

콘크리트 슬래브와 바닥 상부구조가 일체된 바닥구조의 바닥충격음

Floor Impact Noise Level for Concrete Slab Integrated with Floor Finishing Layers

문 대 호* · 오 양 기** · 정 갑 철*** · 박 홍 근†

Dae Ho Mun, Yang Ki Oh, Gab Cheol Jeong and Hong Gun Park

(Received November 2, 2015 ; Revised March 16, 2016 ; Accepted March 16, 2016)

Key Words : Floor Impact Sound(바닥충격음), Integrated Floor(일체형 바닥구조), Heavy-weight Impact Sound(중량충격음), Remodeling(리모델링)

ABSTRACT

Floating floor is most commonly used at apartment houses in Korea for thermal insulation and reducing impact noise. But it is proven that the floating floor is not effective for reducing the floor impact noise in low frequency range. In most cases, impact sound pressure level under 63 Hz frequency band were actually increased by the resonance of resilient material, lightweight concrete and the finishing mortar installed on it. In this paper, an integrated floor system consist of 70 mm light weight concrete and 40 mm finishing mortar successively installed on the concrete slab was suggested to avoid the resonance. Integrated floor system increases total flexural stiffness and mass per unit area. The natural frequencies of first and second vibration mode were increased and acceleration response and floor impact sound level was decreased in all measurement range.

1. 서 론

바닥충격음 저감을 위해 2005년부터 국내 공동주택의 바닥구조는 ‘공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준’에 의해 표준바닥구조 또는 인정바닥구조로 시공되었다. 표준바닥구조 또는 인정바닥구조는 주로 완충재를 사용한 뜬바닥 구조로 시공되며, 콘크리트 슬래브의 두께가 기존 120~150 mm에서 210 mm로 증가된 바닥구조이다. 콘크리트 슬래브의

두께를 210 mm로 크게 설정한 이유는 바닥충격음의 저주파 대역 차단성능을 향상시키기 위한 것이다.

그러나 뜬바닥 구조 조건에서의 중량충격음 저감 특성에 대한 다양한 연구결과에서 뜬바닥 구조로 마감구조를 시공한 이후 125 Hz 대역 이상 주파수에서는 소음이 저감되었지만 63 Hz 대역의 저주파 소음은 오히려 증가하는 것으로 나타났다⁽¹⁻³⁾. 이러한 연구결과들은 완충재를 사용한 뜬바닥 구조가 125 Hz 이상의 바닥충격음 저감에는 효과적이지만 63 Hz 이하 저주파 대역의 바닥충격음 저감에 큰 효과가

† Corresponding Author ; Member, Department of Architecture, Seoul National University
E-mail : parkhg@snu.ac.kr

* Member, Department of Architecture Engineering, Dankook University

** Member, Department of Architecture, Mokpo National University

*** Member, Research Institute, S.I.PAN Co., Ltd.

A part of this paper was presented at the KSNVE 2014 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Myung Jyn Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

없음을 나타내는 것이다.

튼바닥 구조가 저주파대역에서 좋지 않은 바닥충격음 차단성능을 나타내는 요인은 바닥 상부구조의 공진에 의한 2차 발생음과 콘크리트 슬래브를 가진하는 충격력 스펙트럼의 변화 때문이다⁽¹⁾. 이 연구에서는 이러한 공진을 줄임으로써 저주파 바닥충격음 차단성능을 높일 수 있는 방법으로 바닥 상부구조와 콘크리트 슬래브가 일체화된 바닥구조 시스템을 제안하였다. 콘크리트 슬래브와 경량기포콘크리트, 마감몰탈(온돌축열층) 등의 상부구조가 하나로 연결된 일체형 구조에 의하여 100 mm 정도의 슬래브 두께 증가 효과와 함께 상부구조 공진에 의한 저주파 바닥충격음 증폭 억제 및 저감 효과를 기대할 수 있다.

2. 튼바닥 구조의 문제와 대안

국립환경과학원⁽⁴⁾의 연구결과에 따르면, 바닥충격음 기준 시행 후 바닥충격음 차단성능 단일수치 평가량은 경량충격음 13 dB 저감, 뱅머신 중량충격음 1.5 dB 저감, 그리고 고무공 중량충격음 8.7 dB 저감되는 것으로 나타났다. 이 연구결과는 수음실의 위치(거실, 안방), 평형 등의 조건이 반영되어있지 않았다. 충격원에 따른 바닥충격음의 주파수 특성은 125 Hz에서 태핑머신 6.8 dB 저감, 뱅머신 6.2 dB 저감, 고무공 8.8 dB 저감된 것으로 나타났으며, 그 이상 주파수에서는 이보다 바닥충격음 저감 레벨이 더욱 증가하였다. 반면 63 Hz의 저주파 대역에서의 중량충격음은 뱅머신 2.7 dB 증가, 임팩트볼 0.4 dB 증가 된 것으로 나타났다. 조사된 공동주택의 평균 두께는 법제화 전과 후 각각 149 mm, 210 mm로 법제화 이후 평균 60 mm의 콘크리트 슬래브 두께 증가가 있었다. 슬래브 두께가 증가하였음에도 불구하고 법제화 후 사용된 바닥구조는 63 Hz에서 두 가지 표준 중량충격원에 대해 바닥충격음 저감 성능을 나타내지 못하였다.

최근 이웃간의 층간소음 분쟁의 가장 큰 원인이 아이들의 뛰거나 발걸음(72.7%)로 조사되었다⁽⁵⁾. 기존 연구에 의하면 2014년부터 새로운 중량충격원으로 도입되는 고무공 충격원과 아이들이 뛰거나 점핑에 의한 바닥충격음은 주파수 특성이 유사한 것으로 보고되었다^(6,7,8). 이러한 실생활 충격력이 고무공 충격원과 유사한 주파수 특성을 갖는 점을 고려해보

면, 125 Hz 이상의 바닥충격소음은 완충재를 사용한 튼바닥 구조를 통해 저감시킬 수 있지만 63 Hz 이하 저주파 소음은 기존 연구결과처럼 현행 바닥구조 시스템을 통해서 저감시키기 어려운 실정이다. 층간 소음 분쟁의 원인이 주로 저주파 바닥충격소음이라는 점을 고려하면 현행 공동주택의 바닥구조로 사용되는 튼바닥 구조의 단점을 개선할 수 있는 새로운 기술 개발이 필요하며, 이러한 기술은 근본적으로 저주파 대역의 바닥충격소음을 발생시키는 저주파 대역의 바닥진동응답을 저감시킬 수 있어야 한다.

