

진동대 실험을 통한 보행진동과 뒷꿈치 충격진동의 인지수준 비교

Investigation on Human Perception Level under Walking and Heel Drop Vibrations Using Shaking Table Test

한 상 환† · 이 상 욱*

S. W. Han and S. W. Lee

(2002년 10월 31일 접수 ; 2003년 2월 17일 심사완료)

Key Words : Frequency(진동수), Damping Ratio(감쇠비), Peak Acceleration(최대가속도), Heel Drop Vibration(뒷꿈치 충격진동), Walking Vibration(보행진동), Perception Level(인지수준)

ABSTRACT

Floor vibrations in residence and office buildings are typically induced by heel drop and walking movement of occupants. The criteria of most vibration provisions have been developed based on the vibration caused by heel drop impact rather than walking. There may be considerable differences between the vibration characteristics induced by walking and heel drop. The effect of walking vibration was not well reflected on current provisions. In this paper, shaking table test was performed to investigate the human perception level against the vibrations due to walking and heel drop. This study attempts to compare the human perception level of two different vibration sources. Also, this study investigates the effect of damping on a perception level under heel drop and walking vibration.

1. 서 론

최근의 건축물은 대공간 확보를 위한 장스팬화와 설계기술의 발달, 고강도 강재의 개발, 고강도 경량 콘크리트의 사용 등으로 인한 중량 감소화가 나타나고 있다. 이로 인하여 구조물의 진동수(frequency)와 감쇠비(damping ratio)는 감소하고 있다. 이러한 현상은 바닥판 위의 동적 하중에 대하여 수직진동 문제를 발생시키고 있다. 이러한 수직 진동을 제어하기 위하여 효과적인 기준이 요구되는 실정이다. 그러나, 지금까지 슬래브의 수직진동에 관한 사용성 기준이 국내에는 개발되지 않았으며, 국내 진동 평가를 위한 사용기준들은 해외기준들을 사용하고 있는데, 이는 바닥 구조형식, 진동원, 지역적인 거주자들의 감성등의

차이로 해외기준을 그대로 적용하기는 어려운 실정이다.

따라서, 국내에서는 해외기준의 고찰을 통한 진동 연구가 필요하다. 해외 기준은 인지 평가 실험을 기반으로 진동에 대한 제한수준과 평가식들이 제안되어 왔다.

Reiher와 Meister⁽¹⁾는 1931년 정현파를 가진원으로 인지실험을 수행하여 인지수준을 제한하였다. 이후 Lenzen(1966)⁽²⁾은 Meister 곡선에 진폭을 10배한 수정 Meister 곡선을 제안하였으며, Wiss와 Parmelee⁽³⁾는 Reiher와 Meister의 연구⁽¹⁾를 기본으로 인지실험을 평가하였다. 이와 같은 인지실험 이후 Allen과 Reiher의 연구⁽⁴⁾(1974)와 Murray의 연구⁽⁵⁾(1981)가 진행되었으며, 이를 토대로 CSA⁽⁶⁾(Canadian Standard Association, 1989)와 AISC⁽⁷⁾(Steel Design Guide Series 11, 1997)가 제안되었다.

이 연구들 중에서도 Lenzen(1966)⁽²⁾과 Wiss와 Parmelee⁽³⁾의 인지실험은 현재 사용되는 진동기준들의 기초가 되고 있다. 이 인지실험들의 특징은 바닥

† 책임저자, 정회원, 한양대학교 건축공학부 조교수

E-mail : swhan@hanyang.ac.kr

Tel : (02) 2290-1715, Fax : (02) 2291-1716

* 한양대학교 대학원 건축공학과

판에 발생하는 진동의 특성을 소멸진동으로 보고 뒷꿈치 충격하중을 적용하여 실험을 수행하였다. 그러나, 최근에 주거 공간에서는 충격하중에 의해 발생하는 진동보다 연속적으로 반복되는 보행하중에 의한 진동이 보편적이고 일반적인 것으로 인식되고 있다.⁽⁸⁾ 인지실험에서 뒷꿈치 충격진동과 보행진동은 가진 하중의 특성에 의해 인지수준에 차이를 나타낼 수 있지만, 해외의 규준은 보행진동에 의한 인지실험이 이루어지지 않았다. 다만, 식에 의한 적용에서 보행진동의 영향을 고려한다고 언급하고 있지만, 명확한 평가가 이루어져 있지 않으며 현재까지 가진 하중에 따른 인지차이가 인지실험을 통하여 수행된 바는 없다.

