

유한 요소법을 이용한 나 슬래브의 2차원 바닥 충격진동 해석

2-Dimensional Floor Impact Vibration Analysis in Bare Reinforced Concrete Slab Using Finite Element Method

서 상 호* · 전 진 용*

Sang Ho Seo and Jin Yong Jeon

(2005년 3월 14일 접수 : 2005년 4월 28일 심사완료)

Key Words : Standard Heavy Impact Source(표준 중량 충격원), Floor Impact Sound(바닥 충격음), Finite Element Analysis(유한요소해석), Natural Frequency(고유진동수), Mode Shape(모드형), Modal Analysis(모드해석), Transient Analysis(과도해석)

ABSTRACT

The relationship between floor impact sound and vibration has been studied by field measurements, and the vibration modal characteristics have been analyzed. Vibration levels impacted by a standard heavy-weight impact source have been predicted according to the main design parameters using finite element method. Experimental results show that the dominant frequencies of the heavy impact sounds range below 100 Hz and that they are coincident with natural frequencies of the concrete slab. In addition, simple 2-dimensional finite element models are proposed to substitute 2 types of 3-dimensional models of complicated floor structural slabs those by. The analytical result shows that the natural frequencies from first to fifth mode well correspond to those by experiments with an error of less than 12 %, and acceleration peak value is coincident with an error of less than 2 %. Using the finite element model, vibration levels are estimated according to the design parameters, slab thickness, compressive strength, and as a result, the thickness is revealed as effective to increase natural frequencies by 20~30 % and to reduce the vibration level by 3~4 dB per 30 mm of extra thickness.

1. 서 론

생활 수준이 높아지고 소음 진동 환경에 대한 소비자 인식이 증대되면서, 특히 공동 주택에 있어서 발생하는 바닥 충격음 문제가 사회적으로 크게 이슈화 되었으며 이에 대한 적절한 해석적 연구와 적극적인 대응 방안이 요구되고 있다.

바닥 충격음은 충격원의 특성에 따라 중량 충격음

과 경량 충격음으로 나뉘어 진다. 중량 충격음은 주로 수십 Hz 대역의 저주파 특성을 가지는 비교적 무거운 충격원에 의해 바닥에 가해질 때 발생하는 소음으로 표준 충격원으로 뱅머신(bang machine)과 임팩트볼(impact ball) 등이 사용된다. 이에 반해 경량 충격음은 가벼운 물건이 떨어지거나 여성들의 하이힐 등에 의해 발생하는 비교적 낮은 레벨의 중고주파 특성을 가지고 있으며 이러한 바닥 충격음을 평가하기 위한 표준 충격원으로 태핑머신(tapping machine)이 사용되고 있다.

이러한 바닥 충격음 저감을 위한 국내외 다양한 실험적 연구로는 크게 3가지로 구분되는데 즉 가진원(source), 전달경로(path), 그리고 수음자(receiver) 측면에서 이루어지고 있다. 먼저 가진원에 대한 연

† 책임저자 : 정희원, 한양대학교 건축공학과
E-mail : paulseo@ihanyang.ac.kr
Tel : (02) 2220-1795, Fax : (02) 2291-1793

* 정희원, 한양대학교 건축공학과

구로서, 실제 거주자와 동일한 충격원 특성을 가질 수 있도록 태퍼머신, 뱅머신, 임팩트볼, 샌드볼(sand ball) 등에 대한 연구^(1,2)와 가진력의 특성을 변화시킬 수 있는 바닥 마감재 등에 대한 연구⁽³⁾로 나뉘어 진행되었다. 전달경로와 관련된 대표적인 연구로서, 완충재(resilient materials)를 삽입하여 상부와 하부 슬라브를 분리시키는 구조인 뜬바닥 공법과 슬라브의 두께를 변화시키거나 강성 자체를 증가시키는 고강성 공법^(4,5) 등에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 특히 뜬바닥 공법은 경량 충격음저감에는 효과가 뛰어난 반면, 저주파 특성이 지배적인 중량 충격음에 대해서는 오히려 증가시키는 경향⁽⁶⁾이 있어 보다 체계적인 연구와 적용에 면밀한 주의가 필요하다. 또한 수음자 측면에서의 연구로서, 수음실 천장내 공기층을 고려하거나 흡음재 또는 차음재를 충전하는 2중 천장 공법⁽⁷⁾을 적용하고 있으며 실제 거주자의 주관적 감성 평가에 대한 연구⁽⁸⁾가 활발히 전개되고 있다.

