

완충재 유무에 따른 표준중량충격원에 의한 콘크리트 바닥 구조의 소음 및 진동 특성[#]

Noise and Vibration Characteristics of Concrete Floor Structures Using Resilient Materials Driven by Standard Heavy Impact Source

서 상 호[†] · 송 희 수* · 전 진 용**

Sang Ho Seo · Hee Soo Song and Jin Yong Jeon

(2004년 1월 8일 접수 ; 2004년 7월 1일 심사완료)

Key Words : Resilient Materials(완충재), Standard Heavy Impact Source(표준중량충격원), Natural Frequency(고유진동수), Resonance(공진), Triggering(동기화), Finite Element Analysis(유한요소해석), Rigid Body Analysis(강체해석)

ABSTRACT

The characteristics of noise and vibration by a heavy impact source was studied. The triggering method was used for increasing the reliability and stability to measure the level of sound pressure, sound intensity and vibration acceleration. A simple finite element model and a rigid body analysis method were suggested to calculate the natural frequencies of the multi-layer floor system. The results show that the resilient materials decrease the natural frequency of the reinforced concrete slab, make a resonance with dominant driving frequency in the low frequency region, and increase the vibration and noise level. A simple finite element model and rigid body models was suggested to calculate the natural frequencies of the floor systems.

1. 서 론

최근 공동주택의 바닥 충격음 문제가 사회적으로 크게 이슈화되면서 이에 대한 적절한 규제방안으로서 현재 2004년 상반기부터 사업계획을 승인받는 아파트를 대상으로 법적 규제치를 적용할 예정이다.

바닥 충격음은 충격원의 에너지 레벨 및 주파수 특성에 따라 중량 충격원(heavy impact source)과 경

량 충격원(light impact source)으로 나뉘어 진다. 표준 중량 충격원으로서 비교적 100 Hz 이하의 저주파에서 높은 에너지 레벨을 가지는 뱅머신(bang machine)을 사용하고, 표준 경량 충격원으로서 여성의 하이힐 소리나 가벼운 물건 등이 떨어지는 특성과 유사한 태핑머신(tapping machine)이 사용된다.^(1~3)

공동주택에서 발생하는 주 충격형태 및 어린이 연령대를 서울지역 공동주택 거주자 611명을 대상으로 조사한 결과에 의하면, 어린이의 달리기와 뛰기가 70% 이상 차지하고 있으며 6~9세의 어린이가 충격음을 가장 많이 발생시키는 것으로 나타났다.⁽⁴⁾ 특히 충격원에 따른 주관적 평가에 대한 연구에 의하면, 경량 충격원보다 중량 충격원에 해당하는 저주파음에 대해 입주자 불만이 큰 것으로 조사되었다.⁽⁵⁾

경량 충격원에 의한 바닥 충격음에 대한 대책으로서, 가진원에 보다 근접한 대책방안으로서 바닥 마감

[†] 책임저자 : 정희원, 한양대학교 건축공학과
E-mail : paulseo@ihanyang.ac.kr
Tel : (02) 2290-1795, Fax : (02) 2291-1793

* 한양대학교 건축공학과

** 정희원, 한양대학교 건축공학과

[#] 본 논문은 2003추계학술대회에서 우수발표논문으로 추천되었음.

재의 구조전체 두께별, 발포층 두께별, 발포층의 발포율 및 하부 절연층 부착여부별 종류에 따라 실험적 방법에 의한 연구가 진행되었다.⁽⁶⁾ 또한 수음차 측면에서의 방안으로 일정한 공간의 공기층을 형성하는 천정 구조를 설치함으로 바닥 충격음을 저감하는 연구 또한 수행되었다.⁽⁷⁾

중량 충격원에 의한 바닥 충격음에 대한 대책으로서서는 주로 바닥 슬래브의 두께 또는 강도를 증가시키는 것이 주로 고려되고 있으나⁽⁸⁾ 이는 바닥전체의 구조와 관련된 경계조건, 구조적 강도, 시공 재료비 등 종합적으로 고려하여야 한다.

