

방진달대 적용에 따른 천장구조의 바닥충격음레벨 및 진동가속도레벨 저감 특성

Reduction in Floor Impact Sound and Vibration Acceleration Levels of Ceiling Structure by Installing Anti-vibration Hangers

홍 다 혜* · 김 신 태** · 김 명 준†
Dahye Hong*, Sintae Kim** and Myungjun Kim†

(Received February 1, 2024 ; Revised April 1, 2024 ; Accepted April 2, 2024)

Key Words : Floor Impact Sound(바닥충격음), Vibration Acceleration(진동가속도), Anti-vibration Hanger(방진달대), Supported Ceiling(천장), Rubber Ball(고무공 충격원), Tapping Machine(태핑머신)

ABSTRACT

Anti-vibration hangers can effectively reduce sound and vibration transmitted through structural connections between concrete slabs and supported ceilings. This research examined the impact of installing anti-vibration hangers on reducing floor impact sound through mock-up tests. Results showed that with anti-vibration hangers, vibration acceleration levels decreased above 200 Hz for both heavy- and light-weight impact sources. In terms of floor impact sound, reduction in heavy-weight impact sound was marginal, occurring only below 200 Hz with a maximum decrease of 1.7 dB. In contrast, the sound pressure level for light-weight impact sound steadily decreased by at least 2.7 dB starting from 630 Hz, reaching a maximum reduction of 4.8 dB at 1250 Hz. Therefore, the effectiveness of reducing both vibration acceleration and floor impact sound was confirmed for a lightweight impact source. This suggests that the application of anti-vibration hangers can effectively reduce floor impact sound, particularly in response to continuous impulsive sound like those generated by tapping machines.

1. 서 론

공동주택의 천장구조는 일반적으로 달대를 통해 상부 세대 슬래브와 연결된다⁽¹⁾. 천장 달대는 비구조체이지만, 상부 콘크리트 슬래브의 진동 응답을 천장구조로 전달함과 동시에 증폭시키는 매개체로 작용할 수 있다^(2,3). 또한 천장 상부 공기층의 공기 스프링(air-spring) 작용

과 더불어 슬래브에 방사된 바닥충격음 중 저주파 대역의 증폭 현상을 야기할 수 있다⁽⁴⁾. 이에 따라 구조체 간 진동 전달을 저감하고 바닥충격음 증폭을 완화하기 위해 다양한 천장공법들이 개발되어 왔다. 천장공법은 바닥구성층의 재시공에 비하여 상대적으로 시공 및 수선에 소요되는 기간이 짧고 비용이 저렴하기 때문에 층간소음 저감기술로서의 필요성이 요구됨과 함께 다양한 천장공법들이 제안되고 있다⁽⁵⁾.

† Corresponding Author ; Member, Division of Architecture, University of Seoul, Professor
E-mail : mjunkim@uos.ac.kr

* Member, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, M.S. Student

** Member, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Ph.D Student

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2023 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Jooyoung Hong

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

천장공법의 개발은 구조 형태, 공기층 두께, 흡음재를 통한 내부 충전, 달대 구조 등 다양한 조건에 대한 성능 확인과 함께 이루어졌다. 우물천장의 측부재와 벽면 몰딩재를 타공한 통기성 천장공법에서 63 Hz에서의 공진 현상이 완화되었고⁽⁶⁾, 이후 공명기형 천장 흡음체에 대하여 125 Hz에서 최대 6 dB 저감량이 확보되었다⁽⁷⁾. 또한 천장재 자체에 흡음성을 부여하여 시공성을 확보할 수 있는 흡음 석고보드 천장재⁽⁸⁾와 타공 석고보드⁽⁹⁾가 제시되었다. Kim은⁽⁴⁾ 저주파수 대역에 대한 천장 흡음재 기술을 제시하고 그 중 멤브레인형 흡음재를 통해 100 Hz~125 Hz 대역에서 중량충격음의 저감능력이 최대로 확보됨을 서술하였다. 그러나 상기 천장공법들은 충분한 성능 확보에 한계가 있었으며, 공동주택 현장 적용을 위해 시공성, 경제성, 바닥충격음 차단성능 등에 대한 추가적인 연구 및 검토가 요구된다.

천장구조의 달대 연결에 관한 연구에서 Park et al.은⁽¹⁰⁾ 달대 제거를 통해 콘크리트 슬래브와 천장구조 사이의 진동 전달 경로를 차단하는 무달대 천장구조를 개발하였고, 100 Hz 이상에서 바닥충격음 저감능력을 확인하였다. Lee et al.은⁽⁵⁾ 흡음재가 포함된 벽체지지형 천장구조 적용 시 경량철골 천장구조 대비 잔향시간 감소와 흡음력 증가에 따른 바닥충격음 차단성능 확인 결과를 제시하였다.

그러나 달대를 사용하지 않는 천장구조에 대하여 바닥충격음 차단성능의 한계점은 여전히 존재한다. Park et al.은⁽¹⁰⁾ 무달대 천장구조에서 100 Hz 이하의 바닥충격음은 저감되지 않았으며, 고체전달 외에도 공기전달을 통하여 슬래브의 진동이 전달될 수 있음을 서술하였다. 이와 더불어 최근 공급되는 공동주택의 경우 경량벽체 혹은 내단열벽체와 같은 비내력벽이 다수 존재하기 때문에 천장구조의 하중을 벽체를 통해 완전하게 지지하는 데는 기술적 한계가 있다. 따라서 부분적으로라도 달대 사용이 필요 불가결한 경우가 많으며, 바닥충격음에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 달대에 대한 검토가 필요하다.

일반적으로 천장구조와 슬래브를 연결하는 달대에는 구조체 사이의 진동을 절연하는 용도로 방진달대를 사용할 수 있다. 방진달대는 주로 건축물의 설비 기기 혹은 배관 등에서 발생하는 진동에 의한 구조전달음의 대책으로 진동을 절연하고 소음을 제어하기 위해 사용된다^(11,12). 진동원을 고무패드나 스프링 등

으로 탄성지지하여 건축물의 구조체로 전달되지 않도록 진동원과 제어 대상을 격리하고 기계적 진동 에너지를 다른 유형의 에너지로 변환하여 흡수 및 소산시키는 역할을 수행한다^(4,13).