바닥 충격음에 대한 국내 대표적인 해석적 연구로서, 임피던스법(impedance method)을 이용한 차음 성능 예측⁽⁹⁾과 각 부재간 에너지 입출력과의 관계를 이용한 에너지 해석법(SEA, statistical energy analysis)⁽¹⁰⁾ 등이 있으나, 일반 기계 구조물 등에 광범위하게 활용되고 있는 유한 요소법(FEA, finite element analysis)을 이용한 연구에 대해서는 다소 미흡한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 경량기포와 마감물탈 등이 설치되기 전 상태의 나슬래브 구조에 대해 바닥 충격음과 바닥 충격 진동의 주파수 특성을 간략히 살펴보고, 3차원 구조의 복잡한 공동 주택 바닥 구조에 대해 타당성 있는 2차원 유한 요소 모델을 구축하여 진동 특성을 예측하였으며 실험과 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다.

2. 연구 개요 및 실험 결과

2.1 연구 개요

이 연구에서는 실험을 통해 중량 충격원에 의한 소음 및 진동 특성을 파악하고, 유한 요소법을 이용하여 나 슬래브 바닥 구조를 해석하고 현장측정결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다. 이 후 검증된 유한 요소 모델을 통해 바닥 구조의 주요 설계인자에

대해 모드 및 과도 해석을 실시하여 진동 특성을 예측하였다.

유한 요소 모델을 구축함에 있어서 3차원형상의 복잡한 거실/주방 구조를 비교적 간단한 2차원 형상의 구조로 모델링하여 모델의 변경이나 신속한 해석이 수행될 수 있도록 하였으며, 또한 보다 신뢰성 있는 해석과 실험을 위해 두가지 평형대의 나 슬래브 구조에 대해서 연구를 진행하였다.

Fig. 1은 이 연구의 대상인 2가지 평형대의 투시도로, 최근 아파트 공급 평형의 약 48.3%를 차지하는 30평형대(case-A)와 40평형대(case-B)이다. 한편 주요 관심 영역으로 거주자들이 가장 많은 시간동안 사용하며 가족이 공동으로 사용하고 있어 아이들 뛰는 소리를 포함한 충격음 발생 빈도가 높은 주방/거실 공간을 선정하였다.

2.2 실험 방법

Fig. 2와 Table 1은 중량 충격원에 의한 소음 및 진동 측정 계략도와 측정에 사용된 계측기 및 센서 등을 나타낸다.

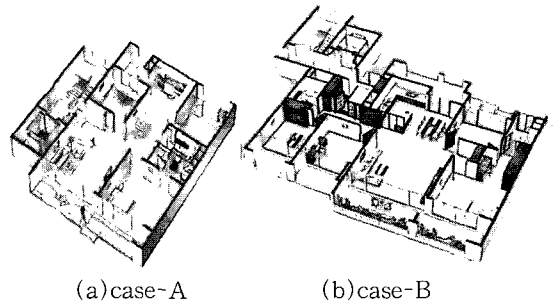


Fig. 1 Apartment details for experiment and finite element analysis

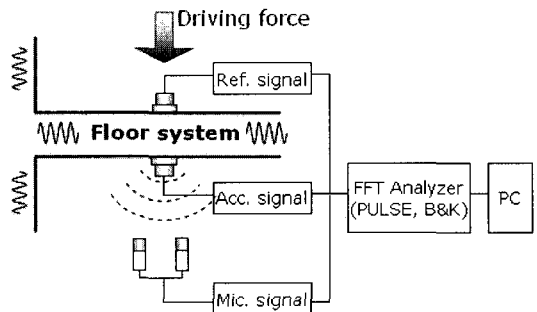


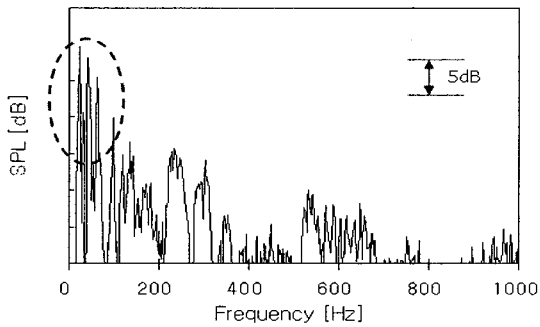
Fig. 2 Noise and vibration experiment driven by bang machine, standard heavy impact source

30평형대인 case-A에 대한 실험에서는 슬래브 중앙지점의 진동 및 소음특성을 상호 비교하기 위하여 KS F 2810-2 실험법에서 중앙점 측정치만 선정하였다. 거실의 중앙 1개 지점에 5회 가진하였으며, 진동은 바닥 슬래브 하단(수음실 천장)을 포함하여 수음실 벽 및 수음실 슬래브 하부의 중앙 1개 지점에서, 소음은 수음실 중앙 2개 지점에서 측정하였으며, case-B는 천정에서의 진동만 측정하였다.

