

## 중량충격원 충격에 따른 공동주택 실내공간의 구조음장 해석 모델링방법에 관한 연구

### A Study on the Structural-acoustic Analysis Modeling Methods of the Room with Heavy Impact Noise Source

이재광\*                      구해식\*\*  
Lee, Jae-Kwang              Koo, Hae-Shik

#### Abstract

The purpose of the present study is to establish structural noise analyzing method for apartments building floor with structural-acoustic coupling analysis modeling. Noise through floor in the room is recognized as a significant problem with the consequence that noise isolation technique has been studied in the various fields of industry. From among noise factors, resonance sound is the main reason for solid noise of the floor, which is occurred by mechanical vibrations of the acoustic boundary line and the change of velocity. To analyse this phenomenon, numerical computation methods are provided in many fields, In this study, evaluation method for slab is established using finite element method, and a case study for analyzing acoustic phenomenon was suggested. The results show that numerical method, especially F.E.M, has a good approximation to predict noise at floors.

키워드 : 구조음장해석, 중량충격음, 실내 음장

Keywords : Structure-Acoustic Analysis, Heavy Impact Noise, Room Acoustics

#### 1. 서론

국내의 공동주택은 대부분 벽식구조의 현장 타설공법으로 시공되므로 바닥판에 대한 충격진동이 일체화된 벽을 타고 하부로 전달되기 쉬운 구조로 이루어져 있다. 이에 따라 중량충격음과 같은 고체음의 과도한 발생이 최근 심각한 문제로 부각되고 있다.

고체음은 구조물 표면의 기계적인 진동에 의해 음향학적 경계면의 속도변화에 의하여 발생한다.<sup>1)</sup> 구조물의 진동으로부터 구조음장을 예측하는 수치해석법에는 유한차분법, 유한요소법, 경계요소법 등이 있다. 이러한 기법은 기본적으로 해석대상 구조물의 전 주파수 해석 범위에서의 진동모드와 진폭의 산정을 필요로 한다. 그러나 진동모드는 주파수가 증가함에 따라 기하급수적으로 늘어나기 때문에 많은 계산 시간을 필요로 함으로 층간소음 예측에 적용하기에는 많은 어려움이 있었다. 이에 따라 국내에서는 일본에서 바닥충격음의 예측을 위해 제안하고 있는 임피던스법 등의 근사법을 사용하여 층간소음에 대

한 연구를 진행하여 왔다.<sup>2,3)</sup> 그러나 이들 기법은 기본적으로 바닥판에 사용된 재료가 균질함을 가정함으로써 최근 층간소음저감 분야에 활발히 도입되고 있는 여러 복합소재 재질의 음향성능예측에는 그 한계를 드러내고 있다.

따라서 본 연구에서는 공동주택의 구조음장 해석을 통한 차음성능 개선을 위한 기초 연구로서 상용유한요소해석프로그램을 통해 중량충격음에 의한 실내음장을 해석하고 이를 기존의 논문에서 제시된 실측결과와 비교 평가하여 층간소음을 예측하고 그 유효성을 파악하도록 한다.

#### 2. 바닥충격음 해석의 개요

##### 2.1 바닥충격음의 특성

구조물 내부에서의 보행 등 기타의 충격 또는 에너지 파동이 구조물에 고체음을 발생시킨다. 이 고체음이 공기 전달음의 형태로 아래층에 전달되는 소음을 층간 소음이라고 한다.

일반적으로 철근콘크리트 구조의 공동주택은 벽면의 질량이 크기 때문에 벽면을 투과하는 공기음 차단에는 유리하지만, 반면 진동은 쉽게 전달되기 때문에 건물의 넓은 범위에 걸쳐 고체음이 발생한다. 이러한 특성은 인접 세대와 한정된 두께의 벽과 바닥을 공유해야 하므로

\* 교신저자, 경남대학교 건축학부 겸임부교수, 공학박사  
(ljk1203@hanmail.net)

\*\* 경남대학교 건축학부 교수, 공학박사 (koo@kyungnam.ac.kr)  
이 연구결과물은 2009년도 경남대학교 학술연구 장려금 지원에 의하여 이루어 졌음.

바닥충격음 문제로 대두되고 있으며, 국내에서도 이와 같은 문제를 해결하기 위해 KS규격에서 표준 바닥충격원을 경량충격원 및 중량충격원으로 구분하여 지정한 후 공동주택에 시험하도록 하고 있다.<sup>4)</sup>

표준 바닥충격원에 대한 소음의 일반적인 주파수별 특성은 경량충격음은 중·고 주파수대역이 다소 높고, 전체 주파수 대역에서 소음도가 비슷한 특성을 갖는데 반해, 중량충격음은 저주파 대역에서 매우 높고 고주파 대역으로 갈수록 소음도가 낮아지는 특성이 있다. 표준 바닥충격원에 의한 소음의 시간 패턴은 경량충격음은 0.1초의 주기로 충격을 가하기 때문에 인간이 느끼는 반응은 피크치 부근에서 의한 영향이 큰데 반해 중량충격음은 2.5~3초의 주기로 충격을 가하기 때문에 피크치 뿐만 아니라 이후의 울림도 영향을 주는 것으로 알려져 있다.<sup>4)</sup>

중량충격에 따른 바닥충격음의 평가를 위해 사용되는 표준 중량충격원은 바닥에 접하는 부분은 곡률 반지름 90~250mm의 볼록 곡면으로 하고 바닥면의 접촉 면적은 250cm<sup>2</sup>이하로 하며, 충격 시간이 20±2ms로 단봉형의 충격력 파형을 가진다.

