하여 각 인지 단계별 인지 확률 계산으로 시작된다. Fig. 4는 2% 감쇠비의 뒤꿈치 충격진동에 대하여 최대가속도에 대한 각 인지 단계의 확률질량함수이다. 한상환 등⁽⁹⁾의 연구에 따

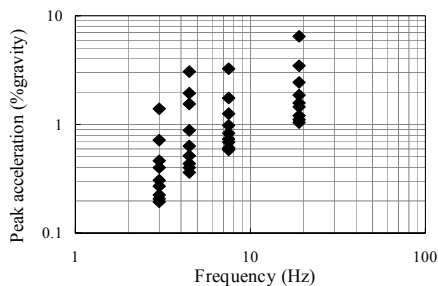


Fig. 2 Combination of parameters(peak acceleration versus frequencies of generated vibration signals)⁽⁹⁾

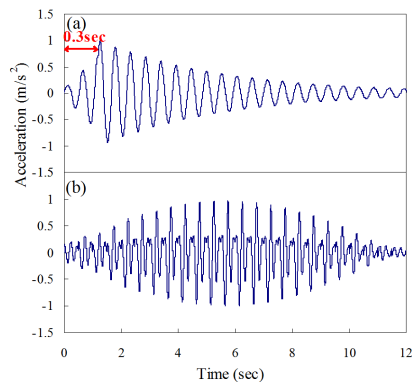


Fig. 3 Acceleration history due to:(a) heel drop impact, (b) walking ($f_n=4.5$ Hz, $\zeta=2\%$, $a_p=1$)⁽⁹⁾

르면 Fig. 4에서 최대가속도값이 증가함에 따라 인접한 인지단계의 확률질량함수가 교차하게 되는데, 이 교차점을 각 인지 단계의 경계점으로 볼 수 있다. Fig. 4(a)에서 교차점 $ap=0.208$ %gravity가 인지하지 못함의 상한점, 약하게 인지의 하한점이 된다. 한상환 등⁽⁹⁾은 모든 감쇠비와 진동원, 고유진동수에 대하여 Fig. 4와 같이 인지단계의 교차점을 구하여, 각 인지단계의 진동수와 최대가속도값의 관계를 결정하기 위하여 회귀분석을 수행하였다. 한상환 등⁽⁹⁾의 연구에서 회귀분석 결과로 얻은 뒤꿈치 충격과 보행 진동에 대한 각 인지수준은 Fig. 5와 같다.

4. 크기 변수에 따른 인지 수준 분석연구

진동 크기 변수에 따른 인지수준 특성을 파악하기 위하여 이 연구에서는 한상환 등⁽⁹⁾의 인지실험의 진동신호의 진동 크기 변수를 달리하여 인지수준을

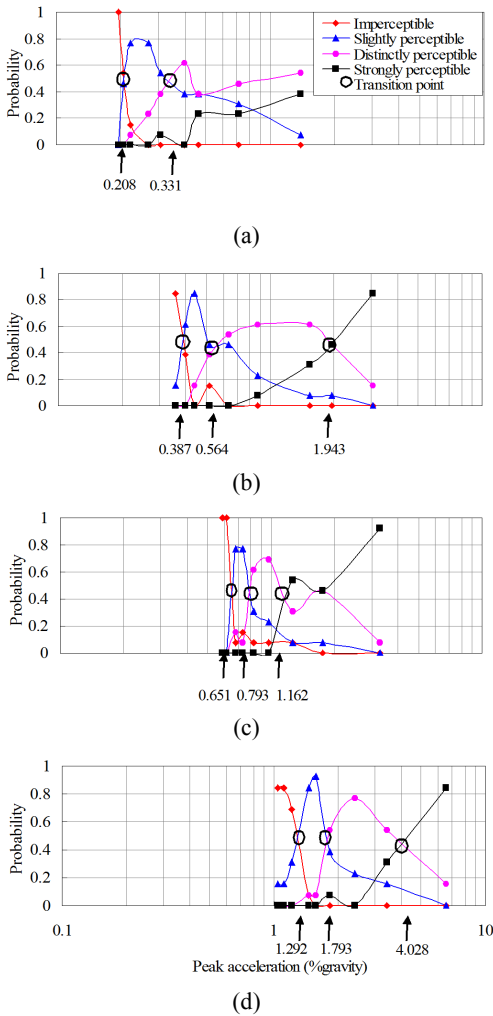


Fig. 4 Probability of peak acceleration under heel drop impacts according to perception levels ($\zeta=2\%$): (a) 3 Hz, (b) 4.5 Hz, (c) 7.5 Hz, (d) 19 Hz⁽⁹⁾

