

# **바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 방법론 연구**

안정적 바닥충격음 차단성능 구현을 위한 시공단계별 성능 관리 방안 연구(I)

연구관리 2024-068호

## 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 방법론 연구

안정적 바닥충격음 차단성능 구현을 위한 시공단계별 성능 관리 방안 연구(1)

지은이 김태민, 천영수, 남성훈, 김지윤, 오명호

발행인 정창무

발행처 한국토지주택공사 토지주택연구원

주 소 (34047) 대전 유성구 엑스포로 539번길 99

홈페이지 <http://lhri.lh.or.kr>

전화번호 042-866-8585

이메일 [ktaemin@lh.or.kr](mailto:ktaemin@lh.or.kr)

이 출판물은 우리 공사의 업무상 필요에 의하여 연구·검토한 기초자료로서 공사나 정부의 공식적인 견해와  
관계가 없습니다.

우리 공사의 승인 없이 연구내용의 일부 또는 전부를 다른 목적으로 이용할 수 없습니다.



# 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 방법론 연구

안정적 바닥충격음 차단성능 구현을 위한 시공단계별 성능 관리 방안 연구(I)

The Study of Floor Impact Noise Prediction Methodology using Slab Vibration

김태민 · 천영수 · 남성훈 · 김지윤 · 오명호

**LH**토지주택연구원

## 참여연구진

### 연구책임

김태민 LH 토지주택연구원 책임연구원

### 연구진

천영수 LH 토지주택연구원 선임연구위원

남성훈 LH 토지주택연구원 책임연구원

김지윤 LH 토지주택연구원 연구원

오명호 LH 스마트주택기술처 차장

### 연구심의위원

이영은 LH 토지주택연구원 선임연구위원(심의위원장)

정승호 LH 스마트주택기술처 팀장

이형철 LH 주택품질처 팀장

홍영호 LH 주택품질처 팀장

고준성 LH 주택품질처 팀장

유호원 LH 설계검증처 팀장

김용희 영산대학교 교수

홍주영 충남대학교 교수

송상훈 LH 토지주택연구원 단장

이동건 LH 토지주택연구원 수석연구원

### 자문위원 (가나다순)

김명준 서울시립대학교 교수

장지호 한국표준과학연구원 책임연구원

### 부분위탁연구수행기관

(주)한국소음진동 공동주택 바닥구조 시공단계별 바닥 슬래브 진동/바닥충격음 측정 및 분석

### ■ 인정 바닥구조의 현장 성능 편차

- 이웃사이센터에 접수된 공동주택 층간소음 관련 민원은 지속적으로 증가하여 2022년 기준 약 4만건이 접수되었으며, 층간소음 원인으로는 상부층 생활충격(보행, 땀 등)에 의해 발생하는 바닥충격음이 약 70%로 가장 많은 비중을 차지하고 있음
- 정부는 바닥충격음 피해를 저감하기 위해 최소 성능 기준 이상의 바닥충격음 차단성능을 인정받은 바닥구조를 적용하도록 바닥구조의 성능 기준을 설정하고 있음(사전인정 제도)
- 2019년 실시된 감사원 ‘아파트 층간소음 저감제도 운영실태’ 보고서에 따르면, 현장 바닥충격음 측정 세대 중 약 96%가 인정구조 대비 현장 성능이 저하되는 것으로 분석됨
- 정부는 지어질 주택, 지어진 주택의 바닥충격음 피해를 저감하기 위해 다양한 제도 개선 방안을 발표함

### ■ 정부의 공동주택 바닥충격음 저감 대책 : 사후확인제도

- 국민이 체감할 수 있는 바닥충격음 저감 정책으로 사용검사 전 현장의 바닥충격음 차단 성능을 측정·평가하는 ‘사후확인제도’를 도입하였으며(‘22.08), 이와 관련하여 바닥충격음 측정 방법 및 소음 기준 등을 강화함
- 공동주택 바닥충격음 관련하여 공동주택 공급자 뿐만 아니라 사용자에게 요구되는 성능 기준도 함께 강화됨

### ■ 바닥충격음 성능 기준 미달시 보수·보강 방안

- 바닥충격음 사후확인제도 평가에서 최소 성능 기준을 미달하는 경우, 사업주체는 보상·보강을 권고할 수 있으며, 최근 보완 시공 의무화 등의 강화된 법률 개정을 예고함
- 사후확인제도 도입과 관련하여 최소 성능 기준 미달시 막대한 비용 발생이 예상됨
- 따라서, 안정적인 공동주택 현장의 바닥충격음 차단성능 구현을 위한 기술 개발이 시급히 요구되는 상황임

## ■ 바닥구조 시공품질 관리의 필요성

- 고성능 바닥구조, 흡/차음형 천정 개발 등 안정적으로 현장 성능을 구현할 수 있는 기술 개발이 진행 중에 있으나, 고성능 저감 기술이 적용된 세대에서도 시공 품질 등에 따라 인정구조 대비 현장 성능 편차 및 세대별 성능 편차가 발생할 수 있음
- 바닥충격음 편차 저감을 위한 이상적인 성능 관리 방안은 시공 단계별 바닥충격음을 측정하고, 성능 저하가 예상되는 경우 시공 단계별 적정 조치를 수행하는 것임
- 단, 바닥충격음 측정을 위해서는 하부층 공간(수음실)의 실험 환경 조건(출입문, 창호 설치 등)이 충족되어야 하지만, 일반적인 공동주택 시공 단계에서 바닥충격음을 측정 가능 시기는 준공 직전에 가능할 것으로 판단됨
- 따라서, 본 연구는 소음 실험 환경 조건이 충족되지 않는 시공 단계에서도 바닥충격음 성능을 예측하고, 편차 발생이 예상되는 경우 사전에 보수·보강이 가능한 바닥구조의 시공품질 관리 방안을 마련하고자 함

## ■ 목업실험동을 이용한 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 측정

- 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 측정 결과의 비율을 계산한 결과 시공 단계별 편차는 존재하나, 평형별 분석 결과는 유사한 것으로 분석됨
- 바닥 슬래브 진동을 이용하여 바닥충격음 예측 결과, 맨슬래브 조건에서 약 2dB 오차 수준으로 신뢰성 있는 바닥충격음 예측이 가능할 것으로 판단됨
- 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 저감량을 이론식과 비교하여 분석한 결과, 1/3 옥타브 밴드의 80Hz 이후 주파수 대역에서는 이론식 대비 유사한 저감량이 존재하는 것으로 분석됨
- 뜬바닥구조 및 바닥 마감재 시공 조건은 이론식 대비 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 저감량은 2dB 편차 수준으로 유사한 것으로 분석되어 이론적 접근이 가능한 것으로 판단됨
- 천정 구조의 경우 이론식에서는 전주파수 대역에서 약 6dB 바닥충격음 저감 효과를 예상할 수 있으나, 실제 바닥충격음 저감량은 약 2dB 존재하는 것으로 분석됨

## ■ 측정, 가진 지점 수 변화에 따른 바닥충격음 영향

- 가진 및 측정 지점 수의 변화에 따라 바닥충격음은 증가하는 경향이 존재하였으나, 약 3dB 편차 이내 수준으로 분석이 가능하였음
- 단, 본 연구에서는 중앙 지점을 가진하는 조건을 포함하여 가진 및 측정 지점 수를 변경

하였기 때문에 공동주택 구조 평면 등에 따라 편차 수준은 상이할 수 있음

- 측정 지점 수 변경은 바닥충격음 결과의 영향이 상대적으로 작게 존재하였으나, 공간 구성(거실과 주방의 배치 등)에 따른 영향은 추가적으로 분석할 필요가 있음
- 중량충격음 대비 경량충격음이 가진 및 측정 지점 수 변경에 따른 영향이 적은 것으로 분석됨

#### ■ 보수 보강 방안

- 바닥 슬래브의 시공 상태에 따른 바닥충격음 편차 요인이 가장 큰 것으로 판단되며, 바닥 슬래브 성능 편차가 존재하는 경우에는 모르타르로 표면 마감을 하는 것을 제안함
- 바닥구조 시공 편차는 재시공이 이상적이나, 현실적으로 많은 어려움이 존재하기 때문에 바닥 마감재 변경 등을 통해 성능 편차를 저감할 수 있을 것으로 판단됨
- 최종 마감 상태에서 발생한 편차는 천정 구조의 차음성능 개선을 통해 저감 가능할 것으로 판단됨(석고보드의 면밀도 증가)

#### ■ 향후 계획

- 본 연구는 시공 단계에서 바닥 슬래브의 진동을 측정하여 바닥충격음을 예측할 수 있는 방법론을 제안하였으며, 약 2dB 편차 수준으로 분석이 가능한 것으로 분석됨
- 바닥구조 및 바닥 마감재 시공 조건의 바닥충격음 저감식 예측 결과는 측정 결과 대비 약 3dB 편차가 존재하였으며, 천정 구조는 저감식을 이용한 예측에서 상대적으로 큰 편차가 존재함.
- 후속 연구에서는 실제 공동주택 시공 현장을 대상으로 본 연구에서 제안한 바닥충격음 예측 방법론을 이용하여 바닥구조의 성능 관리 방안을 시범적으로 적용할 예정임

#### 주제어

공동주택, 바닥충격음, 바닥 슬래브 진동, 시공품질

---

# 차 례 Contents

<b>제1장 연구 개요</b>	<b>1</b>
1. 연구 개요	1
1. 1. 연구 배경	1
1. 2. 연구 목적과 차별성	5
1. 3. 주요 연구 내용	7
2. 선행 연구 분석	8
2. 1. 바닥충격음 발생 메커니즘	8
2. 2. 충격원	9
2. 3. 바닥 마감재와 매트	13
2. 4. 바닥구조(완충재)	17
2. 5. 바닥 슬래브 진동과 소음 방사	21
2. 6. 천정구조	26
2. 7. 종 합	30
3. 바닥충격음 관련 국내 제도 현황	33
3. 1. 바닥충격음 관련 국내 제도 변화	33
3. 2. 바닥충격음 현황	35
3. 3. 공동주택 바닥충격음 현황(LH 자료)	36
 <b>제2장 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측</b>	 <b>41</b>
1. 바닥구조 시공품질 관리 방안 개요	41
1. 1. 바닥구조의 성능 관리 필요성	41
1. 2. 바닥구조의 성능 관리 방안	44
2. 바닥 슬래브의 진동을 이용한 바닥충격음 예측	47
2. 1. 배경 이론	47

2. 2. 바닥 슬래브의 진동 측정	64
2. 3. 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 계산	76
<b>제3장 목업 실험동을 이용한 예측식 검증</b>	<b>79</b>
1. 바닥구조 시공 단계별 바닥충격음 측정	79
1. 1. 실험 개요	79
1. 2. 실험 방법	80
1. 3. 바닥 슬래브 진동 측정 결과	87
1. 4. 바닥충격음 측정 결과	99
2. 바닥충격음 측정 결과 분석	112
2. 1. 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음 상관성 분석	112
2. 2. 시공 단계별 바닥충격음 영향 분석	116
3. 측정 결과 종합 분석	122
3. 1. 시공단계별 바닥충격음 저감량 분석	122
3. 2. 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 상관 계수	126
3. 3. 측정/가진 지점별 바닥충격음 결과 분석	128
4. 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측식 검증	132
4. 1. 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 및 검증	132
4. 2. 시공 단계별 바닥충격음 저감식 적용 및 검증	142
<b>제4장 소음 보강 방안</b>	<b>147</b>
1. 바닥충격음 편차 저감 방안	147
2. 바닥 슬래브 보완 시공(맨슬래브 조건)	149
3. 바닥 슬래브 강성 보강	151
4. 천정 마감재 변경	153
<b>제5장 결 론</b>	<b>155</b>