표 1은 표준 중량충격원의 1/1옥타브 밴드 중심주파수에서의 충격력 폭로레벨과 허용편차를 나타낸 것으로 이와 같은 충격력 특성을 갖는 중량 충격원은 공기압 (2.4±0.2)×10<sup>5</sup> Pa, 충격원의 유효 질량 7.3±0.2kg, 반발 계수 0.8±0.1과 같은 특성을 갖는 타이어를 높이 0.85m에서 자유낙하 시킴으로써 충격력 특성을 실현할 수 있다.

표 1. 표준 중량충격원의 충격력 폭로 레벨과 허용편차

1/1옥타브 밴드 중심 주파수 (Hz)	1/1옥타브 밴드 충격력 폭로 레벨 (dB)	허용 편차 (dB)
31.5	47.0	±1.0
63	40.0	±1.5
125	22.0	±1.5
250	11.5	±2.0
500	5.5	±2.0

그림 1에서 표 1과 같은 특성을 가지는 표준 중량충격원의 주파수별 충격력 폭로레벨을 연속적으로 나타낸 것이다.

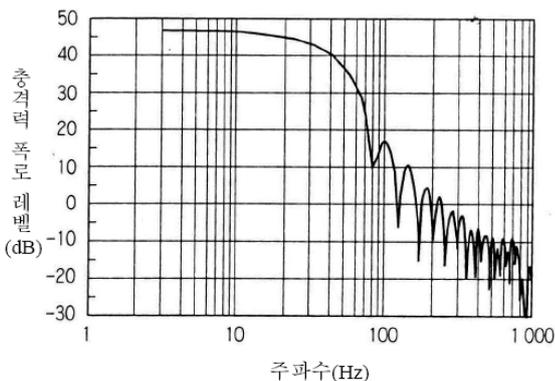


그림 1. 표준 중량충격원의 주파수별 충격력 폭로 레벨

## 2.2 바닥충격음 해석과 사용 물성치

일반적으로 구조물의 설계 및 부재의 강도를 평가하기 위해 수행되는 구조해석은 사용되는 구조재료 외에 실내 공기층 등과 같은 기타 인자의 영향을 무시하고 수행한다. 이것은 구조물의 변형에 비해 기타 장(場)의 영향이 매우 미소함으로서 공학적인 유용성을 가진다.

그러나 바닥충격음은 충격을 받는 구조물과 하부의 실내 음장이 결합하여 발생하므로 실내 공기층의 상태가 해석 결과에 명확히 영향을 미친다.<sup>5)</sup> 이러한 문제를 고려하기 위해서는 구조물의 진동 해석과 함께 발생된 진동이 실내의 공기층에 가하는 변화가 동시에 해석되어야 한다. 연성 해석(Coupling analysis)은 서로 다른 역학체계를 가지는 2개 이상의 장을 결합하여 그 결과들을 유추하는 해석으로 구조물과 유체간의 연성은 크게 일방 연성과 완전 연성으로 구분된다. 일방 연성은 구조물의 거동이 유체에 전혀 영향을 받지 않는다는 가정하에 이루어지며 완전 연성은 유체의 거동 또한 구조물의 거동에 영향을 미친다는 가정하에 이루어진다.<sup>10)</sup>

본 연구에서는 층간소음 평가를 위해 완전 연성해석을 수행하였으며 해석에 사용된 프로그램은 ABAQUS<sup>TM</sup>를 이용하였다. 표 2는 해석에 사용한 재료의 기본 물성치를 나타낸 것이다.

표 2. 해석에 사용된 재료의 기본 물성치

재료	물성치	
	강도	24MPa
콘크리트	밀도	2400kg/m <sup>3</sup>
	탄성계수	2.254 × 10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup>
	Bulk modulus	0.142MPa
공기	Volumetric drag	1.2Ns/m
	밀도	1.2kg/m <sup>3</sup>

또한 진동시의 바닥 슬래브의 감쇠율은 관련연구<sup>5,9)</sup>들을 참조하여 질량감쇠율 α=2.21, 강성감쇠율 β=0.0011로 가정하였다. 해석 모델링시 실 내부의 공기는 8절점 선형 블록요소(AC3D8R)를 사용하였고 바닥판과 벽체는 4절점 선형 쉘요소(S4R)를 사용하였다.