이 연구에서는 달대를 사용하는 천장구조에서 구조체를 통한 고체전달음을 차단하기 위해 방진달대에 대한 충격원별 바닥충격음 저감효과를 검토하고자 한다. 이를 위해 현장과 유사한 조건으로 구축된 목업(mock-up) 실험동에서 방진달대 설치 여부에 대한 각 구조 부위별 진동가속도와 바닥충격음을 측정하였고, FFT 분석을 통해 저감량을 비교 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 실험개요

(1) 실험대상공간

바닥충격음 및 진동가속도레벨 분석을 위한 실험은 59 type 평면을 모사한 목업 실험동에서 진행하였다. 실험동은 거실 기준 가로 3.5 m, 세로 5.8 m, 층고 2.4 m이며, Fig. 1을 통해 평면과 천장구조의 설치 부위를 나타내었다. 해당 실험동은 120 mm 슬래브의 벽식 구조 형태이며, 바닥구조는 완충재(E-TPU; expanded thermoplastic polyurethane) 40 mm, 경량기

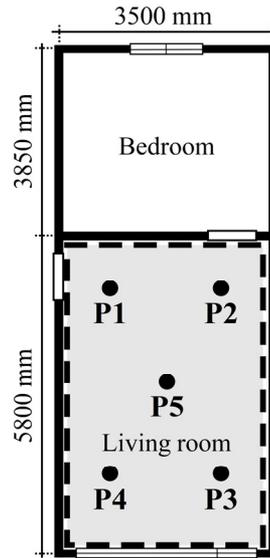


Fig. 1 Floor plan and impact and measurement points by standard sources(ceiling structure installation area is inside the dotted line)



Fig. 2 Installation of the ceiling structure in receiving room



(a) Hanger (b) Anti-vibration hanger

Fig. 4 Ceiling hangers for experiment



Fig. 3 Tray ceiling finished with gypsum boards

포 콘크리트 30 mm, 마감 모르타르 40 mm의 뜬바닥 구조이다.

Fig. 2는 수음실에 설치된 천장구조의 모습을 나타내고 있다. 아연도금강판 소재 설계 모듈을 이용한 자체 개발 천장구조를 우물천장의 형태로 설치하였고 달대를 통해 상부 슬래브와 연결하였다. 슬래브와 천장구조 사이 단부 공기층의 두께 170 mm, 우물부 공기층 두께 100 mm, 달대 간격 1350 mm이다. 천장구조의 시공이 완료된 후 Fig. 3과 같이 9.5 mm 두께의 석고보드를 사용하여 마감하였다.

(2) 달대 조건

방진달대는 매달기형 방진 고무가 설치된 달대를 의미하며, 탄성지지를 통해 상부층 진동원에서 발생하는 진동이 하부층 바닥, 천장, 벽과 같은 구조체로 전달되지 않도록 차단하는 역할을 수행한다.

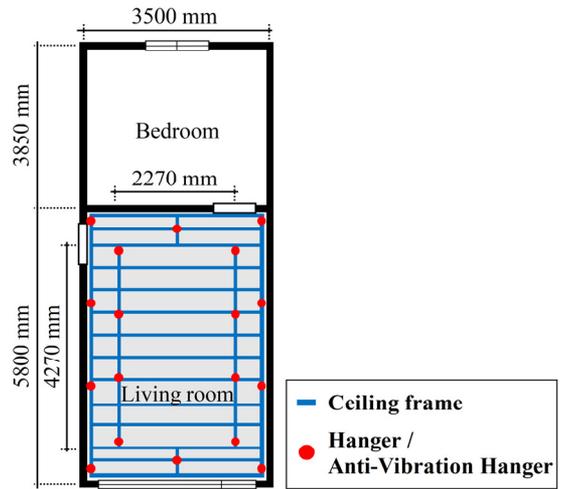


Fig. 5 Location of the hangers/anti-vibration hangers

이 연구에서는 일반적으로 천장구조에 활용되는 직경 10 mm의 달대(이하 일반달대)와 방진달대의 사용에 따른 충격원별 저감효과를 검토하였다. Fig. 4는 일반달대와 방진달대의 설치 모습이며, Fig. 5를 통해 천장틀과 함께 설치된 달대의 위치를 수음실 평면도 위에 나타내었다. 총 18개의 달대를 통해 슬래브와 천장틀을 연결하였다.

일반달대는 직경 10 mm의 달대 볼트를 사용하여 상부는 슬래브에 고정하고 하부는 달대 너트와 결합하여 천장틀을 고정하였다. 방진달대는 외경 22 mm와 천연 고무 배합 경도 60 shore A 재질의 방진고무 1개가 부착된 형태이다. 최대 허용 하중은 230 N이며, 스프링정수는 59 N/mm이다. 스프링정수와 관련하여

실험 당시 온습도 조건은 일반달대 실험 시 24.9°C, 방진달대 실험 시 23.7°C였으며, 습도는 모두 60% RH였다.

2.2 바닥충격음 및 진동가속도 측정방법

(1) 바닥충격음

Fig. 1의 P1 ~ P5는 바닥충격음 가진점과 수음점을 의미하며, 측정 장비의 제원은 Table 1에 나타내었다. 실험은 Fig. 3과 같이 천장구조 시공 후 9.5 mm 두께의 석고보드로 마감한 상태에서 진행하였다. 바닥충격음 표준충격원은 고무공 충격원과 태핑머신을 사용하였으며, KS F ISO 16283-2와 KS F ISO 717-2에 의거하여 바닥충격음 차단성능을 측정 및 평가하였다.