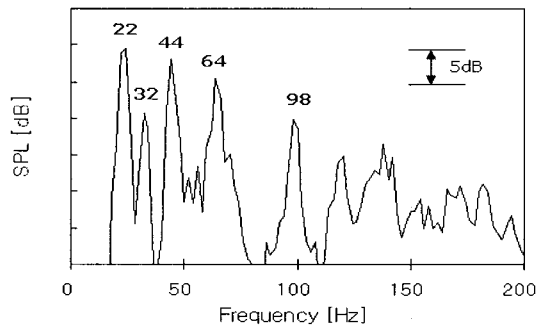
이때 중량 충격원에 의한 가진시, 정상 상태 응답과는 달리 임펄스와 유사하여 매우 짧은 시간 내 전달된 진동 및 소음의 특성을 나타내므로, 측정에 보다 세심한 주의를 필요로 하게 된다. 따라서 이 연구에서는 가진점에서 50 cm 떨어진 위치에 가속도 센

Table 1 Measurements instrumentation

Items	Instruments
Frequency analyzer	B&K, Pulse
Standard heavy impact source (bang machine)	Rion, FI-02
Microphones	B&K, Type 4190
Accelerometers	PCB, 333A12



(a) Frequency range : 2~1000 Hz



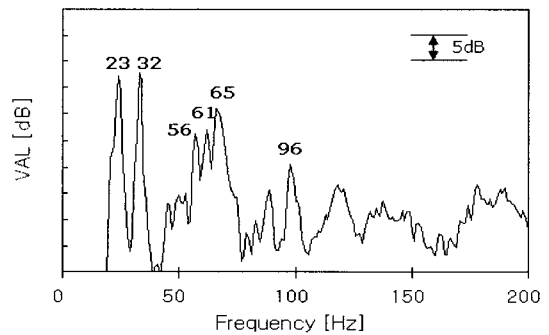
(b) Frequency range : 2~200 Hz

Fig. 3 Floor impact sound spectrum in case-A

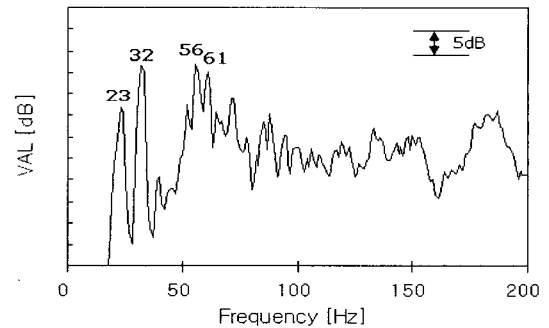
서를 별도 설치하여 이를 기준신호로 활용하였다. 즉, 이 가속도 센서를 통해 일정 레벨 이상이 입력될 때 소음 및 진동 측정이 이루어지도록 동기화(triggering)하였다.

2.3 실험 결과

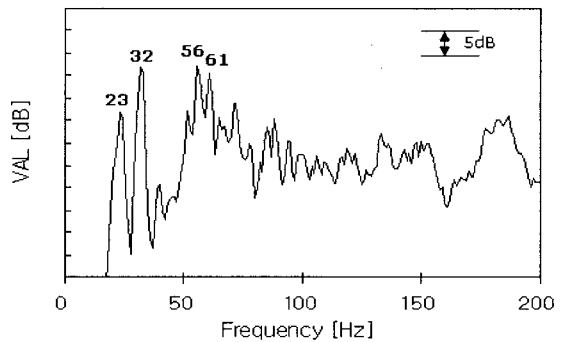
Fig. 3~4는 case-A의 수음실에서 측정된 음압레벨(SPL, sound pressure level)과 진동레벨(VAL,



(a) On the ceiling of receiving room



(b) On the wall of receiving room



(c) On the floor of receiving room

Fig. 4 Floor impact vibration spectrum in case-A

vibration acceleration level, $ref=10^{-5} m/s^2$)을 각각 나타낸다. Fig. 4(a)는 수음실 천정 위치에서, (b)는 수음실 벽에서, 그리고 (c)는 수음실 바닥에서의 진동레벨을 나타낸다.