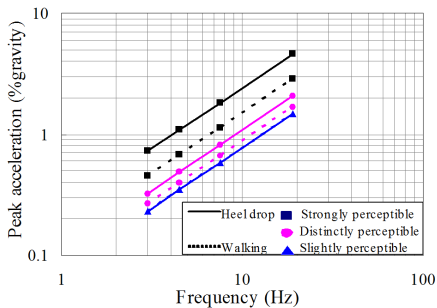


Fig. 5 Acceleration threshold under heel drop impacts and walking activities($\zeta=2\%$)⁽⁹⁾

재분석하였다. 진동 크기 변수로는 진동신호의 전체 지속시간 T에 대한 rms 가속도(a_{rms}), 지속시간 1초에 대한 rms 가속도($a_{rms(1s)}$), 진동신호 전체 지속시간 T에 대한 VDV 이다.

뒤꿈치 충격진동은 Fig. 1(b)와 같이 가속도의 최대값 발생 후 감쇠비에 따라 소멸되는 형태를 보인다. Fig. 3(a)는 신호 입력 시 진동대의 쇼크를 방지하기 위해 0.3초의 신호를 앞부분에 추가한 것으로 이를 제외한 뒤꿈치 충격진동의 지속 시간은 감쇠비와 진동수에 따라 1초 미만에서부터 8초 내외이다. 반면 보행진동은 뒤꿈치 충격이 반복되어 발생하여 각 뒤꿈치 충격에 대한 응답이 중첩되어 진동신호의 중간 부분에서 최대값을 가지게 된다. 보행진동의 경우 지속시간이 바닥 크기에 따라 다소 차이가 있으나, 주거 건물의 거실 바닥인 경우 보행진동의 지속시간은 보통 10초 내외이다.

이 연구에서는 1초의 지속시간에 대한 rms 가속도($a_{rms(1s)}$) 산정 시 뒤꿈치 충격의 경우 처음부터 1초까지를, 보행진동의 경우 가속도의 절대값의 최대값을 기준으로 앞뒤로 0.5초씩 총 1초의 신호를 선택하였다. 2% 감쇠비의 뒤꿈치 충격과 보행진동에 대한 진동수와 진동 크기 변수의 조합을 Fig. 6에 나타내었다. 각 가속도 크기 변수의 단위는 최대가속도와 rms 가속도의 경우 $[m/s^2]$, VDV 의 경우 $[m/s^{1.75}]$ 로 Fig. 6의 세로축 값은 최대가속도와 rms 가속도, 그리고 VDV 에 대하여 각각 중력가속도에 대한 백분율인 $[\%gravity]$ 와 $[\%gravity \cdot s^{0.25}]$ 의 단위이다.

Fig. 6에서 동일한 진동신호에 대하여 rms 가속도보다 VDV 와 최대가속도가 더 높은 가속도 수준임을 알 수 있다. 각 진동 크기 변수별 가속도 수준의 차이는 보행진동보다 뒤꿈치 충격진동에서 더 크게 나타난다. 이는 시간이 짧고 진동 크기가 큰 경우 rms 가속도로 예측한 것보다 훨씬 더 큰 불쾌감을 유발한다고 한 Griffin과 Whitham⁽¹⁴⁾의 연구와 일치하는 것이다.

한상환 등⁽⁹⁾의 인지실험에서 Fig. 2의 진동수와 최대가속도의 조합은 전 감쇠비에 대하여 동일하다. 그러나 rms 가속도 및 VDV 는 감쇠비와 진동수의 영향을 복합적으로 받아 감쇠비에 따라 진동수와 진동 크기 조합이 다양한 값을 가지므로 5%, 10%의 감쇠비에 대한 진동수와 진동 크기 조합은 Fig. 6과

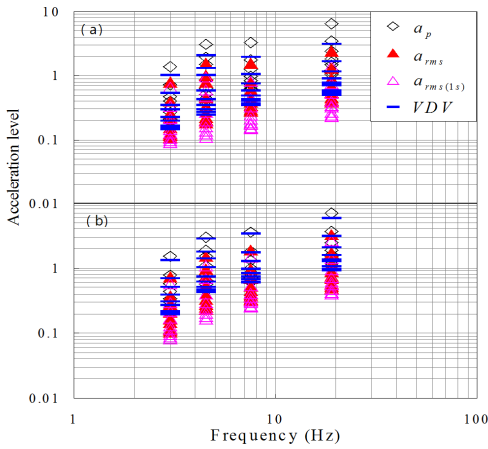


Fig. 6 Combination of parameters(vibration values versus frequencies of generated vibration signals for $\zeta=2\%$) : (a) heel drop impacts, (b) walking

차이가 있다.