(2) 진동가속도

측정을 위해 상부층에서 고무공 충격원과 태핑머신을 Fig. 1의 모서리 부분 P2와 실 중앙 P5에 각각 10초씩 가진하였고 수음실에 설치된 가속도계를 이용하여 측정하였다. 가속도계의 부착 위치는 Fig. 6을 통해 나타내었다. 구조 부위별 진동가속도의 바닥충격음에 대한 기여량을 평가한 결과, 벽식 구조 형식의 수음실에서 중량충격음은 천장, 경량충격음은 네 개 벽면의 기여율이 가장 높게 평가되었다^(14,15). 따라서 방진달대의 진동 및 소음 저감 특성을 분석하기 위해서는 수음실의 천장, 슬래브, 벽체의 모든 구조 부위에 대한 진동가속도를 측정 및 분석할 필요가 있다. 측정은 총 4개의 가속도계를 사용하였으며, A1은 슬래브 하부면, A2와 A4는 천장틀, A3는 벽면에 각각 부착하였다. A1 ~ A3은 모두 가진점 P2와 동일한 수직선상에 배치하였고, A4는 A2로부터 한 개 달대 간격인 1350 mm 이격하여 실 중앙 부위에 좀 더 가깝게 설치하였다. 정확한 진동 센서 부착을 위해 Fig. 2와 같이 석고보드 마감을 하지 않은 조건에서 측정을 진행하였고, 총 3회 반복하여 측정하였다.

측정과 함께 진동가속도를 12 800 Hz의 샘플링 주파수로 레코딩하였고 이를 활용하여 FFT 분석과 1/3 옥타브밴드 패스 필터를 적용한 주파수 분석을 진행하였다. 분석 시 01dB dB4(ACOEM)와 MATLAB R2023a(MathWorks)를 사용하였다. FFT 분석은 hanning window를 사용하였고, 표준충격원별 바닥충격음 차단성능 평가 기준 및 주파수대역과 동일하게 분석하

Table 1 Measurement and analysis equipment

Equipment	Model(company)
Microphone	UC-59(RION)
Accelerometer	KS78C.100(MMF GmbH)
FFT analyzer	H/W : 01dB dB4(ACOEM) (4 ch. sound and vibration analyzer) S/W : MATLAB(MathWorks)

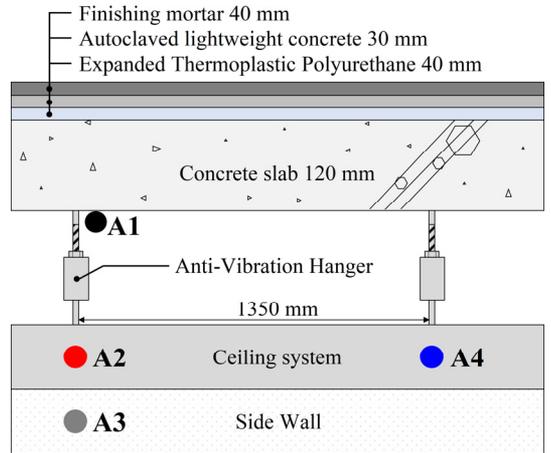


Fig. 6 Location of the accelerometers

여 평가하였다. 고무공 충격원은 측정시간 동안 개별 가진에 대한 최댓값으로 각 측정점에서의 진동가속도 레벨을 산출하였고, 태핑머신은 평균값을 분석하였다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 표준충격원 가진의 바닥충격음레벨

Fig. 7은 일반달대와 방진달대 설치에 따른 표준충격원별 바닥충격음 측정결과를 1/3 옥타브밴드로 나타낸 그래프이다. Table 2와 Table 3은 각각 고무공 충격원과 태핑머신의 단일수치평가량과 주파수대역별 실험결과이다.

고무공 충격원에 대한 중량충격음 평가 결과, 에너지 평균 최대 바닥충격음레벨($L_{i,Fmax}$)의 각 중심주파수에 대하여 125 Hz와 160 Hz에서 최대 1.7 dB 감소하였다. 그러나 A 보정치의 적용에 의해 A-가중 최대 바닥충격음레벨($L_{iA,Fmax}$)은 일반달대와 방진달대 모두 64.6 dB로 단일수치평가량의 변화가 발생하지 않았다.

태핑머신에 대한 경량충격음은 가중 표준화 바닥

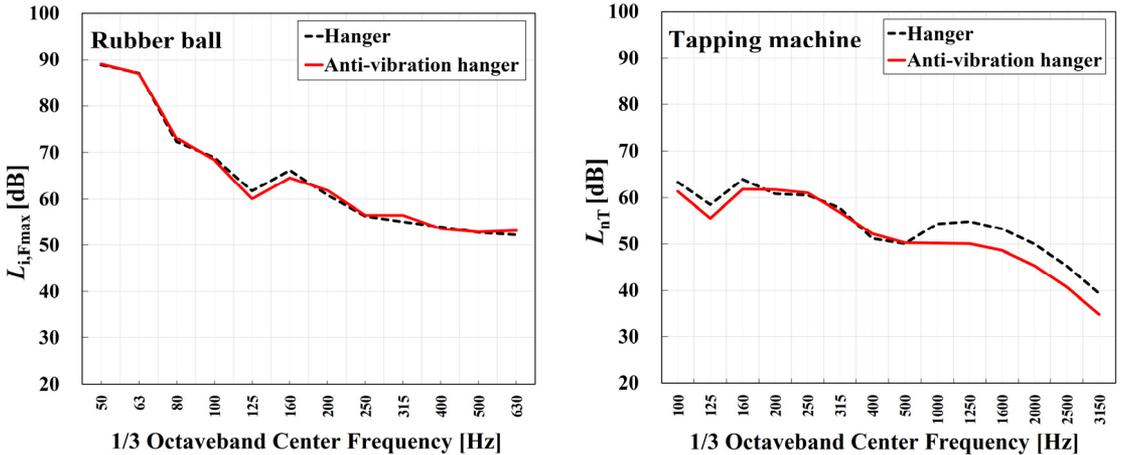


Fig. 7 Floor impact sound measurement with hanger/anti-vibration hanger

Table 2 Measured floor impact sound pressure level of heavy-weight

Variable	$L_{i,Fmax}$ [dB]												$L_{iA,Fmax}$ [dB]
	50 Hz	63 Hz	80 Hz	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	
Hanger	88.9	87.1	72.3	69.0	61.7	66.3	60.9	56.3	55.1	53.9	52.7	52.2	64.6
Anti-vibration hanger	89.1	87.0	73.1	68.4	60.0	64.6	61.8	56.5	56.4	53.5	52.8	53.1	64.6

