

# 1:10 축척 시험동 구조 모형의 바닥충격 진동 전달

## Propagation of floor impact vibration in a 1:10 scale model of a test structure

이평직†·유승엽\*·김재호\*\*·전진용\*\*\*

Pyoung Jik Lee, Seung Yup Yoo, Jae Ho Kim, Jin Yong Jeon

**Key Words** : 축척모형 (scale model), 바닥충격 진동 및 소음 (floor impact vibration and sound), 시험동 (test building)

### ABSTRACT

Vibration characteristics of concrete slabs were investigated using a 1:10 scale model and finite element method. A 1:10 scale model of a test building with 150 and 200mm slab thicknesses was made of acrylic materials. Modal test was conducted to investigate mode shape and modal frequencies. Results show that the mode shapes of two slabs with different thickness are similar each other, whereas natural frequency is different. Through modal analysis using FEM, it was revealed that both mode shapes and natural frequencies calculated from the FEM model are similar to those of the scale model measurement. It was also found that natural frequencies increased with increment of the slab thickness.

### 1. 서론

국내에서는 내력벽 구조를 갖는 공동주택 주거형태가 대부분으로 상하층 세대간 고체전달음에 의해 발생하는 층간소음이 주된 소음형태로 대두되고 있다. 일반적으로 바닥충격음 문제해결을 위해서는 온돌바닥구조 내부에 저감재료를 삽입하거나 건식, 반건식 구조를 적용하는 방안들이 개발되어 활용되고 있다. 이러한 바닥충격음 저감구조 개발은 주로 실험과 현장의 시험시공을 통해 진행되며, 실험실과 현장 측정결과간 차이 등의 시행착오들로 인해 장시간이 소요된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 고체전달음 및 층간소음의 해석 및 예측 연구들이 진행되고 있으며, 구조물의 진동특성을 예측하기 위해 축소모형 실험이 적용되고 있다. Harris와 Sabins<sup>(2)</sup>과 황재익 등<sup>(3)</sup>은 RC 구조체 축소모형의 상사법칙을 검증하였으며, 박근석 등<sup>(4)</sup>은 고층 건물의 내진성능을 살펴보기 위해 1:12 축소모형 실험을 진행하였다. 이러한 축소모형 방법론은 맨슬래브뿐만 아니라 바닥충격음 저감재를 포함한 복합층에의 진동 및

소음특성 예측에 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 바닥충격음 저감구조의 진동 및 소음 특성을 살펴보기 위해 먼저 맨슬래브의 시험동을 대상으로 축소모형 실험을 진행하였으며 그 결과를 전산해석 결과와 비교하였다.

### 2. 바닥충격음 시험동

#### 2.1 시험동 개요

본 연구에 활용된 바닥충격음 시험동은 실제 주거환경의 일반적인 거실환경을 반영하여 바닥면적과 높이를 설계하였고, 발코니와 같은 구조 부재요소의 영향도 반영되었다. 동일 층에 슬래브 두께가 같은 3개실을 연속 배치하여 슬래브 두께가 변화함에 따른 하부층 전달기여율 변화요인을 최소화하였다. 바닥충격음 시험동의 단면 및 평면은 그림 1과 같다.

바닥충격음 시험동 평면은 계단을 중심으로 좌우편 2개의 건물로 나뉘어져 있다. 계단실 왼편에는 180, 240mm 슬래브 두께의 6개실이 위치하고 있고 오른편에는 150, 210mm 슬래브 두께의 6개실이 위치하고 있다. 본 연구에서는 150, 210mm 슬래브 두께를 갖는 시험동을 대상으로 축척모형을 제작하였다.