특히 바닥 충격음 저감을 위해 기포 콘크리트와 슬래브 사이에 사용되는 충격음 저감재 즉, 완충재는 뜬바닥 형태의 슬래브와 독립된 바닥 구조를 형성하여 진동전달률을 저감하는 역할을 하는 것으로 알려져 있어 현장 적용이 증가되는 추세에 있으며, 최근 다양한 동특성을 갖는 완충재에 대해 실험실 경량 충격음에 대한 연구⁽⁹⁾가 진행된바 있으나, 중량 충격음에 대한 현장 실험 측정법에 대한 연구는 다소 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 완충재 유무에 따른 중량 충격원에 대해 바닥 구조의 소음 및 진동 특성을 살펴보고, 또한 실험 및 간략화한 해석적인 방법을 통해 저주파수 영역에서 발생된 지배적인 특정 주파수를 분석하여 중량 바닥 충격음의 저감 방안으로 활용하고자 한다.

2. 실험 방법 및 결과

2.1 측정 대상

표준 중량 충격원에 의해 수음실 각 부위로 전달된 진동 및 소음간 상관 관계를 분석하고, 또한 충격음 저감재로서 완충재의 특성을 파악하기 위해 벽식 구조의 S시 현장의 30평형대 아파트내 방2(room2)를 그 대상으로 완충재 유무에 따라 Case-A세대와 Case-B세대로 구별하였으며 이를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타냈다.

거실의 경우 단면적이 넓고 또한 다수의 방 및 베란다, 현관 등으로 연결되어 다소 복잡한 경계조건을 가지고 있어 완충재 적용에 따른 소음진동 특성 변화를 고찰하기에 다소 어려움이 있어 보다 경계조건이 단순화된 방2를 선정하였다.

Case-A와 Case-B세대는 바닥 높이가 같은 260mm로 동일한 벽식 구조를 가지고 있으며 공히 20층 규모의 대단지 아파트내 위치한 계단식 아파트이다. Case-A세대의 바닥 구조는 바닥 슬래브 150mm, 기포 콘크리트 55mm와 마감 몰탈 45mm로 구성되어 있고 그 사이 두께 10mm, 동탄성계수 23 MN/m³, 손실계수 0.19의 완충재가 삽입된 구조이고, Case-B세대는 완충재를 적용하지 않은 기본 바닥 구조이다.

대상 건물의 마루 바닥재나 석고보드 등 마감재를 부착하기 전 슬래브의 골조 상태에서 소음 및 진동을 측정하였는데, 이는 마감재와 골조사이 결합구조의 특성에 따라 소음 방사 특성과는 무관한 공진 특성 등이 발생할 수 있기 때문이다.

2.2 측정 방법

현장에 대한 소음 및 진동 측정은 KS규격(KS F 2810-2)을 참조로 표준 중량 충격원인 뱀머신을 사용하여 가진하였으며, 음압레벨, 진동레벨 그리고 음향 인텐시티레벨을 측정하였다.

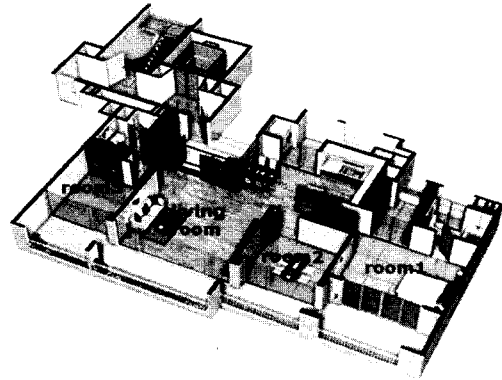
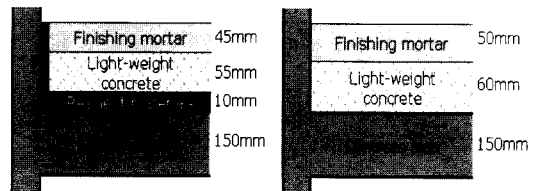