따라서, 본 연구에서는 뒷꿈치 충격하중과 보행하중의 특성을 비교하였다. 진동대 위에 피험자를 의자에 착석하게 하고 다양한 규모, 진동수, 감쇠비를 갖는 진동을 일으켜 인지수준을 평가하여 차이의 정도를 파악하였다. 또한 본 연구에서는 감쇠비가 각 인지 수준에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 기존연구

1966년 Lenzen⁽²⁾은 인간의 진동 지각(perception) 특성을 파악하여 진동수와 변위 진폭으로 표시되는 수정 Reiher-Meister곡선을 제안하였다. 이것은

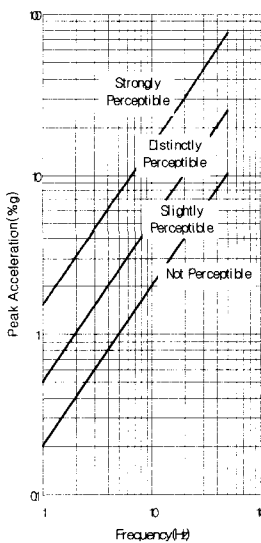


Fig. 1 Human perceptible criteria by Lenzen⁽²⁾

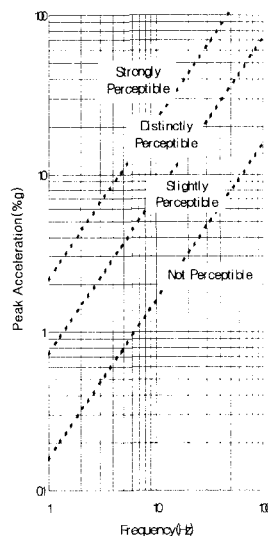


Fig. 2 Human perceptible criteria by Wiss & Parmelee⁽³⁾

Reiher-Meister의 평가 그래프⁽¹⁾에 지속적이지 않은 진동에 대해 감쇠의 개념을 적용시켜 나타낸 것이다. 이후 1974년에 Wiss 와 Parmelee⁽³⁾는 40명을 대상으로 소멸 바닥진동(transient floor vibration)에 대한 실험적 연구를 수행하여 통계적인 방법으로 인간의 인지단계에 대한 R값을 제안하였다. 또한 감쇠의 개념을 적용시켰으나, 그 영향은 아주 작게 나타났다.

Fig. 1과 Fig. 2는 이러한 기존 기준의 제한들을 나타내고 있다. Lenzen(1966)과 Wiss 와 Parmelee (1974)의 인지 곡선은 서로 유사한 인지수준을 나타내고 있으며, 인지 수준을 5단계로 분류하고 있다. 5단계인 '참을 수 없음(severe)' 수준은 그래프에 나타내고 있지 않다.

최근에 보행하중에 의한 진동이 실질적인 바닥판의 진동으로 인식되고 있지만, 뒷꿈치 충격하중으로 인한 진동을 사용한 기존기준은 보행에 대한 영향이 명확하게 반영되어 있지 않다.

3. 인지실험

3.1 인지실험 장치 및 계획

본 연구에서는 두 가지의 진동에 대한 인지차이와 감쇠의 영향을 알아보기 위해 P연구원에 설치된 진동대 시스템을 통하여 인지실험을 수행하였다. 진동대는 단축 진동대(수직 방향)로 유압에 의해 제어되는 시스템이다. 특징을 보면 다음과 같다.

- ① Dynamic force : 0 ~ 44,480 N
- ② Maximum frequency : 500 Hz
- ③ Stroke range : 0 ~ 200 mm
- ④ Typical load : 0 ~ 400 kg
- ⑤ System velocity : 56 cm/sec

크기는 가로, 세로 1.2m이며 앉은 자세와 서있는 자세를 실험할 수 있는 크기이다. 본 실험에서는 Fig. 3과 같이 특수 제작된 의자를 설치하여 가장 민감한 누워있는 자세와 가장 민감하지 않은 서있는 자세의 중간자세인 앉은 자세로 실험을 수행하였다.

제어 프로그램으로 Labview6.0(2000)을 사용하였다. 이 프로그램을 이용하여 간단한 수식으로 임의의 감쇠와 진동수, 진폭을 가지는 진동신호를 만들어 진동대를 가진 하였다. 제어 시스템은 입력값과 출력값

이 DAT(digital audio tape)에 아날로그 신호로 기록될 수 있도록 하였다. 진동대 바닥면에 고정된 센서는 INU 600EA 6자유도 센서로써 진동대 바닥판의 움직임에 대한 가속도를 측정할 수 있으며, $98.8 \text{ mV}/(\text{m}/\text{s}^2)$ 의 감도를 가진다.