저주파 바닥충격소음은 슬래브의 질량과 휨 강성을 높일 때 가장 효과적으로 저감시킬 수 있다. 바닥구조의 휨 강성 증가는 바닥구조의 고유진동수를 증가시키고 외부 충격에 대한 초기 변형을 줄일 수 있다. 중량 충격원의 경우 주파수가 높아질수록 충격력이 낮아지는 특성을 갖고 있기 때문에 바닥구조의 고유진동수를 높이면 상대적으로 진동에너지가 큰 저차 모드에 의한 공진이 충격력이 작은 주파수에서 발생되어 그에 따른 진동응답을 저감시킬 수 있다. 바닥구조의 단위 면적당 질량을 증가시키면 외부 힘에 저항하는 바닥구조의 관성력은 동일하지만 가속도 크기가 작아지기 때문에 바닥충격음을 발생시키는 소음원인 바닥의 진동을 원천적으로 줄여줄 수 있다.

현재 공동주택의 바닥 마감 구조로 사용되고 있는 경량 기포 콘크리트와 마감모르타르는 물과 반응하여 일정 시간을 거치면 응결-경화를 통해 일정 강도를 갖는 건축 재료이다. 이러한 마감 구조의 재료 특성을 이용하면 콘크리트 슬래브 상부에 마감층을 단순 시공하는 것만으로 전체 바닥구조의 휨강성과 단위 면적당 질량을 동시에 증가시킬 수 있다. 본 연구에서는 바닥 상부구조와 콘크리트 슬래브가 일체화된 바닥구조의 두 가지 기대효과, 1) 100 mm 정도의 슬래브 두께 증가 효과와 2) 상부구조 공진에 의한 2차 발생음 제거 효과에 의하여 63 Hz 대역의 저주파 바닥충격음 저감 성능이 향상될 수 있음을 검증하고자 하였다.

3. 실험 개요

3.1 바닥 상부구조 일체형 바닥구조

Fig. 1은 실험에 사용된 바닥구조의 단면도를 나타낸 그림이다. 바닥구조는 콘크리트 슬래브(두께

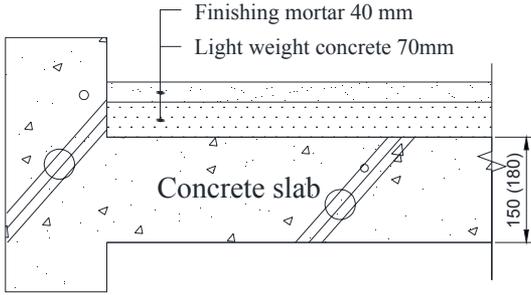


Fig. 1 Cross-section of floor structure integrated with floor finishing layers(finished floor)

150 mm, 180 mm), 경량기포 콘크리트 70 mm, 그리고 마감 몰탈 40 mm로 구성된다. 바닥 구성층은 경량기포 콘크리트와 마감몰탈의 습식시공을 통해 일체화 되었으며 바닥 상부구조와 콘크리트 벽은 절연되지 않았다.

바닥 상부구조 재료 특성으로 경량기포콘크리트는 0.4 품(KS F 4039), 마감몰탈은 44일 재령 기준 최대 압축강도 23 MPa, 정적 탄성계수 12.1 GPa, 그리고 푸아송비 0.27이다.(KS F 2438, 공시체 100 mm × 200 mm)

3.2 실험조건

수음실의 구조평면도와 측정위치를 Fig. 2에 나타내었다. 수음실과 음원실의 실의 크기는 5.0 mm × 4.5mm × 2.7 m(안목치수)로 동일하며, 구조형식은 벽식구조로 벽체 두께는 150 mm이다. 콘크리트 슬래브 두께는 150 mm, 180 mm 두 가지 조건에 대해 실험되었다.

천장구조는 경량철골 + 공기층 90 mm + 석고보드 9.5 mm로 마감되었으며, 바닥 및 벽체의 표면은 마감되지 않았다.

3.3 실험내용

바닥 상부구조 시공 전·후의 바닥구조에 대해 중량충격음(고무공), 가속도 응답(고무공), 가속도 및 음압 주파수응답함수, 그리고 25개 측정지점에 대한 진동모드분석 실험을 수행하였다. 바닥 상부구조 일체형 바닥구조를 대상으로 4.5 mm PVC 바닥 마감재에 대한 경량충격음 저감량을 계측하였다. 뱅머신에 대한 중량충격음은 측정되지 않았지만 충격력-바닥진동-음압 관계의 주파수 선형 특성을 이용하여

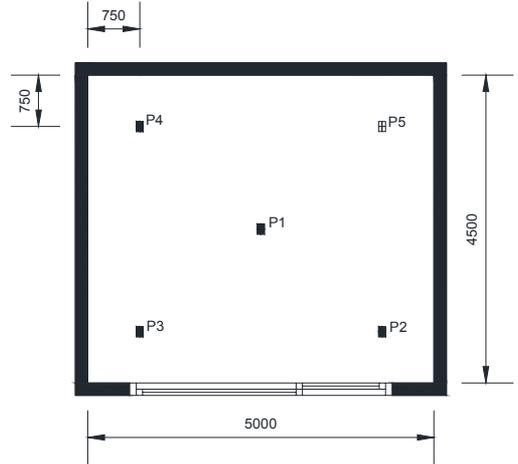


Fig. 2 Impact and receive points on structure plan

Table 1 Experimental condition by floor types and impact sources; each floor types have two concrete slab thickness of 150 mm and 180 mm

	Bare concrete slab	Integrated floor
Modal test	○	○
Acceleration FRF	○	○
Acoustic pressure FRF	○	○
ISO rubber ball	○	○
Tapping machine (with/ without PVC floor covering)	○	○

바닥 상부구조 시공 전·후의 뱅머신에 대한 중량충격음을 음압 주파수응답함수와 뱅머신의 충격력 스펙트럼을 이용하여 예측하였다⁽⁸⁾. 맨바닥콘크리트 슬래브와 일체형 바닥구조에서 실험된 조건을 요약하여 Table 1에 나타내었다.

바닥충격음과 바닥 가속도 측정위치는 Fig. 2에서 5개 가진점 P1 ~ P5, 4개의 수음점 P1 ~ P4, 4개 수진점 P1 ~ P4이다. 수진점은 수음점과 동일한 위치이며 가속도계는 콘크리트 슬래브 하부에 설치하였다. 바닥충격음과 가속도 응답은 측정장비의 입력 채널수 제한으로 동일한 가진 행위를 2번 반복하여 계측하였다.