Fig. 1 Perspective apartment drawing for measurement



(a) Case-A (b) Case-B

Fig. 2 Floor system details

바닥 구조의 소음진동 특성은 바닥 구조의 동특성과 더불어 충격원 특성에 의해 결정되게 되는데 Table 1과 Fig. 3은 경량 충격원과 중량 충격원에 대한 에너지 스펙트럼을 나타낸다.⁽¹⁰⁾

중량 충격원의 경우, 100 Hz 미만의 저주파 성분에 충격 에너지가 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 따라서 이러한 저주파 특징으로 인해 바닥 구조의 고유 진동수가 특히 옥타브 밴드 31.5 Hz 또는 63 Hz 부근에 존재할 경우 가진력과 공진에 따라 진동 응답이 크게 증폭되어 결과적으로 소음에 큰 영향을 주게 된다. 반면, 경량 충격원은 넓은 주파수 범위에서 상대적으로 평탄 특성을 가지며 500~4000 Hz 부근에서 보다 높은 에너지가 집중되는 경향을 가진다.

Fig. 4과 Table 2는 중량 충격원에 의한 소음 및 진동 측정 개략도와 실험에 사용된 장비를 나타낸다.

뱅머신은 가진실의 바닥 중앙을 가진하게 하였으며, 이때 가진실 바닥 충격지점, 슬래브 하단 즉 수음실 천정 중앙지점, 수음실 벽 중앙지점 및 수음실 바닥 중앙지점에서 가속도레벨을 측정하였으며, 음압레벨은 수음실 바닥에서 약 1.2 m 높이에서 중앙을 포함한 2개소를 측정하였다. 이때 주파수분석기의 채널 수 제한으로 수회 가진하여 가속도계를 옮겨가며 측정을 진행하였는데, 이때 가진실 바닥의 진동신호를

기준 신호(Ref. signal)로 하여 동기화(triggering)시켜 피크레벨을 측정하였다.

일반적인 임펄스 가진의 경우, 정상상태의 특성과 달리 매우 짧은 시간 내 정확한 데이터를 확보해야 하는 어려움이 있으며, 본 중량 충격원의 경우 수십 msec 내 다수의 데이터를 평균해야 한다. 따라서 본 실험에서는 중량 충격원에 의해 바닥이 진동하는 시점을 기준으로 하기 위해 가진 바닥에 가속도계를 장착하여 기준 신호로 인식하여 이 신호가 정해진 레벨 이상의 값을 가지는 순간 측정 대상에 대한 소음 및 진동 측정이 시작되도록 설정하였다. 또한 잡음 신호의 제거를 위해 동기화된 5개의 데이터를 평균하여 측정하였다.

또한 크기와 방향을 동시에 측정하여 보다 정확한 소음 방사 특성을 분석하기 위해 음향 인텐시티 레벨을 동시에 측정하였다. 음향 인텐시티는 신호대 잡음비(signal to noise ratio)가 좋은 근거리 음장(near field)에서 음원에 대해 보다 정확히 측정할 수 있는 것으로, 2개의 마이크로폰으로부터 측정된 음압과 상호 스펙트럼 함수(cross spectrum function)의 허수부를 이용하여 측정되었다. 음향 인텐시티 프로브에 사용된 마이크로폰은 1/2" 크기의 콘덴서형으로 마이크로폰 사이 간격자(spacer)는 충격음의 저주파 특

Table 1 Driving force of floor impact sources

Hz	16	31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Light (N)	1.7	2.4	3.5	4.7	6.9	9.6	13	15	10	1.7
Heavy (N)	108	104	40	10	4.5	1.6	0.6	-	-	-

