

## 기존 아파트 바닥의 수직진동 성능 평가

한상환<sup>1)\*</sup> · 이민정<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 한양대학교 건축공학부

(2003년 10월 10일 원고접수, 2004년 12월 10일 심사완료)

### Evaluation of Floor Vibration Existing in Apartment Building

Sang Whan Han<sup>1)\*</sup> and Min Jung Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea

(Received October 10, 2003, Accepted, December 10, 2003)

#### ABSTRACT

In recent years building floors become larger and more spacious due to the development of new design methods and high strength and light weight materials. However, such long span floor systems may provide smaller amount of damping and have a longer period so that they may be more vulnerable to the floor vertical vibration. In Korea when floors are to be checked against the floor vertical vibration, the provisions developed in foreign countries have been used. However these guidelines have been developed based on human perception, which may vary from country to country. Also, Korea have particular floor systems, such as flat plate floor system of apartment building. This study attempts to evaluate the vibration performance of the floors in typical apartment buildings. Two different floors with the area of 28m<sup>2</sup> and 32m<sup>2</sup> were investigated. The criteria provided by ATC-1(1999), AISC-11(1997), AIJ(1991) and the local criteria developed in the previous study(Han, 2003) was used to check the acceptability of the floor vertical vibration.

**Keywords :** floor vertical vibration, walking, heel drop, peak acceleration, human perception level

#### 1. 서 론

최근의 건축물은 설계기술의 발달, 고강도 및 경량 재료의 개발 등으로 인하여 바닥 구조가 장스팬화 되고 건물의 중량이 감소하고 있다. 이로 인하여 구조물의 진동수(natural frequency)와 감쇠비(damping ratio)가 감소한다. 이러한 현상은 바닥구조에서 동적하중에 대하여 수직진동 문제를 발생시킬 수 있다.

그러나 지금까지 바닥 진동에 관한 사용성 기준이 국내에는 개발되지 않았다. 수직진동을 유발하는 구조물의 수평 부재의 경우 정적 처짐에 대한 제한치와 응력검토(콘크리트구조설계기준(2000)<sup>1)</sup>, ACI 318-02(2002)<sup>2)</sup>)에 의해 설계되므로 구조 안전성에는 문제가 없으나, 진동으로 인한 사용자들의 불편감 혹은 불안감을 발생시킬 수 있다. 우리나라에서는 수직진동 평가를 위해 해외 기준들을 사용해 왔다. 그러나 해외 기준들은 바닥판 실험과 그 지역 사람들의 감성(human perception)을 고려한 인지곡선(perception curve)을 통해 제안된 것으로 우리나라 사람

의 감성을 고려하지 못하는 국외 기준들을 그대로 사용하기는 힘들다. 특히 우리나라의 경우 해외에서 볼 수 없는 아파트 구조물이나 주상복합 건물 등과 같은 특이한 구조 형식의 건물들이 있다. 이와 같은 구조 형식은 진동 특성에 있어서도 일반적인 구조물과는 다르다고 볼 수 있다<sup>3)</sup>. 그러므로 우리나라의 특성있는 구조 형식의 슬래브에 대한 동특성 평가와 함께 우리나라 사람의 감성을 고려한 인지 수준에 대한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 우리나라의 가장 일반적인 벽식 철근콘크리트 아파트 바닥에 대하여 수직진동 성능 평가를 수행하였다. 뒤꿈치 충격하중(heel drop)과 보행하중(walking)을 가진원으로 한 현장 측정으로 대상 바닥판의 동특성을 파악하고 최대가속도를 측정하여 그 결과를 해외 기준 및 선행 연구에서 제안된 인지곡선(2003)<sup>3,4)</sup>과 비교하였다. 바닥 수직진동 성능 평가에 사용된 해외 기준은 ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 기준과 AISC-11(1997)<sup>6)</sup> 기준, 그리고 일본건축학회 기준(AIJ(1991))<sup>7)</sup>이다.

ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 기준과 AISC-11(1997)<sup>6)</sup> 기준에서는 보행하중에 의한 최대가속도비 제한과 정적 처짐을 이용한 최소강성을 이용하여 평가하고 있다. 최소강성 평가를 위하여 바닥의 유한요소 해석을 수행하였다.

\* Corresponding author

Tel : 02-2290-1715 Fax : 2291-1716

E-mail : swhan@hanyang.ac.kr

## 2. 수직진동 평가 기준

우리나라에는 아직 수직진동에 대한 기준이 마련되어 있지 않으므로 본 연구에서는 수직진동 평가 기준으로 ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 기준과 AISC-11(1997)<sup>6)</sup> 기준, 그리고 일본건축학회 기준(1991)<sup>7)</sup>을 사용하였다. 그런데 이들 기준은 우리나라 사람의 감성을 반영하지 못하므로 주거환경이 다른 우리나라 주거 건물에 적용하는데 한계가 있다. 그러므로 우리나라 주거 건물 바닥의 수직진동 성능 평가에 우리나라 사람의 감성을 반영하기 위하여 선행 연구에서 제안된 인지곡선(2003)<sup>3,4)</sup>을 함께 사용하였다.

### 2.1 ATC Design Guide 1 and AISC Design Guide Series 11

ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 기준은 ISO 인지곡선(ISO Standard 2631-2(1989))을 기본으로 하여 고유진동수와 가속도비에 대한 관계를 파악하고 보행하중에 대해 바닥판의 공진을 피하도록 최대가속도를 제한하고 있다. 최대가속도는 건물의 용도별로 나누어 ISO 기본곡선의 배수로 제안하고 있는데 4Hz와 8Hz 사이에서 가장 낮은 제한값을 가지고 있으며, 이 값은 주거 건물의 경우 0.5%g(gravity)에 해당한다. 8Hz 이상의 고유진동수를 가지는 경우 제한치가 상승하여 고주파의 경우 진동에 대한 높은 가속도를 허용한다. 이러한 바닥 진동에 대한 가속도 제한값은 AISC-11(1997)<sup>6)</sup> 기준과 동일하다.