진동 모드분석실험을 위한 측정위치를 Fig. 3에 나타내었다. 임펄스 가진법을 사용하여 1~25번 가진에 대해 1번과 13번에서의 가속도 주파수응답함수를

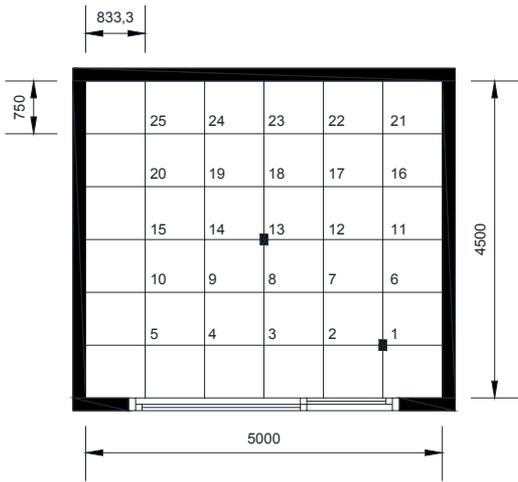


Fig. 3 Measurement points on the floor for modal analysis(roving hammer test)

계측하였다. 1번과 13번 측정위치의 마감물탈 상부와 콘크리트 슬래브 하부에 가속도계를 설치하여 바닥 구성층의 일체 거동 여부를 확인하였다.

중량충격음 및 경량충격음은 KS F 2810과 2863을 따라 1/3 옥타브밴드 주파수 분석한 결과를 이용하여 바닥충격음 레벨($L_{i,Fmax}$, L_n)과 바닥충격음 차단 성능 단일 수치 평가량($L_{i,Fmax,AW}$, $L_{n,AW}$)을 계산하였다.

모든 음압, 가속도, 힘에 대한 계측 신호는 샘플링 주파수 65 536 Hz로 디지털 레코딩(Pulse 3560C measurement front-end and time data recorder software, Brüel & Kjær)하였으며, 주파수분석 소프트웨어(Pulse reflex core ver. 18, Brüel & Kjær)를 이용하여 1/3 옥타브밴드와 FFT 주파수 분석하였다. FFT 분석은 트리거를 사용하여 계측된 5개의 유효한 신호에 대해서만 선형 스펙트럼 평균하여 800 Hz까지 1 Hz 단위로 분석하였다.

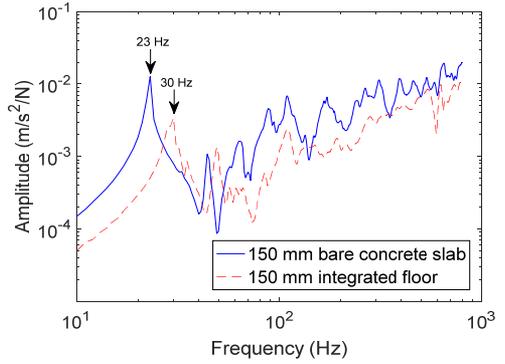
주파수응답함수에 사용된 임펄스해머(PCB 086D20)는 hard tip을 사용하였으며, 이 때의 유효 가진주파수 대역은 약 300 Hz이다.

4. 실험 결과

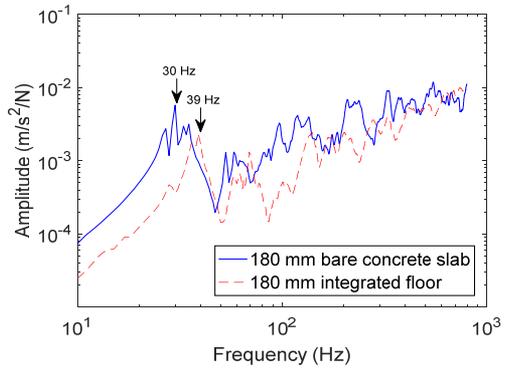
4.1 바닥 진동

(1) 진동모드

콘크리트 슬래브 두께 150 mm, 180 mm에 대한



(a) 150 mm concrete slab



(b) 180 mm concrete slab

Fig. 4 Accelerance(acceleration/force) of bare concrete slab(blue, solid line) and integrated floor(red dot line) at driven point floor center P1

바닥 마감 구조 시공 전후의 바닥구조에 대해 실의 중앙점 P1을 가진하였을 때 그 하부 콘크리트 슬래브의 가속도 주파수응답함수를 비교하여 각각 Fig. 4의 (a), (b)에 나타내었다.

150 mm, 180 mm 바닥구조 모두 바닥 상부구조 시공 후 고유진동수가 증가되어 150 mm, 180 mm 슬래브의 1차모드 고유진동수는 각각 23 Hz, 30 Hz에서 30 Hz, 39 Hz로 증가하였다. 또한 2차 모드 공진응답 이후 약 80 Hz 이상 주파수에서 가속도 응답 크기도 감소되었다.

25개 측정지점에 대한 1, 2차 진동모드 형상과 모달파라미터를 각각 Fig. 5와 Table 2에 나타내었다. 슬래브의 진동모드에 대한 형상함수를 식 (1)과 같이 sine 함수내의 p , q 를 이용하여 표현할 수 있으며, 이때 p , q 는 파동수(wave number)를 의미한다. 따라서 (1,1), (1,2)는 각각 슬래브의 1, 2차 진동

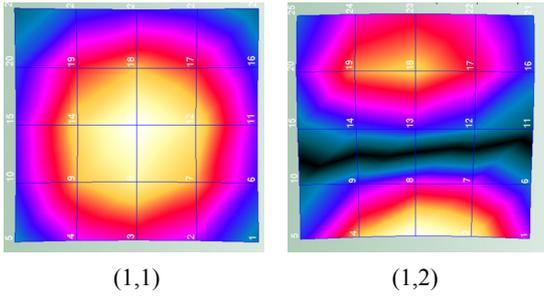


Fig. 5 Vibration mode shapes of bare concrete slab and finished floor

Table 2 Natural frequency and modal damping ratio

Slab thickness (mm)	Floor type	Mode	Natural frequency (Hz)	Damping (%)
150	Bare	(1,1)	22	1.8
150	Bare	(1,2)	44	1.8
150	Integrated	(1,1)	29 (+7)	3.5 (+1.7)
150	Integrated	(1,2)	48 (+4)	2.5 (+0.7)
180	Bare	(1,1)	29	2.1
180	Bare	(1,2)	53	2.1
180	Integrated	(1,1)	38 (+9)	4.7 (+2.6)
180	Integrated	(1,2)	58 (+5)	4.6 (+2.5)

모드를 의미한다.

$$W(x,y) = \sin(p\pi x/L_x) \sin(p\pi y/L_y) \quad (1)$$

for $p, q = 1, 2, 3, \dots$

150 mm, 180 mm 두께의 바닥 마감구조 시공 전후의 (1,1)과 (1,2)의 모드 형상은 Fig. 5와 동일하게 나타났지만 그 이상의 고차 모드에 대한 모드 형상은 일정한 패턴을 갖고 거동하는 모드 형상이 없어 맨바닥 콘크리트 슬래브 조건과 상대비교가 불가능 하였다.