---

## 표 차례 List of Tables

[표 1-1] 바닥충격음 측정 결과(감사원 보고서) —————	1
[표 1-2] 바닥충격음 사후확인제도 도입에 따른 제도 변화 —————	2
[표 1-3] 공동주택 공급자와 사용자에 대한 바닥충격음 관련 기준 —————	3
[표 1-4] 중량충격음과 경량충격음 모두 성능미달시 손해배상 비용(안) —————	4
[표 1-5] 단계별 연구 목표 및 주요 내용 —————	5
[표 1-6] 바닥충격음 발생 메커니즘 —————	8
[표 1-7] 바닥충격음 종류와 원인 —————	9
[표 1-8] 바닥마감재 종류에 따른 중량충격음 영향(문대호, 2018) —————	13
[표 1-9] 바닥 마감재 종류 및 특징16) —————	14
[표 1-10] 충격저감 매트 소재별 장단점(이수규 외 2018) —————	16
[표 1-11] 천정 구성에 따른 바닥충격음 영향(김 경우 외, 2004) —————	26
[표 1-12] 천정 구성에 따른 바닥충격음 영향(정환욱 외, 2001) —————	27
[표 1-13] 천정 구성에 따른 바닥충격음 저감 측정 결과(정환욱 외, 2002) —————	29
[표 1-14] 바닥충격음 사후확인제도 도입에 따른 제도 변화 —————	34
[표 1-15] 중량충격음 조사 결과(이재원, 2013) —————	35
[표 1-16] 경량충격음 조사 결과(이재원, 2013) —————	35
[표 2-1] 중량충격음과 경량충격음 모두 성능미달시 배상액 가이드 —————	41
[표 2-2] 바닥충격음 발생 메커니즘과 이론식 요약 —————	47
[표 2-3] 입사각에 따른 차음성능 이론식 —————	61
[표 2-4] 가속도계의 선정 —————	66
[표 2-5] 마감공사 공종별 공사기간 —————	72
[표 2-6] 마감공사 공종별 공사기간 —————	73
[표 3-1] 목업실험동의 거실 크기 비교 —————	80
[표 3-2] 바닥구조 시공 단계별 실험 계획 —————	81
[표 3-3] 인정구조의 구성재료 재질 및 규격 —————	83



[표 3-4] 바닥충격음 측정 장비의 제원	86
[표 3-5] 바닥충격음 측정 결과(단일수치량)	111
[표 3-6] 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 결과 비교	132
[표 3-7] 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 결과 비교	142
[표 5-1] 바닥충격음 측정 결과(감사원 보고서)	155
[표 5-2] 바닥충격음 사후확인제도 도입에 따른 제도 변화	156
[표 5-3] 바닥충격음 측정 방법과 성능 기준	156
[표 5-4] 바닥충격음 발생 메커니즘	159
[표 5-5] 바닥구조 시공 단계별 실험 계획	160
[표 5-6] 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 결과 비교	164
[표 5-7] 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 결과 비교	165

---

## 그림 차례 List of Figures

[그림 1-1] 기존 바닥충격을 저감 연구와 본 과제의 차별성	6
[그림 1-1] 층간소음 원인(2012~2017)(이웃사이센터)	9
[그림 1-2] 표준충격원과 어린이 행동별 충격력 비교(김경우 외, 2005)	10
[그림 1-3] 다양한 생활충격원과 표준충격원 현장 측정 결과 비교	11
[그림 1-4] 공동주택 청감실험 결과(정정호, 2008)	11
[그림 1-5] 성인 남성 보행에 따른 충격력 측정 결과(문대호, 2018)	12
[그림 1-6] 바닥 마감재 종류에 따른 충격력 영향(문대호(2018))	13
[그림 1-7] 바닥마감재 두께 변화에 따른 바닥충격을 저감 실험 결과	15
[그림 1-8] 뜬바닥구조의 진동 거동(황재승 외, 2010)	17
[그림 1-9] 동탄성계수 변화에 따른 바닥충격을 저감(송국곤 외, 2018)	18
[그림 1-10] 공동주택 전용면적에 따른 바닥충격음 측정 결과(이원학, 2020)	21
[그림 1-11] 공동주택 층별 바닥충격음 측정 결과(이원학, 2020)	21
[그림 1-12] 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음 측정결과(정진연 외, 2008)	22
[그림 1-13] 바닥충격음 예측 결과와 중량충격음 측정 결과 비교	24
[그림 1-14] 바닥충격음 예측 결과와 경량충격음 측정 결과 비교	24
[그림 1-15] 구조 진동과 소음 방사 해석을 이용한 바닥충격음 분석 방법	25
[그림 1-16] 시공 단계별 바닥충격음 저감 효과(백영수, 2015)	30
[그림 1-17] 바닥구조 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(이원학, 2020)	31
[그림 1-18] 바닥구조 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(1/1옥타브 밴드)	31
[그림 1-19] 바닥구조 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(문대호, 2014)	32
[그림 1-20] 공동주택 바닥충격음 관련 주요 제도 변화	33
[그림 1-21] 맨슬래브 조건에서의 구조 형식별 바닥충격음 측정 결과	36
[그림 1-22] 바닥구조 설치에 따른 바닥충격음 측정 결과 비교(벽식 구조)	38
[그림 1-23] 공동주택 전용 면적에 따른 바닥충격음 측정 결과: 맨슬래브	39
[그림 1-24] 완충재 동탄성계수에 따른 바닥충격음 저감 효과	39

[그림 2-1] 공동주택 시공 공정표 예시	43
[그림 2-2] 공동주택 바닥구조 시공 품질 관리 방안	44
[그림 2-3] 바닥구조 차단성능 관리 방안 비교	46
[그림 2-4] 고무공에 의한 충격 발생	48
[그림 2-5] 표준중량충격원의 시간	48
[그림 2-6] 표준중량충격원의 충격력 스펙트럼	49
[그림 2-7] 표준경량충격원: 태핑머신	49
[그림 2-8] 표준경량충격원의 충격력	50
[그림 2-9] 바닥 마감재 설치에 따른 충격력 변화	51
[그림 2-10] 바닥 마감재의 이론적인 소음 감쇠 (Jens Holger Rindel, 2017)	52
[그림 2-11] 일반적인 바닥구조의 구성	53
[그림 2-12] 1 자유도(1-DOF) 진동 시스템	53
[그림 2-13] 뜬바닥구조의 에너지 전달율 그래프	54
[그림 2-14] 완충재 동탄성계수 변화에 따른 공진 주파수 변화	55
[그림 2-15] 상부층 평균 밀도 변화에 따른 공진 주파수 변화	55
[그림 2-16] 뜬바닥구조의 바닥충격을 저감 이론식	57
[그림 2-17] 단일 재료로 구성된 무한평판에서의 음의 입사, 반사 및 투과	60
[그림 2-18] 이론적인 차음성능 그래프	61
[그림 2-19] 압전형 가속도계의 압전 소자 (자료: B&K)	64
[그림 2-20] 질량이 피에조 일렉트로닉스 소자에 압축력을 가하는 압축형	65
[그림 2-21] 가속도계의 감도 선형성과 측정 주파수 대역 (자료: B&K)	65
[그림 2-22] 가속도계의 사양 예시(P사)	66
[그림 2-23] 가속도계 설치 방법에 따른 최대 측정 가능 주파수(96)	67
[그림 2-24] 가속도계 설치 방법에 따른 주파수 응답 특성 (자료: B&K)	68
[그림 2-25] 바닥 슬래브 진동 측정을 위한 가속도계 설치	69
[그림 2-26] 바닥 슬래브 진동 측정을 위한 가속도계 설치	70
[그림 2-27] 마감공사 표준 공정흐름	71
[그림 2-28] 마감공사 표준 공정 (22층 기준)	72
[그림 2-29] 마감공사 네트워크 공정표	74
[그림 3-1] 목업실험실을 이용한 바닥충격음 계산식 검증	79
[그림 3-2] 실험 대상 목업주택의 평면도	80

[그림 3-3] 목업 실험동 천정 석고보드 철거	81
[그림 3-4] 목업실험동 바닥구조 시공	83
[그림 3-5] 바닥충격음 측정을 위한 표준충격원	84
[그림 3-6] 바닥충격음 측정을 위한 센서 설치	85
[그림 3-7] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(중량충격원)(29타입)	88
[그림 3-8] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 영향(중량충격원)(29타입)	88
[그림 3-9] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(경량충격원)(29타입)	90
[그림 3-10] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 영향(경량충격원)(29타입)	90
[그림 3-11] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(중량충격원)(36타입)	92
[그림 3-12] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 영향(중량충격원)(36타입)	92
[그림 3-13] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(경량충격원)(36타입)	94
[그림 3-14] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 영향(경량충격원)(36타입)	94
[그림 3-15] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(중량충격원)(46타입)	96
[그림 3-16] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 영향(중량충격원)(46타입)	96
[그림 3-17] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(경량충격원)(46타입)	98
[그림 3-18] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 영향(경량충격원)(46타입)	98
[그림 3-19] 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(중량충격원)(29타입)	100
[그림 3-20] 시공 단계별 바닥충격음 영향(중량충격원)(29타입)	100
[그림 3-21] 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(경량충격원)(29타입)	102
[그림 3-22] 시공 단계별 바닥충격음 영향(경량충격원)(29타입)	102
[그림 3-23] 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(중량충격원)(36타입)	104
[그림 3-24] 시공 단계별 바닥충격음 영향(중량충격원)(36타입)	104
[그림 3-25] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(경량충격원)(36타입)	106
[그림 3-26] 시공 단계별 바닥충격음 영향(경량충격원)(36타입)	106
[그림 3-27] 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(중량충격원)(46타입)	108
[그림 3-28] 시공 단계별 바닥충격음 영향(중량충격원)(46타입)	108
[그림 3-29] 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(경량충격원)(46타입)	110
[그림 3-30] 시공 단계별 바닥충격음 영향(경량충격원)(46타입)	110
[그림 3-31] 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 상관 계수(중량충격원)	113
[그림 3-32] 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 상관 계수(경량충격원)	115
[그림 3-33] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 저감량 비교(중량충격원)	116

[그림 3-34] 시공 단계별 중량충격음 저감량 비교(중량충격원)	117
[그림 3-35] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 저감량 비교(경량충격원)	119
[그림 3-36] 시공 단계별 경량충격음 저감량 비교(경량충격원)	120
[그림 3-37] 목업실험동의 맨슬래브 표면 상태	121
[그림 3-40] 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 상관 계수(종합)	127
[그림 3-41] 타격 지점 변경에 따른 바닥충격음 편차(29타입)	128
[그림 3-42] 타격 지점 변경에 따른 바닥충격음 편차(36타입)	128
[그림 3-43] 타격 지점 변경에 따른 바닥충격음 편차(46타입)	129
[그림 3-44] 측정 지점 변경에 따른 바닥충격음 편차(29타입)	130
[그림 3-45] 측정 지점 변경에 따른 바닥충격음 편차(36타입)	130
[그림 3-46] 측정 지점 변경에 따른 바닥충격음 편차(46타입)	131
[그림 3-47] 바닥 슬래브 진동을 이용한 중량충격음 계산(29타입)	133
[그림 3-48] 바닥 슬래브 진동을 이용한 경량충격음 계산(29타입)	135
[그림 3-49] 바닥 슬래브 진동을 이용한 중량충격음 계산(36타입)	137
[그림 3-50] 바닥 슬래브 진동을 이용한 경량충격음 계산(36타입)	138
[그림 3-51] 바닥 슬래브 진동을 이용한 중량충격음 계산(46타입)	139
[그림 3-52] 바닥 슬래브 진동을 이용한 경량충격음 계산(46타입)	140
[그림 3-53] 시공 단계별 바닥충격음 예측 결과(중량충격원)	143
[그림 3-54] 바닥충격음 저감식 검증(경량충격음)	145
[그림 4-1] 주파수 대역별 소음 보강 방안의 주파수 대역별 저감 효과	147
[그림 4-2] 바닥충격음 보강 방안	148
[그림 4-3] 바닥 슬래브 시공 불량 및 보완 시공 예시	149
[그림 4-4] 보완 시공에 따른 바닥 슬래브 진동 해석 결과	150
[그림 4-5] FRP 보강에 따른 바닥 슬래브의 강성 영향	151
[그림 4-6] 바닥 슬래브 하부 보강에 따른 바닥 슬래브 진동 저감	151
[그림 4-7] 바닥 슬래브 하부 보강에 따른 바닥충격음 저감 효과 분석	152
[그림 4-8] 일반석고보드의 이론적 차음성능	153
[그림 4-9] 천정 보강에 따른 바닥충격음 저감 효과(LH 주택품질처)	154
[그림 5-1] 기존 바닥충격음 저감 연구와 본 과제와의 차별성	158
[그림 5-2] 실험 대상 목업주택의 평면도	160
[그림 5-3] 바닥 슬래브 진동 측정 결과(중량충격원)	161

[그림 5-4] 바닥충격음 측정 결과(중량충격원)	161
[그림 5-5] 바닥 슬래브 진동 측정 결과(경량충격원)	162
[그림 5-6] 바닥충격음 측정 결과(경량충격원)	162
[그림 5-7] 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 비율(종합)	163
[그림 5-8] 시공 단계별 바닥충격음 저감량	166

# 제1장 연구 개요

## 1. 연구 개요

### 1. 1. 연구 배경

#### 1) 인정 바닥구조의 현장 성능 편차

이웃사이센터에 접수된 공동주택 층간소음 관련 민원은 지속적으로 증가하여 2023년 기준 약 4만건이 접수되었으며, 접수된 층간소음 민원 중 상부층 생활충격(보행, 뒹 등)이 70% 이상으로 가장 많은 비중을 차지하는 층간소음 원인으로 분석되고 있다<sup>1)</sup>.