또한 ATC-1(1999)<sup>5)</sup>에서는 바닥진동에 대하여 공진, 처짐, 충격진동의 세 가지 모델을 제시하고 바닥의 고유진동수와 구조형식에 따라 적용하도록 제안되어 있는데, 이는 AISC-11(1997)<sup>6)</sup> 기준에서 바닥 고유진동수별 평가 방법과 유사하다. ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 기준과 AISC-11(1997)<sup>6)</sup> 기준에 따르면 보행하중에 대하여 바닥의 고유진동수가 8Hz-15Hz인 경우에는 보행하중에 의한 최대가속도 응답이 제한값을 넘지 않도록 설계하여야 한다. 이때, 가속도 제한값을 고유진동수 증가에 따라 증가시키지 않고 4~8Hz의 제한값을 사용한다. 또한 바닥의 고유진동수가 10Hz 이상인 경우 최소강성을 동시에 검토하도록 하고 있다. 최소강성은 바닥 중앙에 작용하는 1KN의 집중하중에 대해서 정적 처짐이 1mm 이하가 되도록 제안되어 있다.

### 2.2 일본건축학회 기준

일본건축학회 기준(1991)<sup>7)</sup>은 여러 기준을 토대로 하중 종류와 건물용도를 구분하여 최대가속도 제한값을 여섯 단계로 제안하고 있다. 또한 사용성의 등급을 나누어 제한값의 상한치와 하한치를 적용할 수 있도록 하고 있다. 하중 종류, 건물용도 및 사용성 등급별 적용 기준을

Table 1 Criteria according to force type and occupancy

Force type	Type 1*			Type 2†	Type 3‡
	Rank I	Rank II	Rank III	Rank III	Rank III
Residence	V-0.75	V-1.5	V-3	V-5	V-10
Conference	V-1.5	V-3	V-5	V-10	V-30
Office	V-3	V-5	V-5	V-10	V-30

\* Type 1 : floors exposed to continuous or intermittently repeated vibration

† Type 2 : floors exposed to impulse vibration and having low damping ratio ( $\xi \leq 3\%$ )

‡ Type 3 : floors exposed to impulse vibration and having high damping ratio ( $\xi = 3 \sim 6\%$ )

Table 1에 나타내었다. 여기서 Rank는 사용성의 등급을 나타내는데, 표준적인 판단의 근거는 RankII에 나타나고, RankI은 거주 성능 상이 범위를 밀도는 것이 좀 더 바람직한 레벨이며, RankIII은 그 범위를 상회하지 않도록 해야 하는 레벨을 나타낸다. 본 연구에서는 RankII를 평가 기준 레벨로 사용하며, 보행하중을 하중 종류 Type 1에, 뒤꿈치 충격하중을 바닥의 감쇠비에 따라 하중 종류 Type 2 혹은 Type 3에 적용하였다.

### 2.3 인지실험으로 제안된 인지곡선

선행 연구(2003)<sup>3,4)</sup>에서는 우리나라 사람의 수직진동에 대한 인지 수준을 파악하기 위하여 진동대를 이용한 인지 실험이 수행된 바 있다. 인지실험은 서로 다른 배경의 성인 남녀 20명을 대상으로 수직진동에 대한 우리나라 사람의 인지 수준을 파악하기 위한 것이다. 피험자에게 가해지는 진동은 뒤꿈치 충격하중과 보행하중에 대한 바닥의 응답과 같은 것이다. 충격하중과 보행하중에 대하여 각각 4개 진동수, 9개 최대가속도, 3개 감쇠비의 조합으로 형성된 총 108개 진동이 가해졌다. 수직진동에 대한 인지 수준은 주변 환경의 영향을 받으므로 진동대 주변을 주거환경과 유사하도록 하였다. 또한 피험자는 진동 인지에 가장 민감한 누운 자세와 가장 민감하지 않은 선 자세의 중간인 앉은 자세로 실험하였다.

실험 결과는 회귀분석을 통하여 인지곡선으로 나타내었다. 인지 수준은 '인지하지 못함(not perceptible)', '약하게 인지(slightly perceptible)', '분명하게 인지(distinctly perceptible)', '강하게 인지(strongly perceptible)'의 4단계로 구분하였다.

## 3. 진동측정 및 방법

### 3.1 평가절차

수직진동 성능 평가는 현장 측정 및 유한요소 해석 결과와 기준의 비교로 이루어진다. 일본건축학회 기준(1991)

에 의하면 바닥 수직진동 성능 평가는 바닥응답과형에서 얻어진 진동수, 진폭, 감쇠비로 이루어진다. 뒤꿈치 충격하중과 보행하중을 이용한 현장 측정으로 바닥판의 감쇠비와 진동수 등 바닥판의 동특성 및 최대가속도를 측정하였다. 또한 ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 및 AISC-11(1997)<sup>6)</sup> 기준에 따른 바닥 강성 평가는 유한요소 해석을 통하여 이루어졌다. Fig. 1은 평가 과정을 도식화한 것이다.