인지단계의 가속도 수준에 미치는 감쇠비와 진동수, 가속도 크기 변수의 영향을 복합적으로 고려하기 위하여 Fig. 4와 같은 방법으로 인접 인지단계 교차점의 가속도 크기 값을 구하고, 진동수와 가속도 크기의 관계를 회귀분석으로 결정하였다. 이때 기존 연구와 비교 시 편의를 위하여 진동수와 가속도 크기의 대수 관계에서 기울기는 1로 고정하였다.

4.1 진동 크기 변수별 인지수준에 대한 감쇠비의 영향

한상환 등⁽⁹⁾은 감쇠비의 증가에 따라 인지 단계의 최대가속도 수준이 높아지며, 이러한 경향은 인지 단계가 높아질수록 분명하며 보행진동보다 뒤꿈치 충격진동에서 더 분명하게 나타난다 하였다(Fig. 7(a), Fig. 8(a) 참고). 다만 약하게 인지 단계의 최대 가속도 수준은 뒤꿈치 충격과 보행진동 모두에서 감쇠비의 영향을 거의 받지 않으며, 2%, 5%, 10%의 감쇠비에 대한 약하게 인지 단계의 최대가속도 수준이 거의 일치한다.

그러나 가속도 크기 변수가 a_{rms} , $a_{rms(1s)}$, VDV 인 경우 인지수준은 감쇠비, 진동수, 인지단계 및 가속도 크기 변수의 영향을 복합적으로 받고 있어 하나의 경향으로 간단하게 서술하기 어렵다. Fig. 7(b)~(d)은 뒤꿈치 충격진동에 대하여 가속도 크기

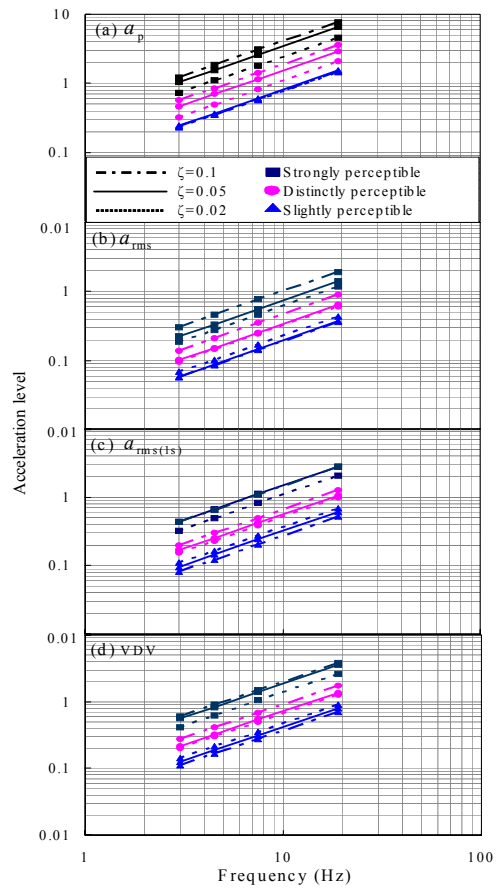


Fig. 7 Effect of damping ratio according to vibration value parameters for heel drop impact induced vibration

변수 a_{rms} , $a_{rms(1s)}$, VDV 로 나타낸 인지수준에 미치는 감쇠비의 영향을 보여준다. 한상환 등⁽⁹⁾의 연구에서와 같이 분명하게 인지와 강하게 인지 단계의 경우 감쇠비가 증가함에 따라 인지단계의 가속도 크기 수준도 높아지는 경향을 나타내고 있다. 감쇠비 2%와 5%, 10%의 가속도 크기 비는 인지 단계에 따라 a_{rms} 의 경우 1.0~1.6, $a_{rms(1s)}$ 와 VDV 의 경우 1.1~1.4이다. 이에 반하여 약하게 인지 단계는 감쇠비와 가속도 크기 수준이 반비례하여 2%의 감쇠비에서 가장 높은 가속도 크기 수준을 나타내고 10%의 감쇠비의 가속도 수준은 감쇠비 2%에 대한 가속도 크기의 0.7~0.8 정도로 가장 낮은 값을 가진다.