† 한양대학교 건축환경공학과, 박사과정  
E-mail : nosaer4@gmail.com  
Tel : (02) 2220-1795, Fax : (02) 2220-4794

\* 한양대학교 건축환경공학과, 박사과정

\*\* 한양대학교 건축환경공학과, 석사과정

\*\*\* 한양대학교 건축대학, 부교수

Table 1. Details of the test building

구 분	내 용
슬래브 두께	150, 180, 210, 240 mm (각 3개실)
바닥면적	4.7m×5.3m (25m <sup>2</sup> ) : 30평형대 거실면적
층 고	2,800 [mm]
콘크리트 물성	압축강도 210 [kg/cm <sup>2</sup> ], 밀도 2,300 [kg/m <sup>3</sup> ]

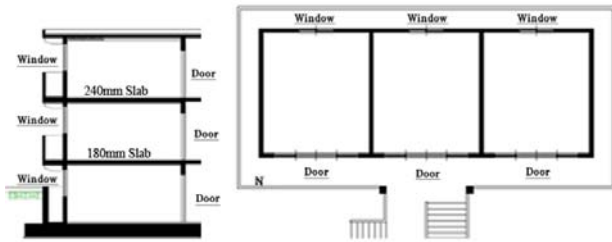


Figure 1. Section and floor plan of the standard test building

### 3. 축척모형

#### 3.1 축척 모형 및 재료

축척모형을 제작하기 위해서는 상사법칙이 적용되는데, 각 실험의 목적이나 방법에 따라 적절한 법칙을 선정하여야 한다. 시간이력하중 문제에서는 질량, 길이, 시간의 세가지가 기본차원으로 선택되면 나머지는 이들로 부터 유도되어 결정된다<sup>(2-3)</sup>. 건축물의 내진성능을 위해 제작된 축척모형의 경우에는 원형 구조물과 동일한 재질을 사용하여 두 재질의 변형률이 같다( $\epsilon_r = 1$ )는 전제하에 시멘트, 자갈, 철근 등 다양한 재료를 적용하였다<sup>(3-4)</sup>. 그러나 본 연구에서는 원형 구조물과 축척모형 재료의 변형률이 같지 않을 경우 그 비를 이용하여 각 기본차원을 유도할 수 있다고 전제하였으며, 실험동의 구조체를 단일재료로 가정하였다. 이를 통해 축척모형 재료로 콘크리트의 기본 물성치와 유사한 단일재료인 아크릴을 선택하였으며, 아크릴과 콘크리트의 기본 물성치는 표 2에 정리하였다

Table 2. Properties of acrylic and concrete

구 분	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	영계수 (N/m <sup>2</sup> )	속도 (m/sec)	감쇠계수
아크릴	0.00115	0.57*e10	0.022*e5	2~4*e-3
콘크리트	0.0023	2.6*e10	0.034*e5	4~8*e-3

축척은 대상 건물의 크기와 실험실에서 측정 가능한 적정 크기와 이전 연구에서 활용된 축척 등을 고려하여

1:10을 적용하였다. 본 연구에서 활용된 축척모형의 최대 너비와 높이는 각각 1.6, 0.8m이다.

실험동의 경계조건을 재현하기 위해 축척모형의 부재는 바닥판과 벽체 등으로 구분되어 제작되었으며, 각 부재는 에폭시 본드로 접합되었다. 일반적으로 생산되는 아크릴 두께를 고려하여 15mm와 20mm 두께를 갖는 아크릴 판재로 제작되었으며, 완성된 축척모형은 그림 2에 나타난바와 같다.