### 3.2 측정 장비 및 방법

바닥판 수직진동 측정에 사용된 기기는 EDX 1500A이다. 이 장비는 증폭기와 신호 분석기, 기록장치가 내장되어 있는 시스템이다. 센서를 통해 들어온 신호는 동적 신호 분석기를 통해 측정 데이터를 얻을 수 있다. EDX-1500A의 센서로 사용하고 있는 서브 가속도계는 항상 일정량의 전압이 유지되고 있어 수평, 수직진동 측정에 용이하다. 기존 연구에서 알려진 것과 같이 바닥판의 고유진동수는 처짐과 밀접한 관계가 있으므로 Fig. 2에서와 같이 처짐이 가장 많이 발생하는 측정 바닥판의 중앙부에 센서를 설치하였다.<sup>6)</sup>

가진원으로는 뒤꿈치 충격하중과 보행하중을 사용하였다. 각 하중에 대한 바닥판의 응답을 이용하여 수직진동 평가에 필요한 고유진동수, 감쇠비 및 각 하중에 대한 최대가속도값을 구할 수 있다. 각 하중의 가력 방법은 다음과 같다.

뒤꿈치 충격하중은 Fig. 3에서와 같이 70kgf 정도의 몸무게를 가진 사람이 바닥판의 중앙부 센서에서 50cm정도 떨어진 곳에서 5cm의 높이만큼 뒤꿈치를 든 다음 무릎은

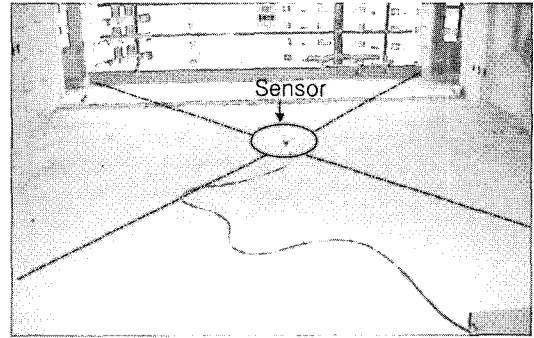


Fig. 2 Sensor setting

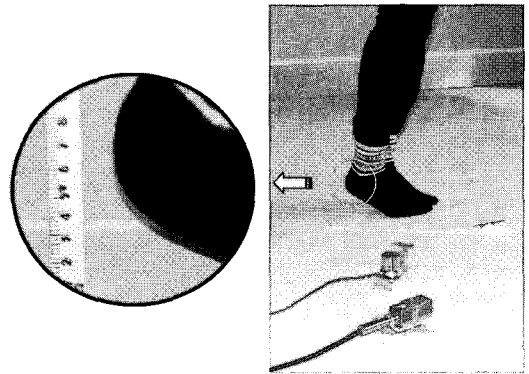


Fig. 3 Heel drop loading

편 상태로 체중을 뒤꿈치로 옮기면서 자연스럽게 자유 낙하시켜 바닥에 충격을 주게 된다<sup>8-10)</sup>. 보행하중의 경우 보행자의 몸무게와 보행속도 등이 보행하중의 특성을 결정하는 중요한 변수가 된다. 보행하중을 가진원으로 고려한 ATC-1(1999)<sup>6)</sup> 기준 및 AISC-11 (1997)<sup>6)</sup> 기준에서는 바닥 설계 시 보행자의 체중을 700N으로 하여 진동에 대해 고려하도록 하고 있다. 따라서 보행하중은 70kgf의 몸무게를 가진 사람이 메트로놈을 이용하여 2Hz의 일정한 보조로 중앙부에 설치된 센서를 바라보며 대각선으로 걸어가는 방식으로 가력하였다.

또한 뒤꿈치 충격하중과 보행하중 가력 시 보행자의 몸무게가 70kgf가 아닌 경우 측정된 최대가속도를 다음 식(1)과 같이 보정하였다.

$$a_b = a_{p_0} \times \frac{70}{\text{보행자 몸무게}} \quad (1)$$

뒤꿈치 충격하중과 보행하중은 신발을 착용한 상태로 가력할 경우, 신발이 감쇠의 역할을 하게 되고, 신발의 종류에 따라 그 값이 변하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 현장 측정 시 신발을 착용하지 않은 상태로 뒤꿈치 충격하중 및 보행하중을 가력하였다.