피험자는 성인 남녀 20명으로 남자 10명, 여자 10명을 실험하였고, 연령층은 20~40대이다. 실험시간은 총 50분의 실험을 하였다. 보행진동은 10~15초 사이의 진동신호에 총 108개로 약 25~30분이 소요되었으며, 뒷꿈치 충격진동은 4~6초 정도에 보행과 같은 108개의 신호로 약 9~12분이 소요되었다. 하나의 진동신호가 들어가고 난 다음 인지평가표에 피험자가 인지수준을 기입하는 방법으로 실험을 실시하였다. 인지수준은 '인지하지 못함(not perceptible)'에서부터 '약하게 인지(slightly perceptible)', '분명하게 인지(distinctly perceptible)', '강하게 인지(strongly perceptible)'까지 4단계로 구분하였다. 인지 실험은 객관적인 평가기준이 정해져 있지 않고, 주관적인 감



Fig. 3 Perception level test using shaking table

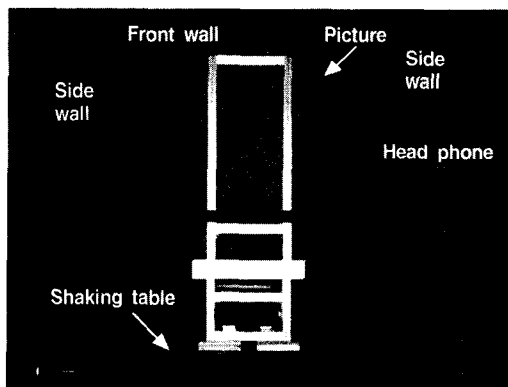


Fig. 4 Test room

각에 의존하는 것이기 때문에 주변 환경의 영향을 고려해야 한다. 따라서, 실험이 이루어지는 동안 주거공간과 유사한 환경을 제공하고자 하였다. 진동대 주변 환경은 시각적인 면을 고려하여 Fig. 4와 같이 피험자의 시선에 영향을 미치는 정면과 측면에 높이 2.5m의 벽을 설치하였고, 진동대 바닥판에는 카펫을 깔았다. 이는 피험자에게 심리적으로 주거공간의 느낌을 주기 위한 것이다. 전방에는 시각적인 안정감과 시선 고정을 위해 조명이 비치는 그림을 걸어 두었다. 또한 주변 소음과 유압식 진동대의 특성으로 인한 유체 진동소음은 피험자에게 가진되는 진동을 몸이 아닌 귀(소음)로 느끼게 함으로서 기대보다 더욱 민감해진 진동 인지특성을 나타낼 수 있다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하고자 메스킹 효과를 이용하였다.

진동소음이 피험자에게 들리지 않도록 피험자에게 Senheiser HD-630 헤드폰을 통하여 피아노 독주곡을 수음하도록 하였고, 개인별 실험이 끝날 때까지 각 피험자가 수음한 피아노 곡의 종류 및 평균 음압이 동일하도록 설정하였다. 진동소음과 평균적인 음압 차이는 30~40 dB을 유지하게 하여 충분한 메스킹이 될 수 있도록 하였다.

인지 실험은 구조체의 진동수와 감쇠비 그리고 최대 가속도를 주요 매개변수로 가지고 있으며, 이 세 가지 변수의 조합에 의해 실험 결과가 얻어진다. 따라서 본 연구에서 고려한 매개 변수들의 종류와 범위는 다음과 같이 설정하였다.

- ① 진동수(frequency) : 3, 4.5, 7.5, 19 Hz (4개)
- ② 최대가속도(peak acceleration) : 0.1~7 %g(9개)
- ③ 감쇠비(damping ratio) : 0.02, 0.05, 0.1 (3개)

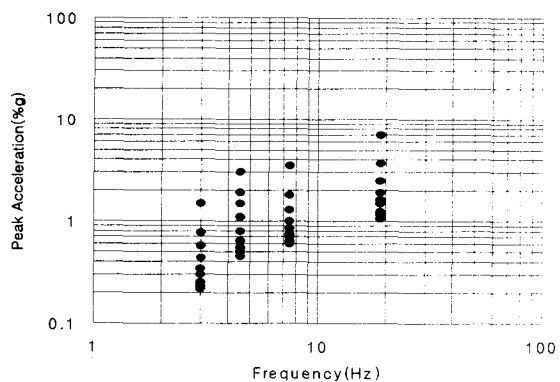


Fig. 5 Point of vibration signals

진동신호는 진동수 4개에 대한 각각의 최대 가속도 9개, 감쇠비 3개의 조합에 의해 108개를 형성시켰다. 또한 진동신호의 진폭이 서서히 증가하거나 감소 할 경우 피험자가 진동에 대해 예측하고 적응할 수 있는 문제를 막기 위해 일정하지 않은 순서로 진동신호를 전달하였다.

Fig. 5는 변수들의 조합에 의한 측정점을 나타낸 것이다. 낮은 가속도부분은 간격을 좁게 하여 인지수준의 변화에 민감하도록 하였고, 높은 가속도 부분은 상대적으로 넓게 측정점을 배치 시켰다.