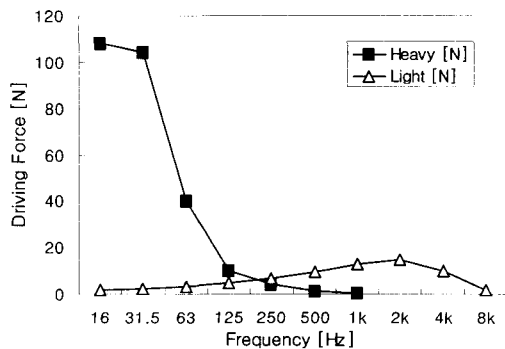


Fig. 3 Driving force spectrum of floor impact sources

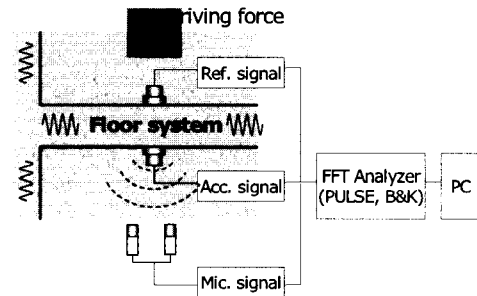


Fig. 4 Noise and vibration measurement with triggering

Table 2 Measurement instrumentation

Items	Instruments
Frequency analyzer	B&K, Pulse
Heavy impact source	Rion, FI-02
Microphones	B&K, Type 4165
Accelerometers	PCB, 333A12
Sound intensity probe	GRAS, 40 AK

성을 고려하여 50 mm를 사용하였다. 측정위치는 수음실내 천정, 바닥, 벽의 가로, 세로를 각각 5개로 균등 분할하여 총 25개 지점으로 나누어 분할된 면의 중앙 지점을 선택하였으며, 또한 각 면에서 약 50 mm 거리에서 측정하였으며 이때 가진면 바닥의 진동신호로 동기화하였다.

2.3 소음 및 진동 실험 결과

Fig. 5는 완충재를 적용한 Case-A에 대한 소음 및 진동 측정 결과를 나타낸다.

소음 스펙트럼의 경우(a), 약 49 Hz의 특정 주파수에서 비교적 높은 주파수 특성을 가지고 있다. 또한 진동 스펙트럼의 경우, 가진면 바닥(b), 수음실 천정(c), 수음실 벽(d), 수음실 바닥(e)에 있어서도 동일한 특성의 40~60 Hz 부근에서 높은 피크성분을 가지고 있다. 특히 가진면 바닥에서의 진동레벨은 음압레벨과 비교적 유사한 값을 가지고 있으며, 바닥에서의 피크 주파수는 바닥 구조의 고유특성을 반영해주는 것으로 고유진동수로 판단된다. 또한 이러한 진동 특성이 수음실 벽과 바닥으로 전달되어 유사한 주파수 특성이 발견됨을 알 수 있다. 특히 바닥에서의 주파수 특성의 경우, 다소 복잡하고 다양한 피크가 발생하고 있는 것은 가진면에서 발생한 진동이 벽과 주변 구조를 통해 전달되면서 이들이 동특성이 일부 반영되었기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 6은 완충재를 적용하지 않은 Case-B에 대한 소음 및 진동 측정결과이다.

소음 스펙트럼의 경우(a), 약 52 Hz 부근에서 높은 피크 성분을 보이고 있는 반면, 진동 스펙트럼의 경우(b), 약 96 Hz에서 비교적 높은 피크의 레벨이 발생하였다. 또한 레벨에 있어서도 완충재를 적용한 세대가 완충재를 적용하지 않은 세대에 비해 진동레벨은 10 dB, 음압레벨은 14 dB 오히려 증가하였다.

이의 주 원인으로는 바닥 구조의 동특성과 가진력 즉 중량 충격원의 특성에서 그 원인을 찾을 수 있을 것으로 사료된다. 즉, 완충재를 적용하지 않은 세대의 경우, 콘크리트 슬래브와 기포 콘크리트 및 마감 몰탈이 일체화 된 하나의 바닥 구조로서 굽힘 진동을 하게 된다. 반면, 완충재를 적용한 세대의 경우, 완충재를 중심으로 기포 콘크리트와 마감 몰탈의 상부 구조와 콘크리트 슬래브의 하부 구조로 분리 되어 이른바 뜬바닥 구조로서 1자유도 진동계의 특성이 나타나는 것이다.