Table 2에서 150 mm, 180 mm 슬래브는 바닥 마감구조 시공 후 (1,1) 모드의 고유진동수는 각각 23 → 30(+7), 30 → 38(+9) Hz로 증가하였으며, (1,2) 모드는 각각 44 → 48(+4), 53 → 58(+5) Hz로 증가하였다. 마감구조 시공 후 모달 감쇠비도 증가하는 것으로 나타났다.

(2) 마감물탈과 콘크리트 슬래브의 일체거동
실험된 일체형 바닥구조는 상부 마감층이 습식시

공을 통해 단순히 콘크리트 슬래브 상부에 적층 시공되는 구조이다. 따라서 적층되는 상부 마감층은 콘크리트 슬래브와 어떠한 연결재도 없이 시멘트 수화반응과 마찰력을 통해서만 결합되기 때문에 상부 마감층과 하부 콘크리트의 결합이 완전하지 않을 수 있다.

콘크리트 슬래브와 마감구조의 일체거동여부를 파악하기 위해 Fig. 3의 1번과 13번 위치의 마감물탈 상부와 콘크리트 슬래브 하부에 가속도계를 설치하고 25개 가진점에 대한 가속도 주파수응답함수를 분석하였다. 마감물탈이 들뜬 부분은 가속도 주파수응답함수뿐만 아니라 임펄스 햄머로 가진할 때의 소리 변화를 통해 확인 가능하였다. Fig. 3에서 소리 변화를 통해 확인된 마감물탈이 들뜬 부분은 150 mm 콘크리트 슬래브는 5번, 25번 이었으며, 180 mm 슬래브는 1번, 20번 이었다. 실의 코너과 테두리 부분에서 주로 마감물탈이 들뜨는 것으로 나타났다.

Fig. 6과 7은 각각 150 mm, 180 mm 슬래브의 마감물탈이 들뜬 부분을 가진한 경우에 대한 실중양점(13번)과 코너점(1번)에서의 마감물탈과 콘크리트 슬래브의 가속도 주파수응답함수를 나타낸 그래프이다.

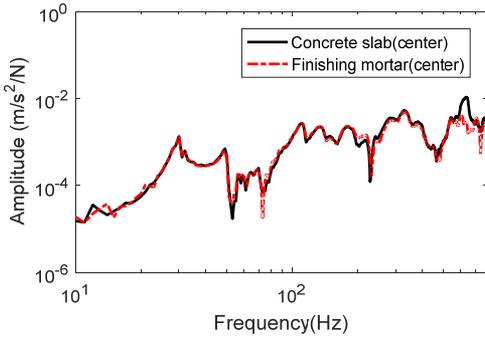
마감물탈이 들뜬 부분을 가진하였을 때 Fig. 6(a), Fig. 7(a)의 슬래브 중앙부분에서의 가속도 주파수응답함수 크기는 전 주파수 영역에서 마감물탈과 콘크리트 슬래브가 동일하게 나타났다. 하지만 슬래브 모서리 부분 측정점(Fig. 3의 1번)에서의 가속도 응답은 100 Hz 이하 주파수에서는 마감물탈과 콘크리트 슬래브가 동일했지만 100 Hz 이상 주파수에서는 마감물탈이 콘크리트 슬래브보다 크게 나타났다.

4.2 바닥충격음

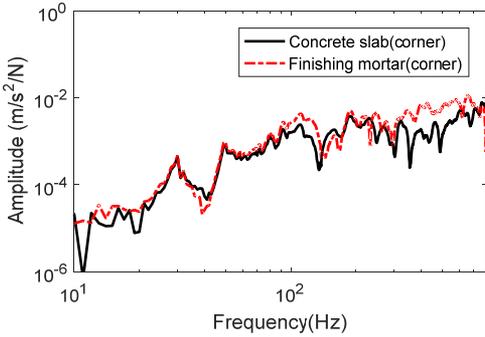
(1) 중량충격음(고무공)

Figs. 8, 9는 각각 150 mm, 180 mm 콘크리트 슬래브 바닥구조의 고무공 충격원 가진에 대한 5개 가진점 마다의 수음실 평균 음압 레벨($L_{i,Fmax,k}$)을 나타낸 그래프이다.

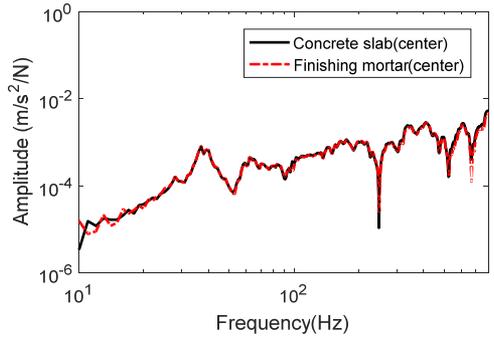
Fig. 8에서 바닥 마감구조 시공 후 125 Hz 이하 저주파대역에서의 바닥충격음 레벨이 저감되었음을 확인할 수 있으며 250 Hz, 500 Hz에서는 가진



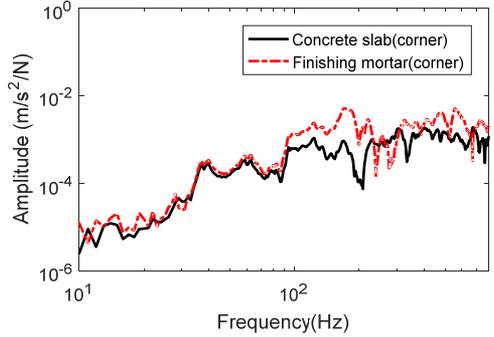
(a) Accelerance at acceleration response point #13 and excitation point #5



(a) Accelerance at acceleration response point #1 and excitation point #5



(a) Accelerance at acceleration response point #13 and excitation point #20



(b) Accelerance at acceleration response point #1 and excitation point #20

Fig. 6 Accelerance of integrated floor system which has 150 mm concrete slab thickness

Fig. 7 Accelerance of integrated floor system which has 180 mm concrete slab thickness

위치에 따라 저감 특성이 다르게 나타났다. 모드 분석 시 마감몰탈이 들뜬 부분이었던 3번 가진점에서는 500 Hz의 바닥충격음이 바닥 마감구조 시공 후 증가되는 것으로 나타났다.