3.2 실험 진동신호

본 연구에서 진동대 실험에 사용된 진동수, 최대가속도, 감쇠비의 조합에 따른 바닥판 응답과(진동대 입력과)는 구조해석 프로그램 MIDAS Genw 4.3.2 (2001)를 이용하여 만들었다. 해석모델은 실제 건물의 바닥판 측정결과와 비교를 통하여 최적의 모델링을 찾아내었다.⁽⁹⁾ Fig. 6은 바닥판 모델링을 보여주고 있다. 바닥판의 구속조건으로 좌우는 벽을 형성시켜주었다. 상부는 슬래브 연속조건을 부여하였으며, 하부는 자유단을 형성시켜 거실공간을 모델링하였다. 질점은 실험 보폭인 50~60 cm에 맞추어 40 cm × 40 cm 격자로 형성시켰다.

보행하중은 Fig. 6과 같이 모델링된 바닥판에 대각선 방향으로 하중을 가진 하였다. 시간이력 해석시 입력변수는 보조와 몸무게이며, 본 신호에서는 2 Hz의 보조와 70 kg의 몸무게를 적용시켰다.

하중적용으로는 IABSE 하중형태⁽¹⁰⁾를 적용시켰다. 이 하중형태는 보행진동의 일반특성을 나타내는 식 (1)

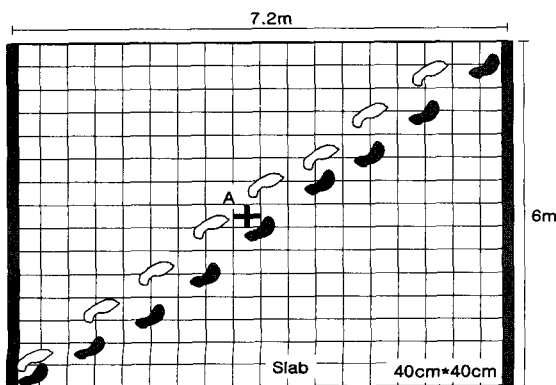


Fig. 6 Modelling of floor system and loading form

을 적용한 하중함수이다. Fig. 7은 IABSE(inter-national association for bridge and structure engineering)에 의해 적용된 하중함수 그래프이다. 자세한 내용은 “Vibrations in Structures Induced by Man and Machines”에 잘 기술되어 있다. 이러한 과정의 결과로, Fig. 8과 같은 보행응답을 얻었다.

$$F_p(t) = G + \Delta G_1 \sin(2\pi f_s t) + \Delta G_2 \sin(4\pi f_s t - \Phi_2) + \Delta G_3 \sin(6\pi f_s t - \Phi_3) \quad (1)$$

여기서

G : Weight of the person

ΔG_1 : Load component(amplitude) of 1st harmonic

ΔG_2 : Load component(amplitude) of 2st harmonic

ΔG_3 : Load component(amplitude) of 3st harmonic

$\Delta G_1 : f_s = 2.0 \text{ Hz}$ 에서 0.4G, $f_s = 2.4 \text{ Hz}$ 에서 0.5 G

$\Delta G_2, \Delta G_3 : 0.1 \text{ G}$, f_s : Pacing rate.

Φ_2, Φ_3 : Phase angle, $F_p(t)$: Dynamic load

뒷꿈치 충격하중은 Fig. 6의 A위치에 하중을 가진

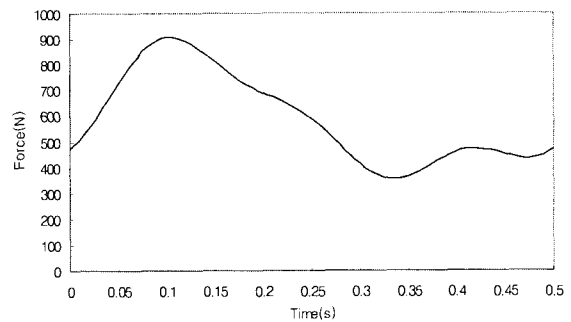


Fig. 7 Loading function of walking by IABSE⁽¹⁰⁾

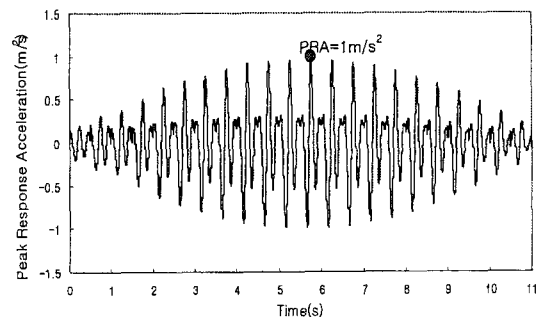


Fig. 8 Signal form of walking vibration ($f = 4.5$, $\xi = 0.02$)

하였다. 시간이력 해석시 적용된 하중 함수는 Lenzen과 Murray(1969)가 제안한⁽¹¹⁾ 뒷꿈치 충격하중 함수이고, Fig. 9는 뒷꿈치 충격하중에 적용된 하중 함수 그래프이다.