이에 따라 2003년 정부는 바닥충격음 피해를 저감하기 위해 최소 바닥충격음 차단 성능 기준을 마련하고, 성능을 인정받은 바닥구조를 적용하도록 성능 기준을 도입하였다. 하지만 2019년 실시된 감사원의 ‘아파트 층간소음 저감제도 운영실태’ 보고서에 따르면<sup>2)</sup>, [표 1-1]과 같이 현장 바닥충격음을 측정한 세대 중 약 96%가 인정구조 대비 현장 성능이 저하되는 것으로 분석되어 인정구조에 대한 제도개선이 요구되었다.

[표 1-1] 바닥충격음 측정 결과(감사원 보고서)

구분		등급 상향	등급 유지	등급 하락		
				등급 만족	등급 외	합계
공공아파트 (126)	세대수	2	5	52	67	119
	비율	2	4	41	53	94
민간아파트 (65)	세대수	0	0	18	47	65
	비율	0	0	28	72	100
합 계 (191)	세대수	2	5	70	114	184
	비율	1	3	36	60	96

1) 이웃사이센터 홈페이지(<https://floor.noiseinfo.or.kr/floornoise/home/statistics/all.do>)

2) 감사원(2019), 아파트 층간소음 저감제도 운영실태

## 2) 정부의 공동주택 층간소음 저감 대책 : 사후확인제도

정부는 국민이 체감할 수 있는 바닥충격음 저감 정책으로 준공 단계에서 현장의 바닥충격음 차단성능을 측정·평가하는 ‘사후확인제도’를 도입하였으며(‘22.08), 최소 성능 기준 미달시에는 사업주체가 보상·보강을 권고할 수 있도록 제도를 개선하였다. 이와 함께 바닥충격음 표준충격원, 평가 방법, 최소 성능 기준 등을 [표 1-2]와 같이 강화하였다.

[표 1-2] 바닥충격음 사후확인제도 도입에 따른 제도 변화

	2022년 8월 이전	2022년 8월 이후
제 도 명	사전인정제도	사후확인제도*
대 상	튼바닥구조에 대한 성능 기준(인정구조)	현장 성능 기준
주 체	제조사	시공사
시험 장소	표준시험동/현장	준공 예정 현장
소음 기준	중량충격음 50dB, 경량충격음 58dB 이하	중량/경량충격음 49dB 이하
표준충격원	(중량)뱅머신, (경량)태핑머신	(중량)고무공, (경량)태핑머신
성능 편차	(성능기준 만족) 인정구조 획득 (성능기준 불만족) 사용 불가	(성능기준 만족) 사용검사 승인 (성능기준 불만족) 보상/보완 시공

\*바닥구조 사전인정제도 병행 유지(2024년 10월 기준)

최근 정부는 측정 세대 확대(세대수 무작위 2% →5%), 성능 기준 미달시에는 보완 시공을 권고에서 의무로 변경(준공승인 불허), 손해배상시 정보 공개 등 현행 사후 확인제도 대비 강화된 법률 개정을 예고하고 있다.

또한, 공동주택 공급자<sup>3)</sup> 뿐만 아니라 공동주택 사용자<sup>4)</sup>에 대한 소음 기준도 [표 1-3]과 같이 강화되었다.

3) 국토교통부, 주택건설기준 등에 관한 규정(시행 2024. 7. 17.)

4) 국토교통부, 공동주택 층간소음의 범위와 기준에 관한 규칙(시행 2023. 1. 2.)



[표 1-3] 공동주택 공급자와 사용자에게 대한 바닥충격을 관련 기준

	공동주택 공급자	공동주택 사용자
적용 근거	주택건설기준 등에 관한 규정	공동주택 층간소음의 범위와 기준에 관한 규칙
측정 방법	KS F ISO 16283-2	소음·진동 공정시험 기준(ES 03305.1)
측정 시기	사용검사 전	층간소음 민원 발생시
충격원	표준충격원(고무공, 태핑머신)	생활충격원
소음 기준	경량/중량충격음 49dB 이하	[주간] (최고소음도)57dBA, (1분 등가소음도)39dBA [야간] (최고소음도)52dBA, (1분 등가소음도)34dBA
기준 초과	보완 시공/보상 (권고)	소음 발생세대 과태료

공동주택 사용자에게 대한 소음 기준(직접충격 소음)은 최고소음도는 주간 기준 57dBA로 유지되었으나, 1분 등가 소음도의 기준의 경우 주간 기준 4dB 강화하여 보다 정숙한 주거 공간을 유지할 수 있도록 기준을 강화하였다.

또한, 기존에는 인정을 받은 바닥구조를 적용하면 현장 성능에 대한 점검은 이루어지지 않았으나, 현재 제도에서는 현장에서 성능을 점검하고 성능 기준을 만족하지 못하는 경우에는 이에 대한 대안을 제시하여야 한다.

따라서 공동주택 바닥충격음 관련 제도 및 기준은 공동주택 거주자가 직접적으로 체감할 수 있도록 강화되었다고 판단된다.

### 3) 바닥충격음 성능 기준 미달시 보수·보강 방안

최근 국토안전관리원에서는 손해배상 가이드라인 마련 연구를 진행하여, 중량, 경량충격음 미달시 바닥 슬래브 두께 상향 비용을 기준으로 손해배상액을 산정하였으며, LH에서는 사후보강 가이드라인 마련 연구를 진행 중에 있다.

국토안전관리원의 연구 결과에서는 손해배상액 산정액을 입주지체보상금과 보완 시공 비용을 합산하여 산출하였으며, 중량충격음 미달시, 경량충격음 미달시 및 중량/경량충격음 미달 상황에 따른 지역별 손해배상 비용을 산출하였다<sup>5)</sup>. [표 1-4]는 중량충격음과 경량충격음 모두 성능이 미달되는 경우의 손해배상 비용(안)을 나타낸다.

[표 1-4] 중량충격음과 경량충격음 모두 성능미달시 손해배상 비용(안) (단위:원/m<sup>2</sup>)

중량충격음	전국	서울	5대 광역시 및 세종시	기타 지방
49dB 초과 - 51dB 이하	251,934	313,184	253,404	239,014
51dB 초과 - 53dB 이하	256,704	317,954	258,174	243,784
53dB 초과 - 55dB 이하	261,474	322,724	262,944	248,554
55dB 초과 - 57dB 이하	266,244	327,494	267,714	253,324
57dB 초과 - 59dB 이하	271,014	332,264	272,484	258,094
59dB 초과	275,784	337,034	277,254	262,864

\*국토안전관리원 자료 재구성

또한 LH에서는 바닥충격음 미달시 적용 가능한 사후보강 방안으로 천정 구조 또는 마감재 변경 등을 이용한 보강 가이드라인 마련 연구를 수행 중에 있으나, 바닥충격음 평가 시기와 관련하여 보강 가능한 기간이 충족되지 않아 입주 지연 등에 따른 소모적 비용이 수반될 가능성이 존재한다.

이와 관련하여 건설사에서는 안정적으로 현장의 바닥충격음 성능을 만족할 수 있는 기술개발이 진행 중에 있으나, 고성능 바닥구조가 적용된 세대에서도 시공품질 등에 따라 인정구조 대비 현장 성능 편차 및 세대별 성능 편차가 발생할 수 있다.

사후확인제도 평가시 성능 편차가 크게 존재하는 세대가 다수 포함되는 경우, 성능 기준을 초과하는 상황이 발생할 수 있기 때문에 고성능 기술 개발 뿐만 아니라 일정한 바닥구조의 성능을 유지할 수 있는 시공품질 방안이 필수적으로 요구된다.

5) 국토안전원(2024), 공동주택 바닥충격음 손해배상 가이드라인 마련 연구

## 1. 2. 연구 목적과 차별성

### 1) 연구 목적

바닥충격음의 현장 성능 관리를 위해서는 시공 단계별 바닥충격음을 측정하여 시공 단계별 성능 편차를 저감시키는 것이 이상적인 방안이다.

바닥충격음 측정을 위해서는 하부층 수음실의 소음 실험 환경 조건(출입문, 창호 설치 등)이 충족되어야 하지만, 일반적인 공동주택 공정 조건에서는 창호 및 출입문 설치 등이 공정 후반에 존재하기 때문에 시공 단계별 바닥충격음 측정에 한계가 존재한다.

따라서 안정적인 사후확인제도 대응을 위해 수음실의 소음 실험 환경이 조성되지 않은 상황에서도 바닥구조의 바닥충격음 차단성능을 예측하고, 성능 편차 및 성능 미달 상황이 예상되는 경우 대응할 수 있는 시공품질 관리 방안이 시급히 요구된다.

본 연구에서는 바닥충격음을 결정하는 바닥 슬래브 진동을 이용하여 바닥충격음 예측 방안 및 시공 단계별 저감 효과 분석 방안을 제시하고, 목업실험동을 이용하여 본 연구에서 제안한 관리 방법에 대한 신뢰성을 분석하였다.

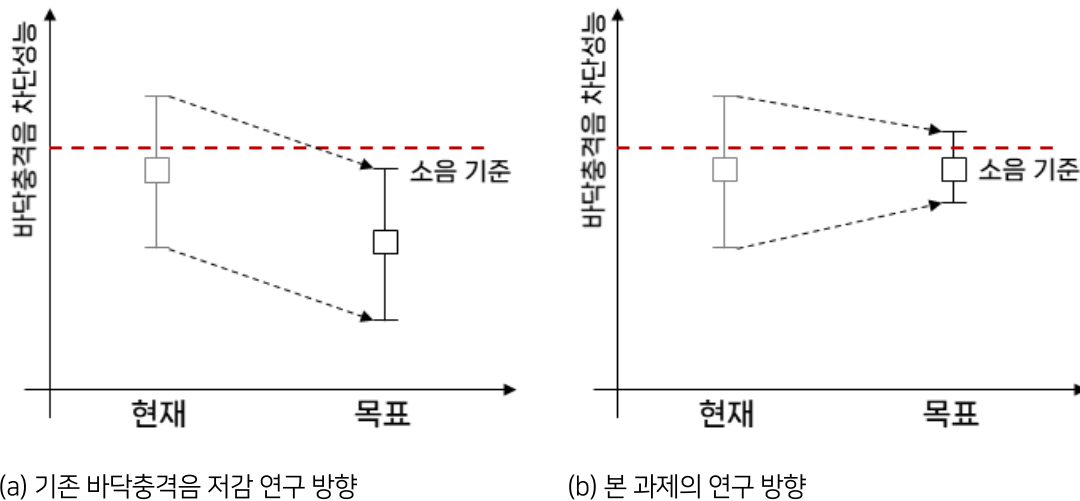
[표 1-5]는 단계별 연구 목표 및 주요 내용을 나타내며, 해당 연구는 1단계 연구로 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 방법론 개발을 목적으로 한다.

[표 1-5] 단계별 연구 목표 및 주요 내용

단 계	연구 목표 및 주요 내용
1단계	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시공 단계별 바닥구조의 성능 점검 방안 연구</li> <li>• 바닥구조 시공 단계별 성능 분석 방법 연구</li> </ul>
2단계	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 빅데이터 기반의 시공 단계별 바닥충격음 성능 DB 구축</li> <li>• 공동주택 구조형식, 타입별 시공 단계별 성능 측정</li> <li>• 바닥구조 시공 단계별 바닥충격음 성능 DB 구축</li> </ul>
3단계	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 바닥구조 성능 관리 플랫폼 구축</li> <li>• 시공 단계별 바닥구조 성능 분석이 가능한 플랫폼 구축</li> <li>• 현장 관리 매뉴얼 제작 등</li> </ul>

## 2) 선행 연구 차별성

[그림 1-1]과 같이 기존 바닥충격음 저감 연구의 방향은 고성능 완충재, 흡/차음 천정 구조 등의 설계 개선 등의 연구로, 평균적인 바닥충격음 저감 효과를 기대할 수 있다. 단, 시공품질에 따른 현장 성능 편차가 발생할 수 있으며, 성능 편차가 크게 존재하는 경우에는 최소 성능 기준을 초과하는 세대가 다수 발생할 수 있는 상황이다.