실험 결과, 바닥 충격 소음의 주요 스펙트럼 특성으로는 주요 주파수 특성이 100 Hz 이하의 저주파 성분이며 이 범위내 주요 피크 성분인 22, 32, 44, 64 Hz 등은 진동레벨의 피크와 거의 일치한다는 것이다. 이러한 피크 성분들은 총합 소음 레벨(overall sound level)과 바닥 충격음 차단 성능 평가에 가장 큰 영향을 미치는 주파수 대역이다.

이러한 저주파 대역의 피크 특성의 주 원인으로는 다음의 2가지로 구별하여 분석될 수 있다.

첫째, 저주파에서 지배적인 성분을 갖는 주 원인으로는 가진원인 중량 충격원의 충격력 특성에 의한 것이라 판단된다. 즉 충격력의 시간 파형 특성은 20 msec 이내에서 단봉형의 임펄스로 구성되어 있고, 이의 주파수 특성이 약 100 Hz 이하의 저주파 성분이 지배적인 것과 잘 일치한다. 즉 가진원의 충격력 스펙트럼과 유사한 저주파 대역에서 높은 소음 응답 특성을 보여 주고 있는 것이다. 둘째, 이러한 저주파 대역에서의 피크 성분들은 바닥 슬래브의 구조적 진동 즉, 고유 진동수(natural frequency)의 영향으로 특정 주파수에서 높은 에너지 특성을 가진 구조진동음으로 판단된다. 따라서 이와 같은 바닥 충격음에 대한 체계적인 분석 및 저감을 위해서는 가진원인 중량 충격원에 대한 상세한 고찰과 함께 주요 전달 매체인 바닥 슬래브 구조의 진동모드 등에 대해 보다 면밀한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

Fig. 5는 Case-B의 진동레벨을 나타내는 것으로, 보다 작은 평형인 Case-A에 비해 고유진동수가 낮음을 알 수 있다.

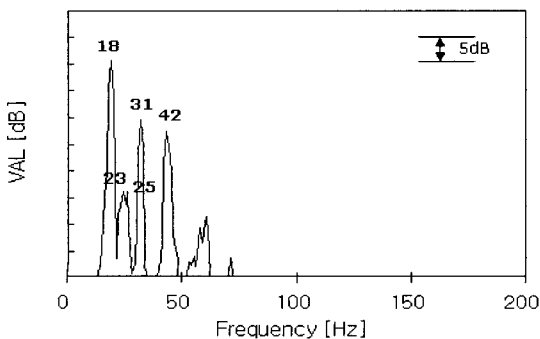


Fig. 5 Floor impact vibration spectrum in case-B

3. 유한 요소 해석

3.1 유한 요소 모델링

중량 충격원에 의해 발생된 소음은 바닥 구조의 슬래브 진동과 직접적으로 관련되는 것이며, 이러한 진동 특성은 슬래브의 고유진동수임을 확인하였다. 이 장에서는 2가지 평형 case-A와 case-B에 대해 유한 요소법을 활용하여 복잡한 3차원 형상의 주방/거실에 대한 2차원 유한 요소 모델을 구축하였으며 2차원 모델의 타당성을 검증하기 위해 모드 해석(modal analysis)을 실시하여 실험과 비교하였으며, 이를 바탕으로 설계 인자를 변경하며 과도 해석(transient analysis)을 실시하여 각각 진동량을 예측하였다.

Fig. 6은 이 연구에서 제시된 주방/거실에 대한 유한 요소 모델이다. 고려된 유한 요소 모델의 주요 특징은 3차원 형상을 2차원으로 간략화 한 것과 세대 전체가 아닌 거실/주방만을 그 대상으로 한 것이다. 특히 주방/거실과 연결된 방 및 벽체 부분에 대해서는 경계 조건만을 고려하여 모델링되었다.

Table 2와 Fig. 7은 해석에 사용된 물성치와 가진력의 특성을 나타낸다. 물성치중 탄성계수(elastic

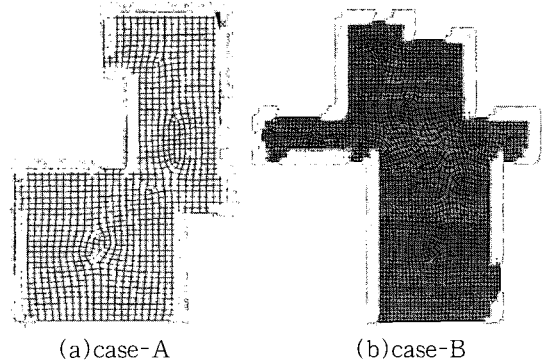


Fig. 6 Finite element modeling of kitchen/living room

Table 2 Material properties for FEA

No.	Type	Value
1	Thickness	[mm] 150
2	Elastic modulus	[N/m ²] 2,254×10 ¹⁰
3	Density	[kg/m ³] 2400
4	Poisson ratio	- 0.167
5	Damping ratio	- 0.054

modulus)는 압축강도와 중량과의 관계식으로부터, 감쇠비(damping ratio)는 실험을 통해 측정된 값이다. 입력 가진력(b)은 과도 해석을 위한 것으로 뱅머신의 실제 가진력(a)을 고려하여 0.002 sec 시간 간격으로 이산화하였다.