이와 같이 뜬바닥 구조의 진동계의 경우, 고유진동수는 기포 콘크리트와 마감 몰탈의 질량과 완충재의 동탄성계수로 결정되어 보다 저주파로 이동하게 된다. 본 연구결과와 같이 완충재가 없는 세대의 고유진동수 96 Hz의 구조는 완충재를 삽입하게 됨으로 오히려 보다 낮은 50 Hz 대역으로 내려오게 된 것이다. 이때 이러한 저주파 특성은 중량 충격원의 에너지 스펙트럼의 특성과 일치하여 오히려 음압레벨이 증가하는 결과를 초래한 것으로 사료된다. 이는 이전의 완충재에 대한 연구⁽⁹⁾에서와 같이, 뜬바닥 구조의 고유진동수가 낮아짐에 따라 진동 및 음압레벨이 증가하는 것과 일치된 결과를 나타낸다.

2.4 음향인텐시티 실험 결과

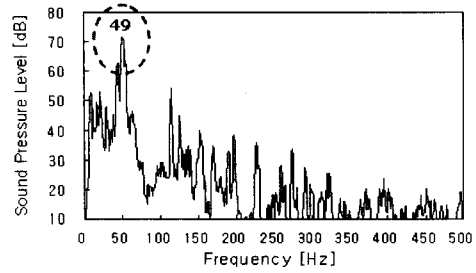
Fig. 7은 완충재를 적용한 세대 Case-A의 각 면에 대해 음향 인텐시티 레벨을 측정후 이를 공간 평균한 값을 나타낸다. 그 결과, 소음방사특성은 바닥 > 천정 > 벽의 순으로 소음이 크게 방사되고 있으며, 특히 천정의 경우 40, 50, 63 Hz의 주파수 성분이 크게 지배적으로 나타나고 있다. 완충재를 적용하지 않은 세대 Case-B에 대해 각 면의 공간 평균한 측정결과를 Fig. 8에 나타냈다. 인텐시티 레벨의 경우, 천정 > 바닥 > 벽의 순으로 소음이 크게 방사되고 있으나, Case-A에서 3개의 주파수에서 지배적인 성분이 나타나는 반면, Case-B에서는 보다 넓은 밴드인 50~160 Hz에 걸쳐 높은 에너지를 방사함을 알 수 있다. 따라서 완충재를 적용한 경우에 비해 지배적인 주파수성분이 다소 분산되어 있는 특성을 보여주고 있다.

3. 해석 방법 및 결과

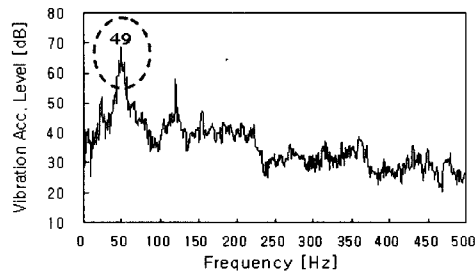
3.1 유한요소 해석

완충재를 적용하지 않은 바닥 구조의 경우 마감 몰탈, 기포 콘크리트 및 바닥 슬래브가 일체화된 구조로서 진동한다고 가정하였으며, 이에 대한 유한요소해석을 수행하기위해 구조해석 전용 프로그램인 ANSYS를 이용하여 Fig. 9와 같이 2차원 형상으로 모델링하였다.

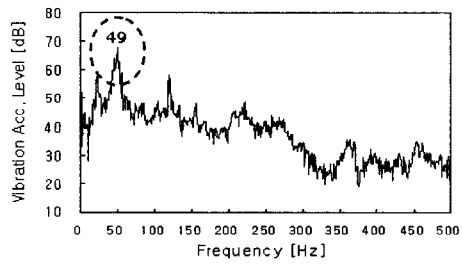
바닥 모델은 벽에 의해 4면이 모두 구속된 것으로 경계조건을 설정하였으며, 이때 물성치로 탄성계수는 2200 MPa, 밀도는 2400 kg/m³, 푸아송비는 0.167로 하였다.