Fig. 9에서 63 Hz, 125 Hz의 바닥충격음은 대부분의 가진점에서 바닥 마감구조 시공 후 저감되는 것으로 나타났지만 31.5 Hz의 낮은 주파수에서는 오히려 증가되었다. 180 mm 콘크리트 슬래브는 바닥 마감 구조 시공 후 (1,1) 모드의 고유진동수가 38 Hz로 증가되었으며 이렇게 증가된 고유진동수는 31.5 Hz 바닥충격음 레벨을 증가시키고 있다. 모드 분석 시 확인 된 마감 몰탈이 들뜬 부분(2, 5번 가진점)은 150 mm 바닥구조와 동일하게 500 Hz의 바닥충격음을 증가시키는 원인으로 작용하고 있다.

4개 바닥구조에 대한 바닥충격음 레벨($L_{i,Fmax,k}$)을 Fig. 10과 Table 3에 비교하여 나타내었다. 바닥 마감 구조 시공 후 150 mm 슬래브는 31.5 Hz ~ 250 Hz

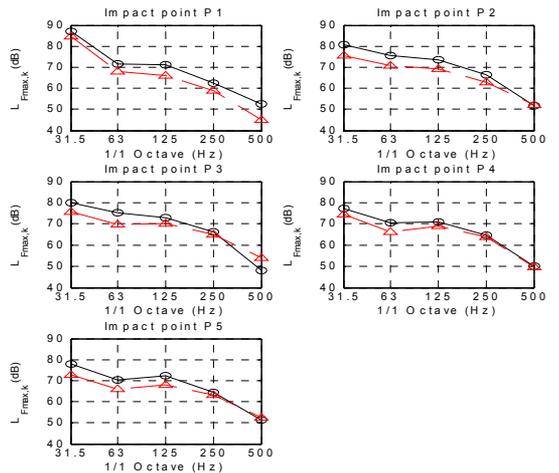


Fig. 8 Average impact sound pressure level($L_{i,Fmax,k}$) in receiving room at each five impact points: the circular and triangular symbols indicate bare concrete slab and integrated floor respectively(150 mm concrete slab)

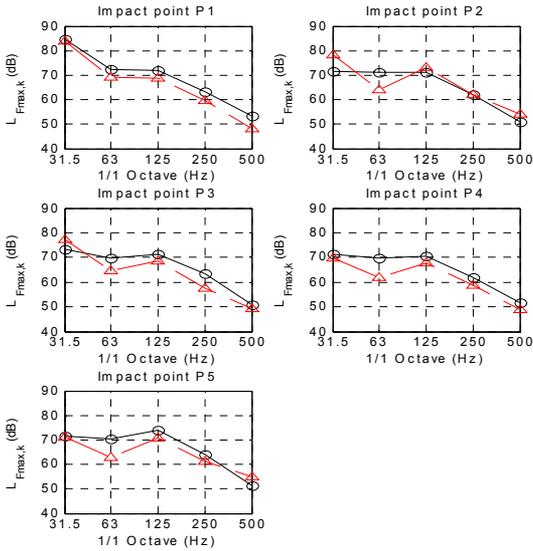


Fig. 9 Average impact sound pressure level($L_{i,Fmax,k}$) in receiving room at each five impact points: the circular and triangular symbols indicate bare concrete slab and integrated floor respectively(180 mm concrete slab)

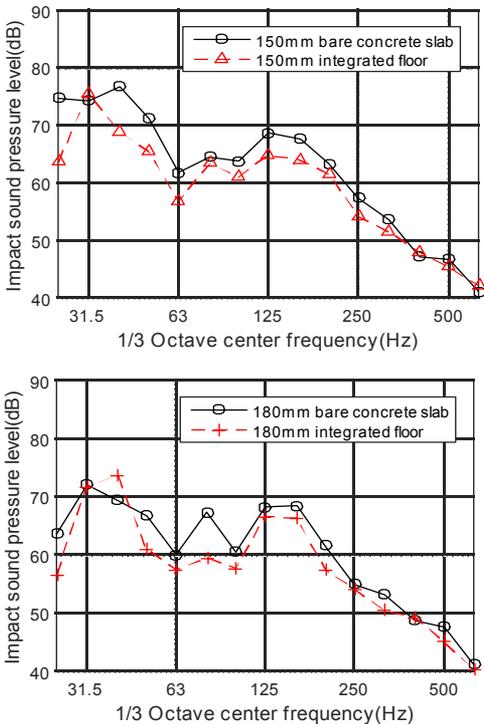


Fig. 10 Average impact sound pressure level($L_{i,Fmax}$) for rubber-ball

Table 3 Heavy-weight impact sound pressure level ($L_{i,Fmax}$) for rubber-ball and single-number quantity($L_{i,Fmax,AW}$), dB

Frequency (Hz)	150 mm bare	150 mm integrated	180 mm bare	180 mm integrated
31.5	80.2	76.5 (-3.7)	74.3	75.9 (+1.6)
63	72.5	67.8 (-4.7)	70.5	64.3 (-6.2)
125	71.9	68.3 (-3.6)	71.6	69.8 (-1.8)
250	64.7	62.6 (-2.1)	62.9	59.6 (-3.3)
500	50.5	50.5 (+0)	51.6	51.0 (-0.6)
$L_{i,Fmax,AW}$	55	52 (-3)	54	52 (-2)

까지 바닥충격음이 저감되었으며, 500 Hz는 저감되지 않았다. 180 mm 슬래브는 31.5 Hz에서 바닥 마감 구조 시공 후 1.6 dB 바닥충격음이 증가하였지만 63 Hz ~ 500 Hz의 소음을 저감시킬 수 있었다. 특히 63 Hz의 바닥충격음은 6.2 dB까지 저감되어 나타났다. 바닥충격음 차단성능 단일 수치 평가량으로 150 mm, 180 mm의 바닥 마감구조는 각각 3 dB, 2 dB 저감되어 52 dB, 52 dB를 나타내었다.

(2) 중량충격음(뱅머신)

문태호⁽⁹⁾의 연구에 의하면 충격력-음압의 관계가 선형인 구조-음향 시스템에서는 다양한 충격원에 대한 충격력 스펙트럼과 음압 주파수응답함수를 이용하여 수음실에서의 음압을 예측할 수 있었다. 이 연구에서는 뱅머신 중량충격원에 대한 바닥충격음은 측정되지 않았지만 바닥충격음 측정 시 모든 바닥구조에 대해 4개 수음점과 5개 가진점에 대한 음압 주파수응답함수를 측정하였으며, 뱅머신 충격력 스펙트럼을 이용하여 뱅머신에 대한 중량충격음을 예측할 수 있다.