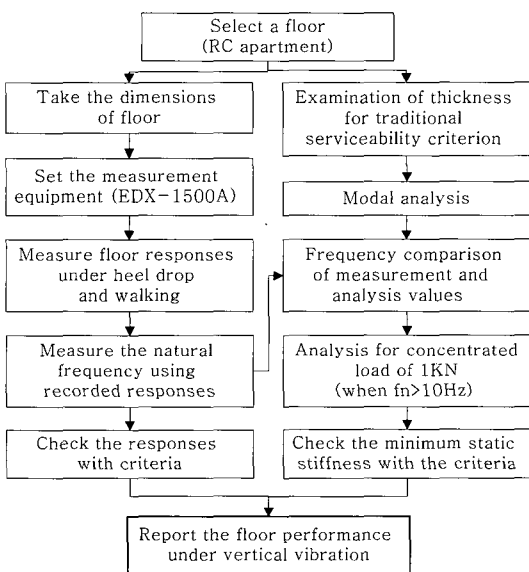


Fig. 1 Flow for evaluating performance of floor vertical vibration

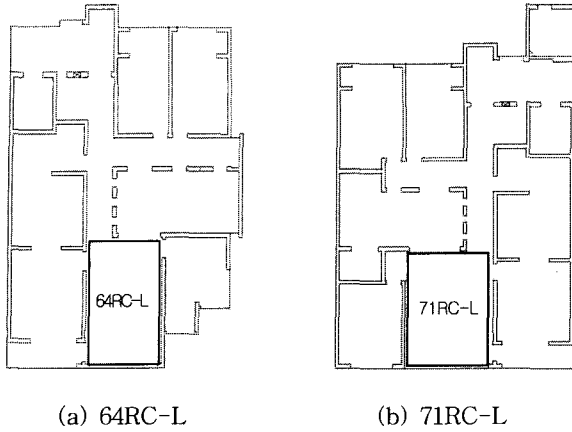


Fig. 4 Floor plans

#### 4. 기존 아파트 바닥의 수직진동 실험

##### 4.1 실험 대상 건물의 개요

본 연구에서는 우리나라 아파트의 바닥을 측정 대상으로 하였다. 서울에 위치한 아파트 중 64평형과 71평형의 두 세대에 대해서 바닥 수직진동을 측정하였다. Fig. 4에 대상 아파트의 평면을 나타내었다. 스패인이 클수록 고유진동수가 감소하여 진동에 불리한 것으로 예상되므로 아파트에서 가장 큰 스패인을 가지는 거실 바닥을 측정 대상으로 하였다. 측정 대상 바닥판의 크기는 64평형의 경우 4.6m×6.15m(28m<sup>2</sup>) 71평형의 경우 5.2m×6.15m(32m<sup>2</sup>)이다. 측정 당시 64평형은 바닥과 내력벽 구조체의 시공 외에 천장마감 된 상태이고, 71평형은 천장마감 및 거실 외부 창이 시공된 상태였다. Table 2에 측정 아파트의 일반 사항을 나타내었다. 측정대상 바닥판은 64평형의 거실을 64RC-L, 71평형의 거실을 71RC-L로 표기하였다.

##### 4.2 바닥두께 검토

콘크리트구조설계 기준(2000)<sup>1)</sup> 및 ACI 318-02(2002)<sup>2)</sup> 기준에서는 철근콘크리트 구조의 사용성을 고려하기 위해 보 및 바닥구조의 최대 처짐을 제한하고 있다. 이에 대하여 처짐을 계산하지 않는 경우 최소두께를 제시하고, 처짐을 계산할 경우 계산된 처짐 값이 최대처짐 한계보다 작을 경우 제시된 최소두께 이하의 값을 허용하고 있다.

수직진동에 대한 사용성 검토에 앞서 측정 대상 바닥판의 두께와 기준의 최소두께를 비교하여 현행 기준의 정적 처짐에 대한 사용성 검토를 수행하였다. 아파트는 내력벽 식으로, 강성비  $\alpha_m$ 이 2.0 이상인 경우로 볼 수 있다. 기준에서는 2방향 슬래브에서 처짐을 계산하지 않는 경우 최소 두께는 강성비  $\alpha_m$ 이 2.0을 초과하는 경우 다음 식 (2) 이상이고, 최소한 9cm 이상이 되도록 하고 있다.

$$h \geq \frac{l_n(800 + \frac{f_y}{14})}{36000 + 9000\beta} \quad (2)$$

또한 불연속단을 갖는 슬래브에 대해서는 최소두께를 적어도 10% 이상 증대시키도록 하고 있다. 기준에 따라 계산된 대상 바닥판의 최소 두께는 다음 Table 3과 같다.

#### 4.3 측정 결과 및 동특성 평가

뒤꿈치 충격하중과 보행하중에 대한 바닥판의 응답을 이용하여 대상 바닥판의 감쇠비와 고유진동수를 구할 수 있다. Fig. 5는 뒤꿈치 충격에 대한 바닥판의 가속도 시간 이력 응답 그래프로 바닥판의 감쇠 특성을 볼 수 있다. 감쇠비는 Fig. 5의 그래프와 식 (3)에 의하여 결정된다.

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{A_i}{A_{i+j}} \quad (3)$$

위 식은  $j$ 개의 감쇠비 값에 대한 평균을 의미하는 것으로,  $A_i$ 는 뒤꿈치 충격하중 응답의  $i$ 번째 진폭,  $A_{i+j}$ 는 뒤꿈치 충격하중 응답의  $i+j$ 번째 진폭이다. 본 연구에서는  $i=1, j=10$ 으로 하여, 초기 10개의 평균값으로 바닥판의 감쇠비를 구하였다<sup>1)</sup>.

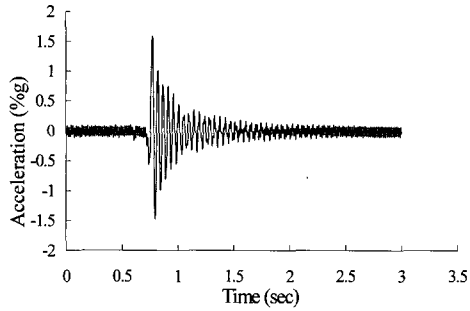
Fig. 6은 바닥판의 보행하중에 대한 시간이력 응답 그래프이다. 보행하중에 대한 바닥판의 응답은 뒤꿈치 충격하중에 대한 응답과 같은 형태의 응답이 중첩되어 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 2 Characteristics of the subjects of the measurement

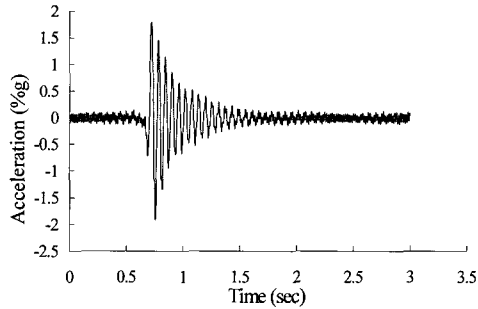
Classification	64RC-L	71RC-L
Structural details	RC bearing wall system and flat plate slab	
Slab thickness	15 cm	15 cm
Size of living room	4.6 m × 6.15 m (28 m <sup>2</sup> )	5.2 m × 6.15 m (32 m <sup>2</sup> )
Height of the story	2.8 m	2.8 m
Construction conditions	Ceiling	Ceiling and outer window