유한 요소 모델은 신속한 모델링 및 해석을 위해 8개 절점을 가지는 2차원 쉘 요소(shell element)를 사용하였는데 이는 각 절점에서 병진방향과 회전방향의 6개 자유도를 가지므로 바닥구조의 진동을 충분히 고려할 것으로 판단하였다. 주요 경계 조건은 크게 2가지로 구분하여 벽체와 연결된 부분에서는 병진방향과 회전방향 자유도 6개를 모두 구속(fixed)시켰으며, 문 또는 통로로 연결된 부분에서는 6개 모든 자유도를 놓아주는(free) 조건을 고려하였다.

3.2 유한 요소 모델 검증

이 연구에서 제시된 유한 요소 모델에 대한 검증을 위해 2가지 평형의 실험 결과와 비교하였으며 이를 Table 3에 나타냈다.

실험과 해석 비교 결과, 1~5차 고유 진동수에 대해 실험과 약 12% 오차 범위 내에서 비교적 잘 일

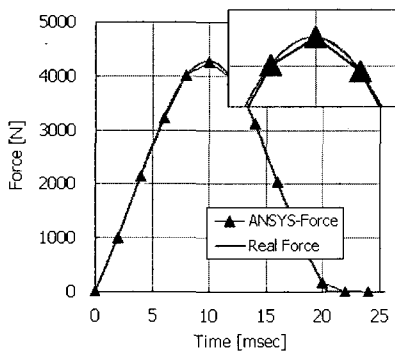


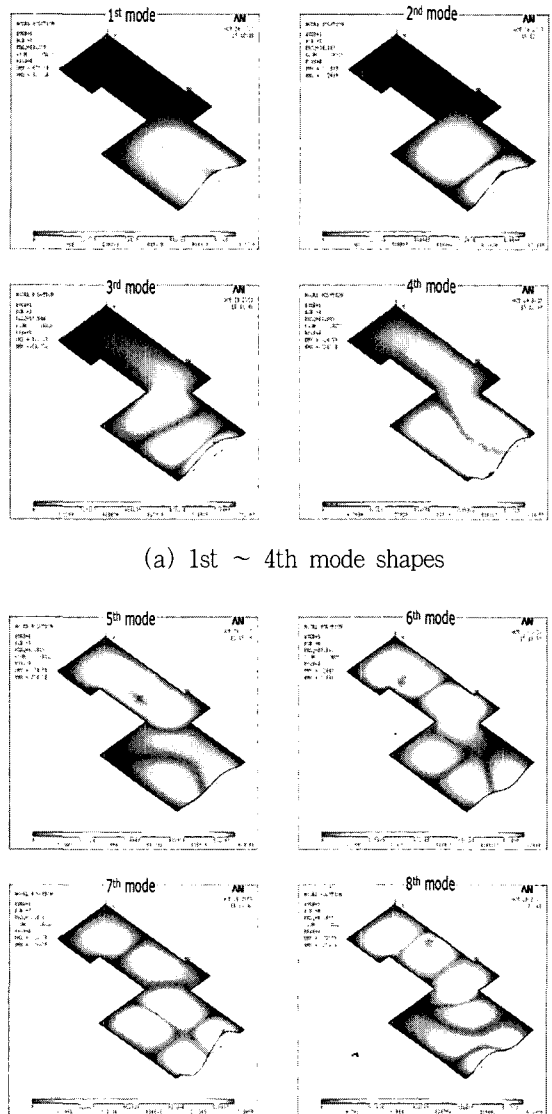
Fig. 7 Driving force of bang machine

Table 3 Comparison of natural frequencies by experiment (EXP) with finite element analysis (FEA)

Modes	Case-A			Case-B		
	EXP	FEA	Error [%]	EXP	FEA	Error [%]
1st	23	23.3	1.3	18	16.9	6.1
2nd	31	34.2	9.4	23	20.4	11.4
3rd	56	57.5	2.6	25	24.8	0.7
4th	61	61.0	0.0	31	33.1	6.9
5th	65	61.9	5.0	42	45.2	7.7

치하였다. 특히 2차 고유 진동수에서 실험과 다소 많은 차이를 보이는데 이는 경계 조건인 베란다 창부분에 대한 영향에 의한 것으로 향후 이 부분에 대해 보다 정확한 경계 조건에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

따라서 이 연구에서 도출된 2차원 형상의 유한 요소 모델은 3차원 구조의 다소 복잡한 주방/거실 공간에 대해 잘 적용될 수 있어 타당성 있는 것으로 판단된다.