표 3. 해석에 사용된 중량충격원의 충격폭로량

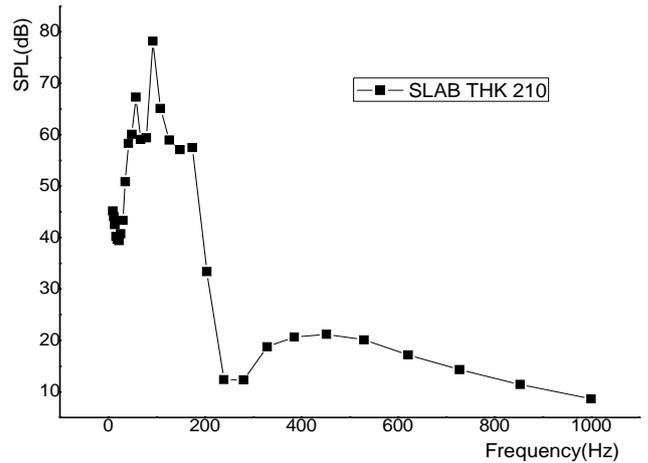
1/3옥타브밴드 중심주파수(Hz)	F <sub>rms</sub> (N)	20logF <sub>rms</sub> (dB)
8	85	38.6
16	108	40.6
31.5	104	40.3
63	40	32
125	10	20
250	4.5	13
500	1.6	4
1k	0.6	-5

표 3은 해석에 사용된 하중으로 KS F 2810-2에서 지정하고 있는 중량충격음을 1/3옥타브벤드별로 구하여 나타낸 것이다. 또한 개구부에서 키워드 \*SIMPEDANCE를 사용하여 5Hz, 100Hz, 500Hz에서 지정함으로서 실 개구부에서 유리창을 닫았을 경우 유리의 음 반사율을 고려하였으며 키워드 \*TIE를 사용하여 공기와 구조체의 경계면에서의 연성을 고려하였다.<sup>7)</sup>

**2.3 주파수 세분화에 따른 해석결과의 변화**

실제 구조물에 대한 해석에 앞서 주파수 세분화에 따른 결과 변화를 분석하기 위해 4.7m×5.3m×2.8m의 치수를 가지는 해석모델에 대해 슬래브의 두께를 각각 150mm, 180mm, 210mm로 가정하였으며 해석은 20Hz~1kHz내에서 각각의 주파수별 음압레벨(SPL:Sound Pressure Level)값을 계산하였다.

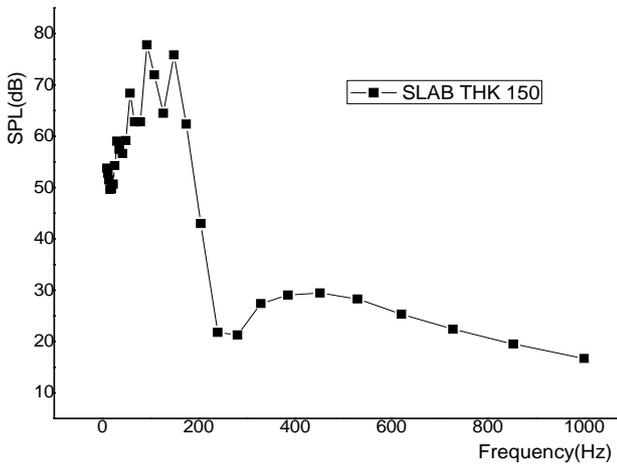
그림 2는 이의 해석결과를 슬래브 두께별 음압레벨을 나타낸 것으로 음압레벨 최대값의 범위는 60~100dB이며 최대 음압레벨은 약 80Hz에서 나타났다.



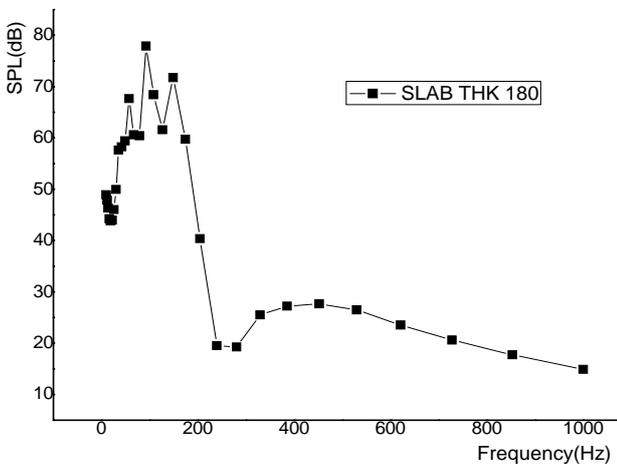
(c) h=210mm

그림 2. 슬래브 두께별 주파수에 대한 음압레벨(SPL) 해석결과(20Hz~1kHz)

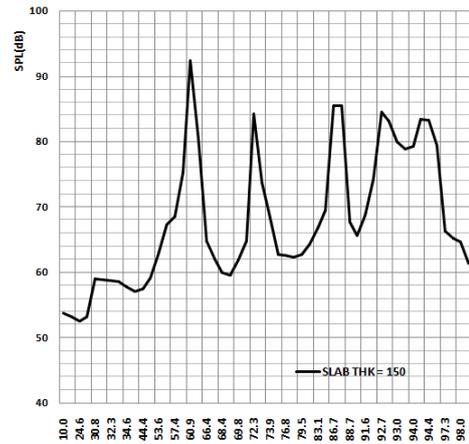
그리고 그림 3은 주파수 세분화에 따른 결과값의 변화를 살펴보기 위해 그림 2의 해석결과로부터 최대주파수가 위치하는 100Hz미만의 저주파수 영역을 재해석한 결과를 나타낸 것으로 여기서 각 모델마다 해당구간에서 여러 차례 피크값을 보이고 있다.