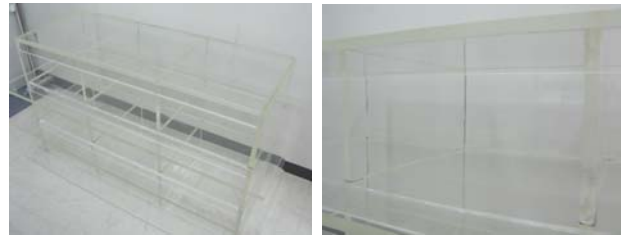


Figure 2. 1:10 scale model of the testing building

#### 3.2 측정장비

그림 3과 같이 exciter (B&K, Type 4810)를 이용하여 바닥판을 가진하였을 때 가속도계를 이용하여 중앙부에 위치한 실의 바닥판 진동특성을 측정하였다. 바닥판의 가진은 노드를 피해 1개 지점을 선정하였으며, 가속도계는 각 실 36개 지점에 부착하였다. 특히 본 연구에서는 가속도계의 무게가 측정에 미치는 영향을 최소화하기 위해 소형 가속도계(Endevco, Type 2250-12)를 사용하였다. 진동특성은 실시간 주파수 분석기(B&K, Pulse system)를 통해 분석되었으며, 바닥판의 모드 형상과 감쇠비는 모드해석 프로그램인 스타모달(Spectral dynamics, Starmodal)을 이용하여 분석하였다.



Figure 3. Pictures of the modal test

#### 3.3 측정결과

슬래브 두께 차이에 따른 진동특성을 살펴보기 위해 먼저 모드해석에 의한 슬래브의 고유주파수와 모드형상을 비교하였다. 15, 20mm 슬래브 두께를 갖는 각 실의 1~3번째 모드의 고유주파수는 표 3과 그림 4에 정리한 바와 같다. 축척모형의 경우 슬래브 두께를 제외한 실의 크기와 형상, 구속조건이 동일하기 때문에 축척모형에서의 15, 20mm 두

실의 모드형상은 유사하게 측정되었다. 그러나 각 모드  
 고유주파수는 슬래브의 두께가 5mm 증가함에 따라 증가하  
 였다. 1차 모드의 고유진동수는 슬래브 두께가 증가할 때  
 180.8Hz에서 221.6Hz로 약 20Hz 증가했다. 이는 슬래브  
 두께 증가에 따라 바닥판의 강성도 함께 증가하기 때문으로  
 사료된다.

Table 3. Natural frequencies at different modes

Slab thickness [mm]	1st [Hz]	2nd [Hz]	3rd [Hz]
15	180.8	305.7	484.9
20	221.6	365.8	500.6

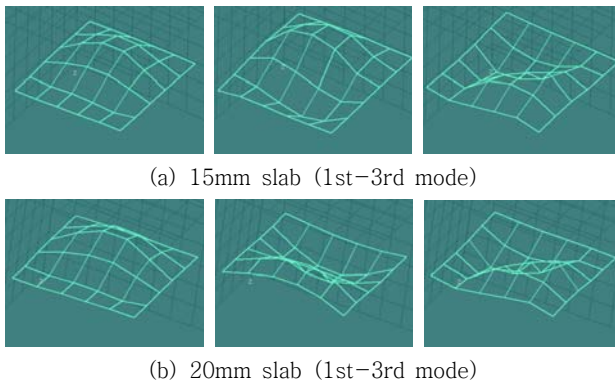


Figure 4. Mode shapes of 15 and 20mm slab

그림 5는 curve-fitting 과정을 통해 얻어진 동일 지점에  
 서의 주파수응답함수를 나타낸다. 각 모드가 나타나는 주파  
 수 대역이 다소 상이하며, 슬래브 두께 증가에 따라 주파수  
 응답함수의 크기가 특히 저주파 대역에서 크게 감소하는 것  
 을 확인할 수 있다. 이는 슬래브 두께 증가를 통해 바닥판  
 의 진동량이 저주파에서 다소 감소했다는 것을 의미한다.