Table 3 Measured floor impact sound pressure level of light-weight

Variable	L_{nT} [dB]															$L_{nT,W}$ [dB]	
	100 Hz	125 Hz	160 Hz	200 Hz	250 Hz	315 Hz	400 Hz	500 Hz	630 Hz	800 Hz	1000 Hz	1250 Hz	1600 Hz	2000 Hz	2500 Hz		3150 Hz
Hanger	63.4	58.6	64.0	60.9	60.6	57.9	51.2	50.0	53.2	54.4	54.4	54.9	53.2	50.0	45.4	39.4	56
Anti-vibration hanger	61.4	55.6	61.9	61.8	61.1	56.9	52.2	50.2	50.5	50.9	50.2	50.1	48.6	45.3	40.7	34.8	53

충격음레벨($L_{nT,W}$)로 평가한 결과, 일반달대 설치 시 56 dB, 방진달대 설치 시 53 dB로 나타났으며, 방진달대 적용에 의해 단일수치평가가량이 3 dB 저감되었다. 또한 표준화 바닥충격음레벨(L_{nT})에 대하여 630 Hz 이상에서는 각 중심주파수에서 최소 2.7 dB 이상의 바닥충격음 감소가 일정하게 유지되었으며, 1250 Hz에서 4.8 dB 감소하여 다른 주파수대역에 비해 가장 큰 바닥충격음레벨의 저감성능이 나타났다.

3.2 표준충격원 가진의 진동가속도레벨

(1) 측정위치별 진동가속도레벨 분석

Fig. 8과 Fig. 9는 표준충격원 가진 시, 방진달대 적용 여부에 따라 슬래브, 모서리 천장틀, 벽체, 중앙 천

장틀의 진동가속도레벨을 비교한 그래프이다. 표준충격원별 FFT 분석을 진행하여 바닥충격음의 평가주파수 범위에 대한 결과를 나타내었다. Fig. 8에서 가진원은 고무공 충격원이며, 가진점은 모서리 부분의 P2와 중앙 부분의 P5이다. Fig. 9에서 가진원은 태핑머신이며, 가진점 조건은 동일하다. 가진점 P2는 가속도계 A1 ~ A3과 동일한 수직선상에 위치하며, 표준충격원 가진 시 최단 경로를 통해 가속도계 A1 ~ A3에 진동 및 고체전달음이 전달될 수 있다. 가진점 P5는 실의 중앙이며, 가장 변위가 클 것으로 예상하였다.

Fig. 8(a)에서 일반달대 설치 시 고무공 충격원으로 P2를 가진하였을 경우 천장틀에 설치한 A2와 A4의

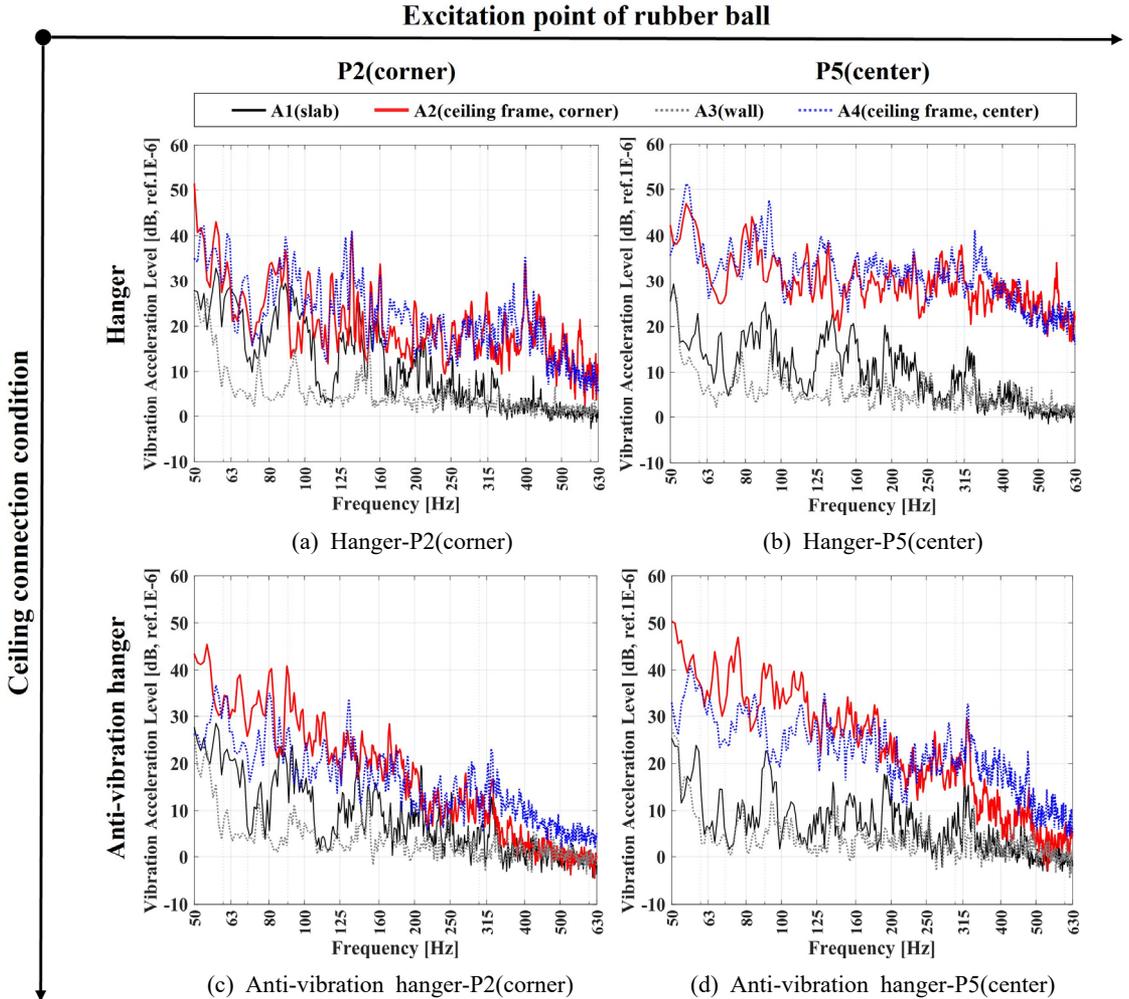


Fig. 8 Vibration acceleration level excited by rubber ball in case of hanger and anti-vibration hanger installation

진동가속도레벨이 가장 높게 산출되었고, 슬래브 하부에 설치한 A1, 벽체에 설치한 A3 순으로 감소하였다. 이는 슬래브와 벽체에 비해 천장틀의 지지 강성이 약하기 때문으로 판단된다. 슬래브와 벽체에 대한 천장틀(A2, A4)의 진동가속도레벨 격차는 Fig. 8(b)에서 중앙점 P5를 가진하였을 때 더욱 증가하였다. 이러한 경향은 3회 반복된 측정회차에 관계없이 동일하게 나타났다.