Fig. 8(b)~(d)은 보행진동에 대하여 가속도 크기

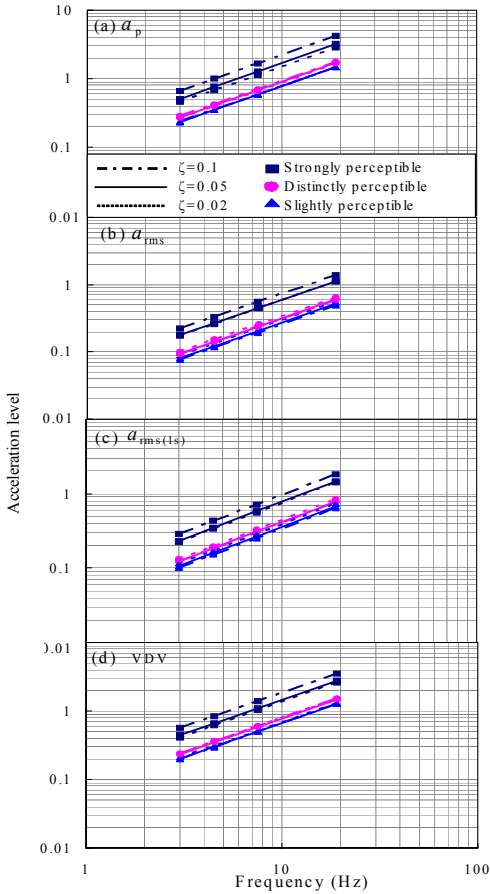


Fig. 8 Effect of damping ratio according to vibration value parameters for walking induced vibration

변수 a_{rms} , $a_{rms(1s)}$, VDV 로 나타낸 인지수준에 미치는 감쇠비의 영향이다. 보행진동의 경우 가속도 크기 변수에 감쇠비의 영향 차이가 거의 없으며 이는 한상환 등⁽⁹⁾의 연구 결과와 같다. 이는 가속도 크기 변수 a_{rms} , $a_{rms(1s)}$, VDV 가 지속시간 동안의 평균 진동양을 의미하므로, 뒤꿈치 충격진동의 경우 감쇠비 증가에 따라 진폭이 크게 감소하여 가속도 크기의 평균치를 낮추고, 가속도 수준이 낮은 진동일수록 그 영향이 크기 때문으로 판단된다.

4.2 진동 크기 변수에 따른 인지수준

Fig. 1(a)의 사인곡선 형태의 진동은 최대가속도와 rms 가속도의 비가 $a_p/a_{rms} = \sqrt{2}$ 이다. 그러나 Fig. 1(b)과 같은 형태의 진동은 최대가속도와 rms

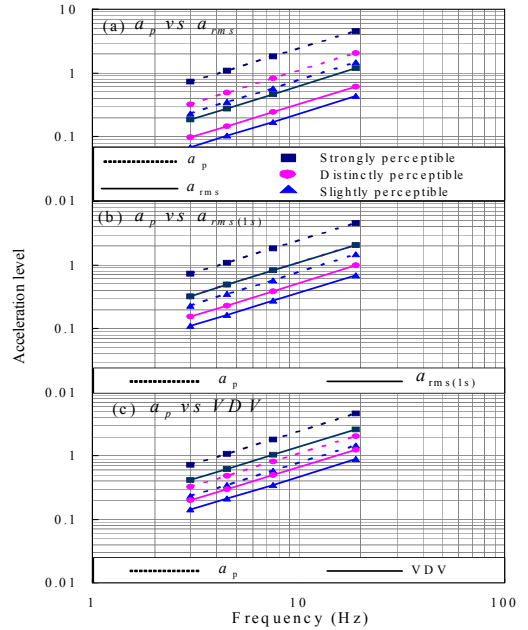


Fig. 9 Comparison of acceleration level according to acceleration values for heel drop impact induced vibration($\zeta=2\%$)