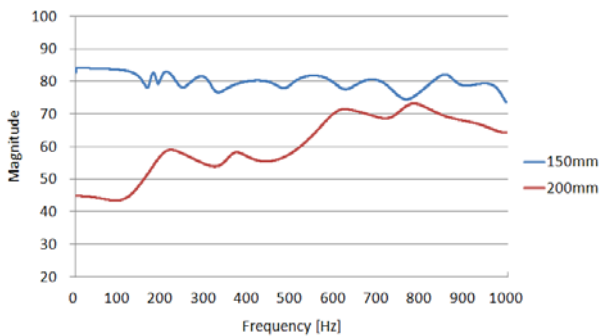


Figure 5. FRF of 150 and 200mm slab

#### 4. 전산해석

##### 4.1 전산해석 모델링

축척모형 실험의 타당성을 검증하기 위해 유한요소법  
 (FEM)에 기반을 둔 상용 해석프로그램(ANSYS)을 활용하  
 여 전산해석을 진행하였으며, 본 연구에 활용된 전산해석  
 모델은 그림 6에 나타난 바와 같다. 주요 경계 조건은 크게  
 2가지로 구분하여 벽체와 연결된 부분에서는 병진방향과 회  
 전방향 자유도 6개를 모두 구속(fixed)시켰으며, 통로로 연  
 결된 부분에서는 단순지지조건으로 가정하였다. 또한 바닥  
 충격음은 비교적 충격력이 작고, 구체의 진동 지속시간이 짧  
 기 때문에 선형조건으로 가정하여 해석을 진행하였다.

축척모형 측정실의 고유진동수를 조사하기 위해 모드 해  
 석(modal analysis)을 실시하여 실험과 비교하였다. 이 때  
 축척모형의 슬래브 두께인 15, 20mm 이외에 10, 25mm  
 를 추가하여 서로 다른 슬래브 두께의 영향을 조사하였다.

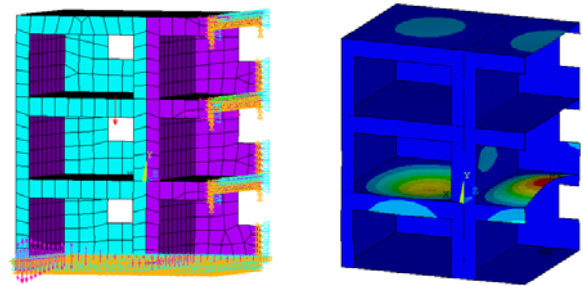


Figure 6. FEM model of a scale model

##### 4.2 전산해석 결과

모드해석에 의한 각 슬래브의 고유진동수는 표 4와 같다.  
 슬래브 두께 15, 20mm의 경우 각 모드에서의 고유진동수  
 는 축척모형 실험결과와 비교적 유사하였다. 이는 축척모형  
 의 각 부재가 전산해석에서 가정했던 것과 같이 병진 및 회  
 전방향에서 구속되었으며, 전산해석 결과가 신뢰성이 있음  
 을 시사한다. 슬래브 두께가 10mm에서 25mm로 증가함에 따  
 라 각 모드의 고유주파수는 약 130Hz에서 314.5Hz로 증  
 가하였으며, 이는 콘크리트 슬래브의 두께가 증가함에 따라  
 고유진동수가 증가하는 양상을 보인 이전 연구결과<sup>(1)</sup>와 일  
 치한다.

Table 4. Natural frequencies in 1st-3rd modes

Slab thickness [mm]	1st [Hz]	2nd [Hz]	3rd [Hz]
10	130.2	211.1	339.3
15	192.8	307.8	498.9
20	254.4	402.3	653.9
25	314.5	493.4	802.8

15, 20mm 두께를 갖는 측정실의 모드형상 결과는  
 그림 7과 같으며, 이는 축척모형 결과와 거의 일치하였  
 다. 이는 모드형상이 재료의 물성보다는 실의 크기와 형  
 상 및 구속조건에 의해 결정되기 때문이다.