Table 4는 음압 주파수응답함수를 이용하여 예측한 고무공 충격원에 대한 바닥충격음 예측결과와 실험결과의 오차를 나타낸다. 비교적 예측결과와 실험결과가 유사하게 나타나고 있다.

뱅머신에 대한 바닥충격음 레벨($L_{i,Fmax}$) 예측결과를 Fig. 11과 Table 5에 나타내었다. 고무공 충격원과 뱅머신에 대한 바닥충격음 주파수 특성은 Fig. 10과 11에서 고무공 충격원에 대한 125 Hz에서의 바닥충격음이 63 Hz보다 크게 나타나고 있지만 뱅머신에 대해서는 주파수가 낮을수록 음압 레벨이 높게 나타나고

Table 4 Prediction result errors(test results-prediction results) of heavy-weight impact sound pressure level for rubber-ball($L_{i,Fmax}$), dB

Frequency (Hz)	150 mm bare	150 mm integrated	180 mm bare	180 mm integrated
31.5	-0.8	1.3	-0.5	0.5
63	0.6	-0.8	0.9	0.5
125	0.1	1.7	0.7	0.6
250	-1.1	0	-1.1	0.4
500	0.8	2.5	0.9	3.3
$L_{i,Fmax,AW}$	-1	0	0	1

Table 5 Prediction result of heavy-weight impact sound pressure level for bang-machine($L_{i,Fmax}$) and single-number quantity($L_{i,Fmax,AW}$), dB

Frequency (Hz)	150 mm bare	150 mm integrated	180 mm bare	180 mm integrated
31.5	89.5	83.7 (-5.8)	83.4	84.0 (+0.6)
63	81.0	77.5 (-3.5)	77.3	72.9 (-4.4)
125	69.8	64.4 (-5.4)	68.1	65.7 (-2.4)
250	58.8	55.9 (-2.9)	57.0	52.4 (-4.6)
500	45.9	44.3 (-1.6)	46.5	43.7 (-2.8)
$L_{i,Fmax,AW}$	54	50 (-4)	51	48 (-3)

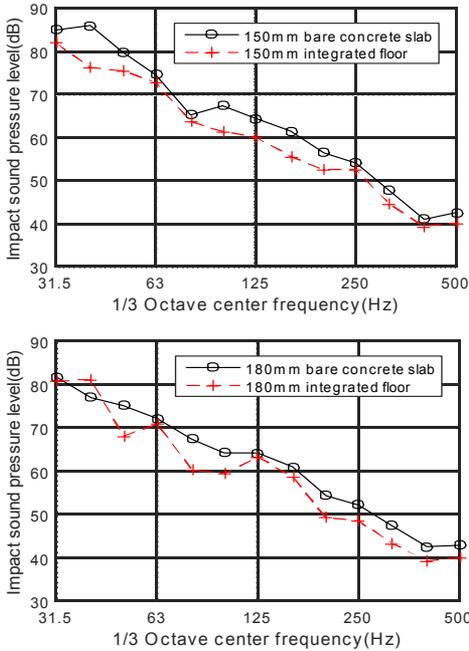


Fig. 11 Average heavy-weight floor impact sound pressure level($L_{i,Fmax}$) for bang-machine

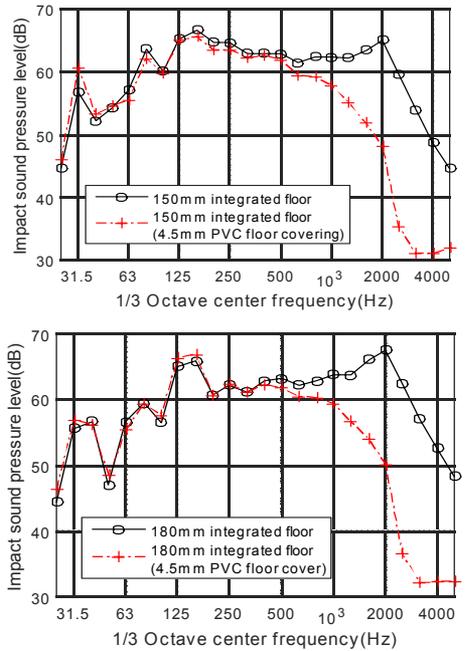


Fig. 12 Average light-weight impact sound pressure level(L_i) for 4.5 mm PVC floor covering

있다. 이러한 바닥충격음 발생차이는 충격원의 주파수 특성과 매우 밀접한 관련이 있으며 고무공 충격원이 125 Hz 이상에서 뱅머신 보다 충격력이 크기 때문이다.

뱅머신 가진에 대한 63 Hz의 바닥충격음은 바닥 마감 구조 시공 후 150 mm, 180 mm 바닥구조에서 각각 3.5 dB, 4.4 dB 저감되어 고무공 충격원에 대한 저감 성능 보다는 낮게 나타났지만 31.5 Hz와 125 Hz에서는 더 우수한 바닥충격음 저감 성능을 보였다. 단일 수치 평가량은 150 mm, 180 mm 바닥 구조 각각에 대해 4 dB, 3 dB 저감된 것으로 나타났

으며 이 수치는 고무공 충격원에 대한 바닥충격음 예측 결과와 동일한 저감 성능이다.

(3) 경량충격음(바닥마감재, 바닥마감구조)

완충재를 사용하지 않은 일체형 바닥구조는 중량 충격음의 성능 향상에도 불구하고 경량충격음이 취약한 문제가 있다. 이 연구에서도 경량충격음의 단일 수치값은 67 dB ~ 70 dB를 나타내고 있고, 법적인 기준 58 dB를 초과하고 있다. 이를 극복하고자 4.5 mm 두께의 PVC 재질 바닥 마감재를 사용하여 경량 충격음 레벨 저감량을 분석하였다(Table 6).

Table 6 Average normalized light-weight impact sound pressure level(L_n) and single-number quantity($L_{n,W}$, $L_{n,AW}$), dB

Freq. (Hz)	150 mm integrated	150 mm integrated (floor covering)	180 mm integrated	180 mm integrated (floor covering)
125	65.7	65.1 (-0.6)	65.0	66.1 (+1.1)
250	65.9	65.0 (-0.9)	63.2	63.2 (0)
500	64.0	63.1 (-0.9)	64.3	63.2 (-1.1)
1000	64.1	59.5 (-4.6)	65.3	60.9 (-4.4)
2000	65.8	51.3 (-14.5)	68.4	53.4 (-15.0)
$L_{n,W}$	67	57 (-10)	70	57 (-12)
$L_{n,AW}$	64	59 (-5)	66	59 (-7)

Fig. 11은 바닥 마감 일체형 바닥구조에서 4.5 mm 두께의 PVC 재질 바닥 마감재 유무에 따른 경량 충격음 레벨(L_i)을 비교한 그래프이다. 바닥 마감재로 인해 약 500 Hz 이상 주파수부터 경량충격음 레벨이 저감되었으며 주파수가 증가할수록 바닥충격음 레벨이 효과적으로 저감되었다. 역A특성 가중 기준화 바닥충격음 레벨($L_{n,AW}$)은 바닥마감재 설치 후 두 바닥구조 모두 59 dB를 나타내었으며, 150 mm 바닥구조는 5 dB 저감(64 → 59 dB), 180 mm 바닥구조는 7 dB 저감(66 → 59 dB)되었다.