Fig. 8(c)와 Fig. 8(d)에서 방진달대 설치에 따른 슬래브와 벽체의 진동가속도레벨 변화는 크게 나타나지 않았으나, 천장틀의 진동가속도레벨의 저감을 확인하였다. 또한 일반달대와 동일하게 모서리보다 중앙을

가진하였을 때 측정 부위 중 천장틀(A2, A4)의 진동가속도레벨만 크게 증가하였다. 이에 따라 방진달대 설치 여부에 관계없이 고무공 충격원을 중앙에서 가진하였을 때 천장틀의 진동가속도레벨이 가장 높게 산출되는 것을 확인하였다.

Fig. 9(a)에서 일반달대 설치 시 태핑머신으로 P2를 가진하였을 경우 슬래브 하부에 설치한 A1의 진동가속도레벨이 가장 높게 산출되었고, 다음으로 A2와 A4, 마지막으로 A3 순으로 감소하였다. 고무공 충격원과 달리, 가진원으로부터 가장 먼 수직거리에 설치된 A3의 진동가속도레벨이 100 Hz ~ 3150 Hz 대역에서 대부분 약 10 dB 이상으로 값이 증가하였고, 4개

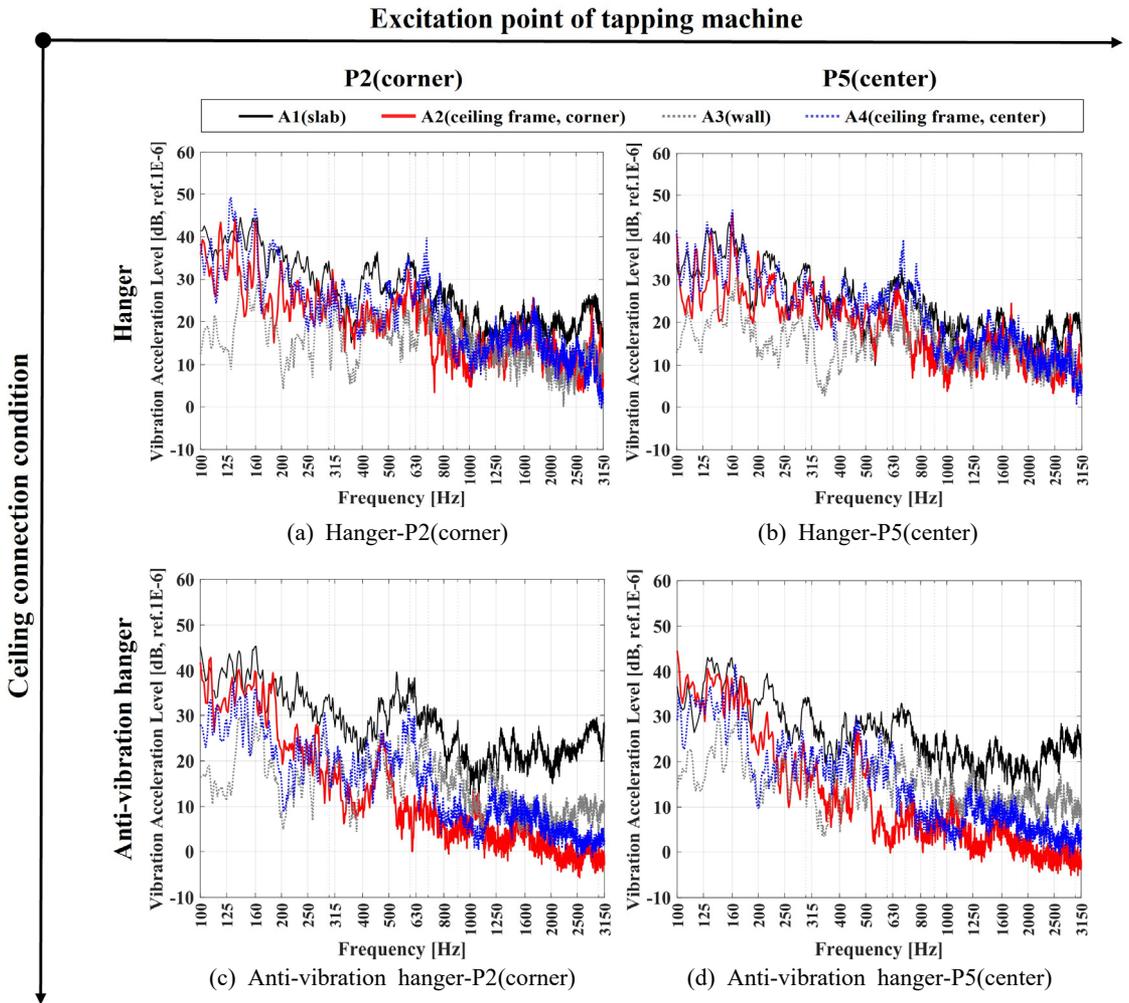


Fig. 9 Vibration acceleration level excited by tapping machine in case of hanger and anti-vibration hanger installation

의 가속도계간의 진동가속도레벨 격차가 감소하였다. 이를 통해 태핑머신에 대한 벽체의 진동가속도레벨의 기여율이 고무공 충격원과 비해 높음을 확인하였다. Fig. 9(b)에서 중앙 P5를 가진하였을 경우에도 구조체별 진동가속도레벨은 동일한 경향을 나타내었다.