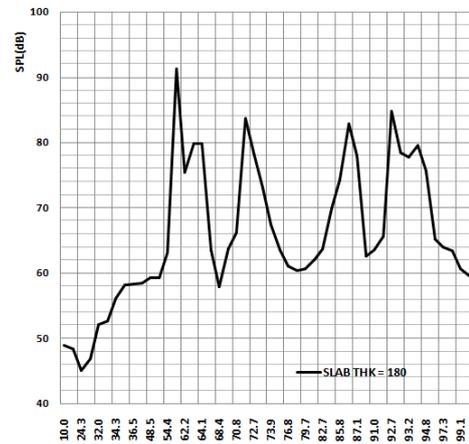
(a) h=150mm



(b) h=180mm



(a) h=150mm



(b) h=180mm

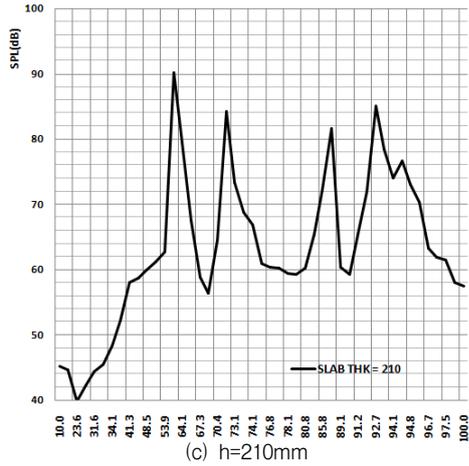
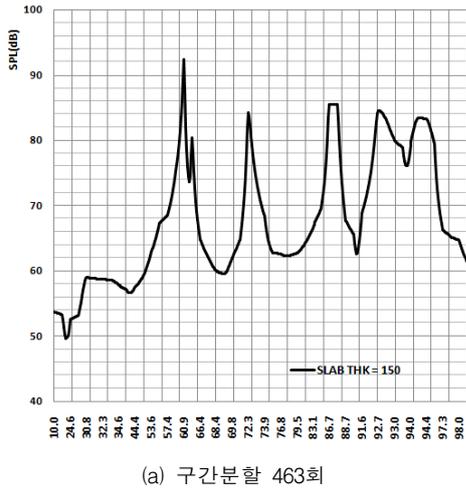
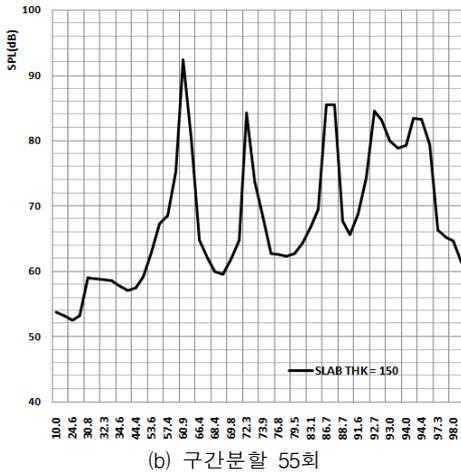


그림 3. 슬래브 두께별 저주파 영역에서의 해석결과(1~100Hz)

그림 4는 동일 모델에 대해 주파수 구간 분할 횟수를 변경한 후 해석한 결과로 약 63Hz의 주파수에서 모델 (a) 경우 부분적인 피크를 보이고 있는 반면 모델 (b) 경우에는 보이지 않고 있다.



(a) 구간분할 463회



(b) 구간분할 55회

그림 4. 구간분할별 음압레벨 결과 (h=150mm, 1~100Hz)

이것은 해석시 각각의 주파수에 대한 결과만을 산출하

게 됨으로서 충격음 발생 후 2~2.5초 동안 발생하는 실측시 포함되는 부분적인 피크치의 울림에 대한 영향을 해석에서는 고려되지 않음을 알 수 있으며 이를 평가하기 위해서는 각 옥타브밴드별 중심주파수의 해석뿐만 아니라 그 주변 주파수영역에 대해서도 상세한 해석이 필요함을 의미한다. 이러한 부분적인 피크치 발생은 구조물의 진동에 의한 영향이라기 보다는 구조체와 유체의 결합에 따른 특성으로 평가된다.

그림 5는 동일 해석모델에 있어 구조체 단독의 고유진동수 해석 및 구조체와 유체의 음장연성에 의한 고유진동수 해석을 통해 고유진동수의 차이를 나타낸 것이다.