[그림 1-1] 기존 바닥충격음 저감 연구와 본 과제의 차별성

본 연구의 목적은 구조별, 세대간 성능 편차를 저감시켜 안정적으로 일정한 현장 성능을 구현하고자 하며, 1단계에서는 실험 환경이 충족되지 않은 조건에서 시공 단계별 바닥충격음을 분석할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

즉, 기존 연구는 바닥충격음 차단성능의 목표 성능을 향상시키는 것이 목적이라면, 본 연구는 현장의 성능 편차를 예측·대응하여 목표 성능이 현장에서 안정적으로 구현될 수 있도록 바닥구조의 시공품질 관리 방안 개발을 목적으로 한다.

### 1. 3. 주요 연구 내용

#### 1) 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음 측정 및 소음-진동 상관성 분석

##### ■ 바닥구조 시공 단계별 바닥충격음 및 바닥 슬래브 진동 측정

- 시공 단계(4단계) : 맨슬래브, 바닥구조 시공 후, 마감재 시공 후, 천정 설치 후
- 바닥구조 구성 : 완충재(30mm), 경량기포(40mm), 모르타르(40mm), 마감재(튕카펫)
- 표준충격원을 이용한 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음 측정(KS F ISO 16283-2)

##### ■ 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음 상관성 분석

- 시공 단계별 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음 측정 결과의 상관성 분석
- 시공 단계별 진동-소음 상관성 분석 및 상관계수 도출(중량/경량 구분)

##### ■ 측정/가진 위치, 지점수 등에 따른 바닥충격음 단일수치량 상관성 분석

- 바닥 슬래브 가진/측정 위치, 지점수 별 바닥충격음 단일수치량 상관성 분석
- 바닥충격음 및 바닥 슬래브 진동 주요 측정 위치 도출(유효평면의 중앙 등 1~2지점)

#### 2) 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 및 신뢰성 검증

##### ■ 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 알고리즘 개발

##### ■ 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 알고리즘의 신뢰성 분석

#### 3) 바닥구조 시공단계별 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음 영향 분석

##### ■ 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 측정

##### ■ 시공 단계별 바닥충격음 저감량 예측

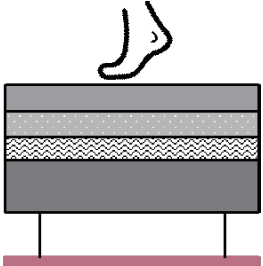
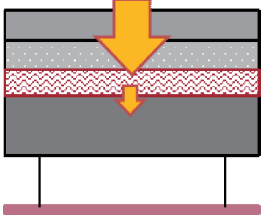
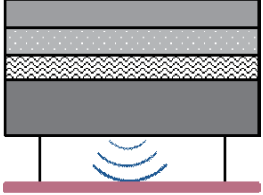
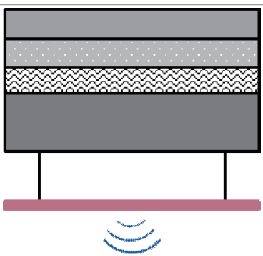
##### ■ 시공 단계별 바닥충격음 예측 결과의 신뢰성 분석

## 2. 선행 연구 분석

### 2. 1. 바닥충격음 발생 메커니즘

공동주택 바닥충격음 발생 과정은 [표 1-6]과 같이 지배적인 물리현상으로 단순화하여 설명할 수 있다. 표와 같이 생활충격원으로 발생한 충격력은 완충재가 포함된 바닥구조의 방진 작용으로 충격력이 감소되어 바닥 슬래브로 전달되게 된다. 바닥 슬래브로 전달된 충격력은 슬래브를 진동시키게 되며, 이 때 구조물과 인접한 공기를 진동시켜 소음이 발생하게 된다. 최종적으로 천정 구조에서 소음이 감소하여 하부층 공간으로 전달되게 된다.

[표 1-6] 바닥충격음 발생 메커니즘

단계	대상	기능	특징
	생활충격원	충격원	<ul style="list-style-type: none"> <li>거주자 생활 중 바닥을 가진하여 발생하는 생활충격원(아이들 뒹, 보행 등)</li> <li>충격원과 바닥면의 충격력 크기, 접촉 시간으로 충격원의 주파수 특성이 결정</li> </ul>
	튼바닥구조 (완충재 +상부구조)	방진시스템 (절연기)	<ul style="list-style-type: none"> <li>튼바닥구조가 1자유도 진동 시스템으로 운동</li> <li>충격력을 저감, 방진시스템(절연기)</li> <li>완충재의 동탄성계수가 낮을수록, 상부구조(모르타르, 경량콘크리트)의 질량이 클수록 충격력 저감에 유리</li> </ul>
	바닥 슬래브	구조 진동 + 소음 방사	<ul style="list-style-type: none"> <li>바닥 슬래브 진동에 의한 소음 방사</li> <li>바닥 슬래브의 강성이 증가할수록 소음 저감에 유리</li> <li>바닥 슬래브 진동이 바닥충격음의 크기, 특성 등을 결정함)</li> <li>하부층 거실(수음실)의 음향 모드에 따라 소음 증폭 가능</li> </ul>
	천정 구조	차음	<ul style="list-style-type: none"> <li>바닥 슬래브에서 방사된 소음을 차단</li> <li>고밀도 천정 마감재(차음석고보드 등) 적용시 소음 저감 효과 기대 가능</li> <li>천정내 공기층의 공진현상으로 증폭 발생 가능</li> <li>천정 깊이 증가 또는 흡음재 삽입시 공진현상 억제 가능</li> </ul>

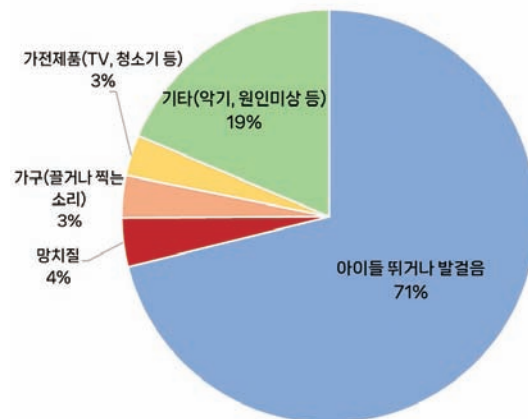
## 2. 2. 충격원

「주택법」에서는 충격원 특성에 따라 바닥충격음을 경량충격음과 중량충격음으로 구분하고 있으며, 중량충격음과 경량충격음의 특성은 [표 1-7]과 같이 정리할 수 있다. 중량충격음은 거주자 보행 등으로 발생하는 저주파 대역의 소음이며, 표준 바닥구조의 차단성능 실험에는 거주자 보행과 충격력이 유사한 고무공을 이용한다. 경량충격음은 가구 끄는 소음 등 고주파 대역의 소음에 해당되며, 표준 실험에는 태핑머신을 이용한다.

[표 1-7] 바닥충격음 종류와 원인

구분	중량충격음	경량충격음
소음 특징	무겁고, 부드러운 충격에 의한 저주파 대역의 바닥충격음	가볍고, 딱딱한 충격에 의한 고주파 대역의 바닥충격음
측정주파수	1/1 옥타브 밴드의 중심주파수 63~500Hz 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수 50~630Hz (약 40 ~ 710Hz)	1/1 옥타브 밴드의 중심주파수 125~2,000Hz 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수 100~3,150Hz (약 90 ~ 3,600Hz)
충격 원인	거주자 보행, 어린이 뒹 등	물건 낙하, 가구 끄는 소리 등
표준충격원	고무공	태핑머신
소음평가	A-가중 최대 바닥충격음레벨	가중 표준화 바닥충격음레벨

이웃사이센터에 접수된 층간소음 민원의 원인을 분석하면, [그림 1-1]와 같이 아이들 뛰거나 발걸음 등의 직접충격소음(중량충격음)이 70% 이상으로 가장 많은 비중을 차지하고 있는 것으로 분석되고 있다<sup>7)</sup>.

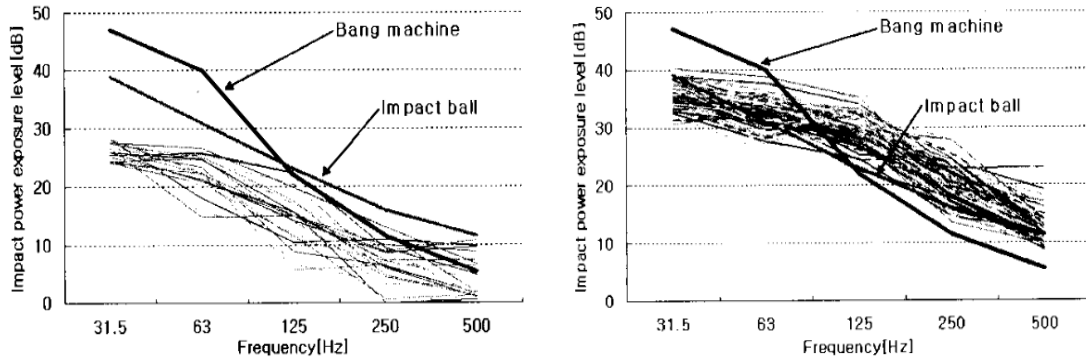


[그림 1-1] 층간소음 원인(2012~2017)(이웃사이센터)

6) 김태민, 곽병창, 박시현, 김민준, 박원환(2023), 공동주택 층간소음 저감을 위한 사후 구조 보강 방안 연구: 시공 단계 적용 방안, 토지주택연구원

7) 이웃사이센터 홈페이지(<https://floor.noiseinfo.or.kr/floornoise/home/statistics/all.do>)

김경우(2005)는 충격력 측정장치를 이용하여 어린이 행동에 따른 충격력 특성을 분석하였다. 연구 결과 [그림 1-2]과 같이 어린이 뒹 조건 보다 점핑 조건이 충격력이 상대적으로 크게 존재하였으며, 점핑하는 경우에는 표준충격원 대비 충격력이 크게 존재하였다. 충격력의 특성은 그림과 같이 뱅머신 대비 고무공이 어린이 행동 조건에서의 충격력 특성과 상대적으로 유사한 것으로 분석하였다<sup>8)</sup>.



(a) 어린이 달리기

(b) 어린이 점핑(50cm)

[그림 1-2] 표준충격원과 어린이 행동별 충격력 비교(김경우 외, 2005)

전진용(2005) 연구에서는 표준충격원(뱅머신, 고무공)과 10세 어린이 뒹과 점핑에 대한 바닥충격음을 실제 공동주택을 대상으로 실험적으로 비교하였으며, 해당 연구에서도 고무공의 충격력 특성이 어린이 달리기 충격력 특성과 유사한 것으로 분석하였다<sup>9)</sup>.

이평직(2006)은 100여명의 초등학생을 대상으로 충격 행동(점핑, 달리기)에 대한 충격력을 분석하였으며, 해당 연구에서도 어린이 뒹 또는 달리기에 대한 행동이 고무공의 충격력과 유사한 것으로 분석하였다. 단, 아이들 체중은 충격력 크기와는 상관성이 크지 않은 것으로 분석하였으며, 해당 연구에서는 어린이 뒹 또는 점핑 행동에 대한 충격력 크기는 표준충격원(뱅머신, 고무공) 보다 낮은 것으로 분석하였다<sup>10)</sup>.

앞서 설명하였듯이 충격력 측정 장치를 이용한 선행 연구 결과에서는 어린이 뒹 조

8) 김경우, 최경석, 정영선, 양관섭(2005), “실충격원(어린이)의 충격 발생행위에 따른 충격력 특성에 관한 연구”, 한국소음진동공학회 논문집, 15(5): 542~549.