Fig. 9(c)와 Fig. 9(d)에서 고무공 충격원과 마찬가지로 방진달대 설치에 따른 슬래브와 벽체의 진동가속도레벨 변화는 크지 않았고, 천장틀의 진동가속도레벨은 감소하였다. 하지만 가진점 조건에 따른 변화는 거의 나타나지 않았다.

고무공 충격원과 달리, 태핑머신을 가진하였을 경우 진동 전달 경로상에 설치한 가속도계의 레벨 편차

가 상대적으로 작게 나타났으며, 이를 통해 벽체까지 일정한 진동이 전달되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 가진 위치에 따른 진동 응답의 변화가 크지 않음을 확인하였다. 이는 단발성 충격으로 인한 과도진동의 특성을 띄는 고무공 충격원과 달리, 연발성 충격으로 정상진동을 발생시키는 태핑머신의 진동 특성에서 기인한 것으로 사료된다.

(2) 천장틀에서의 진동가속도레벨 분석

방진달대 설치 여부와 표준충격원의 가진 위치에 따른 구조체별 진동가속도레벨의 분석 결과를 통해 천장틀에 한하여 진동가속도레벨의 유의미한 변화를

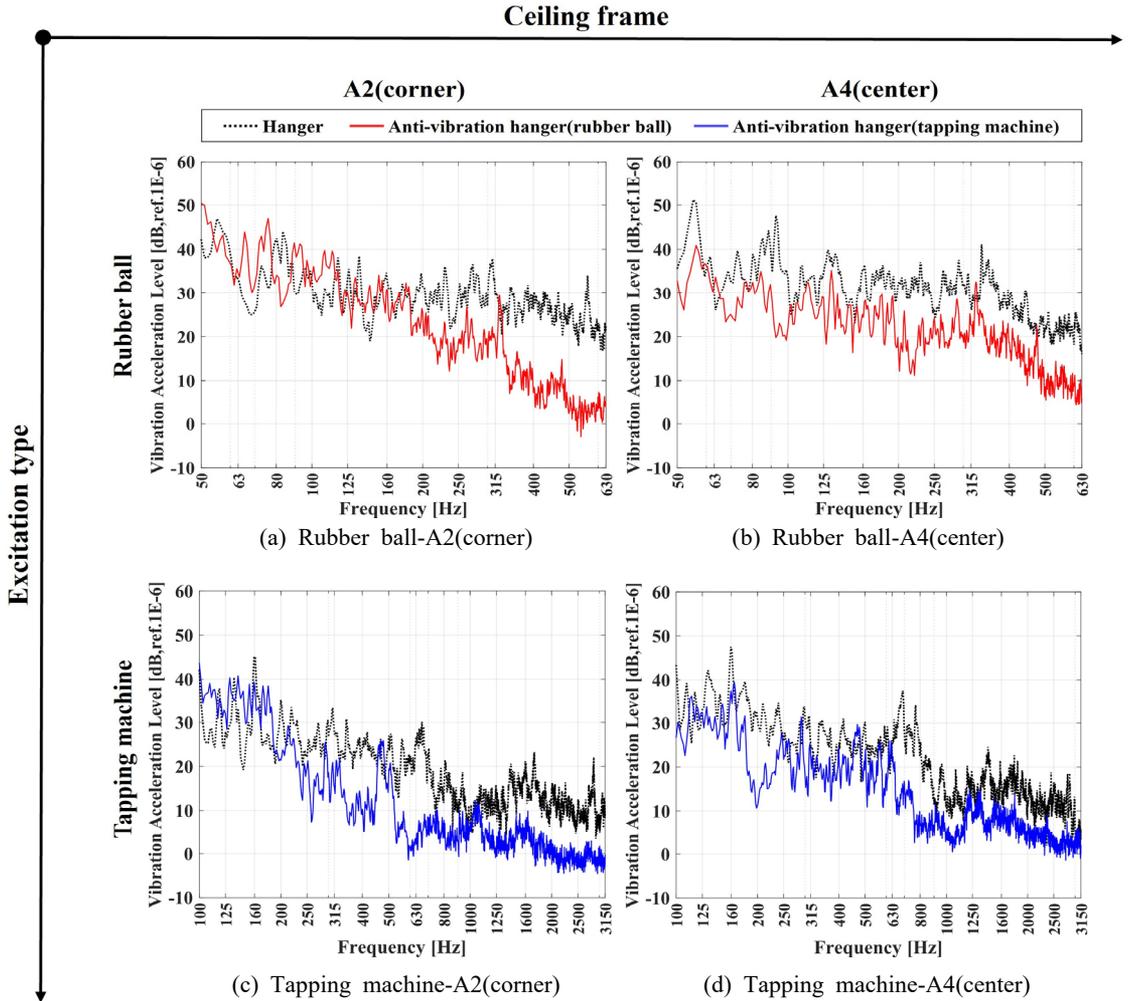


Fig. 10 Vibration acceleration level results of ceiling frame when excited by standard floor impact source

확인할 수 있었다. 또한 고무공 충격원의 경우 가진 점 조건에 대하여 중앙점 가진 시 천장들의 진동 가속도레벨이 가장 크게 산출되는 것을 확인하였다. 이에 따라 표준충격원별 방진달대 설치 여부에 따른 진동가속도레벨의 주파수 분석을 위해 중앙점 P5를 가진하였을 때, 천장들(A2, A4)의 진동가속도레벨 변화를 분석하였다.

Fig. 10은 방진달대 설치 여부에 따른 모서리 천장들(A2)과 중앙 천장들(A4)의 주파수에 대한 진동가속도레벨을 비교한 그래프이다. Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)의 충격원은 고무공 충격원이고, Fig. 10(c)와 Fig. 10(d)의 충격원은 태핑머신이다. 가진점은 모두 P5로 동일하다.

먼저 고무공 충격원에 대하여 Fig. 10(a)에서 방진달대 설치 시 모서리 천장들의 진동가속도레벨은 200 Hz 이하에서는 증폭과 저감이 불규칙적으로 발생하여 일반 달대보다 가속도 응답의 증폭이 높게 나타나는 경우도 있었으나, 200 Hz 이상 주파수대역에서는 진동가속도레벨이 감소하였다. Fig. 10(b)에서 중앙 천장들의 가속도 응답은 모서리 천장들 대비 최대 진동가속도레벨 저감폭은 줄어들었으나, 50 Hz ~ 630 Hz 대역 전반에 걸쳐 일정한 감소를 보였다.