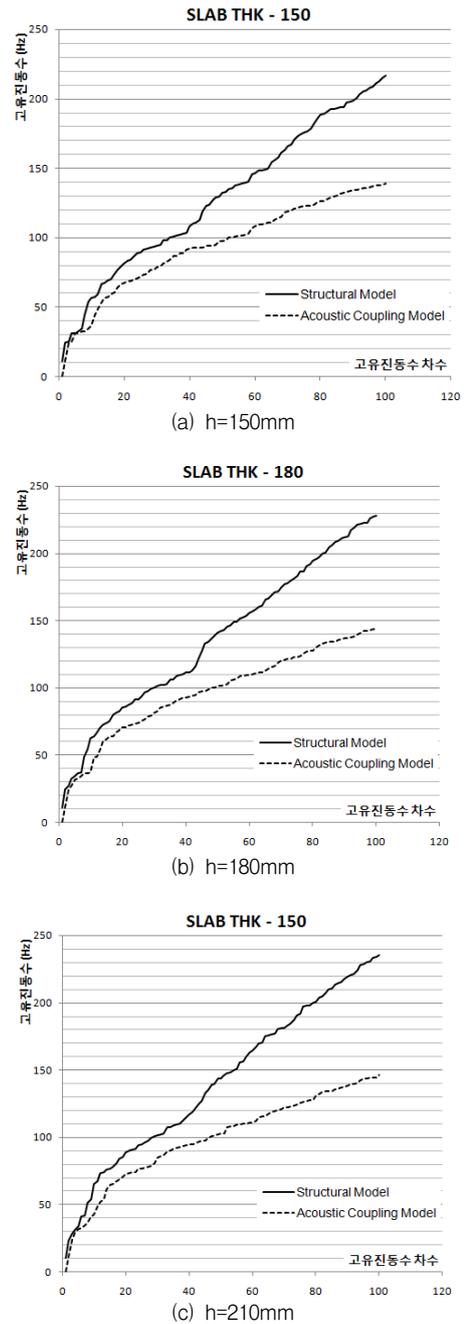


그림 5. 슬래브 두께별 구조체 및 음장연성 모델의 고유진동수

그림 5로부터 구조체와 음장연성 모델들은 약 30Hz 부근까지는 비슷한 양상을 보이다가 음장연성 모델의 경우에는 고유진동수 차수가 증가하면 할수록 점점 더 낮아지는 현상을 보이고 있다. 이것은 음장연성 모델의 경우 실 내부의 공기가 영향을 미침으로서 일어나는 현상으로 실내부 공기와의 공진도 실측결과 약 30Hz 근방에서 발생하는 것으로 나타난다.

### 2.4 해석방안의 적정성 평가

본 연구에서는 사용된 수치해석 기법의 적정성을 평가하기 위해 기존 논문들<sup>5,6)</sup>이 수행한 실측 결과와 해석의 적정성을 비교·검토하였다.

그림 6은 슬래브 두께 150mm, 180mm, 210mm 각각에 대한 실측치와 해석치와의 비교를 나타낸 것이다. 그림 6의 결과에서 250Hz이상의 고차진동수에서 발생한 오차는 실측시 수음실에 존재한 암소음이 해석시에는 반영이 불가능하여 발생한 부분으로서 수음실의 암소음 수준을 해석결과에 합산하면 실측치와 유사할 것으로 판단된다. 또한 이외의 영역에서도 울림 등의 영향으로 인해 해석결과는 실측결과에 비해 125Hz이하에서 약 4dB 정도 작게 평가되고 있다. 그리고 대부분 모델에서의 음압레벨 값의 크기는 일정하지만 슬래브의 두께가 두꺼워질수록 음압레벨 값이 작아지는 것을 알 수 있으며 125Hz기준에 있어서 실측치에서는 3.5dB, 해석치에서는 5.5dB 정도 크기가 작은 것으로 나타났다.

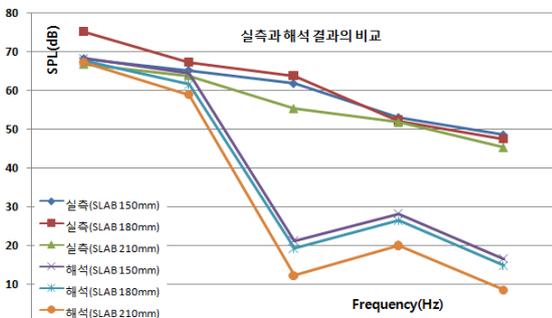


그림 6. 실측치와 해석치 결과 비교 (1/1 옥타브밴드)

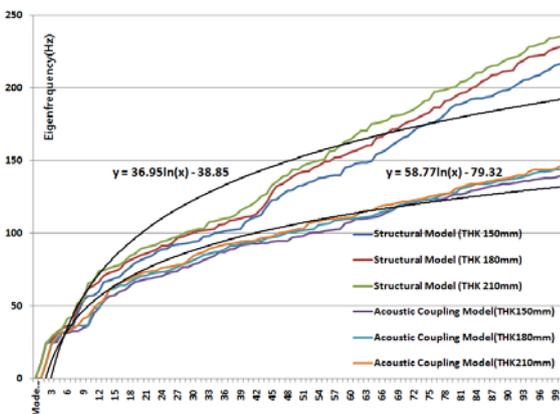


그림 7. 구조물 모델과 구조음장연성 모델의 고유진동수 평가

그림 7은 실측에서 관측된 공진주파수와와의 연관성에 대해 나타낸 것이다. 그림 7에서 로그 추세를 사용하여 두 모델의 양상을 예측한 결과 6개의 모델이 평균 32.3Hz에서 교차하는 것으로 나타났다. 이것은 슬래브 두께 150mm, 180mm, 210mm에 있어서 실측치에서 관측된 공진주파수 32Hz, 37Hz, 40Hz와 유사한 관계를 가지며, 두 실내음장과 구조물의 연성효과가 해석에 충분히 반영되었다고 판단된다.