가속도의 비가 감쇠비와 진동수에 따라 결정된다. Figs. 9~10에 감쇠비 2%인 경우 뒤꿈치 충격진동과 보행진동의 최대가속도와 가속도 크기 변수 a_{rms} , $a_{rms(1s)}$, VDV 에 대한 인지수준을 비교하였다. 뒤꿈치 충격진동은 최대가속도와 가속도 크기 변수 a_{rms} , $a_{rms(1s)}$, VDV 에 대한 각 인지단계의 가속도 크기의 비가 감쇠비와 인지단계의 영향을 받는다. 뒤꿈치 충격진동의 경우 감쇠비와 인지단계에 따라 각 인지단계의 최대가속도와 rms 가속도의 비 a_p/a_{rms} 는 3.4-4.6이며, 1초 지속시간의 rms 가속도 인지수준에 대한 최대가속도 인지수준의 비 $a_p/a_{rms(1s)}$ 는 2.1~2.8, 단위를 고려하지 않을 경우 최대가속도 인지수준과 VDV 인지수준의 비 a_p/VDV 는 1.6~2.1이다. 반면 보행진동은 인지단계의 영향은 무시할 수 있는 수준이며 감쇠비가 증가함에 따라 최대가속도 인지수준과 각 가속도 크기 변수의 인지수준의 비가 커진다. 감쇠비에 따라 각 인지단계의 최대가속도와 rms 가속도의 비 a_p/a_{rms} 는 2.6~3.0, 1초 지속시간의 rms 가속도 인지수준에 대한 최대가속도 인지수준의 비 $a_p/a_{rms(1s)}$ 는 2.0~2.3, 단위를 고려하지 않을 경우 최대가속도 인지수준과 VDV 인지수준의 비

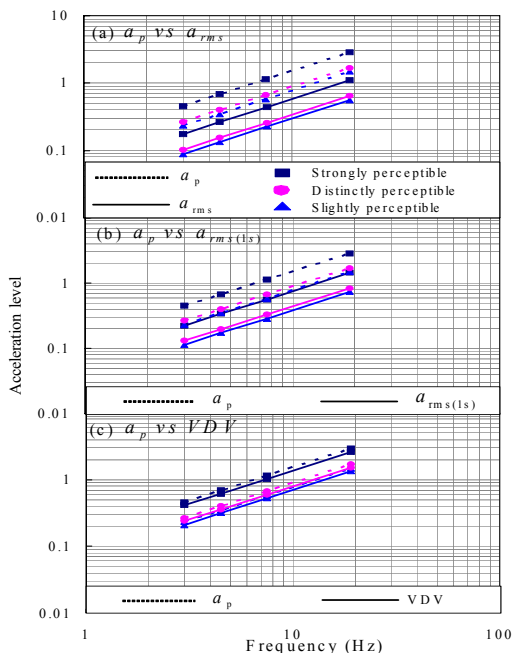


Fig. 10 Comparison of acceleration level according to acceleration value parameters for walking induced vibration($\zeta=2\%$)

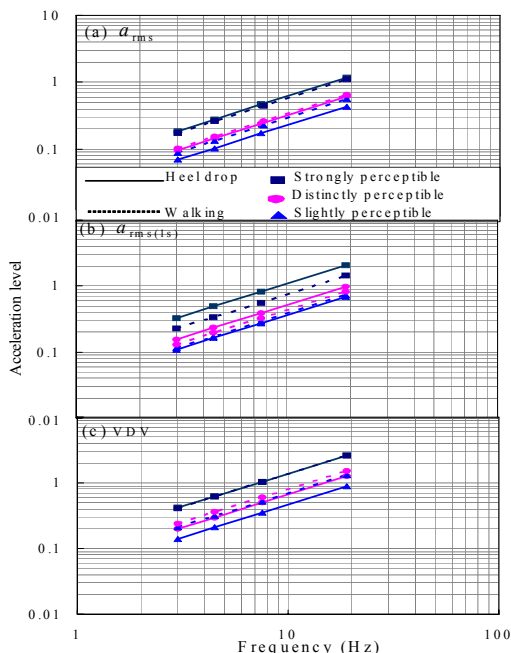


Fig. 11 Comparison of acceleration level between heel drop impact and walking induced vibration according to acceleration values($\zeta=2\%$)

a_p / VDV 는 1.1~1.2이다.