다음으로 태핑머신에 대하여 Fig. 10(c)에서 방진달대 설치 시 모서리 천장들의 가속도 응답은 200 Hz 이하에서 대부분 증폭되어 일반달대보다 높게 나타났

으나, 그 이상 주파수대역에서는 진동가속도레벨이 감소하였다. Fig. 10(d)에서 중앙 천장틀의 가속도 응답은 100 Hz ~ 3150 Hz에 대하여 진동가속도레벨이 저감되었다. 이러한 가속도계별 저감 특성은 고무공 충격원과 동일한 경향으로 나타나며, 결과적으로 200 Hz 이상 주파수대역에서 방진달대 설치에 의한 두 가지 표준충격원의 공통적인 저감을 확인하였다.

3.3 방진달대 적용 여부에 따른 바닥충격음 레벨 및 진동가속도레벨 변화 고찰

천장틀과 슬래브 연결 시 방진달대 사용 여부에 대한 바닥충격음 및 진동가속도레벨의 변화를 비교 검토한 결과, 천장틀의 가속도 응답에 대하여 모든 표준충격원에서 200 Hz 이상 주파수대역에 대한 진동가속도레벨의 저감을 확인하였다. 하지만 슬래브와 벽체의 진동가속도레벨은 달대의 종류와 관계없이 충격원별로 유사하게 나타났다. 일반달대 혹은 방진달대를 통해 슬래브와 천장구조를 연결할 때, 벽체와 천장구조 사이의 구조적 연결은 이루어지지 않았고, 천장구조의 연결은 슬래브 하부에 설치한 달대를 통해서만 이루어졌다. 이에 따라 슬래브, 달대, 천장구조, 벽체 순의 경로로 전달되는 진동 성분이 크지 않은 것으로 판단된다. 그러나 슬래브와 벽체가 일체화된 벽식 구조의 구조적 한계로 인하여 슬래브로부터 벽체로의 진동 전달은 방진달대 설치 여부와 독립적으로 작용하며 방진달대로 인한 슬래브와 벽체의 진동가속도레벨 변화는 발생하지 않은 것으로 판단된다.

천장틀의 진동가속도레벨 저감과 달리, 바닥충격음에 대하여 중량충격음에 대한 단일수치평가량($L_{iA, Fmax}$)의 변화는 나타나지 않았고, 경량충격음은 단일수치평가량($L_{nT, W}$)이 3 dB 감소하였다.

먼저 고무공 충격원 가진에 대한 평균 최대 바닥충격음레벨($L_{i, Fmax}$)은 125 Hz와 160 Hz에서 최대 1.7 dB 저감된 결과를 확인하였다. 고무공 충격원은 주로 63 Hz 이하의 주파수대역에서 집중된 충격력을 발생시키며 그 이상 주파수대역에서는 충격력레벨이 감소한다⁽⁶⁾. 또한 단발적으로 가해진 진동은 시간에 따라 점차 감소하는 과도진동(충격진동)의 특성을 갖는다. 하지만 방진달대 설치에 따른 바닥충격음 및 진동가속도 분석 결과, 충격력이 집중되는 63 Hz 이하에서 충분한 에너지 저감이 발생하지 않았다. 또한 충격음레벨이 감소한 주파수대역은 진동가속도레벨의 저감 대역에

포함되지 않았다. 결과적으로 200 Hz 이상의 진동가속도레벨의 저감이 중량충격음의 저감으로까지 이어지지 않은 것으로 사료된다.

태핑머신은 주로 500 Hz ~ 2000 Hz의 주파수대역에 분포된 연발성 충격을 발생시키며 시간에 따라 충격력이 일정하게 지속되는 정상진동 형태이다. 태핑머신 가진에 대한 표준화 바닥충격음레벨(L_{nT})을 분석한 결과, 630 Hz 이상에서 일정한 저감을 보였고 1250 Hz에서 최대 4.8 dB 감소하였다. 방진달대 설치에 따른 진동가속도 분석 결과, 태핑머신의 충격력이 집중되는 대역에서 진동가속도레벨이 감소함을 확인하였다. 따라서 충격력이 집중된 주파수대역이 진동저감 대역에 포함되는 것을 확인하였고, 결과적으로 경량충격음 단일수치평가량의 저감에도 영향을 미친 것으로 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 방진달대 적용에 대한 바닥충격음 및 진동가속도 저감 특성을 분석하기 위하여 표준충격원별 바닥충격음레벨과 진동가속도레벨의 변화를 검토하였으며, 주요 연구결과는 아래와 같다.

실험대상공간에서 일반달대와 방진달대를 설치한 경우의 가속도 응답을 비교한 결과, 방진달대를 설치한 경우 고무공 충격원과 태핑머신 모두 200 Hz 이상에서 천장틀의 진동가속도레벨이 감소하였다. 그에 반해 슬래브와 벽체의 진동가속도레벨은 방진달대 설치 여부와 관계없이 유사하게 나타났다. 천장구조는 슬래브 하부에 설치된 달대를 통해 연결되었고, 벽체와 천장구조 간 별도의 구조 접합은 없었다. 따라서 이러한 진동가속도레벨의 특성은 벽체와 슬래브가 연결되어 있는 벽식 구조의 구조적 특성에서 기인한 것으로 판단된다.

바닥충격음 분석 결과, 방진달대 설치에 의한 바닥충격음은 태핑머신에 한하여 단일수치평가량 기준 3 dB 감소하였다.