Table 3 Thickness comparison

Classification	64RC-L	71RC-L
Slab thickness	150 (mm)	150 (mm)
$h = \frac{l_n(800 + \frac{f_y}{14})}{36000 + 9000\beta}$	144 (mm)	148 (mm)
10% increase	158 (mm)	163 (mm)

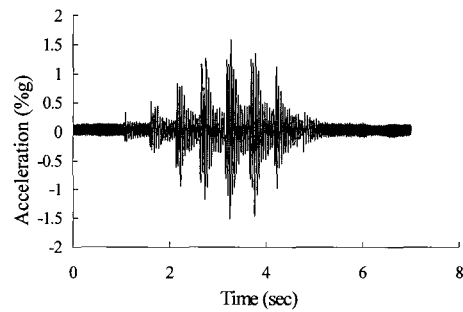


(a) Floor response for heel drop-64RC-L

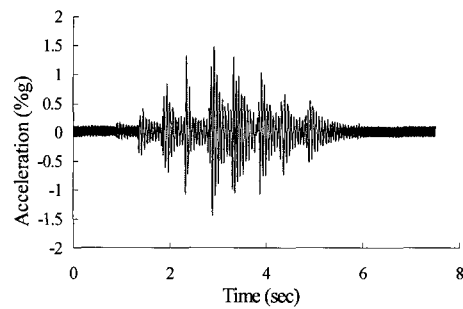


(b) Floor response for heel drop-71RC-L

Fig. 5 Floor responses for heel drop



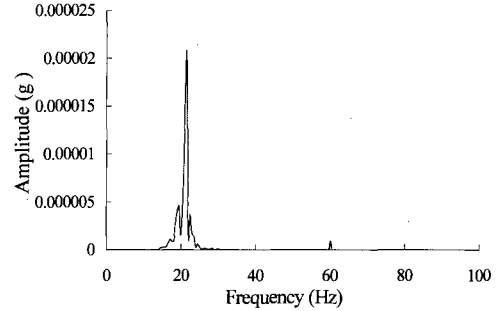
(a) Floor response for walking-64RC-L



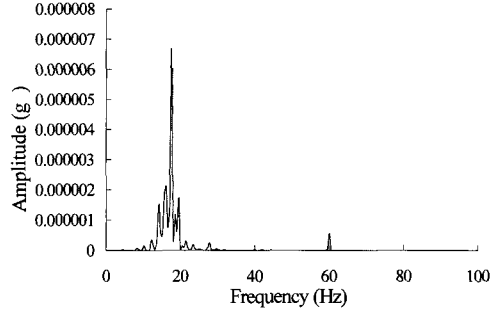
(b) Floor response for walking-71RC-L

Fig. 6 Floor responses for walking

바닥판 고유진동수는 뒤꿈치 충격하중과 보행하중에 대한 가속도 시간이력응답을 FFT(Fast Fourier Transfer)를 이용하여 구할 수 있다. Fig. 7은 이들 시간이력 응답 함수를 FFT변환하여 진동수 영역으로 나타낸 그래프이다.



(a) Frequency domain response-64RC-L



(b) Frequency domain response-71RC-L

Fig. 7 Frequency domain responses obtained from FFT

Table 4 Dynamic properties and maximum accelerations

Classification	64RC-L	71RC-L
$f_n$ (Hz)	21.5	17.6
Damping ratio (%)	3.3	3.7
$a_p$ (%g)-walking	1.69	1.72
$a_p$ (%g)-heel drop	2.33	2.44

Table 4에서 이상의 결과를 통해 얻은 각 바닥판의 동특성 성분인 고유진동수와 감쇠비 및 각 하중에 대한 최대가속도값을 정리하였다. 각각의 값은 하나의 하중에 대하여 5회씩 측정하여 평균값을 사용한 것이다.

## 5. 대상 바닥의 진동성능 평가

### 5.1 ATC-1 및 AISC-11 기준에 의한 평가

ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 기준 및 AISC-11(1997)<sup>6)</sup> 기준은 설계시 보행하중에 의한 최대가속도를 제한하고 있는데, 이 제한값은 주거용 건물에 대해 0.5%g를 사용하도록 하고 있다.

Fig. 8은 ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 기준과 AISC-11(1997)<sup>6)</sup> 기준의 사무·주거 공간에 대한 그래프와 보행하중에 대한 대상 바닥판의 최대가속도 값을 비교한 것으로, 71평형과 64

평형의 대상 바닥판에 대하여 각각 71-W, 64-W로 표기하였다. 대상 바닥판 모두 8Hz 이상의 고유진동수를 가지고, 보행에 의한 최대가속도 값은 0.5%g보다 크며, 그래프의 제한값 보다도 큰 것을 알 수 있다.

### 5.2 일본건축학회 기준에 의한 평가

일본건축학회 기준(1991)<sup>7)</sup>은 보행하중의 경우 V-3, 뒤꿈치 충격하중은 V-10의 제한값과 비교하였다. 일본건축학회 기준에 의하면, 보행하중에 대한 최대가속도는 하중 중별 1에 대하여 RankⅢ 등급인 V-3를 넘지 않도록 하고, 뒤꿈치 충격하중에 대한 최대가속도는 바닥의 감쇠비가 3%보다 크므로 하중 중별 3에 대하여 RankⅢ 등급인 V-10을 넘지 않아야 한다. 아래 Fig. 9는 일본건축학회 기준(1991)<sup>7)</sup> 그래프와 대상 바닥판의 보행하중(71-W, 64-W)과 뒤꿈치 충격에 대한 최대가속도값(71-H, 64-H)을 나타낸 것으로, 뒤꿈치 충격하중에 대한 64평형 거실의 최대가속도 값(64-H)을 제외한 나머지 모두 기준 값을 만족하지 못하고 있음을 알 수 있다.