과거 몇몇 연구에서는 보행하중을 연속적인 주기 하중으로 보고 보행진동을 평가하였다. 그러나 보행진동에 대하여 최대가속도에 대한 인지수준과의 비율이 가속도 크기 변수 VDV 의 인지수준을 제외하고는 모두 $\sqrt{2}$ 보다 큰 값을 나타내고 있어, rms 가속도로 평가한다면 가속도의 최대 진폭의 영향을 과소평가할 우려가 있다.

4.3 진동 크기 변수에 따른 뒤꿈치 충격진동과 보행진동의 인지수준 비교

한상환 등⁽⁹⁾에 따르면 약하게 인지 단계를 제외하고, 뒤꿈치 충격진동의 인지수준이 보행진동보다 최대가속도 수준이 더 높다(Fig. 5). 약하게 인지 단계의 가속도 수준은 진동원과 감쇠비의 영향이 미비하여 뒤꿈치 충격진동과 보행진동, 2~10%의 감쇠비에 대하여 일정하다.

Fig. 11에 진동 크기 변수 a_{rms} , $a_{rms}(1s)$, VDV 에 대한 뒤꿈치 충격진동과 보행진동의 인지수준을 비교하였다. Fig. 11(b)의 가속도 크기 변수 $a_{rms}(1s)$ 에

대한 인지수준은 한상환 등⁽⁹⁾의 최대가속도에 대한 인지수준의 결과와 같이 약하게 인지 단계를 제외하고는 뒤꿈치 충격진동이 보행진동보다 높은 가속도 수준을 나타내고 있다. 그러나 Fig. 11(a)와 Fig. 11(c)에서 알 수 있듯이 가속도 크기 변수 a_{rms} 와 VDV 에 대한 인지수준은 한상환 등⁽⁹⁾의 최대가속도에 대한 뒤꿈치 충격진동과 보행진동의 인지수준 비교와 상반된 결과를 보여준다. 가속도 크기 변수 a_{rms} 와 VDV 에 대한 인지수준은 강하게 인지 단계를 제외하고는 뒤꿈치 충격진동이 보행진동보다 낮은 가속도 수준을 나타내고 있으며, 강하게 인지 단계에서 뒤꿈치 충격진동과 보행진동의 가속도 수준이 거의 일치한다.

Pavic과 Reynolds⁽¹⁵⁾는 조용한 환경에 대하여 인지하지 못함과 인지함의 경계를 사용성 기준치로 선정해야 한다 하였다. 한상환 등⁽⁹⁾은 진동수와 최대가속도를 변수로 나타낸 인지수준에서 인지하지 못함과 인지함의 경계인 약하게 인지 수준은 감쇠비와 진동원의 변수 영향을 받지 않으므로 이를 사용성 기준으로 사용하는 것이 유리하다고 평가하였다.

최대가속도를 가속도 크기 변수로 사용하는 경우 보행진동 평가 시 1회의 뒤꿈치 충격 하중에 대한 진동 응답을 사용할 수 있다. 그러나 가속도 크기 변수로 rms 가속도나 VDV 를 사용하기 위해서는 진동원과 감쇠비에 따른 영향을 고려한 평가 방법이 마련되어야 한다. 다만, 1초의 지속시간을 적용한 rms 가속도를 사용하는 경우 일반적인 바닥 구조의 감쇠비를 고려할 때 보수적으로 뒤꿈치 충격진동에 대한 5% 또는 10%의 감쇠비에 대한 인지수준을 평가 기준으로 사용할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 네 가지의 가속도 크기 변수, a_p , a_{rms} , $a_{rms(1s)}$, VDV 에 대하여 뒤꿈치 충격진동과 보행진동의 인지수준을 비교하였다.

일반적으로 감쇠비의 증가에 따라 인지 단계의 가속도 수준이 높아지는 경향을 보인다. 다만, 뒤꿈치 충격진동의 인지수준에서 가속도 크기 변수가 a_{rms} , $a_{rms(1s)}$, VDV 인 경우 약하게 인지 단계는 감쇠비와 가속도 크기 수준이 반비례한다. 또한 보행진동의 경우 인지수준에 미치는 감쇠비의 영향은 가속도 크기 변수에 따른 차이가 거의 없으며, 약하게 인지와 분명하게 인지 단계의 인지수준에 미치는 감쇠비의 영향은 미비하다.

최대가속도와 가속도 크기 변수 a_{rms} , $a_{rms(1s)}$, VDV 에 대한 인지수준의 비는 단위를 고려하지 않을 때 뒤꿈치 충격진동의 경우 1.6~4.6이고, 보행진동의 경우 1.1~3.0이다.