고무공 충격원 가진 시 발생하는 단발성 충격력의 진동 특성을 고려하였을 때, 시간에 따라 응답이 감소하는 과도진동의 형태이며 태핑머신과 비교하였을 때 63 Hz 이하 주파수대역에 집중되어있다. 하지만 진동가속도레벨이 저감된 200 Hz 이상의 주파수대역은 63 Hz로부터 벗어나 있으며, 충격음레벨의 저감은

200 Hz 미만에서 발생하였다. 이에 따라 방진달대의 바닥충격음 저감효과를 기대하기는 어려운 것으로 판단된다.

태핑머신으로 인해 발생한 연발성 충격은 시간이 지남에 따라 일정량의 진동으로 지속되는 정상진동의 특성을 띤다. 고무공 충격원과 동일한 200 Hz 이상에서 진동가속도레벨 저감과 630 Hz 이상에서 바닥충격음레벨 저감은 모두 태핑머신의 충격력이 집중된 500 Hz~2000 Hz의 주파수대역 내에 포함되며, 이로 인해, 방진달대에 대한 바닥충격음 저감효과가 발생한 것으로 판단된다.

이 연구결과를 통해 방진달대 적용에 따른 바닥충격음의 저감은 태핑머신과 같은 연발성 충격에 대하여 효과적으로 발생할 수 있음을 확인하였다. 따라서 공동주택의 천장구조 시공 시 방진달대를 사용하여 천장구조와 슬래브를 연결할 경우 연속적으로 발생하는 충격원에 대하여 진동 및 충격음의 저감효과가 나타날 것으로 기대된다.

다만, 이 연구내용 외에도 석고보드를 추가 설치하여 달대 하부 구조 추가에 따른 진동가속도의 변화를 검토할 필요가 있다. 또한 태핑머신에 대한 방진달대의 저감효과 발생 원인에 대한 분석을 위해 이 연구결과를 바탕으로 충격원별 진동모드해석과 방진달대의 변수(실험 시 온도도와 스프링 상수, 달대의 진동 전달율 등)를 고려한 추가 분석이 필요할 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(과제번호 RS-2022-00144050)으로 수행되었습니다.

References

(1) Lee, S.-B., An, J.-H. and Kim, M.-J., 2019, A Study on the Vibration Effect of Wall Supported Ceiling System to Reduce Floor Impact Sound in Apartment House, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, p. 356.

(2) Mun, D.-H., 2015, Analysis of Influence Factors of Floor Impact Sound in Residential Buildings, Doctoral Dissertation, Seoul National University,

Seoul, Korea.

(3) Yu, R., Rui, S., Wang, X. and Ma, F., 2023, An Integrated Load-bearing and Vibration-isolation Supporter with Decorated Metamaterial Absorbers, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 253, 108406.

(4) Kim, I.-H., 2020, Technology of Low-frequency Sound Absorber in Ceiling for Reduction of Floor Impact Sound, Review of Architecture and Building Science, Vol. 64, No. 2, pp. 21~25.

(5) Lee, S. B., Kim, S. T., An, J.-H. and Kim, M. J., 2021, Correlation between Sound Absorption and Heavy Weight Impact Sound According to Installation of Sound Absorbing Material behind the Wall Supported Ceiling System, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol. 15, No. 6, pp. 723~734.

(6) Kim, K., Ryu, J. K. and Jeon, J. Y., 2015, Development of Perforated Ceiling Structures to Reduce Floor Impact Sound, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol. 9, No. 1, pp. 34~39.

(7) Song, H., Ryu, J., Kim, Y., Song, G. and Lee, W., 2017, Effect of an Resonator Absorber in the Ceiling on Floor Impact Sound Level, Proceedings of the Joint Conference by KSNVE, ASK and KSME(DC), p. 338.

(8) Song, H.-S. and Ryu, J. K., 2018, Effects of Sound Absorbent Gypsum Board in the Ceiling on Low-frequency Heavyweight Floor Impact Sound, Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 37, No. 5, pp. 323~330.

(9) Shin, H. and Kim, K., 2019, Analysis Effects of Perforated Gypsum Board Ceiling Structure for Floor Impact Sound Reduction, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 4, pp. 511~517.

(10) Park, H.-G. and Mun, D.-H., 2014, Characteristics of Floor Impact Noise Insulation for No Hanger Ceiling Structure in Apartment Building, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 208~213.

(11) Liu, Z., Zhang, Y., Du, S. and Xiao, S., 2014, Analysis on Hanger Location and Hanger Isolator of An Exhaust System with Powertrain, Proceedings of the

International Conference on Mechatronics, Electronic, Industrial and Control Engineering, pp. 1344~1347.

(12) Tao, J. and Mak, C. M., 2006, Effect of Viscous Damping on Power Transmissibility for the Vibration Isolation of Building Services Equipment, *Applied Acoustics*, Vol. 67, No. 8, pp. 733~742.

(13) Lee, J.-H., 2012, Evaluation of Dynamic Characteristic for Vibration and Structure Born Noise Reduction, *Proceedings of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea Winter Annual Conference*, pp. 313~316.

(14) Kim, H. and Kim, M.-J., 2002, Vibrational Response on the Impacted Floor and the Interior Structures of Receiving Room by Standard Impact Sources, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 18, No. 10, pp. 227~234.

(15) Kim, M. J., Kim, H. and Kim, H.-G., 2003, Prediction of Floor Impact Sound by Measuring the Vibration Acceleration Level on the Interior Structures of Receiving Room in Apartment Buildings, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 1~9.

(16) Park, H.-G. and Mun, D.-H., 2014, Characteristics of Impact Force and Floor Impact Noise for Man Walking and Standard Impact Sources, *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 216~224.



Sintae Kim received M.S. in Dept. of architectural engineering from University of Seoul, Seoul, Korea in 2020. He is currently a Ph.D. candidate in University of Seoul. His research interests are in the area of floor impact sound and sound insulation in buildings.



Myungjun Kim received B.S., M.S. and Ph.D. in Dept. of architectural engineering from Hanyang University, Seoul, Korea in 1987, 1989 and 1999, respectively. He is currently a professor in the Dept. of architecture at University of Seoul. His research interests are in the area of architectural acoustics and sound insulation in buildings.



Dahye Hong received B.S. in Dept. of architectural engineering from University of Seoul, Korea in 2023 and Dept. of Audio Production from Dong-ah Institute of Media and Arts, Korea in 2021. She is currently a M.S. candidate at University of Seoul. Her research interests are in the areas of architectural acoustics and room acoustics.