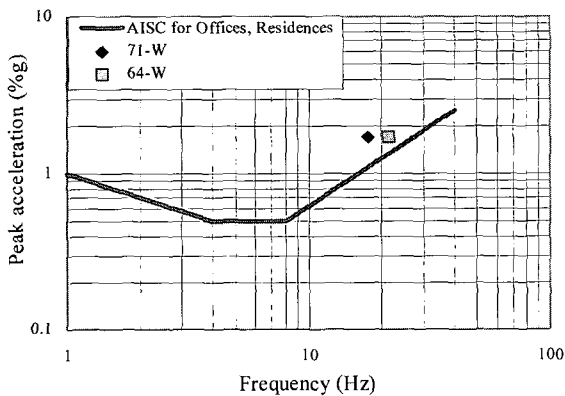


Fig. 8 Comparison of measured results with ATC-1(1999)<sup>5)</sup> and AISC-11(1997)<sup>6)</sup>

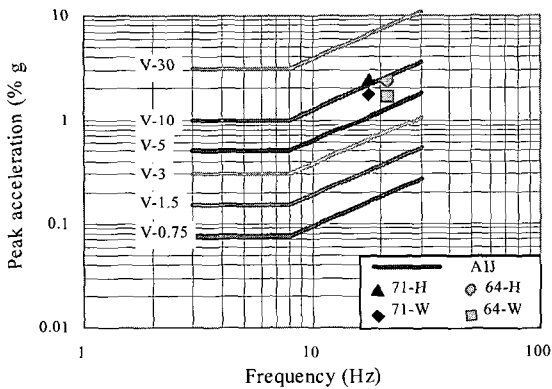


Fig. 9 Comparison of measured results with AIJ(1991)<sup>7)</sup>

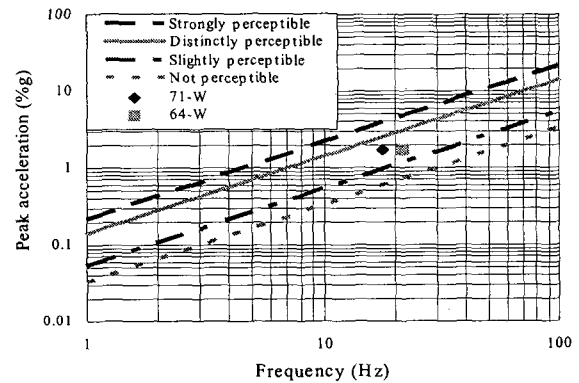
### 5.3 인지실험으로 제안된 인지곡선을 이용한 평가

Fig. 10(a)는 보행하중을 가진원으로 한 인지실험으로 제안된 인지곡선(2003)<sup>4)</sup>과 보행하중에 대한 가속도 응답의 최대값을 비교한 그래프이다. 대상 바닥판은 ‘약하게 인지’와 ‘분명하게 인지’ 수준 사이에 있음을 알 수 있다.

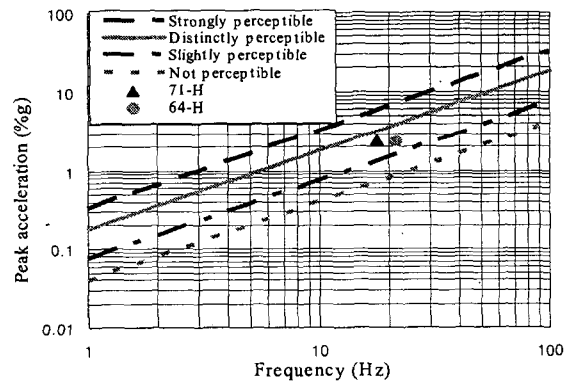
Fig. 10(b)는 뒤꿈치 충격하중에 대한 인지실험 결과(2003)<sup>3,4)</sup>와 뒤꿈치 충격하중에 대한 최대가속도값을 비교한 그래프이다. 측정 대상 바닥판 모두 ‘약하게 인지’와 ‘분명하게 인지’ 사이에 있으며, 71평형 거실의 경우 ‘분명하게 인지’에 가깝다. 인지실험의 ‘인지하지 못함’의 경우 실험범위의 하한치에 따라 그 값이 변할 수 있다. ‘인지하지 못함’ 정도를 인지의 하한선으로 본다면, 대상 바닥판에서 모두 진동을 인지하게 된다.

### 5.4 해석을 통한 고유진동수 및 강성의 평가

ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 및 AISC-11(1997)<sup>6)</sup> 기준을 보면 10Hz 이상의 바닥판의 경우 최소정적 처짐에 대한 추가 검토가



(a) Walking



(b) Heel drop

Fig. 10 Comparison of measured results with perception curve(2003)<sup>3,4)</sup>

이루어져야 한다. 대상 바닥판은 모두 고유진동수가 10 Hz 보다 크므로, 가속도 제한과 함께 정역학적 강성을 같이 고려해야 한다. 그러나 실제 건물에서 정적 처짐을 측정하는 것은 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 정적 처짐의 평가는 유한요소 해석을 통하여 수행하였다. 유한요소 해석을 위해 해석모델을 구축하여야 한다. 해석모델은 현장에서 바닥판을 측정하여 얻은 동특성 값들을 재현할 수 있도록 설정하였다. 또한 해석모델의 검증은 고유치 해석을 통하여 측정된 고유진동수와 비교를 통해 이루어졌다.