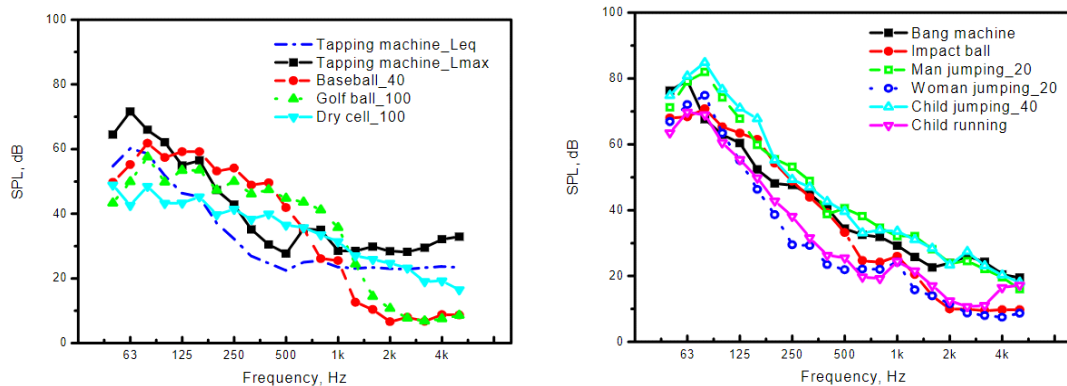
9) 전진용, 정정호(2005), “임팩트 볼을 활용한 바닥충격음 측정 및 평가”, 한국소음진동공학회 논문집, 15(10): 1160~1168.

10) 이평직, 정정호, 박준홍, 전진용(2006), “바닥충격음 측정용 표준충격원과 실충격원의 특성 비교”, 한국소음진동공학회 논문집, 16(8): 789~796.



건 대비 점핑 등이 상대적으로 큰 하중이 존재하는 것으로 분석되었으며, 뱅머신 대비 고무공이 어린이 행동 조건의 충격력 특성과 상대적으로 유사한 것을 확인할 수 있다.

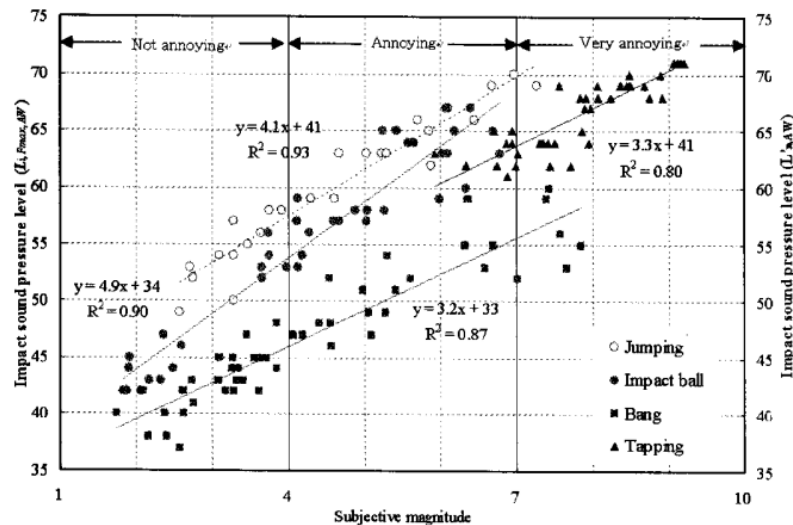
아이들 행동 조건과 관련하여 실제 바닥충격음을 분석한 박현구(2013)의 연구에서는 [그림 1-3]와 같이 아이들의 점핑 행동이 고무공과 유사한 충격력 특성을 갖는 것으로 분석하였다. 해당 연구 결과에서도 아이들 달리기 행동 보다는 점핑(0.4m 높이)가 상대적으로 큰 바닥충격음이 발생하는 것으로 분석하였다<sup>11)</sup>.



(a) 경량충격음

(b) 중량충격음

[그림 1-3] 다양한 생활충격원과 표준충격원 현장 측정 결과 비교(박현구 외, 2013)



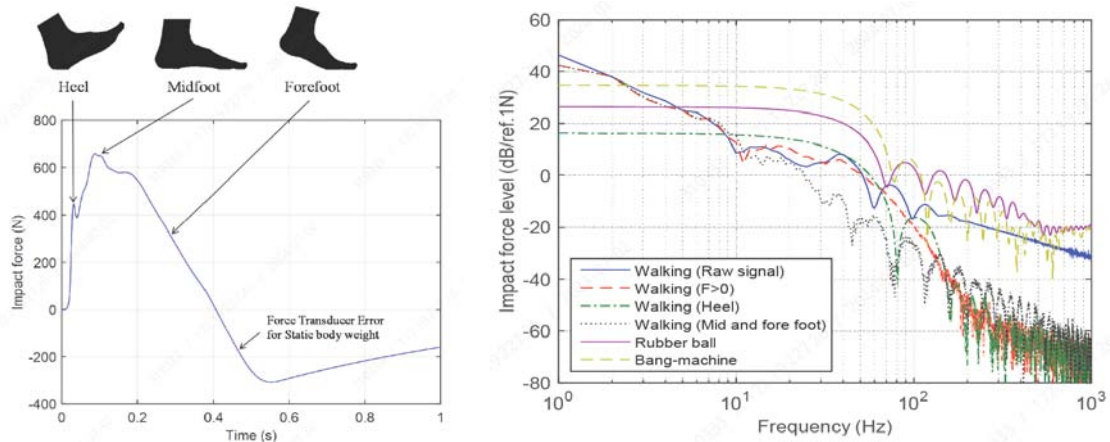
[그림 1-4] 공동주택 청감실험 결과(정정호, 2008)

11) 박현구, 김정모, 김선우(2013), “실생활 충격소음을 통한 표준 바닥충격원의 실효성 검증, 한국소음진동공학회 논문집”, 23(12): 1117~1126.

정정호(2008)는 실제 충격원과 표준충격원의 충격음 특성을 청감실험을 이용하여 [그림 1-4]와 같이 분석하였으며, 고무공이 점핑에서는 0.97, 달리기는 0.98로 상관계수가 가장 높게 분석되었다<sup>12)</sup>.

따라서 정진용(2004) 연구에서는 고무공이 층간소음 원인 중 가장 많은 비중을 차지하는 어린이의 충격력 특성과 유사하며, 재현성, 편리성, 유지보수 등의 측면에서 중량충격을 평가를 위해 뱅머신 대비 효율적인 것으로 제시하였다<sup>13)</sup>.

바닥충격음 원인 중 성인 보행에 따른 생활충격원은 어린이 점핑 대비 충격력이 작게 존재하는 것으로 분석되었으며, 문대호(2018) 연구에서는 [그림 1-5]와 같이 발뒤꿈치 조건에서 충격력의 크기 차이는 존재하나, 표준충격원과 유사한 충격력 특성이 존재하는 것으로 분석하였다<sup>14)</sup>.



(a) 충격력 시간 그래프

(b) 충격력 스펙트럼

[그림 1-5] 성인 남성 보행에 따른 충격력 측정 결과(문대호, 2018)

다양한 선행 연구 결과와 같이 어린이 행동으로 발생하는 생활충격원이 층간소음 원인 중 가장 많은 비중을 차지하고 있으며, 고무공이 어린이 행동과 상대적으로 유사한 충격력 특성이 존재하는 것을 알 수 있다. 이러한 충격력의 특성 등을 고려하여 최근 바닥충격음 차단성능 평가시 표준중량충격원을 뱅머신에서 고무공으로 변경하여 제도를 운영 중에 있다.

12) 정정호(2008). “임팩트볼(Impact Ball)을 활용한 바닥충격음 측정 및 평가”, 방재기술, 45: 28-36.

13) 전진용, 정정호(2004), “바닥충격음 평가를 위한 Impact Ball의 특성 및 주관적 반응”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집-계획계, 대한건축학회, pp.614~617.

14) 문대호, 서울대학교 박사학위 논문 2018

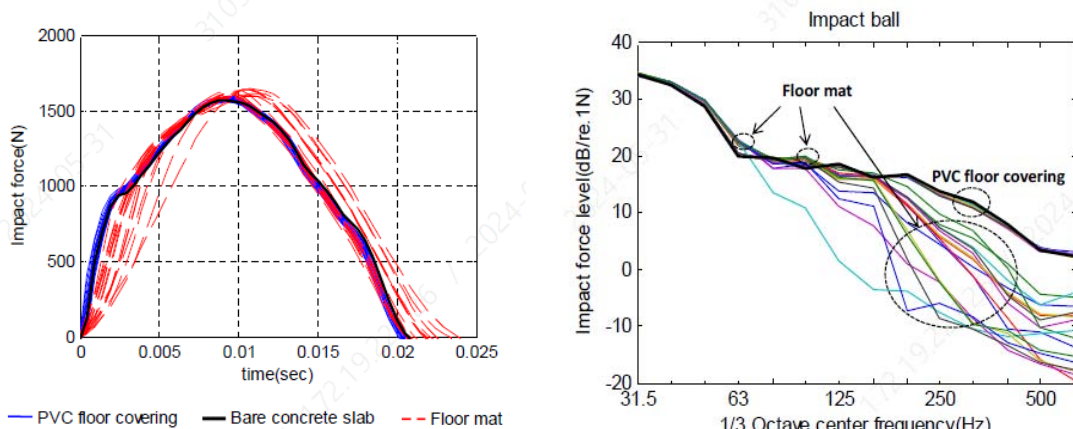
### 2. 3. 바닥 마감재와 매트

바닥충격을 저감을 위해 사용되고 있는 바닥 마감재는 충격력 자체를 저감하는 완충 작용과 함께, 지연 시간( $T_c$ ) 변경에 따른 충격력 스펙트럼 영향도 존재한다. 문대호(2018)는 바닥 마감재 종류(일반 장판(PVC), 매트)에 따른 충격력 영향을 실험적으로 분석하였으며, 바닥 마감재 설치에 따른 바닥충격음 영향을 충격원 지연 시간으로 [표 1-8]과 같이 정리하였다<sup>15)</sup>.

[표 1-8] 바닥마감재 종류에 따른 중량충격음 영향(문대호, 2018)

마감재 종류	충격원	기능
일반 장판(PVC)	중량충격원	소음 저감 효과 미비
	경량충격원	상대적으로 바닥충격음 저감 효과 존재
매트	중량충격원	소음 저감 효과 미비 63Hz 이하 다소 증가, 125Hz 이상의 소음은 저감 가능
	경량충격원	경량충격음 저감에는 효과적

[그림 1-6(a)]는 매트 설치에 따른 시간 충격력 그래프를 나타낸다. 그림과 같이 PVC 조건에서는 지연 시간 차이가 미비하였으나, 매트 설치 시에는 충격력 지연 시간이 증가되는 것으로 분석되었다. 이에 따라 [그림 1-6(b)]와 같이 충격력 특성이 저주파 대역에서는 일부 증가, 125Hz 이후에서는 충격력이 감소하여 경량충격음은 효과적으로 저감시키지만 중량충격음은 일부 증가할 수 있음을 설명하였다.



(a) 고무공에 의한 충격력 그래프(시간)

(b) 고무공에 의한 충격력 그래프(주파수)

[그림 1-6] 바닥 마감재 종류에 따른 충격력 영향(문대호(2018))

15) 문대호(2015), 공동주택의 바닥충격음 영향요인 분석, 서울대학교 박사학위 논문

## 1) 바닥 마감재

바닥 마감재는 충격원이 바닥구조에 최초로 접촉하는 구조로, 충격력 감소 또는 충격 지연 시간을 결정한다. 일반적으로 적용되고 있는 바닥 마감재는 PVC계열(장판), 목질계, 타일계로 구분할 수 있으며, 각 마감재의 특징을 정리하여 [표 1-9]에 정리하였다<sup>16)</sup>.