5. 고 찰

현행 공동주택의 바닥구조 시스템으로 가장 많이 사용되고 있는 뜬바닥 구조의 63 Hz 주파수 대역 중량충격음 저감성능에 대한 한계를 극복하기 위해 콘크리트 슬래브와 바닥 상부구조가 일체화된 바닥구조 시스템을 제안하고 이를 실험을 통해 검증하였다.

마감물탈과 경량기포 콘크리트를 콘크리트 슬래브 상부에 습식 시공하여 적층한 바닥구조는 Figs. 4, 10에서 맨바닥 콘크리트 슬래브에 비해 진동응답과 바닥충격음 모두 저감되는 것으로 나타났다. 실험 조건은 다르지만 기존 연구에서 뜬바닥 구조에서는 63 Hz 이하 저주파 대역 바닥충격음이 맨바닥 콘크리트 슬래브에 비해 더 증가된 것으로 나타났다^(1,2,3). 이 연구에서 뜬바닥 구조 시공 후 단일수치평가량 변화는 동일하거나⁽¹⁾ 3 dB ~ 4 dB 증가되어 나타났다⁽³⁾.

이러한 실험결과들에서 저주파 바닥충격음 저감은 바닥구조의 질량 증가보다는 휨강성 증가가 더욱 효과적임을 의미한다. 뜬바닥 구조와 실험된 일체형 바닥구조의 상부 마감구조의 단위면적당 질량은 각각 100 kg, 115 kg으로 유사하다.

또한 일체형 바닥구조는 바닥상부구조가 콘크리트 슬래브와 일체화되면서 슬래브의 휨강성이 증가되는 효과뿐만 아니라 문대호⁽¹⁾의 연구에서 나타난 뜬바닥 구조의 마감물탈과 완충재로 인해 저주파 충격력이 증가되는 현상이 발생되지 않아 저주파 바닥충격음 저감에 더욱 효과적이었다.

무한 평판(infinite plate)의 고유진동수는 식 (2)와 같이 판의 두께 h^3 에 비례하고 단위면적당 질량에 반비례 한다⁽¹¹⁾. 일체형 바닥구조의 고유진동수가 증가하는 바닥구조의 유효 두께가 증가되었음을 의미하며, 150 mm 콘크리트 슬래브에 대해 (1,1) 진동모드의 고유진동수는 23 Hz에서 30 Hz로 7 Hz 증가되었다.

시공된 바닥 마감구조는 마감물탈 40 mm + 경량 기포콘크리트 70 mm로 시공 두께는 110 mm 증가되고 단위면적당 질량은 115 kg 증가되었다. 서로 다른 재료를 적층하여 일체화된 바닥구조의 유효두께 증가를 검토하기 위해 슬래브의 네 변이 단순지지된 것으로 가정하고 1차 모드 고유진동수를 실험결과와 동일하게하기 위한 고유진동수 보정 계수 α 를 도입하면, 150 mm 맨바닥 콘크리트 슬래브 조건은 식 (2)에서 $\alpha = 1.3$ 일 경우 고유진동수 23 Hz로 실험결과와 동일하다. 이 조건에서 적층된 상부구조를 통해 일체화된 바닥구조의 유효두께 증가는 약 46 mm로 나타났다.

$$\omega = \alpha k_b^2 \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (2)$$

여기서, D 는 휨 강성(bending stiffness, $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$), E 는 탄성계수, h 는 판의 두께, ν 는 푸아송 비, k_b 는 파동수(wave number, $k_b^2 = k_x^2 + k_y^2$), α 는 고유진동수 보정계수, 그리고 m 은 단위면적당 질량을 의미한다.

바닥구조의 두께 증가에 따른 고유진동수는 식 (2)에 의해 고차모드로 갈수록 증가폭이 커야한다. 하지만 Table 2에서 (1,2) 모드의 고유진동수 증가는 (1,1) 모드 고유진동수 증가보다 낮게 나타났기 때

문에 이 연구의 일체형 바닥구조는 마감구조와 콘크리트 슬래브가 완벽하게 일체되는 바닥구조로 설명될 수 없다.

경량기포콘크리트와 마감몰탈은 콘크리트 슬래브 상부에 습식으로 시공되지만 순차적으로 양생되면서 시공되기 때문에 콘크리트 슬래브와 바닥 마감구조가 완벽하게 접착 되지는 않았다. Figs. 6, 7에서 일체형 바닥구조의 마감몰탈 들뜸 현상은 실의 모서리 부분에서 발생되었다. 이러한 마감몰탈 들뜸은 100 Hz 이하 저차 모드 응답에 큰 영향을 주지 않았으며, 이 주파수 영역에서는 마감몰탈과 콘크리트 슬래브가 일체 거동하여 바닥구조의 휨 강성이 증가되었다. 또한 마감몰탈 들뜸이 있어도 100 Hz 이상 주파수에서의 콘크리트 슬래브의 진동 응답과 바닥충격음은 맨바닥 콘크리트 슬래브 조건보다 저감되었으며, 이 영향은 콘크리트 슬래브의 중앙부분이 마감몰탈과 일체거동하여 고차모드의 진동 응답도 저감되었기 때문이다.