시간이력 해석을 위한 모델링에 있어서 슬래브와 내력 벽은 판 요소를 사용하고, 거실 주변의 연속된 슬래브가 거실 슬래브 강성에 영향을 미치므로 세대를 모두 모델링하였다. 슬래브를 구성하는 판 요소는 보행하중 적용을 용이하도록 요소 크기를 결정하였다. 바닥 진동해석에 사용된 프로그램은 범용 유한요소 프로그램인 MIDAS GEN<sup>12)</sup>을 이용하였다.

고유치 해석을 수행하기 위해 해석 대상 바닥판에 직접적인 영향을 주는 모드가 3~4개 포함되도록 10개 정도의 고유모드를 선택하여 해석하였고, 고유진동수는 모드의 형상을 보고 판단하였다<sup>12)</sup>.

본 연구의 대상 바닥판에서는 1차 모드가 지배적이었으며, Fig. 11에 고유치 해석 결과 1차 모드 결과를 나타내었다. Table 5는 고유치 해석을 통해 얻은 실측 건물의 고유 진동수이다.

해석된 모델링 바닥판과 측정된 바닥판의 고유 진동수 값이 10% 내에서 일치하는 것을 볼 수 있었으며, 이것으로 바닥판의 강성이 유사하게 반영되었다고 판단하였다. 따라서 최대 정적 처짐값을 얻기 위해 해석모델의 거실 부분 바닥판 중앙에 1KN의 정적 하중을 재하시켜 처짐값을 얻었다(Table 6).

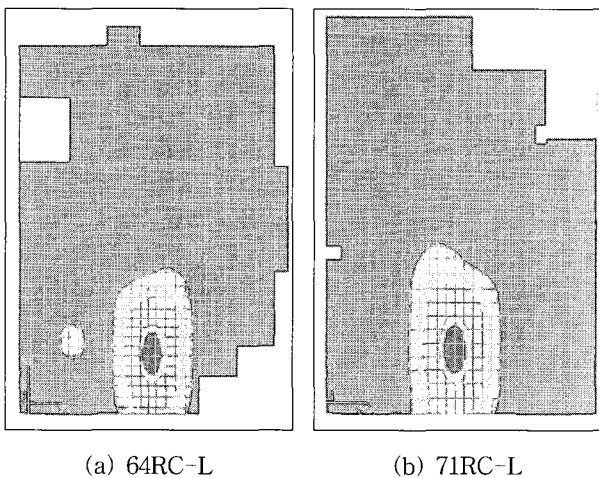


Fig. 11 Modal analysis result-first mode

Table 5 Natural frequency comparison of measurement and analysis

Natural frequency	64RC-L	71RC-L
Measurement (1)	21.5 (Hz)	17.6 (Hz)
Analysis result (2)	21.0 (Hz)	16.4 (Hz)
Error  (2)-(1)/(1)×100	2.33 (%)	6.82 (%)

Table 6 Minimum static stiffness evaluation

	64RC-L	71RC-L
Static deflection (mm)	0.028	0.035
Static stiffness (KN/mm)	35.71	28.8
'Evaluation	O.K	O.K

## 5. 결 론

본 연구에서는 뒤꿈치 충격하중과 보행하중을 가진원으로 하여 벽식 철근콘크리트 아파트 바닥판의 가속도 응답을 측정하였다. 가속도 응답을 이용하여 바닥판의 고유진동수, 감쇠, 그리고 각 하중에 대한 최대가속도를 평가하였다. 이렇게 측정된 결과를 ATC-1(1999)<sup>5)</sup>, AISC-11(1997)<sup>6)</sup> 그리고 일본건축학회 기준(1991)<sup>7)</sup>의 거주, 사무 공간에 대한 제한치와 선행 연구에서 제안한 인지곡선(2003)<sup>34)</sup>에 적용시켜 평가하였다. 또한 ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 기준과 AISC-11(1997)<sup>6)</sup> 기준의 최소 정역학적 강성 제한 검토를 위하여 유한요소 해석을 수행하였다.

- 1) 수직진동 성능 평가에 앞서 측정 대상 아파트 바닥에 대해 콘크리트 설계 기준에 따라 최소 두께 검토를 수행한 결과, 대상 바닥은 기준의 최소값을 만족하나, 단부 바닥에 대한 10% 바닥두께의 증대를 적용하면 만족하지 않는 것으로 나타났다.
- 2) 본 연구의 측정 결과 64평형, 71평형에서 측정된 대상 바닥판의 고유진동수가 모두 17 Hz~22 Hz 사이의 값을 나타내고 있으며, 감쇠비는 3~4% 범위에 있다. 그리고 보행에 의한 최대가속도 값은 64 RC-L의 경우 1.69%g이고, 71 RC-L의 경우 1.72%g이다. 뒤꿈치 충격에 대한 최대가속도 값은 각각 2.33%g, 2.44%g로 측정되었다.
- 3) ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 및 AISC-11(1997)<sup>6)</sup>에서는 8 Hz 이상의 고유진동수를 가지는 바닥판에 대하여 보행하중에 대한 최대가속도 값으로 0.5%g를 제한치로 제시하고 있다. 본 연구의 대상 바닥판은 보행하중에 대한 최대가속도 값이 모두 0.5%g를 초과하여 ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 및 AISC-11(1997)<sup>6)</sup>의 제한값을 만족시키지 못하는 것으로 평가되었다.
- 4) 일본건축학회 기준<sup>7)</sup>은 보행하중에 대하여 V-3, 뒤꿈치 충격하중에 대하여 V-10의 제한값을 적용할 수 있다.