[표 1-9] 바닥 마감재 종류 및 특징<sup>16)</sup>

종류	PVC 시트	합판마루	강화마루	강마루	원목마루	타일
소재	PVC (폴리염화비닐)	합판, 천연무늬목	HDF, 시트지	합판, 시트지	합판, 원목	폴리싱/포세린
시공법	접착시공	접착시공	클릭시공	접착시공	접착시공	접착시공
장점	· 열전도율 우수 · 보행감 우수 · 시공성 우수 · 유지관리 우수	· 심미성 우수 · 열전도율 우수 · 열변형 적음 · 보행감 우수	· 표면강도 우수 · 시공편리성 우수 · 유지관리 우수 · 제작의 용이함	· 열전도율 우수 · 표면강도 우수 · 유지관리 우수 · 보행감 우수	· 심미성 우수 · 보수성 우수 · 난방효율 우수 · 보행감 우수	· 열전도율 우수 · 시공성 우수 · 유지관리 우수
단점	· 약한 표면층 · 낮은 심미성 · 낮은 사용연한	· 낮은 표면내구성 · 고가의 철거비	· 낮은 열전도율 · 습기에 취약 · 변형 발생 쉬움	· 강도대비고가 · 철거비용 발생	· 낮은 표면내구성 · 습도에 취약 · 수축팽창 발생 쉬움 · 표면관리 필요	· 낮은 잠열성 · 낮은 내구성 · 소음 발생 가능

송국곤(2008)은 일반적으로 적용되고 있는 바닥 마감재 종류(비닐계(장판지), 목질계(합판마루, 강화마루) 및 타일계(폴리싱타일, 접합타일))별 경량충격을 저감 효과를 실험적으로 연구하였으며, 연구 결과 바닥 마감재가 단단할수록 맨슬래브 대비 유사한 경량충격음이 측정되었으며, 경량충격을 저감을 위해서는 일정 크기 이상의 마감재의 탄성이 요구됨을 제시하였다<sup>17)</sup>.

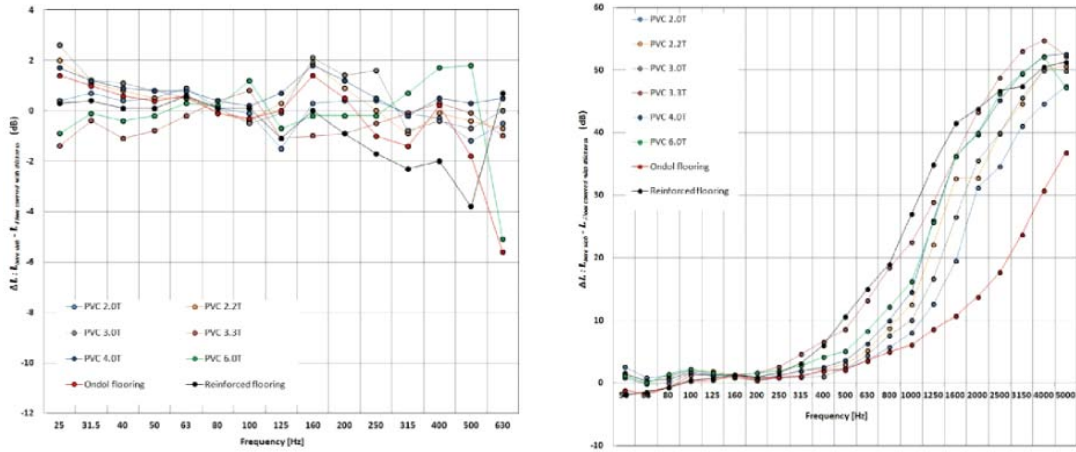
송국곤(2013)의 후속 연구에서는 탄성이 존재하는 PVC계열(장판) 바닥 마감재 3종의 바닥충격을 저감 효과를 실험적으로 분석하였으며, 실험 결과 중량충격음에서는 바닥충격을 저감 효과가 미비하였으나, 경량충격음에서는 약 10dB 저감 효과

16) 잡꾸미기(2017), “바닥재의 종류 및 특징에 대해 알아봅시다.”, 11월 03일 기사, 2022.08.01. (<https://www.ggunim.co.kr/star/view/727>).

17) 송국곤, 박현구, 이태강, 김진성, 김선우(2008), “공동주택 바닥마감재에 따른 경량충격음 저감에 관한 실험적 연구”, 2008년도 추계학술대회 논문집, 한국소음진동학회, pp.433~434

가 존재하는 것으로 분석하였다<sup>18)</sup>.

연준오(2018)는 PVC계열 마감재 두께에 따른 중량충격음(고무공(높이 40 cm)) 저감 효과를 분석한 결과, [그림 1-7]과 같이 PVC 마감재 두께가 증가할수록 저감 효과가 증가하는 것으로 분석하였다<sup>19)</sup>.



(a) 중량충격음(고무공 100mm)

(b) 경량충격음

[그림 1-7] 바닥마감재 두께 변화에 따른 바닥충격음 저감 실험 결과(연준오, 2018)

결과적으로 바닥 마감재는 중량충격음 보다는 경량충격음 저감에 효과가 존재하는 것으로 정리할 수 있으며<sup>20)</sup>, 경량충격음 저감을 위해서는 바닥 마감재의 일정 크기 이상의 탄성이 요구됨을 알 수 있다. 재료 변경 없이 바닥 마감재의 탄성을 증가시키는 방법으로 두께를 증가시키는 방안이 있으며, 동일한 탄성 마감재의 경우 두께가 두꺼울수록 경량충격음 저감 효과 개선을 기대할 수 있다<sup>21)22)</sup>.

18) 송국곤, 이철승, 최은수(2013), “바닥마감재의 바닥충격음 저감 성능 실태 연구”, 2013년도 추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.384~385

19) 연준오, 김명준, 이성찬(2018), “바닥 표면 마감재에 의한 실충격원 및 중량충격음 저감량 평가”, 한국건축친환경설비학회 논문집, 12(4): 361~372.

20) 김학천, 김용길, 김상철, 이현열, 조형호(2008), “표준시험동에서 바닥마감재에 따른 바닥충격음 특성평가”, 2008년도 추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.439~440.

21) 기노갑, 권현중, 송민정, 김선우(2002), “바닥마감재에 의한 바닥충격음 차음특성 연구”, 한국소음진동공학회 심포지엄자료집, 한국소음진동공학회, pp.682~686.

22) 김학천, 김용길, 김상철, 이현열, 조형호(2008), “표준시험동에서 바닥마감재에 따른 바닥충격음 특성평가”, 2008년도 추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.439~440.

## 2) 매트

최근에는 바닥 마감재 상부에 설치하는 추가적으로 설치하는 매트에 대한 연구도 활발히 진행 중에 있다. 일반적으로 상품화 되어 있는 매트는 10mm~50 mm 두께로, PE, PU, EVA 등 다양한 재료가 존재한다. [표 1-10]은 매트에 적용 중인 재료의 특징을 나타낸다<sup>23)</sup>.

[표 1-10] 충격저감 매트 소재별 장단점(이수규 외 2018)

종류	PVC	PE	PU	TPU	EVA
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 충격 흡수율 우수</li> <li>· 복원력 우수</li> <li>· 쿠션감 우수</li> <li>· 내구성 우수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 독성이 적음</li> <li>· 단열성 우수</li> <li>· 탄성 우수</li> <li>· 무게가 가벼움</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 충격 흡수율 우수</li> <li>· 복원성 우수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 독성이 적음</li> <li>· 내구성 우수</li> <li>· 충격 흡수율 우수</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 탄성력 우수</li> <li>· 무게가 가벼움</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 유해물질 발생 우려</li> <li>· 무게가 무거움</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 복원력 미흡</li> <li>· 쿠션감 미흡</li> <li>· 충격흡수율 미흡</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 내구성 미흡</li> <li>· 무게가 무거움</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 가격 고가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 내구성 미흡</li> </ul>

일반적으로 바닥 마감재는 경량충격을 저감 효과가 존재하며, 중량충격을 저감을 위해서는 일정 두께 이상이 요구된다. 매트도 바닥 마감재와 동일하게 중량충격을 보다는 경량충격을 저감에 효과적인 것으로 알려져 있다.

총 16종(매트류)의 매트에 대한 바닥충격을 저감 효과를 분석한 전진용(2006) 연구에서는 고무공 조건에서도 바닥충격음이 최대 23%까지 저감이 가능한 것으로 분석하였다<sup>24)</sup>.

하지만 바닥 마감재는 완충재가 설치된 구조에서는 맨슬래브 설치 조건 대비 바닥충격을 저감 효과가 감소하며, 뱅머신과 같이 저주파 대역에 충격력이 집중된 하중의 경우에는 바닥충격을 저감 효과는 미비할 수 있다<sup>25)26)</sup>.

23) 이수규(2022), 공동주택 층간소음 저감을 위한 바닥마감재 및 저감매트 성능 연구, 토지주택연구원

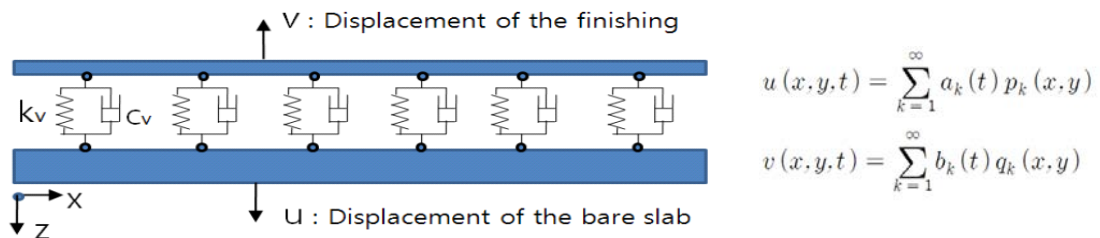
24) 전진용, 유승엽, 정영, 정정호(2006), “철근콘크리트 슬래브의 설계요소에 따른 중량 충격음의 영향”, 대한건축학회 논문집 계획계, 22(10): 329~337.

25) 박지훈, 송국곤, 이원학, 김소영(2019), “바닥 표면 마감재의 충격음 저감량 실험실 측정 방법 고찰”, 2019년도 추계학술대회 초록집, 한국소음진동공학회, pp.358~358.

26) 이원학, 김용희, 송국곤, 윤용진, 윤창연(2016), “바닥마감재의 층간소음저감 성능평가를 위한 측정방법 고찰”, 2016년도 추계학술대회 초록논문집, 한국소음진동학회, pp.75~75.

## 2. 4. 바닥구조(완충재)

일반적으로 적용되고 있는 바닥구조는 슬래브와 모르타르 사이에 완충재가 존재하는 뜬바닥구조 형태로, 바닥 슬래브로 전달되는 충격력을 저감시키는 역할을 한다. 이는 방진시스템 중 절연기(Isolator)에 해당한다<sup>27)</sup>. 완충재의 재료로 발포폴리스틸렌(Expandable Polystyrene, EPS), 에틸렌비닐아세테이트(Ethylene Vinyl Acetate, EVA), 폴리에틸렌(Polyethylene, PE), 발포폴리프로필렌(Expanded Polypropylene, EPP) 등이 사용되고 있으며, 바닥구조로 사용하기 위해 인정받은 바닥구조는 EPS가 약 44%로 가장 많은 비중을 차지한다<sup>28)</sup>. 인정받은 바닥구조의 성능을 살펴보면 표준충격원, 평가 방법 변경 전 기준으로 경량충격음은 1등급 인정구조가 65%로 가장 많았으며, 중량충격음은 4등급 인정구조가 43%로 가장 많은 것으로 분석되었다<sup>29)</sup>. 일반적으로 공동주택에 적용되는 바닥구조는 슬래브 상부에 완충재, 상부 구조(경량기포콘크리트, 모르타르)를 적층하는 구조이다. 여기서 완충재는 다른 구조 재료에 비해 강성이 상대적으로 작기 때문에 독립적으로 거동하며, 1-자유도 진동 시스템과 같은 진동 현상이 발생한다. 이러한 완충재의 진동 현상은 절연(Isolation) 작용으로 충격력 에너지가 감소하나, 완충재에 의한 공진 주파수에서는 충격력이 증폭되는 현상이 동시에 작용할 수 있다<sup>30)31)</sup>.