시간이력 해석을 통해 얻은 뒷꿈치 충격진동 응답은 Fig. 10과 같다. 실험시 뒷꿈치 충격진동과 같은 경우는 진동대에 쇼크를 발생시킬 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 기준문헌에 나타난 Wiss & Parmelee(1974)의 신호와⁽³⁾ 마찬가지로 최대 0.3초 정도의 진동을 신호 초기부분에 추가 시켰다.

이는 진동대의 쇼크 발생을 방지 할 뿐 아니라 피험자에게보다 정확하게 진동을 느끼게 하는데 그 목적이 있다.

위에서 얻은 두 가지의 신호, 즉 보행진동과 뒷꿈치 충격진동 신호는 모두 1차 모드만을 고려하였다.

4. 인지실험 결과

본 연구에서는 20명의 남녀를 대상으로 인지실험이 수행되었고, 4단계의 인지수준('인지하지 못함', '약하

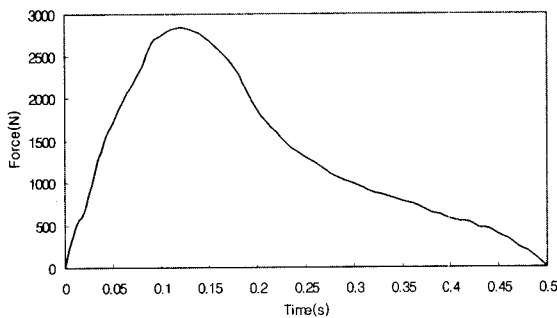


Fig. 9 Loading function of heel drop by Lenzen & Murray⁽¹¹⁾

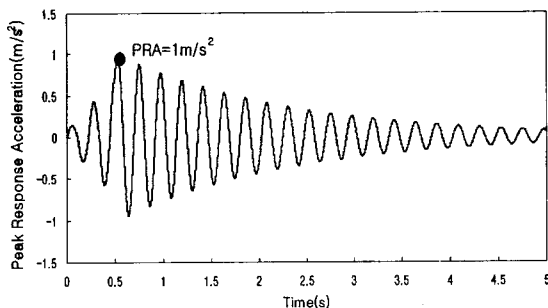


Fig. 10 Signal form of heel drop vibration ($f = 4.5$, $\xi = 0.02$)

게 인지', '분명하게 인지', '강하게 인지')과 3가지의 감쇠비(0.02, 0.05, 0.1)로 뒷꿈치 충격진동과 보행진동에 대한 인지실험 결과를 나타내었다. Fig. 11과 Fig. 12는 감쇠비 0.02인 경우 '분명하게 인지'수준에 대한 인지분포 결과를 나타내고 있다. 이 인지분포 결과는 각 인지수준에 따라 측정된 인지 분포에 회귀 분석을 수행한 결과이다. 회귀 분석은 수학적 모델 중 로그 좌표계에 직선을 나타낼 수 있는 가장 적합한 식 (2)를 통해 수행하였다.

$$\log A = \log C_1 + C_2 \log F \quad (2)$$

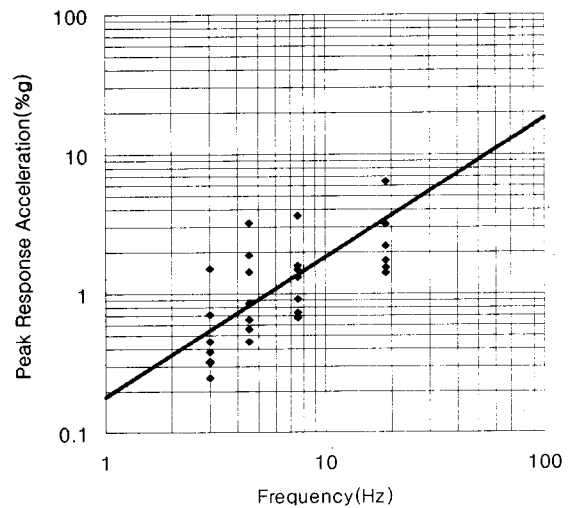


Fig. 11 Number of responses by heel drop - Distinctly perceptible ($\xi = 0.02$)