### 3. 중량충격음을 받는 슬래브의 구조음장해석 사례

#### 3.1 해석 및 실측 모델의 개요

본 연구에서는 정립된 구조음장해석 방법을 사용하여 실제 구조물에 대한 구조음장해석을 실시하고 이를 실측결과와 비교·평가하기로 한다.

그림 8은 실제 시공된 공동주택의 단위세대 평면도이며 이의 거실과 안방의 중량충격음을 해석한 결과치와 KS규격에 의한 실측 결과치를 비교·분석하였다. 그림 9는 거실과 안방의 실측에 의한 중량충격음의 특성을 나타낸 것이다.

그림 9로부터 거실의 경우는 약 30~33Hz에서, 안방의 경우는 약 48~51Hz에서 구조음장연성시의 1차 고유진동수를 보이고 있다. 또한 거실의 바닥충격음은 표 4와 같이 나타내고 있다.

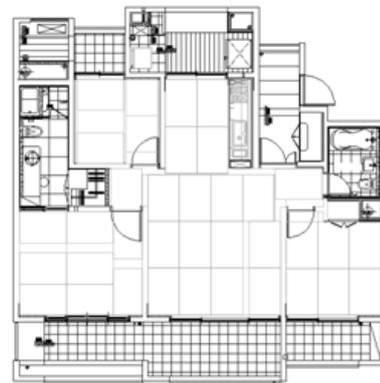
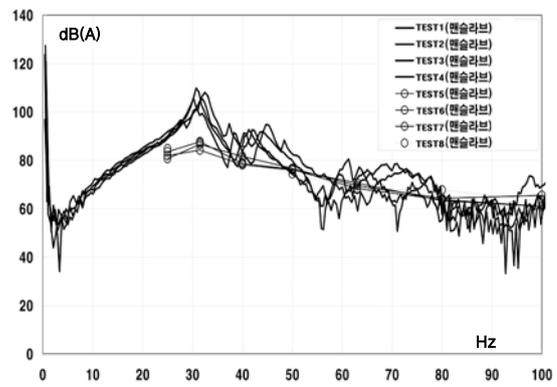


그림 8. 모델링 평면도



(a) 거실

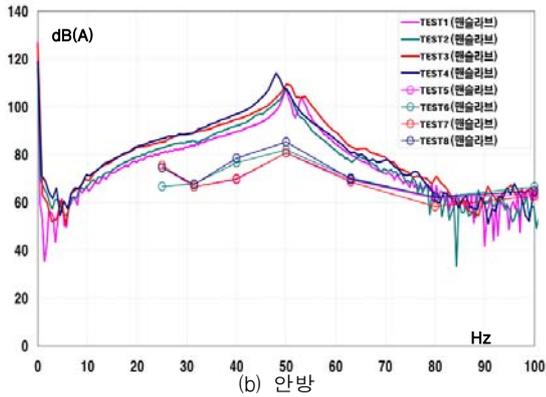


그림 9. 실측에 의한 거실 및 안방의 중량충격음

표 4. 모델 거실바닥의 중량충격음

1/3옥타브밴드 중심주파수	세대1	세대2	세대3	세대4	
dB	31.5	88.6	86.9	89.5	89.6
	63.0	77.7	77.3	77.1	76.0
	125	68.7	65.8	64.9	66.9
	250	57.5	57.2	56.7	58.6
	500	48.9	53.6	54.1	53.4
dB(A)	합(overall)	52	51	51	52

### 3.2 해석모델의 고유진동수 해석

본 연구에서 1차적으로 실측과 해석에 의한 고유진동수를 비교하기 위하여 모델링을 공기층과의 비연성시의 고유진동수를 해석하였는데 그림 10은 거실의 해석결과를 나타낸 것이다.

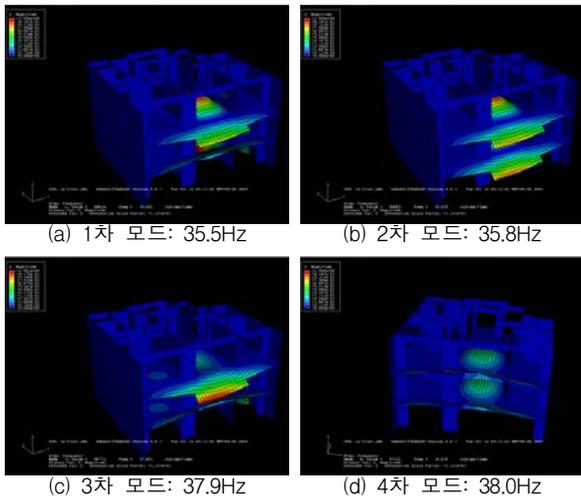


그림 10. 공동주택 거실의 고유진동수 해석결과

고유진동수 해석결과 거실바닥의 경우 1차 고유진동수는 약 35.5Hz, 안방바닥의 경우 1차 고유진동수는 55.5Hz로 나타났다.