[그림 1-8] 뜬바닥구조의 진동 거동(황재승 외, 2010)

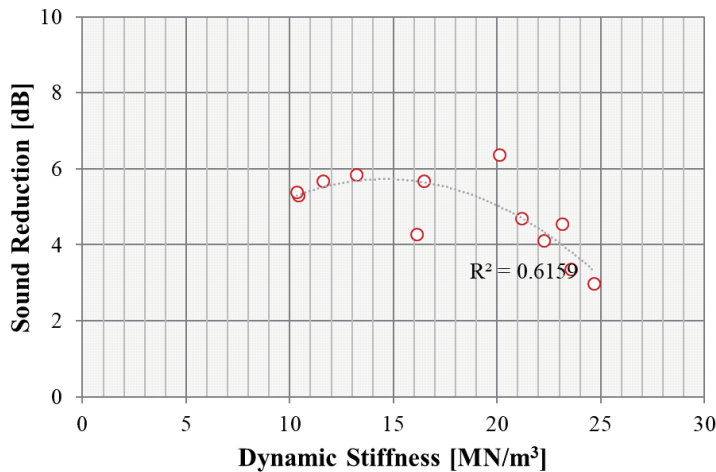
- 27) 방중대, 이범식, 김상연, 천영수, 김홍재, 조완제, 유송이, 김외학(2013), 공동주택 중량바닥충격음 저감을 위한 기술개발 방향설정 연구, 토지주택연구원
- 28) 이원학, 송국근, 한찬훈(2020), “현장시험을 통한 공동주택 바닥충격음 차단성능 분석”, 한국건축친환경설비학회 논문집, 14(1): 19~31.
- 29) 정진연, 임정빈, 이성찬(2012), “바닥충격음 인정구조 성능 현황”, 2012년도 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.805~806.
- 30) 정진연, 이상우, 임정빈, 정갑철(2008), “슬래브의 동특성과 중량충격음의 상관관계에 관한 연구”, 2008년도 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.829~833.
- 31) 문대호, 박홍근, 황재승, 홍건호(2014), “시스템 해석을 이용한 뜬바닥구조에서의 바닥구조 동특성과 뱀머신의 충격력 특성 분석”, 한국소음진동공학회 논문집, 24(5): 390~398.



황재승(2010)은 이러한 완충재의 증폭 현상을 [그림 1-8]과 같이 단순화하여 수치 해석을 이용하여 설명하였으며, 중량충격을 측정 대역에 완충재 진동 모드가 존재하지 않도록 완충재 동탄성계수 설계의 필요성을 제시하였다<sup>32)</sup>.

김홍식(2006)은 완충재의 바닥충격음 저감 성능을 분석하기 위해 모의 실험체를 제작하여 표준충격원에 대한 바닥 슬래브 진동 저감 성능을 실험적으로 분석하였다. 해당 연구에서는 동탄성계수와 진동 저감의 상관관계가 0.82~0.83으로 높은 것으로 분석되었으며, 동탄성계수가 낮을수록 진동 저감 효과도 개선되는 것으로 분석하였다<sup>33)</sup>. 바닥 슬래브 진동 감소는 바닥충격음 감소를 의미하며, 완충재의 동탄성계수와 바닥충격음 저감 성능에 대한 다양한 실험적 연구들이 존재한다.

송국곤(2018)은 목업 실험실을 이용하여 일반적으로 사용되고 있는 EPS 완충재의 바닥충격음 저감 인자(동탄성계수, 두께)를 실험적으로 분석하였다<sup>34)</sup>. 해당 연구에서는 특정 동탄성계수에서 1/1 옥타브 밴드의 63Hz에서 소음 증폭 현상이 존재하였으며, 동탄성계수가 낮을수록 바닥충격음 저감 효과를 기대할 수 있는 것으로 분석하였다.



[그림 1-9] 동탄성계수 변화에 따른 바닥충격음 저감(송국곤 외, 2018)

32) 황재승, 문대호, 박홍근, 홍성길, 홍건호(2010), “완충재의 동특성에 따른 중량충격음 증폭에 관한 해석적 연구”, 한국소음진동공학회 논문집, 20(7): 651~657.

33) 김홍식, 주시용, 진필화(2006), “모의실험을 통한 완충재별 진동전달량과 동적특성과의 상관성 분석에 관한 연구”, 2006년도 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 1290~1296.

34) 송국곤, 김용희, 류종관, 김명준(2018), “EPS 완충재의 동탄성계수 및 두께에 따른 중량 바닥충격음 레벨 분석”, 한국소음진동공학회 논문집, 28(6): 713~720.



[그림 1-9]은 해당 연구의 동탄성계수 변화에 따른 바닥충격을 측정 결과를 재구성한 그래프를 나타낸다. 또한, 완충재의 두께는 바닥충격음 저감 효과에는 미비한 것으로 분석하였다.

김경우(2008) 연구에서는 실험실 조건에서 완충재 종류에 따른 경량충격음 저감 성능을 분석하였다. 해당 연구에서도 단일수치평가량에서 완충재와의 상관계수가 0.7255로 분석되었으며, 동탄성계수가 낮을수록 경량충격음 저감 성능이 개선되는 것으로 분석하였다. 또한 완충재의 재질 및 완충재 적층 순서에 대한 바닥충격음 저감 성능 영향은 미비한 것으로 분석하였다<sup>35)</sup>. 다양한 완충재가 적층된 완충재의 총 동탄성계수는 등가 동탄성계수로 결정하며, 임정빈(2007)의 연구에서는 완충재의 총 동탄성계수를 직렬연결식으로 계산 할 수 있는 것으로 설명하였다<sup>36)</sup>.

다양한 종류의 완충재에 대해 바닥충격음 저감 성능을 실험적으로 분석한 윤세철(2005) 연구에서는 완충재 종류는 바닥충격음 저감 성능 차이는 크지 않았으며, EVA 재질과 같이 동탄성계수가 낮은 완충재가 바닥충격음 저감 효과 개선이 존재함을 설명하였다<sup>37)</sup>.

앞서 설명하였듯이 동탄성계수가 낮은 완충재일수록 바닥충격음 저감 효과는 증가하지만<sup>38)</sup>, 잔류변형이 크게 발생 할 수 있는 것으로 알려져 있다<sup>39)</sup>. 여기서 잔류변형은 일정한 하중을 일정 시간 동안 부여한 후, 하중 재하 전과 후의 완충재 두께 변화로 확인한다. 이러한 잔류변형이 크게 발생하는 경우에는 완충재 상부 구조의 구조적 안정성이 크게 저하될 수 있기 때문에 면밀한 분석이 요구된다.

김경우(2012)는 완충재의 재질에 따라 400일간의 잔류변형을 실험한 결과, 완충재 크기, 형상, 요철 유무에 따라 잔류변형에 영향이 존재하는 것으로 분석하였다. 해당 연구의 결과에서는 완충재의 크기와 형상이 잔류변형에 크게 작용하며, 하부에

---

35) 김경우, 정갑철, 손장열(2008), “완충재 동탄성계수와 경량바닥충격음 저감량의 상관성”, 한국소음진동공학회 논문집, 18(8): 886~895.

36) 임정빈, 정진연, 김경우, 정갑철(2007), “완충재의 구성에 따른 동탄성계수 변화에 관한 연구”, 2007년도 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.1143~1146.

37) 윤세철, 오종민, (2005), “완충재의 종류에 따른 공동주택 바닥충격음 차단성능에 관한 실험연구”, 환경영향평가, 14(4): 217~225.

38) 양수영, 이동훈, 홍병국, 송화영, 이주원(2005), “바닥충격음 완충재의 동적특성과 소음저감 성능 비교” 2005년도 춘계학술대회 논문집, pp.275~278.

39) 김경우, 최현중, 연준오, 양관섭(2011), “완충재 잔류변형과 동탄성계수”, 2011년도 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.234~237.

요철이 존재하는 경우에는 잔류변형이 상대적으로 크게 존재하는 것으로 분석하였다. 단, 시편의 크기가 증가하면 잔류변형이 감소하는 것으로 분석하였다<sup>40)</sup>.

김홍식(2005) 연구에서는 하중 부여 시간이 증가할수록 동탄성계수 변화율이 증가하는 것으로 분석하였으며, 초기 1시간이 가장 많은 동탄성계수 변화가 존재하는 것을 설명하였다<sup>41)</sup>. 이에 따라 박종영(2009) 연구에서는 실제 공동주택에 설치된 완충재의 경우에는 시간이 지남에 따라 상부 구조에 의해 일정 하중이 장시간 부여되기 때문에 완충재의 성능 기준을 초과할 가능성이 있음을 제시하였다<sup>42)</sup>.

하중 부여 시간 외에도 실제 공동주택에 적용된 완충재의 성능은 인정구조 대비 상이할 수 있으며, 이원학(2020)은 현장의 바닥구조 차단성능은 인정구조 대비 현장 성능에서 최소 1등급 이상 하향되는 것을 실험적으로 분석하였다. 동일 등급의 인정구조에서도 세대의 전용면적, 평면 형태(장단비 등)에 따라 경량충격음은 15dB, 중량충격음은 10dB 차이가 존재하는 것으로 분석하였다<sup>43)</sup>.

따라서 완충재의 동탄성계수가 낮을수록 바닥충격음 저감 효과 개선을 기대할 수 있으나, 낮은 완충재를 적용하는 경우 잔류변형 등에 대한 구조적 검토가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다. 또한 공동주택 평면 형태에 따라 바닥충격음 저감 성능이 상이할 수 있기 때문에 최적화된 완충재 설계도 요구될 것으로 판단된다.

---

40) 김경우, 연준오, 양관섭(2012), “완충재 장기처짐과 ISO 20392 대응 연구”, 한국소음진동공학회논문집, 22(12): 1250~1256.

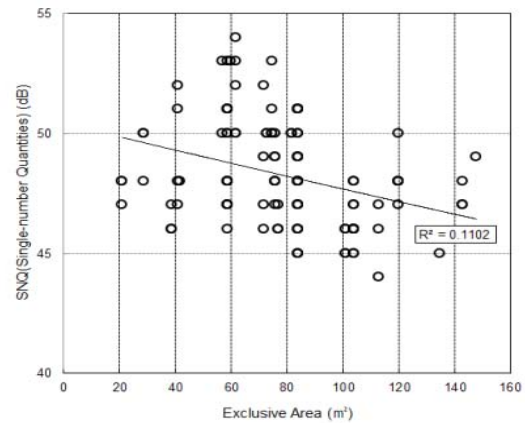
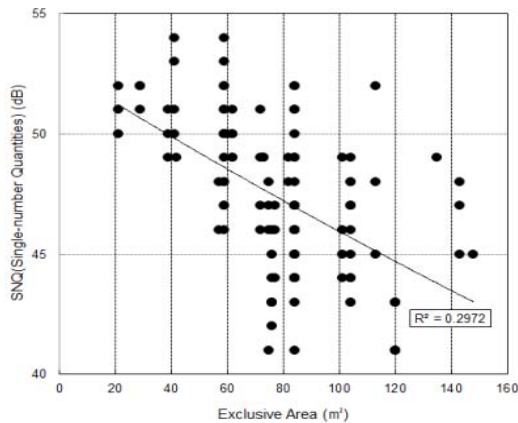
41) 김홍식, 진필화, 주시웅, 정성원(2005), “바닥충격음 완충재의 재하시간에 따른 동적 특성 연구”, 2005년도 후계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.942~945.

42) 박종영, 정갑철, 임정빈(2009), “동탄성 계수와 재하시간과의 상관성 연구”, 2009년도 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.392~393.

43) 이원학, 송국곤, 한찬훈(2020), “현장시험을 통한 공동주택 바닥충격음 차단성능 분석”, 한국건축친환경설비학회 논문집, 14(1): 19~31.