Fig. 3에서 출입문을 통해 구분된 1~5번 측정점 하부의 복도 부분은 Fig. 5의 (1,2) 모드 형상을 통해 진동응답에 참여하는 것으로 나타났다. (1,2) 모드 형상이 실의 중앙점을 기준으로 완벽한 대칭형태로 나타나지 않기 때문이다. 출입문 설치를 위한 날개벽과 창호 설치를 위한 상하부 비구조벽(시멘트 벽돌)이 저차 모드의 응답에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단될 수 있으며, 이러한 비구조벽 설치를 통한 바닥진동응답 특성 변화는 진동모드 형상과 진동응답 크기에 영향을 줄 수 있기 때문에 향후 정량적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

6. 결 론

맨바닥 구조는 콘크리트 슬래브와 바닥상부구조의 공진과 콘크리트 슬래브로 전달되는 충격력 변화로 인해 63 Hz 대역의 저주파 영역에서는 중량바닥 충격음을 효과적으로 저감시키지 못하는 문제를 갖고 있다. 이 연구에서는 이러한 문제에 대한 대안으로 콘크리트 슬래브와 경량기포콘크리트, 마감몰탈 등의 상부구조가 하나로 연결된 일체형 구조를 제안하고, 슬래브 두께 증가 효과와 상부구조 공진의 제어를 통하여 이 바닥슬래브 일체형 바닥구조의 63 Hz 대역 바닥충격음 저감효과를 검증하였다.

현행 바닥 마감 구성층으로 사용되는 경량기포 콘크리트 70 mm와 마감모르타르 40 mm를 콘크리트 슬래브 상부에 단순 시공하여 전체 바닥구조의 휨 강성과 단위 면적당 질량을 동시에 증대시킬 수 있었다. 이러한 바닥구조 동특성 변화로 바닥구조의 진동응답과 중량충격음을 저감시킬 수 있었다.

실험된 바닥 마감 일체형 바닥구조는 현행 바닥구조인 완충재를 시공하는 공정만 빠진 바닥구조이기 때문에 시공성이 우수하며 경제적이다. 완충재를 사용한 뜬바닥 구조보다는 250 Hz 이상의 바닥충격음 저감에 불리하지만 거주자의 보행이나 뛰는 행위에 의한 바닥충격소음이 125 Hz 이하 저주파 대역이기 때문에 이러한 저주파 소음을 저감시킬 수 있는 바닥구조라는 점에서 연구적 의의를 갖는다.

슬래브두께가 얇은 공동주택 리모델링 시 콘크리트 슬래브를 보강하기 위한 방법의 하나로 일체형 바닥구조를 사용할 수 있으며, 공동주택의 수직부재의 내력이 허용하는 한계에서 마감몰탈 또는 콘크리트 슬래브를 콘크리트 슬래브 상부에 추가 시공하는 것만으로도 슬래브 두께를 증가시켜 바닥충격음을 저감시킬 수 있다.

바닥 마감 일체형 바닥구조는 딱딱한 충격원에 대한 충격을 그대로 하부 콘크리트 슬래브로 전달하기 때문에 경량충격음에 매우 취약한 구조이다. 하지만 이런 딱딱한 충격원에 대한 바닥충격음은 바닥 마감재를 이용하여 충격원의 충격력 특성을 변화시켜 고주파대역의 바닥충격음을 효과적으로 저감시킬 수 있다⁽¹⁰⁾. 이 연구에서 사용된 4.5 mm PVC 바닥 마감재는 500 Hz 이상의 바닥충격음을 저감시킬 수 있는 것으로 나타났으며, 경량충격음 단일 수치 평가량($L_{n,AW}$)은 5 dB ~ 7 dB 저감되었다.

하지만 실험된 바닥구조는 과거 바닥충격음 인증을 위한 표준실험동에서 실험되었기 때문에 실제 공동주택의 평면형태가 다르다. 따라서 일체형 바닥구조의 저주파 대역 바닥충격음 저감 효과에 대해서는 다양한 평형과 다양한 슬래브 두께 조건의 공동주택들을 대상으로 실험 검증될 필요가 있다.

후 기

이 연구는 국토교통부 주거환경연구사업의 연구비 지원(16RERP-B082204-03)에 의해 수행 되었습니다.

References

(1) Mun, D. H., Park, H. G., Hwang, J. S. and Hong, G. H., 2014, An Analysis of Characteristics of Floor Dynamic Properties and Bang-machine Impact Force on Floating Floor Using System Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 5, pp. 390~398.

(2) Chung, J. Y., Lee, S. W., Im, J. B. and Jeong, G. C., 2008, Research about Correlation of Slab Vibration Mode and Heavy-weight Floor Impact Sound, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 839~843.

(3) Kim, I. H. and Lee, K. D., 2009, A Study on the Characteristics of Heavy-weight Floor Impact Sound in Apartment Houses of the Flat Plate Structures, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 161~162.

(4) National Institute of Environmental Research, 2011, Final Report for the Survey of Floor Impact Sound in Apartment Buildings in Korea.

(5) Korea Environment Corporation, 2016, The report for Operating Results of National Noise Information System During 2012 to 2015, <http://www.noiseinfo.or.kr>

(6) Jeon, J. Y., Lee, P. J., Jeong, J. H. and Park, J. H., 2006, Comparison of Standard Floor Impact Sources with a Human Impact Source, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 789~796.

(7) Park, H. K., Kim, K. M. and Kim, S. W., 2013, Verification of Effectiveness of the Standard Floor Impact Source by Comparing with Living Impact Sources, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 12, pp. 1117~1126.

(8) Kim, K. W., Choi, G. S., Jeong, Y. S. and Yang, K. S., 2005, Impact Power Characteristics as Behavior of Real Impact Source(Child), Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 58, pp. 542~549.

(9) Mun, D. H., Park, H. G. and Hwang, J. S., 2014, Prediction of Concrete Slab Acceleration and Floor Impact Noise Using Frequency Response Function, Transactions of the Korean Society for Noise and

Vibration Engineering, Vol. 24, No. 6, pp. 483~492.

(10) Mun, D. H., Park, H. G., Song, G. G. and Lee, C. S., 2014, Reduction Effect of Floor Impact Noise and Impact Force of PVC Floor Covering and Floor Mat, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 7, pp. 501~508.

(11) Fahy, F. J. and Gardonio, P., 2007, Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response, 2nd Edition, ELSEVIER, pp. 26~29.



Dae Ho Mun received Ph.D. degree at the Department of Architecture, Seoul National University in 2015. He is a research professor in the Department of Architectural Engineering, Dankook University.



Yang Ki Oh was born in 1961 and received the B.S., M.S., Ph.D. degrees at the Department of Architecture, Seoul National University. After 1 year of post doctoral research at Jeonnam National University, he has been working for the Department of Architecture, Mokpo National University since 1991. His main concerns are room acoustic design and noise engineering for any built environment.



Gab Cheol Jeong received the B.S., M.S., Ph.D. degrees at the Department of Mechanical Engineering, SoongSil University. He had worked in Daewoo Engineering and Construction Institute. He is now working in S.I.PAN.



Hong Gun Park received Ph.D. at Department of Civil Engineering, University of Texas at Austin in 2009 and B.S. and M.S. degrees at Seoul National University. He is a professor in the Department of Architecture, Seoul National University.