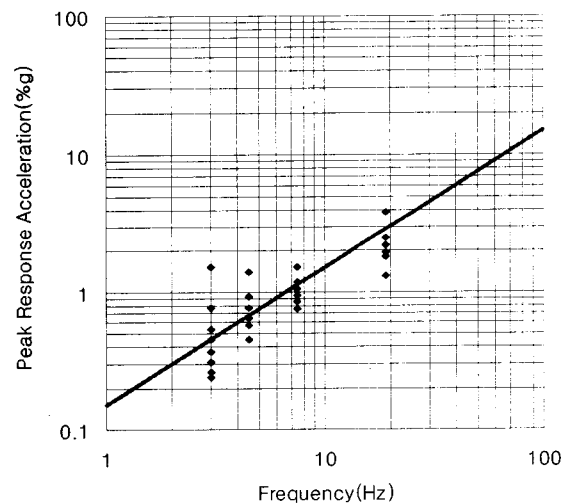


Fig. 12 Number of responses by walking - Distinctly perceptible ($\xi = 0.02$)

여기서, A는 최대가속도(peak acceleration), F는 진동수(frequency)이며, C_1 , C_2 는 회귀 계수이다.

보행진동과 뒷꿈치 충격진동에 의한 인지결과는 Fig. 13과 같다. Fig. 13은 진동수(Hz)에 따른 최대 응답가속도(%g)를 나타낸 것이다.(감쇠비 0.02인 경우)

뒷꿈치 충격진동에 대한 보행진동에 있어서 '강하게 인지' 수준은 30%의 차이로 가장 큰 차이를 보이며, '분명하게 인지' 수준과 '약하게 인지' 수준은 각각 16.7%와 21.8%의 차이를 보이고 있다. 감쇠비 별로 차이를 보면 감쇠비 0.05의 경우는 21%의 평균적인 차이를 보이고, 감쇠비 0.1의 경우에는 20%의

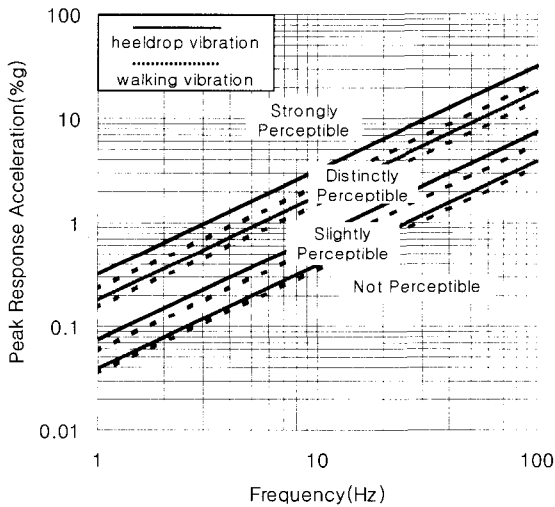


Fig. 13 Comparison of walking and heel drop vibration ($\xi = 0.02$)

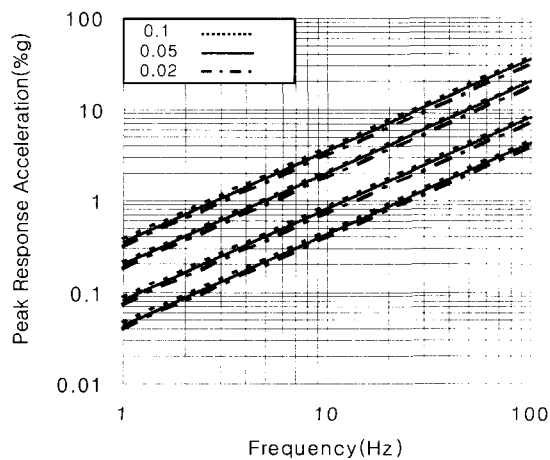


Fig. 14 Comparison of damping ratio by heel drop vibration

차이를 보인다. 인지수준에 따라 그 차이가 조금씩 다르지만, 전체적으로 20~25%의 차이가 나타나는 결과를 얻을 수 있었다.

본 연구에서는 추가적으로 인지분포 결과를 감쇠비에 따라 분류하여 인지수준별 감쇠의 영향을 알아보았다. Fig. 14 와 Fig. 15는 뒷꿈치 충격진동과 보행진동으로 구분되며, 4가지의 인지 수준에 대해서 0.1, 0.05, 0.02의 감쇠비 영향을 나타내고 있다. 감쇠비에 따른 인지의 차이는 감쇠비 0.05를 기준으로 ± 0.005 (%g)정도의 차이를 보이고 있다. 본 연구결과에서는 감쇠비에 따른 인지의 영향이 매우 적은 것으로 나타났다.