(a) 1st ~ 4th mode shapes

(b) 5th~8th mode shapes

Fig. 8 Mode shapes of kitchen/living room by FEA

3.3 모드 해석 결과

Fig. 8은 각 고유 진동수에 대한 모드형(mode shape)을 나타내고 있다. Fig. 8(a)는 주로 중량 충격원에 의해 문제시되고 있는 저주파 대역의 1~4차 모드로, 소음 주파수 특성과 비교적 잘 일치하는 주파수 범위이다. 그러나 Fig. 8(b)와 같이 5차 이상의 고차 모드는 주방과 거실 공간 전반에 걸쳐 발생하는 다소 복잡한 모드로서, 이 주파수가 소음 스펙트럼에서는 발견되지 않았던 것으로 보아 충격음에 대한 기여가 크지 않은 것으로 판단된다.

따라서 거실에서 발생하는 충격음 저감을 위해서는 1~4차 모드에 대한 다양한 구조적 대책이 요구되고 있다.

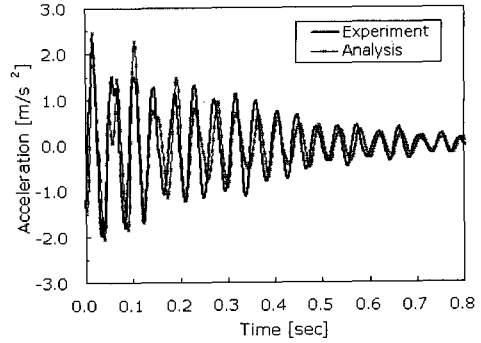
3.4 과도해석 결과

Fig. 9~10은 유한 요소법을 이용하여 거실/주방에 대해 실시한 과도 해석에 대한 결과를 나타내는 것으로 거실 중앙지점에서의 시간 및 주파수 응답이다. Fig. 9(a)는 중량 충격원에 의한 실험결과와 유한 요소법에 의한 해석결과를 비교한 것으로, 해석결과가 실험과 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 특히 해석의 가속도 피크치 2.45 m/s^2 은 실험치 2.42 m/s^2 에 비해 약 2% 이내의 오차를 가짐으로 본 과도 해석시 사용된 모델 또한 유효함을 알 수 있다.

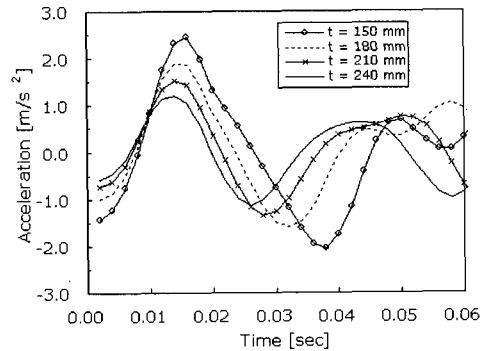
Fig. 9(b)와 Fig. 10(a)는 슬래브의 두께에 따른 가속도 및 진동 가속도 레벨에 대한 시간 및 주파수 응답특성을 각각 나타낸다. 슬래브 두께 150, 180, 210, 240 mm에 대한 해석 결과, 슬래브 두께 30 mm 증가에 대해 고유진동수는 약 20% 증가하였으며 진동 가속도 레벨은 약 3~4 dB 저감되는 것으로 예측되었다. 이는 기존의 실험적 연구와도 비교적 잘 일치하고 있다.^(4~5)

따라서 이러한 구조물의 진동저감은 주파수별 방사 효율 등에 따라 다소 차이는 있을 수 있으나 충격음 저감에도 유사한 효과를 거둘 것으로 판단된다.