이것은 그림 9의 실측시 나타난 거실의 1차 고유진동수 30~33Hz, 안방의 고유진동수 48~51Hz보다 약 2.5~4.5Hz 높은 주파수 영역에 위치한다. 따라서 중량충격음의 측정시 바닥충격으로 인한 진동이 공기층을 통과함으

로서 진동수가 저감됨을 알 수 있다.

그러므로 중량충격음의 평가를 위한 해석시 구조물의 고유진동수뿐 아니라 실 내부의 공기층의 영향도 고려하여야 한다.

### 3.3 구조음장 연성해석을 통한 중량충격음 예측

중량충격음의 피크 주파수를 예측하기 위해서는 실내부의 공기층과의 연성효과를 고려하여야 하므로 여기서는 공기층과의 연성을 고려하여 단위세대의 중량충격음 주파수 및 중량충격음을 예측하였다.

그림 11은 구조음장 연성해석에 따른 거실바닥의 중량충격음 및 음압의 등고선을 나타낸 것이며 이의 단위는 음압(Pa)으로 표기되었다. 표 5는 거실에 있어 주파수대역으로 데시벨로 변환하여 나타낸 것이며 그림 12는 이를 그림으로 표현한 것이다.

구조음장 연성해석은 10~100Hz 구간에서 수행되었으며 실측과 비교한 결과 음압레벨의 피크 주파수 값은 약 3.0dB 차이를 보이는 것으로 나타났다.

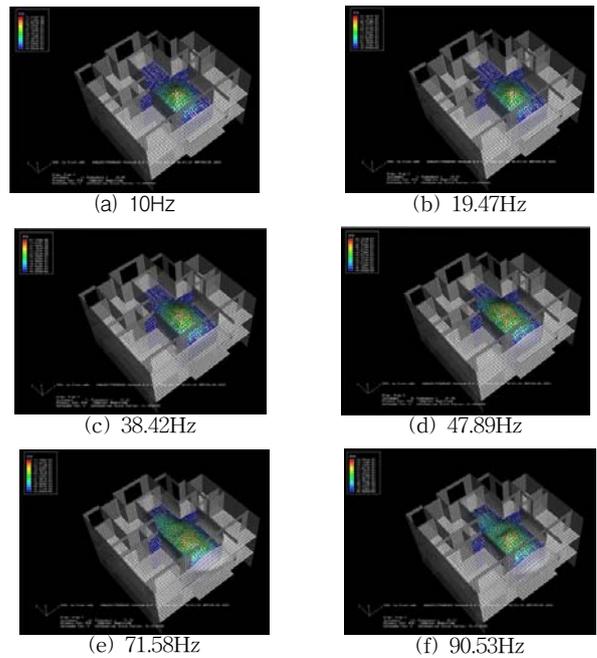


그림 11. 구조음장 연성해석 결과(거실)

표 5. 각 주파수대역에 대한 실내 음압(거실)

Hz	dB	Hz	dB
10	80.0	57.4	78.2
14.7	77.2	62.1	77.6
19.5	76.5	66.8	76.3
24.2	77.4	71.6	75.0
28.9	79.1	76.3	73.7
33.7	83.3	81.1	72.5
38.4	85.8	85.8	71.4
43.2	83.4	90.5	70.2
47.9	80.9	95.3	69.2
52.6	79.2	100	68.2

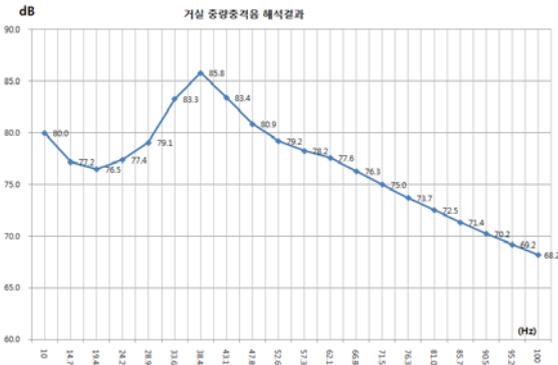


그림 12. 각 주파수대역에 대한 실내 음압(거실)

그림 11의 음압에 의한 실내부의 음압 분포를 살펴보면 대부분의 음압은 실제 충격이 가해지고 있는 바닥 중앙부에서 발생함을 보이고 있다. 이것은 실제 충격이 시작할 때에는 충격력이 작용하는 지점하부의 재료의 밀도 및 분포, 적층상태에 따라 실내하부의 음압이 많은 영향을 미치고 있음을 나타낸다.

그러나 해석영역인 저주파수 영역 내에서도 주파수대역이 높아짐에 따라 실내하부의 음압은 실제 충격이 가해지는 지점뿐만 아니라 바닥 슬래브 전체에 걸쳐 퍼지고 있는데 이것은 구조물의 고유진동수대역이 높아짐에 따라 그 진동이 퍼짐으로서 발생하는 현상이다. 따라서 바닥슬래브의 형상이나 지지조건이 상대적으로 많은 영향을 미치는 것으로 나타나며 이러한 현상은 50Hz 정도의 주파수 영역에서는 이미 일반적인 현상인 것으로 판단된다.