인지의 주요 매개변수는 3.1절에서 언급한 바와 같이 진동수(frequency), 감쇠비(damping ratio), 최대가속도(peak acceleration)로 나타내어진다. 따라서, 3가지 변수들의 관계를 파악하기 위해 Fig. 13의 결과를 가지고 회귀 분석을 수행하였다. 식 (3)은 3가지의 중요 매개변수에 대한 영역으로 나타내는 관계식이다.

$$\log \frac{A}{F} = \log C_3 + C_4 \log D \quad (3)$$

여기서, A는 최대 가속도(peak acceleration), F는 진동수(frequency)이며, D는 감쇠비(damping ratio), C_3 , C_4 는 회귀 계수이다. Fig. 16은 식 (3)의 관계식을 통해 A/F와 D의 영역에 인지수준을 나타내는 과정이다. 인지분포의 경향을 나타내기 위해 보편적으로

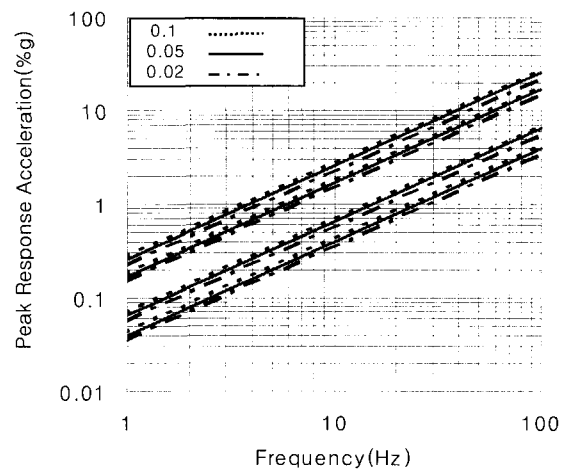


Fig. 15 Comparison of damping ratio by walking vibration

사용되는 평균값을 이용하여 회귀분석을 수행하였다. 식 (3)은 진동수와 최대 가속도 영역으로 나타나 있는 그래프를 Fig. 17과 같이 A/F-D 영역으로 바꾸어 주며, 이를 통해 변수들의 관계를 파악할 수 있다. 회귀분석 과정을 통해 표현된 Fig. 17은 가진 진동에 대한 각각의 인지수준으로 실선은 뒷꿈치 충격진동이고, 점선은 보행진동을 나타내고 있다.

감쇠비에 따른 A/F 값을 비교해 보면 '강하게 인지' 수준에서 23%의 차이를 보이고, '분명히 인지'와 '약하게 인지' 수준은 10%와 15%의 인지 차이를 보인다. 보행진동이 동일한 인지 수준에 대해 뒷꿈치 충격진동 응답보다 낮은 값을 나타내고 있다. 즉, 보

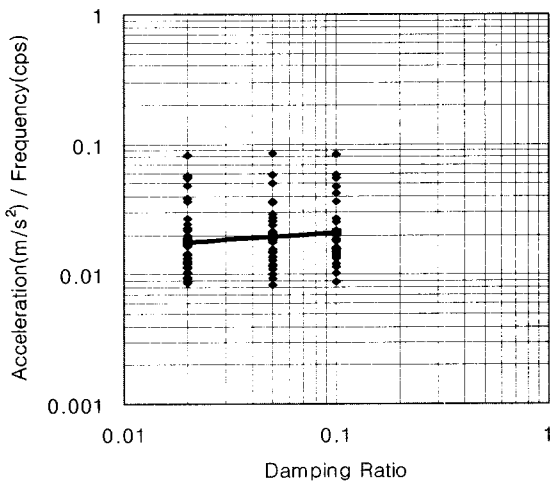


Fig. 16 Distinctly perceptible rating

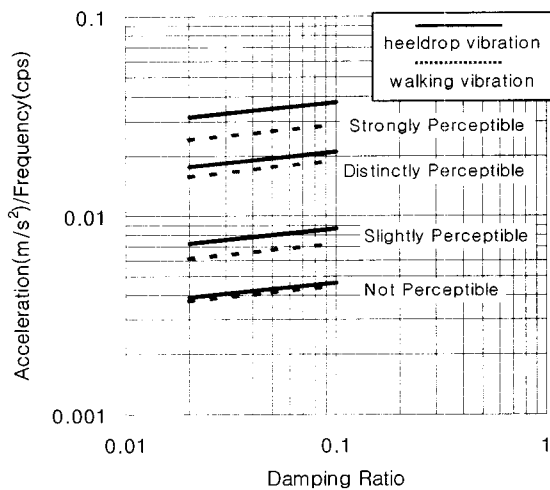


Fig. 17 Comparison of walking and heel drop vibration

행진동에 대한 응답이 보다 민감함을 보여준다.

감쇠의 영향을 나타내는 인지 곡선의 기울기는 전체적으로 0.16~0.2 값이 나타나고 있다. 감쇠비에 따른 차이가 나타났지만, Fig. 14와 Fig. 15를 통해 이러한 차이가 진동인지에 미치는 영향은 크지 않다는 것을 알 수 있다.