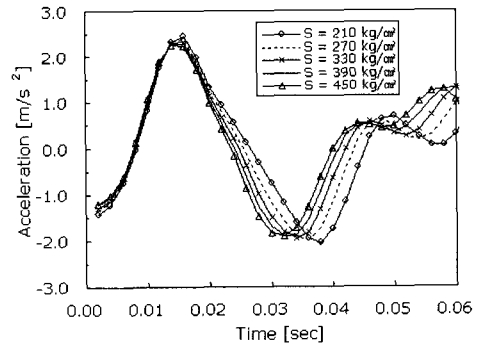
Fig. 9(c)와 Fig. 10(b)는 슬래브의 압축강도에 따른 시간 및 주파수 응답을 나타낸다. 압축강도는 슬래브 구조의 형상 변경 없이 물성 즉 재료적 측면에서 동특성 변화를 고찰하기 위해 고려되었다. 슬래브 압축강도 $210 \sim 450 \text{ kg/cm}^2$ 에 대한 해석 결과, 압축강도 20~30%의 증가에 따른 진동저감 효과는 거의 없으나, $300 \sim 400 \text{ kg/cm}^2$ 등의 고강도의 경우 고유



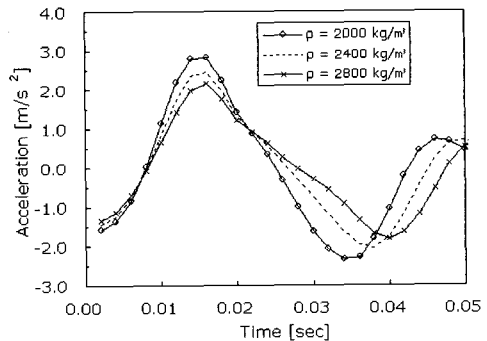
(a) Comparison with experiment



(b) Effect of concrete slab's thickness



(c) Effect of concrete slab's compressive strength

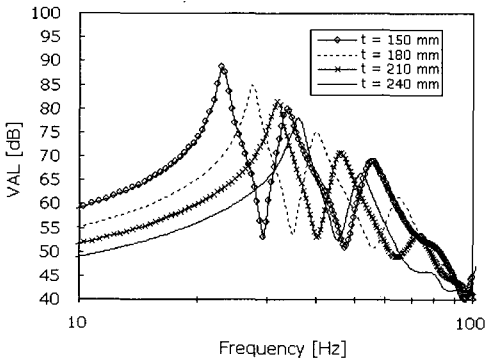


(d) Effect of concrete slab's density

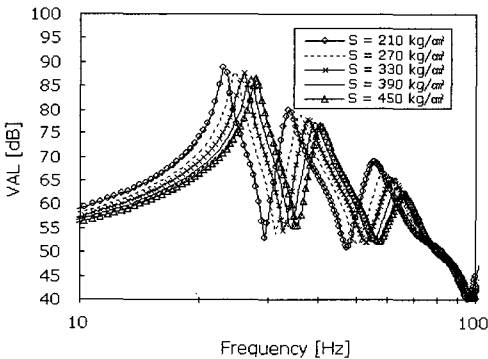
Fig. 9 Transient time response in the central point of living room by finite element analysis

진동수는 약 20% 증가하였고, 진동 레벨 또한 약 2 dB 내외의 저감효과가 있는 것으로 예측되었다.

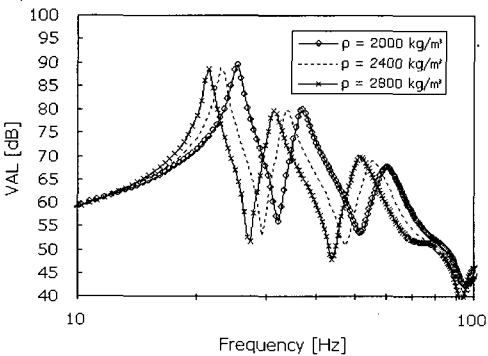
Fig. 9(d)와 Fig. 10(c)는 슬래브의 밀도 변화에 따른 가속도 진동 응답을 나타낸다. 슬래브 밀도가 증가할수록 질량 요소의 효과가 증가하여 고유 진동수가 다소 낮아지게 되며, 또한 초기 가속도 피크치도 저감되기는 하나 그 레벨은 미미한 편이다.



(a) Effect of concrete slab's thickness



(b) Effect of concrete slab's compressive strength



(c) Effect of concrete slab's density

Fig. 10 Frequency response in the central point of living room by finite element analysis

따라서 3가지 주요 설계 인자에 대한 과도 해석 결과, 슬라브 두께에 의한 영향이 가장 크며 두께 증가에 따라 고유 진동수가 증가하며 진동 레벨은 매우 효과적으로 저감되는 특성을 보여줌으로써 최근 충격음 저감을 위해 고려되고 있는 두께 증가를 통한 고강성 공법이 어느 정도 효과를 거둘 것으로 사료된다.