- 그 결과 64RC-L의 뒤꿈치 충격하중에 대한 최대가속도 값을 제외한 나머지가 모두 만족하지 못하고 있다.
- 5) 인지곡선(2003)<sup>34)</sup>과 비교 결과 뒤꿈치 충격하중과 보행하중 모두에 대하여 약하게 인지와 강하게 인지 수준 사이에 있음을 알 수 있었다. 인지하지 못함을 인지의 하한선으로 본다면 대상 바닥에서 모두 진동을 인지하게 된다.
  - 6) ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 및 AISC-11(1997)<sup>6)</sup>에서는 10 Hz 이상의 고유진동수를 가지는 바닥판에 대해서는 최대가속도 제한 외에 정역학적 강성 제한이 적용되며 두 가지 기준을 동시에 만족 시켜야한다. 본 연구에서 측정된 바닥판은 모두 10 Hz 이상의 고유 진동수를 가지므로, 유한요소 해석을 통해 최소 강성에 대한 기준에 대해서도 검토하였다. 바닥판 중앙에 1kN의 집중하중을 적용하여 정적 처짐을 평가한 결과 모든 바닥판이 ATC-1(1999)<sup>5)</sup> 및 AISC-11(1997)<sup>6)</sup>에서 제시한 1mm의 제한값을 만족하였다.
  - 7) 이상의 결과에서 현행 기준의 정적 처짐에 대한 사용성 기준은 보행 및 뒤꿈치 충격과 같은 사용자의 거동으로 인한 수직진동에 대한 주거 건물 바닥의 사용성 문제에 충분하지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 향후 현행 정적 처짐에 대한 최소두께 제한 외에 수직진동에 대한 사용성을 함께 고려할 필요가 있다.

### 감사의 글

본 연구는 2001년 건설 기술 연구개발 사업으로 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 한국콘크리트학회, “콘크리트구조설계기준·해설”, 한국콘크리트학회, 2000, pp.83~89

2. ACI, “Building Code Requirements for Structural Concrete(ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)”, American Concrete Institute, 2002, pp.102~106
3. 한상환, 김도훈, “수직진동 허용제한치 제안을 위한 인지실험”, 대한건축학회논문집 구조계, 19권 1호, 2003, pp.11~21
4. 한상환, 이상욱, “진동대 실험을 통한 보행진동과 뒤꿈치 충격진동의 인지수준 비교”, 한국소음진동공학회논문집, 13권 3호, 2003, pp.186~194
5. ATC, “ATC Design Guide 1 : Minimizing Floor Vibration,” ATC, 1999, pp.1~14
6. Murray, T. M., Allen, D. E., and Unger, E.E., “Floor Vibration Due to Human Activity”, AISC Steel Design Guide Series No.11, AISC, 1997, pp.1~10
7. 일본건축학회, “건축물의 진동에 관한 주거성능 평가지침·동해설”, 일본건축학회, 1991, pp.1~10
8. Allen, D. E. and Rainer, J. H., “Vibration Criteria for long-span Floors,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, National Research Council of Canada, Vol.3, No.2, June 1976, pp.165~173
9. Fatfield, F. J., “Design Chart for Vibration of Office and Residential Floors,” *Engineering Journal*, AISC, Fourth Quarter, 1992, pp.141~144.
10. Foschi, R. O., Neumann, G. A., Yao, F., and Folz, B., “Floor Vibration Due to Occupants and Reliability-Based Design Guidelines,” *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.22, pp.471~479
11. Chopra, A. K., “Dynamics of structures: Theory and application to earthquake engineering,” Prince-Hall, 2001, pp.48~55
12. 마이더스 아이티, “복합구조 아파트 바닥판의 사용성 검토 절차”, 마이더스 아이티, 2000, pp.12~61

### 요 약

본 연구에서는 현장 측정과 유한요소 해석을 이용하여 기존 아파트 바닥의 수직진동 성능 평가를 수행하였다. 평가에 사용된 기준은 ATC-1(1999) 기준과 AISC-11(1997) 기준, 그리고 일본건축학회 기준(1991)이며, 우리나라 사람의 감성을 고려하기 위해 선행연구에서 수행된 인지실험으로 제안된 인지곡선(2003)을 함께 사용하였다. 뒤꿈치 충격하중(heel drop)과 보행하중(walking)을 이용한 현장 측정으로 바닥판의 동특성을 파악하고 최대가속도값을 측정하여 이를 기준과 비교하였다. 대상 바닥판의 동특성은 고유진동수가 17 Hz~22 Hz이고, 감쇠비는 3~4%이다. 수직진동 성능 평가에 앞서 현행 기준의 최소두께 기준과 대상 바닥판의 두께를 비교 검토한 결과 기준의 최소값은 만족하나, 단부 슬래브에 대한 10% 증대 항목을 적용하면 만족하지 않았다. 대상 바닥의 보행하중에 대한 최대가속도값은 모두 ATC-1(1999) 및 AISC-11(1997) 기준과 일본건축학회 기준(1991)을 만족하지 못하였고, 뒤꿈치 충격하중에 대한 최대가속도값은 64RC-L만 일본건축학회 기준(1991)의 제한값에 근접하며 만족하였다. 우리나라 사람의 감성이 고려된 인지곡선(2003)과의 비교 결과 보행하중과 뒤꿈치 충격하중에 대한 대상 바닥판의 최대가속도값은 모두 ‘약하게 인지’ 수준과 ‘인지하지 못함’ 수준에 사이에 분포하고 있어, ‘인지하지 못함’을 인지의 하한선으로 본다면 대상 바닥판에서는 모두 진동을 인지하게 된다. 또한 유한요소 해석으로 구한 1kN의 정적 집중하중에 대한 처짐은 모두 1mm 미만으로 10 Hz 이상의 고유진동수를 갖는 바닥판에 대하여 고려하도록 하는 ATC-1(1999) 및 AISC-11(1997)의 최소 강성 기준은 만족함을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 바닥 수직진동, 보행하중, 뒤꿈치 충격하중, 최대가속도, 인지수준