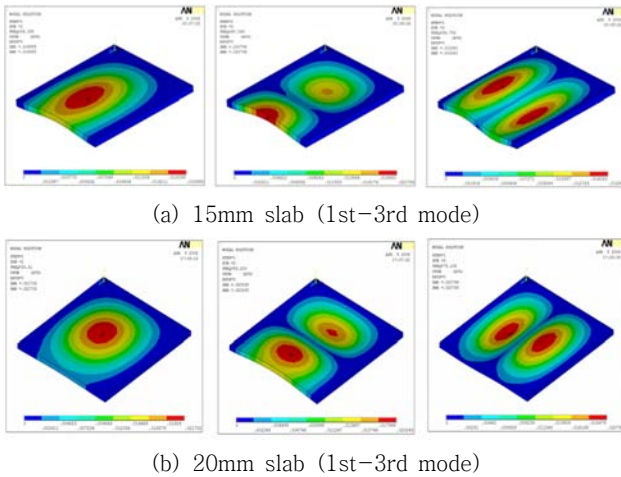


Figure 7. Mode shapes of 15 and 20mm slab

## 5. 결론 및 향후 진행방향

본 연구에서는 바닥충격음 시험동 슬래브의 진동특성을 살펴보기 위해 1:10 축척모형 실험을 진행하였다. 모달테스트를 통해 크기와 형상, 구속조건은 동일하고 슬래브 두께가 상이한 2개실의 모드형상과 각 모드에서의 고유진동수를 조사하였다. 슬래브 두께가 15mm에서 20mm로 증가할 때 모드형상은 유사하며, 각 모드의 고유진동수는 슬래브 두께의 증가에 따라 함께 증가하는 것으로 나타났다.

축척모형 실험의 타당성을 검증하기 위해 유한요소법(FEM)을 적용한 전산해석을 실시하였다. 모드해석 결과 각 모드의 고유진동수는 축척모형 결과와 비교적 유사한 것으로 나타났으며, 슬래브 두께가 10mm에서 25mm로 증가함에 따라 각 모드의 고유주파수는 약 130Hz에서 314.5Hz로 증가하였다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 “표준화 기술개발사업” (과제번호 : 10023489)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 서상호, 전진용, 2005, “유한 요소법을 이용한 나 슬래브의 2차원 바닥 충격진동 해석”, 한국소음진동공학회 논문집, 제15권 제5호, pp. 604-611.
- (2) H. G. Harris, G. M. Sabnis, “Structural modeling and experimental techniques”, CRC press, 1999
- (3) 황재익, 김성렬, 김명모, 2004, “1-g 진동대 모형

실험을 위한 상사법칙의 적용성 평가”, 한국지반공학회는 문집, 제20권 제3호, pp. 141-150.

(4) 박근석 고동우 최성모 권기혁 이한선, 2001, “1/12축소 철근콘크리트 주상복합건물의 진동대실험”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집

(5) Aleksandar Pavic, Paul Reynolds, Peter Waldron, Kevin Bennett, 2001, “Dynamic modelling of post-tensioned concrete floors using finite element analysis”, Finite Elements in Analysis and Design, 37, pp. 305-323.

(6) 김재수, 1996, “임피던스법을 이용한 중량 충격음의 차음성능 예측 시뮬레이션에 관한 연구 - 단층 바닥 슬래브를 중심으로.” 대한건축학회 논문집 제12권 제9호. pp. 181-190.

(7) 김명준, 손장열, 김홍식, 1999, “SEA법에 의한 벽식구조 건물 구조체의 고체전달음 예측을 위한 기초적 연구”, 대한건축학회 논문집 제15권 제6호. pp. 215-222.

(8) 이성호, 정갑철, 2003, “바닥충격음 예측법에 관한 연구”, 한국소음진동학회 2003년도 춘계학술대회논문집. pp. 184-190.

(9) 김명준, 김홍식, 김하근, 2003, “수음실 내 구조체의 진동량 계측을 통한 바닥충격음레벨 예측”, 한국소음진동공학회논문집 제13권 제1호. pp. 3-9.

(10) P. Mees and O. Vermeir, 1993, “Structure-Borne Sound Transmission at Elastically Connected Plates”, Journal of Sound and Vibration 166(1). pp. 55-76.

(11) M. A. Stewart and R. J. M. Craik, 2000, “Impact Sound Transmission through a Floating Floor on a Concrete Slab”, Applied Acoustics 59. pp. 353-372.

(12) A. Pavic. and P. Reynolds., 2003, “Modal testing and dynamic FE model correlation and updating of a prototype high-strength concrete floor”, Cement & Concrete Composites 25(7). pp. 787-799.