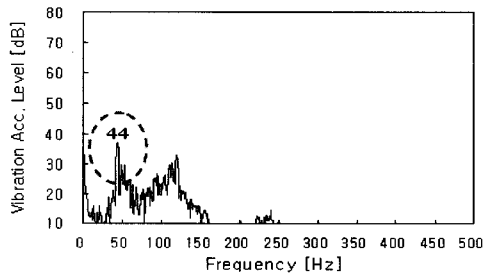
(a) Noise in the receiving room



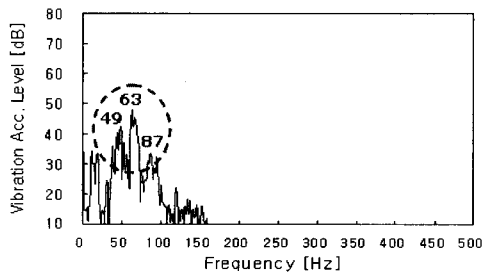
(b) Vibration on the driving floor



(c) Vibration on the ceiling floor

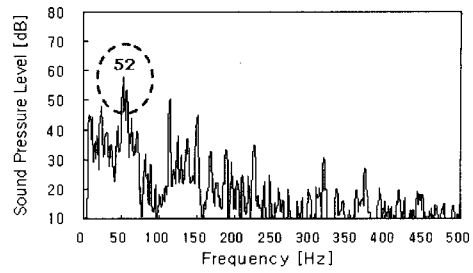


(d) Vibration on the receiving wall

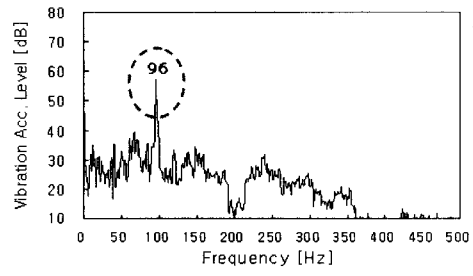


(e) Vibration on the receiving floor

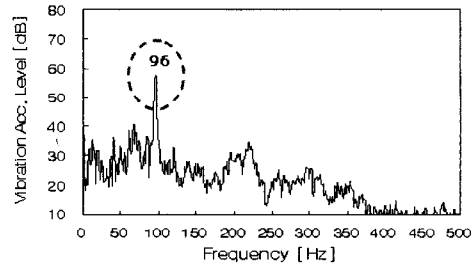
Fig. 5 Noise and vibration spectrum in case-A



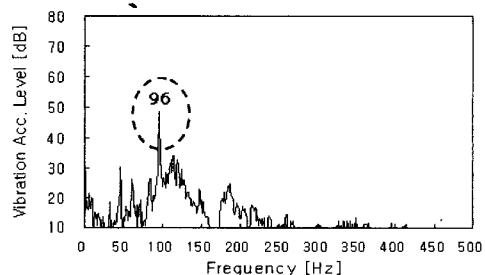
(a) Noise in the receiving room



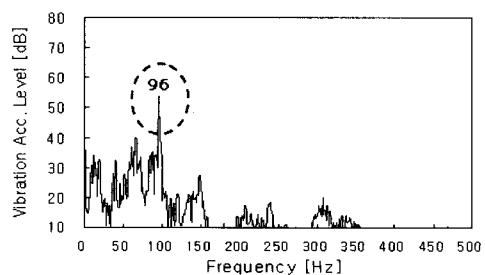
(b) Vibration on the driving floor



(c) Vibration on the ceiling floor



(d) Vibration on the receiving wall



(e) Vibration on the receiving floor

Fig. 6 Noise and vibration spectrum in case-B

유한 요소 해석에 의한 모드 해석 결과를 Fig. 10에 나타냈다.