4. 결 론

공동 주택의 바닥 충격음 저감을 위한 연구로서, 중량 충격원에 의한 소음 및 진동 실험과 유한 요소 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 중량 충격원에 의해 발생된 수음실에서의 소음 특성으로는 100 Hz 이하의 저주파가 지배적이며, 이는 실제 바닥 충격음 차단 성능을 결정짓는 중요 성분이다. 또한 100 Hz 이하의 소음 성분 중 주파수 들로서 소음과 진동이 매우 높은 상관 관계를 가지고 있음을 보여준다.

둘째, 유한 요소법을 이용한 모드 해석 및 과도 해석 결과, 슬래브의 1~5차 고유진동수는 진동 측정 결과와 약 12% 오차 범위 내에서, 시간 응답에 있어서는 가속도 피크치는 실험치와 약 2% 오차 범위 내에서 잘 일치하였으며 이를 통해 타당성 있는 2차원 형상의 유한 요소 모델을 구축할 수 있었다.

셋째, 1~4차 모드는 실제 주민들이 주로 거주하는 거실에서 발생하는 저주파 모드임을 확인하였으며, 5차 이상의 고차 모드는 주방과 거실이 서로 복합적으로 연결되어 있어 제어에 다소 한계가 있을 것으로 사료되나 충격음 특성에는 큰 기여를 하지 않는 것으로 크게 문제가 되지 않을 것으로 사료된다.

넷째, 바닥구조의 주요 설계 인자인 슬래브 두께 변화에 따른 진동 해석 결과, 두께 30 mm 증가시 고유 진동수는 약 19% 증가하였고, 진동 가속도 레벨은 약 3~4 dB 정도 저감되어 충격음 저감을 위한 주요 설계로 고려될 수 있을 것으로 판단되었다.

다섯째, 그외 설계 인자인 압축 강도 및 밀도 변화에 따른 해석 결과, 슬래브 두께에 비해 다소 미미한 영향을 미치고 있으나 압축 강도의 경우 기존 대비 1.5~2배 증가되는 고강도 설계시 약 20%의 고유 진동수 증가와 약 2 dB 정도의 진동 저감 효과가 있는 것으로 예측되었다.

향후 연구 과제로는, 슬래브 구조 진동에 의한 소음 방사 특성에 대해 보다 체계적이고 해석적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 환경부 “차세대 핵심환경기술개발사업” (과제번호 : 03-1-11-2-002)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Tachibana, H. and Tanaka, H., 1996, “Development of a Heavy and Soft Source for the Assessment of Floor Impact Sound Insulation”, Proc. J. Acous. Soc. Am, 100:2768.

(2) Shi, W., Johansson, C. and Sundback, U., 1996, “Assessment of the Sound Insulation of a Wood Joist Construction Due to Different Types of Impact Sources,” Applied Acoustics, Vol. 48, pp. 195~203.

(3) 기노갑, 정진연, 송민정, 김선우, 2003, “바다마감재에 의한 바닥충격음 차음특성 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, pp. 645~648.

(4) 이성호, 정갑철, 2003, “바닥충격음 완화를 위

한 저감기술”, 대한환경공학회 춘계학술연구발표회, pp. 754~761.

(5) 전진용, 정정호, 유병철, 정상민, 2002, “구조부위별 차음시공에 따른 공동주택의 바닥충격음 차단성능평가”, 대한건축학회논문집 계획계, 제 18 권, 제 6 호, pp. 127~134.

(6) 서상호, 전진용, 송희수, 2004, “완충재 유무에 따른 표준 중량 충격원에 의한 콘크리트 바닥 구조의 소음 및 진동 특성”, 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 8 호, pp. 661~667.

(7) 김선우, 신흥철, 정환욱, 기노갑, 송민정, 2002, “천정구조와 바다마감재의 조합에 따른 경량충격음 응답특성 및 저감량에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 계획계, 제 18 권, 제 8 호, pp. 177~184.

(8) Jeon J. Y. and Jeong, J. H., 2003, “Measurements of Floor Impact Noise Using a New Impact Ball”, Noise-con, USA.

(9) 김재수, 장길수, 김선우, 1992, “임피던스법을 이용한 공동주택 바닥 충격음 차음성능 예측방법에 관한 실험적 연구(I)”, 한국소음진동공학회논문집, 제 2 권, 제 1 호, pp. 21~31.

(10) 김명준, 손장열, 김홍식, 1998, “콘크리트 구조체의 경량바닥 충격음 전달특성 해석을 위한 SEA법의 적용성에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집, 제 14 권, 제 1 호, pp. 313~322.