보행진동과 뒷꿈치 충격진동에서 나타난 차이의 원인은 중첩의 영향과 피험자에게 전달되는 진동에너지의 차이에 의한 것으로 생각되어진다. 뒷꿈치 충격진동은 최대 가속도가 발생한 다음 감쇠에 따라 가속도가 줄어드는 모습을 보이고 있다. 그러나 보행진동의 경우 최대 가속도가 발생한 후에도 중첩에 의해 유사한 크기의 가속도 응답이 발생된다. 또한 신호의 시간은 최대가속도의 크기, 감쇠의 영향, 하중종류 등에 따라 달라지고 있기 때문에 Fig. 8과 Fig. 10과 같은 신호의 형태를 보인다. 보행진동과 뒷꿈치 충격진동은 최대응답가속도와 1차 진동수가 동일하더라도 피험자에게 전달되는 진동의 시간이 서로 다르게 되고, 이러한 시간의 차이는 피험자에게 전달되는 진동에너지의 차이를 발생시킨다. 이러한 인지 실험결과는 가진 하중의 특성에 따라 사람의 인지가 다르게 나타나는 것을 보여주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 인지 실험 결과를 통해 보행진동과 뒷꿈치 충격진동에 대한 인지의 차이와 인지에 대한 감쇠의 영향을 알아보았다.

(1) 본 연구 결과 보행진동과 뒷꿈치 충격진동은 인지수준에 차이를 나타내었다. '강하게 인지' 수준은 30%이상의 차이를 보이며, '분명히 인지', '약하게 인지' 수준은 각각 15%, 20%이상의 차이를 보이고 있다. 이는 뒷꿈치 충격진동을 사용하여 나타낸 기존연구에 보행의 영향이 반영되어야 함을 보여준다.

(2) 본 실험에서는 감쇠비에 따라 인지수준에 관계 없이 0.005(%g)의 차이를 보인다. 또한 A/F-D영역의 그래프 상에서 감쇠비의 영향을 나타내는 직선의 기울기가 0.16~0.2이다. 이는 가진 진동신호에서 반영된 감쇠의 영향이 피험자에게 크게 나타나지 않았음을 알 수 있다. 따라서, 현행 바닥의 감쇠비 범위에서는 감쇠비가 진동인지에 미치는 영향이 크지 않을 것으로 판단된다.

(3) 현재 수직진동에 대한 사용성 평가에 반영되는 기준은 최대 가속도에 대한 제한으로 이루어져 있다. 그러나 본 연구에 따르면 동일한 가속도와 진동수를 나타내는 진동에 대해서 하중종류에 따라 인지의 응답이 다르게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 이에 대한 연구가 보완되어 현행 최대 가속도에 대한 기준제한에 고려되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 2001년도 건설기술 연구개발 사업연구비 지원에 의한 결과임.

참 고 문 헌

- (1) Reiher, H. and Meister, F. J., 1931, "Sensitivity of Humans to Vibration," *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, Vol. 2, No. 11, pp. 381.
- (2) Allen, D. E., 1974, "Vibrational Behavior of Long Span Floor Slabs," *Canadian J. of Civil Engineering*, Vol. 108, No. 1, pp. 108~115.
- (3) Wiss, J. F. and Parmelee, R. A., 1974, "Human Perception of Transient Vibrations," *Journal of the Structural Division*, Vol. 100, No. Apr, ASCE, pp773~787.
- (4) 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.
- (5) Murray, T. M., 1981, "Acceptability Criterion for Occupant Induced Floor Vibration," *Engineering Journal*, 18(2), pp. 62~70.
- (6) CSA, 1989, *Canadian Standard CAN3-S16.1-M89 : Steel Structures for Buildings - Limits States Design : Appendix G, Guide for Floor Vibration*, Rexdale, Ontario.
- (7) AISC/CISC, 1997, "Steel Design Guide Series 11, Floor Vibration due to Human Activity," American Institute of Steel Construction, Chicago
- (8) Allen, D. E. and Murray, T. M., 1993, "Design Criterion for Vibrations Due to Walking," *Engineering Journal*, 4th Qtr, AISC, pp. 117~129.
- (9) 마이더스 아이티, 2000, "복합구조 아파트 바닥 판의 사용성 검토 절차."
- (10) Bachman, H. and Amman, W., 1987, "Vibration in Structures Induced by Man and Machine," *Structural Engineering Document 3*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich.
- (11) Foschi, R. O., Neumann, G. A., Yao, F. and Folz, B., 1995, "Floor Vibration Due to Occupants and Reliability-Based Design Guidelines," *Canadian J. of Civil Engineering*, Vol. 22, pp. 471~479.