해석 결과, 완충재를 적용하지 않은 기본 구조의 경우, 1차 고유 진동수는 약 95 Hz로 중량 충격원에 의해 발생된 주요 진동 주파수와 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

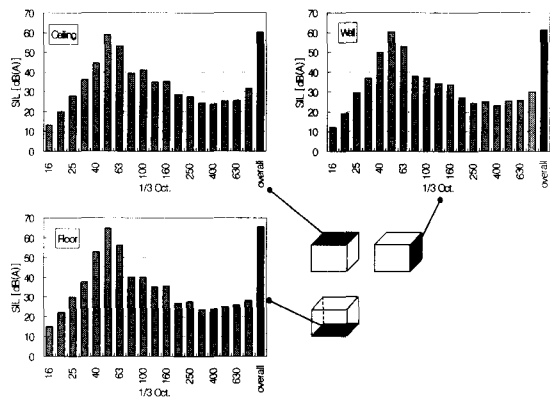


Fig. 7 Sound intensity level in Case-A

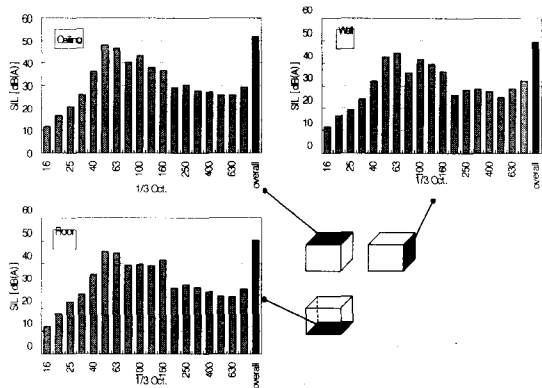


Fig. 8 Sound intensity level in Case-B

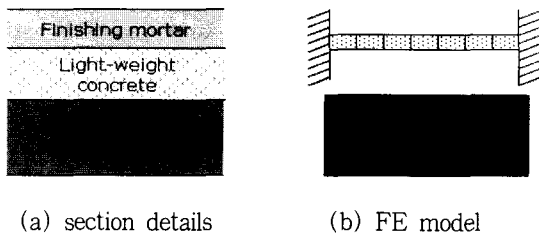


Fig. 9 Finite element modeling by ANSYS

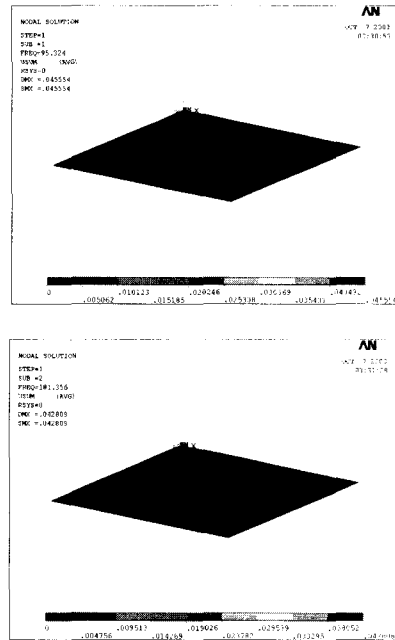


Fig. 10 The first and the second mode by ANSYS

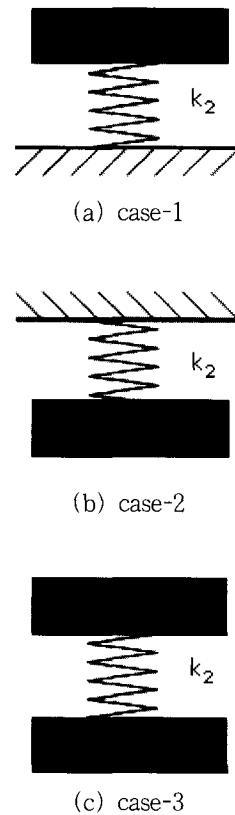


Fig. 11 Rigid body modeling with resilient materials

3.2 강체 해석

완충재가 적용된 뜬바닥 구조의 경우, 완충재에 대한 유한요소모델에 다소 한계가 있어 다음 Fig. 11과 같이 간략화된 1자유도 진동계로 각각 단순화시켜 강체 해석(rigid body analysis)을 수행하였다.