그러므로 중량충격음에 대한 저감 및 설계를 위해서는 하부 재료의 밀도조절만으로는 불가능하며 바닥 형상의 변화 및 지지조건을 조절이 뒤따라야 한다.

#### 4. 결론

본 연구는 공동주택의 구조음장 해석을 통한 차음성능 개선을 위한 기초 연구로서 상용 유한요소 해석프로그램을 통해 중량충격음에 의한 실내음장을 해석하고 이를 기준 논문의 실측결과와 비교·평가하여 층간소음을 예측하고 그 유효성을 파악하기 위해 실시되었다. 이를 위해 본 연구에서는 구조음장 연성해석을 분석하고 이를 실제 공동주택에 적용하여 그 유효성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 바닥충격음의 평가에 있어서 일반적으로 바닥판 사용 재료를 균질한 것으로 가정 한 후 근사법 등으로 조사를 실시함으로써 성능예측의 한계점을 가졌으나 연성 해석법(coupling analysis) 등의 수치해석법을 이용하여 재료 자체로서 성능예측 평가를 실시해야 한다.
- 2) 구조음장 연성기법을 사용하여 충격음 해석을 수행할 경우 주파수의 분할 횟수에 따라 부분별 피크치가 존재함을 알 수 있지만 실측의 경우 이들 값은 울림으로 영향을 미치거나 측정치의 평균값으로 반영되어진다. 해석에 있어 이들 값을 반영하기 위해서는 옥타브밴드에 따른 주파수 분할 방법은 불가능하며 피크치 주

파수 주위에 가능한 많은 주파수 분할 구간을 두어 이를 반영할 수 있도록 하여야 한다.

- 3) 해석치와 실측치 비교에 있어 실측시 암소음의 영향으로 고유진동수가 높을수록 오차가 많이 발생하며 슬래브의 두께가 두꺼울수록 음압레벨 값은 작아진다.
- 4) 실제 공동주택의 거실 및 안방바닥에 대한 해석 및 실측결과 고유진동수에 있어서 해석치는 실측치에 비해 약 2.5~4.5Hz 정도 높게 나타났는데 중량충격음의 해석 평가시 구조물의 고유진동수뿐 아니라 실 내부의 공기층의 영향도 함께 고려하여야 한다.
- 5) 중량충격음에 대한 저감 및 설계를 위해서 충격력을 받는 바닥슬래브의 사용재료의 밀도 및 분포, 적층상태 등이 음압에 많은 영향을 끼치며 이에 수반되는 진동 퍼짐현상 등과 관련된 바닥슬래브의 형상과 지지조건 등도 함께 고려되어야 한다.

본 연구는 공동주택의 실내공간에서 바닥슬래브의 경계조건 및 구조형상에 따른 중량충격음의 구조음장 특성 해석을 범위로 한정된 연구로 실제 국내의 공동주택 건설시 사용되는 구성재의 종류들의 정확한 물성 파악과 구성 조건들의 조사가 선행되어 적용해야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 김기철, 최원호, 이동근, “건물 바닥판 진동의 사용성 규준에 관한 고찰”, 대한건축학회 학술발표논문집 19권 1호, pp75-80, 1999
2. 김선우, 송진규, 황재승, 송민정, 기노갑, “모델 구조체 실험을 통한 바닥충격음 저감 방안에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회, 대한건축학회논문집(계획계), 제 22권 제 4호, pp.251-258, 2006.
3. 서재관, 황재승, 송진규, 김선우, “바닥판의 동적특성에 따른 소음진동저감성능에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집 24권 1호, pp161-164, 2004.
4. 손철봉, 김재수, 김선우, “공동주택 바닥충격음 음장분포 특성에 관한 연구”, 대한건축학회 제36호, pp135-147, 1991
5. 진진용, 유승엽, 정영, 정정호, “철근콘크리트 슬래브의 설계 요소에 따른 중량충격음의 영향”, 대한건축학회, 대한건축학회 논문집(계획계) 제22권 제10호, pp329-336, 2006
6. 진진용, 정정호, 유병철, 정상민, “구조부위별 차음시공에 따른 공동주택의 바닥충격음 차단성능평가”, 대한건축학회, 18 권 6호, pp. 127-134, 2002.
7. 한경민, 박성수, “공동주택의 복합바닥판 구조에 따른 구조음장 특성 해석기법에 관한 연구”, 대한건축학회, 대한건축학회 논문집(구조계) 제23권 제4호, pp.3-10, 2007
8. 환경부, “기존 아파트의 층간소음 저감방안”, 2002
9. Joseph W. Tedesco, J Michael Stalling, Mchmoud EI-Mihilmly, “Finite element method analysis of a concrete bridge repaired with fiber reinforced plastic laminates”, Computers & Structures, Volume 72, Issues 1-3, pp. 379-407, 1999.
10. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, “The Finite Element Method, 6th edition”, Elsevier, Oxford, 20

투고(접수)일자: 2009년 11월 10일

심사일자: 2009년 11월 11일

게재 확정일자: 2009년 12월 24일