최대가속도와 지속시간 1초의 rms 가속도에 대한 인지수준은 약하게 인지 단계를 제외하고는 뒤꿈치 충격진동의 인지수준이 보행진동의 인지수준보다 가속도 수준이 더 높다. 이와 반대로 가속도 크기 변수 a_{rms} 와 VDV 에 대한 인지수준강하게 인지 단계를 제외하고는 뒤꿈치 충격진동이 보행진동보다 낮은 가속도 수준을 나타내고 있으며, 강하게 인지 단계에서 뒤꿈치 충격진동과 보행진동의 가속도 수준이 거의 일치한다.

가속도 크기 변수로 rms 가속도, VDV 를 사용하는 경우 진동원과 감쇠비에 따라 인지수준이 변하므로, 진동원과 감쇠비 영향을 고려한 추가적인 평가 기준치 및 평가 방법이 필요하다. 그러나 보행이나 뒤꿈

치 충격과 같은 거주자의 거동으로 발생하는 진동에 대한 사용성 평가 시 최대가속도를 가속도 크기 변수로 사용하여 약하게 인지 수준을 평가기준으로 선정할 경우 기준치가 감쇠비나 진동원에 따라 변하지 않는다는 이점이 있다.

References

- (1) International Organization for Standardization, 1989, ISO 2631-2: Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration -Part2: Continuous and Shock-Induced Vibration in Buildings(1 Hz to 80 Hz), Geneva, Switzerland.
- (2) CSA, 1989, Canadian Standard: Steel Structures for Buildings - Limits States Design: Appendix G, Guide for Floor Vibration, CAN3 -S16.1 -M89, Rexdale, Ontario.
- (3) BS 6472, 1992, Guide to Evaluation of Human Exposure to Vibration in Buildings, British Standards Institution.
- (4) Hicks, S., 2004, Vibration Characteristics of Steel-concrete Composite Floor Systems, Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 6, No. 1, pp. 21~38.
- (5) Griffin, M. J., 1996, Handbook of Human Vibration, Academic Press, London.
- (6) Ellis, B. R., 2001, Serviceability Evaluation of Floor Vibrations Induced by Walking, The Structural Engineer, Vol. 79, No. 21, pp. 30~36.
- (7) Han, S. W. and Kim, D. H., 2003, Human Perception Test for Acceptance Criteria of Floor Vertical Vibration, Journal of the Architectural Institute of Korea. Vol. 19, No. 1, pp. 11~20.
- (8) Han, S. W. and Lee, S. W., 2003, Investigation on Human Perception Level under Walking and Heel Drop Vibrations Using Shaking Table Test, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 3, pp. 186~193.
- (9) Han, S. W., Lee, M. J. and Moon, K. H., 2009, Acceleration Thresholds of Vertical Floor Vibrations According to Human Perception Levels in Korea, Advances in Structural Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 595~607.
- (10) Wiss, J. F. and Parmelee, R. A., 1974, Human

Perception of Transient Vibrations, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 100, pp. 773~787.

(11) Allen, D. E. and Rainer, J. H., 1976, Vibration Criteria for Long Span Floors, Canadian Journal of Civil Engineering, National Research Council of Canada, Vol. 3, No. 2, pp. 165~173.

(12) International Organization for Standardization, 1997, ISO 2631-1: Mechanical Vibration and Shock-Evaluation of Human Exposure to Whole-body Vibration: Part 1: General Requirements, Geneva, Switzerland.

(13) Eriksson, P. E., 1994, Vibration of Low-frequency Floors-dynamic Forces and Response Prediction, PhD Thesis(in English), Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.

(14) Griffin, M. J. and Whitham, E. M., 1980, The Discomfort Produced by Impulsive Whole-body Vibration, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 68, No. 5, pp. 1277~1284.

(15) Pavic, A., Reynolds, P., Waldron, P. and Bennett, K. J. 2001, Critical Review of Guidelines for

Checking Vibration Serviceability of Post-tensioned Concrete Floors, Cement and Concrete Composites, Vol. 23, pp. 21~31.



Min Jung Lee received Ph.D. from Department of Architectural Engineering, Hanyang University in 2011. She is a researcher in SEismic Engineering and structural Dynamics Laboratory in Hanyang University.



Sang Whan Han received Ph.D. from Department of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign in 1994. He is a professor in Department of Architectural Engineering at Hanyang

University