각 부재 즉, 완충재(k_2)를 사이에 두고 양쪽에 마감 몰탈(m_1)와 기포 콘크리트(m_2), 그리고 슬래브(m_3)로 구성된 진동계로 보고 Fig. 11과 같이 3가지로 나누어 각각 모델링하여 계산을 수행하였다.

계산 결과, 1차, 2차, 3차 공진주파수가 47, 64, 80 Hz로 특히 수음실 바닥에서 나타난 진동 주파수와 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구는 완충재 적용유무에 따른 소음 및 진동 특성에 대해 실험 및 해석적인 방법으로 접근하였다.

바닥 충격음의 저감을 위해 사용되는 완충재는 경우에 따라서는 바닥 구조에 있어서 하나의 강성요소로 작용하여, 구조 진동의 고유진동수를 낮추는 효과를 가져와 결과적으로 가진원의 에너지가 높은 저주파에서 공진을 발생시켜 중량 충격원에 의해서는 소음이 오히려 증가되는 결과를 가져왔다. 따라서 구조적 변경에 의한 바닥 충격음의 차음성능을 비교하기 위해서는 진동 및 소음 특성과 아울러 가진원의 주파수 특성을 동시에 고려하여야 할 것이다.

바닥 구조의 해석적 접근 방안의 하나로 제안된 기본 바닥 구조의 유한요소해석과 완충재 적용 바닥 구조의 강체해석의 경우, 실험과 비교적 잘 일치함을 확인하였다.

향후, 바닥 구조내 완충재에 대한 스프링요소를 고려한 유한 요소 해석을 수행하여 바닥 구조 개선을 위한 구체적인 개선 방안을 도출할 예정이다.

후 기

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

참 고 문 헌

- (1) KS F 2863-1, 2002, “건물 및 건물 부재의 바닥 충격음 차단 성능 평가 방법-제1부 : 표준 경량 충격원에 대한 차단 성능”.
- (2) KS F 2863-2, 2002, “건물 및 건물 부재의 바닥 충격음 차단 성능 평가 방법-제2부 : 표준 중량 충격원에 대한 차단 성능”.
- (3) ISO 717-2, 1996, “Rating of Floor Impact Sound Insulation for Impact Source in Buildings and of Building Elements - Part1 : Floor Impact Sound Insulation Against Standard Light Impact Source”.
- (4) Jeon, J. Y. and Jeong, J. H., 2003, “Use of Rubber Ball Impactor for Floor Impact Noise Evaluation,” WESPAC 8, Melbourne, Australia.
- (5) Jeon, J. Y., 2001, “Subjective Evaluation of Floor Impact Noise Based on the Model of ACF/IACJ,” Journal of Sound and Vibration, 241(1):147~155.
- (6) 기노갑 등, 2003, “바다마감재에 의한 바닥충격음 차음특성 연구”, 대한건축학회 학술발표논문집, pp. 645~648.
- (7) 김선우 등, 2002, “천정 구조와 바닥마감재의 조합에 따른 경량충격음 응답특성 및 저감량에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 계획계, 제 18 권, 제 8 호, pp. 177~184.
- (8) 정갑철, 이성호, 2003, “바닥충격음 완화를 위한 저감기술”, 대한환경공학회 춘계학술연구발표회, pp. 754~761.
- (9) 이주원 등, 2003, “충격음 저감재의 동특성과 실험실 경량충격음레벨 저감량의 상관관계”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 191~195.
- (10) “騒音振動對策ハンドブック”, 日本音響材料協會, p. 366.