## 2. 5. 바닥 슬래브 진동과 소음 방사

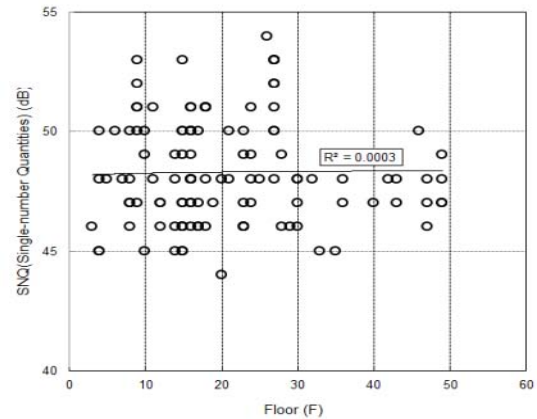
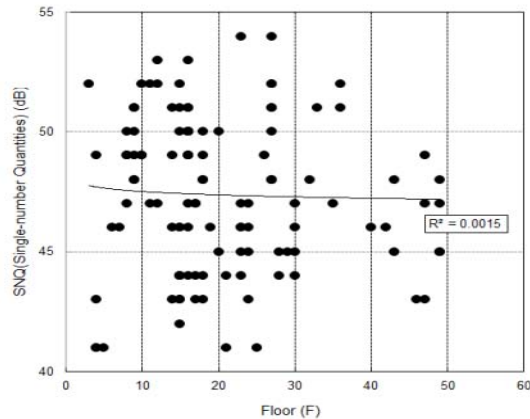
이원학(2020)의 연구에서는 전용 면적과 층별 영향을 실험적으로 분석하였으며, [그림 1-10]과 같이 전용 면적 증가에 따른 바닥충격음 저감 효과가 존재하는 것으로 분석하였다. 반면, 층별 영향은 [그림 1-11]과 같이 미비한 것으로 분석하였다<sup>44)</sup>. 일반적으로 전용 면적이 증가하면 거실의 크기가 증가하는 경향이 있으며, 이에 따른 바닥충격 저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다. 반면 벽식 구조의 경우 내력벽 위치, 형상 등에 따라 거실의 크기와 형상이 변경 될 수 있기 때문에 [그림 1-10]과 같이 편차가 크게 존재할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) 경량충격음

(b) 중량충격음

[그림 1-10] 공동주택 전용면적에 따른 바닥충격음 측정 결과(이원학, 2020)



(a) 경량충격음

(b) 중량충격음

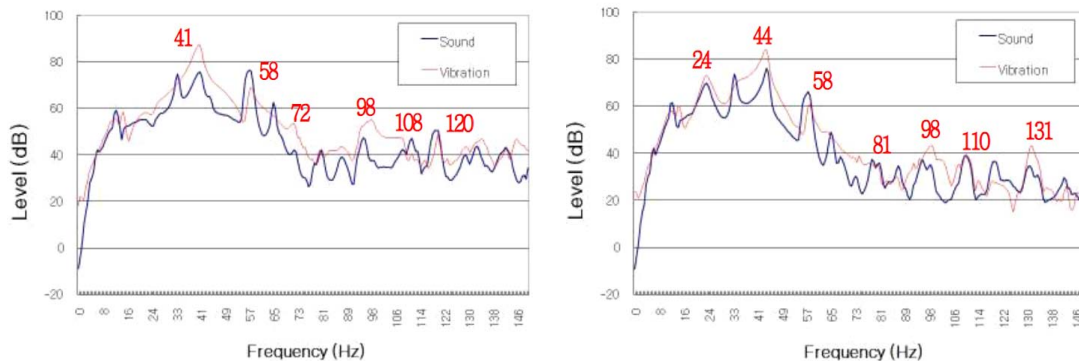
[그림 1-11] 공동주택 층별 바닥충격음 측정 결과(이원학, 2020)

44) 이원학, 송국근, 한찬훈(2020), “현장시험을 통한 공동주택 바닥충격음 차단성능 분석”, 한국건축친환경설비학회 논문집, 14(1): 19~31.

진동은 크게 종파(Longitudinal Wave), 횡파(Transverse Wave) 및 굽힘파(Bending Wave)로 구분할 수 있으며, 소음 방사는 굽힘 진동에 의한 기여도가 가장 크게 존재한다<sup>45)</sup>. 따라서 바닥충격음의 경우에도 바닥 슬래브의 굽힘 진동에 대한 정밀한 분석이 요구된다.

윤세철(2005)의 다양한 현장의 맨슬래브 바닥충격음을 측정한 결과에서 바닥충격음은 바닥의 면적, 슬래브의 두께가 바닥충격음에 지배적인 요소로 작용하는 것으로 설명하였으며<sup>46)</sup>, 김태민(2020)은 바닥 슬래브의 진동을 결정하는 영역을 내력벽, 기둥 등을 경계로 형성되는 유효평면으로 정의하여 설명하였다<sup>47)</sup>.

정진연(2008)은 목업 실험실에서 바닥 슬래브(180mm) 진동과 바닥충격음을 측정하여 상관성을 분석하였다. [그림 1-12]과 같이 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음의 피크 주파수가 일치하는 것을 확인할 수 있으며, 슬래브의 진동 피크 주파수는 바닥 슬래브 진동 모드인 것을 실험적으로 분석하였다. 따라서 바닥충격음 저감을 위해서는 바닥 슬래브의 진동 저감이 요구됨을 제시하였다<sup>48)</sup>.



(a) 맨슬래브 조건

(b) 뜯바닥구조 설치 조건

[그림 1-12] 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음 측정결과(정진연 외, 2008)

45) 황재승, 이강석, 이태진, 박희준, 박세훈(2016), “콘크리트 슬래브 진동모드의 중량충격음 참여특성”, 대한건축학회연합 논문집, 18(6): 127~134.

46) 윤세철, 오종민(2005), “완충재의 종류에 따른 공동주택 바닥충격음 차단성능에 관한 실험연구”, 환경영향평가, 14(4): 217~225.

47) 김태민, 배진영, 양홍석(2020), “바닥 슬래브 진동 특성을 이용한 바닥충격음 요인 분석 연구 : 유효 평면”, 한국소음진동 공학회논문집, 30(3): 276~285.

48) 정진연, 이상우, 임정빈, 정갑철(2008), “슬래브의 동특성과 중량충격음의 상관관계에 관한 연구”, 2008년도 춘계학술대회 논문집, pp.829~833.

닫힌 공간으로의 소음 방사 현상을 이론적으로 분석하기 위한 다양한 연구가 존재한다. 송민정(2000)은 축소 잔향실을 이용하여 다양한 재료(테라조, 콘크리트, 철)로 구성된 판의 진동과 소음의 상관성을 분석하였으며, 진동을 이용하여 소음을 예측하고자 하였다. 축소 잔향실을 이용한 경량충격음 결과에서는 슬래브 진동과 소음 상관성이 0.95로 매우 높은 상관계수를 갖는 것으로 분석되었으나, 중량충격음의 경우에는 0.46~0.9 사이로 편차가 크게 존재하였다<sup>49)50)</sup>.

이러한 결과는 바닥 슬래브의 진동 및 수음실의 음향 모드에 따라 결정된다. 경량충격음의 주파수 대역에서는 구조물과 수음실의 모드 밀도가 충분하기 때문에 개별적인 진동 특성의 영향이 감소된다. 따라서 경량충격음이 상관계수가 높게 분석된 것으로 판단된다. 잔향실의 경우에는 비교적 낮은 주파수 대역부터 확산 음장 조건이 가능하며, 따라서 경량충격음의 경우에는 공간적인 편차가 줄어들며, 이론적 접근이 상대적으로 중량충격음 대비 가능할 것으로 판단된다.

잔향실이 아닌 목업 실험실을 대상으로 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 연구도 존재한다. 김명준(2002)은 바닥 슬래브 진동을 이용하여 식 (1)을 이용하여 닫힌 공간의 바닥충격음을 예측할 수 있는 방안을 제시하였으며, 목업 실험실 실험 결과와 약 7~10% 편차로 바닥충격음을 예측할 수 있는 것으로 분석하였다. 수음실 전체의 구조 진동을 측정하여 예측한 결과에서는 5~6% 편차로 유사한 것으로 분석하였다<sup>51)</sup>.

$$SPL = 20\log\left(\frac{a}{a_{ref}}\right) + 10\log\sigma + 10\log(A/A_0) - 20\log f_m + 36 \quad (1)$$

여기서  $a$ 는 바닥 슬래브의 가속도,  $\sigma$ 는 방사 효율,  $A$ 는 방사면적,  $A_0$ 는 수음실의 흡음력,  $f_m$ 은 옥타브 밴드의 중심주파수,  $a_{ref}$ 는 진동 기준값(10<sup>-5</sup>)을 나타낸다.

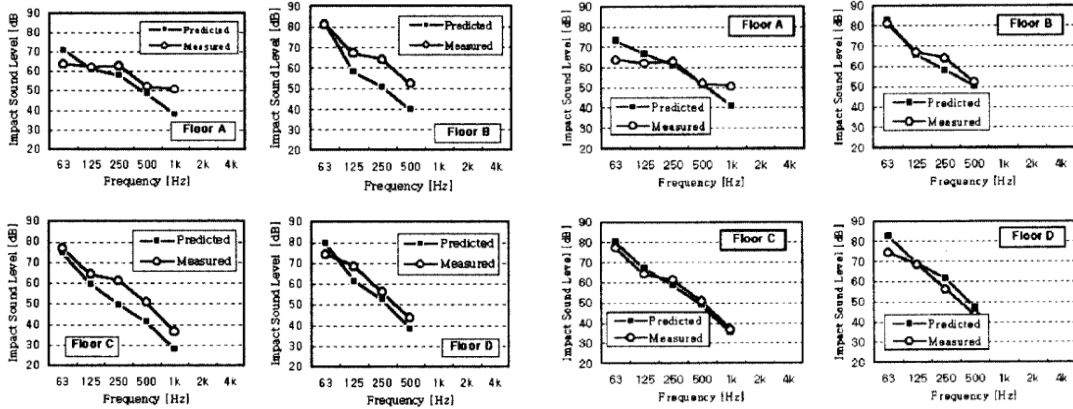
[그림 1-13]은 해당 연구에서 바닥 슬래브의 진동을 이용하여 예측한 중량충격음 결과, [그림 1-14]는 경량충격음 예측 결과를 나타낸다. 그림과 같이 바닥 슬래브

49) 송민정, 김선우(2000), “축소실험실에서의 진동가속도 레벨과 잔향실험실 음압 레벨의 상관관계에 관한 실험적 연구 - 비닐계 바닥마감재의 경량충격음을 대상으로 -”, 대한건축학회 논문집-계획계, 16(1): 109~116.

50) 송민정, 장길수, 김선우(2000), “축소실험실을 이용한 바닥충격음의 경량충격음 차음성능 예측방법에 관한 실험적 연구”, 소음·진동, 10(1): 82~96.

51) 김명준, 김홍식, 김하근(2003), “수음실 내 구조체의 진동량 계측을 통한 바닥충격음레벨 예측”, 한국소음진동공학회논문집, 13(1): 3~9.

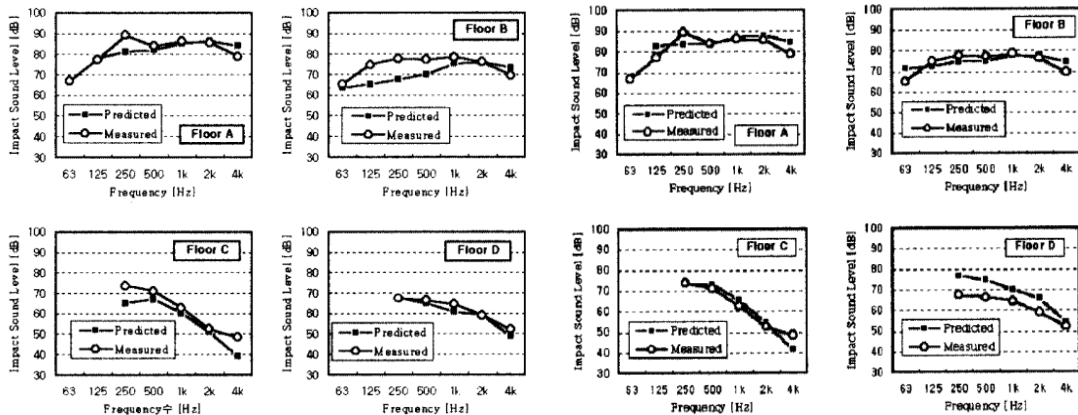
진동만을 이용한 바닥충격음 예측 결과에서도 측정 결과 대비 유사한 것을 확인할 수 있으며, 모드 밀도가 충분한 주파수 대역을 평가하는 경량충격음의 경우에는 바닥 슬래브 진동을 이용한 방법에서도 상대적으로 측정 결과 대비 유사한 예측 결과를 확인할 수 있다.



(a) 바닥 슬래브 진동

(b) 전체 구조물 진동(바닥 슬래브, 내력벽)

[그림 1-13] 바닥충격음 예측 결과와 중량충격음 측정 결과 비교



(a) 바닥 슬래브 진동

(b) 전체 구조물 진동(바닥 슬래브, 내력벽)

[그림 1-14] 바닥충격음 예측 결과와 경량충격음 측정 결과 비교

김정철(2008)은 목업 실험실을 이용하여 다양한 구조 타입에 대한 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음을 측정하여 진동-소음 상관성을 분석하였다. 연구 결과 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음 측정 결과가 유사한 것으로 분석되었으며, 바닥 슬래브 진동은 실험실의 형상 등에 의해 결정되고 있음을 설명하였다<sup>52)</sup>. 이때의 바닥 슬래브

52) 김정철, 조호규, 김태희(2008), “평균진동량을 이용한 바닥충격음 평가”, 건설안전기술, 47: 79-87.

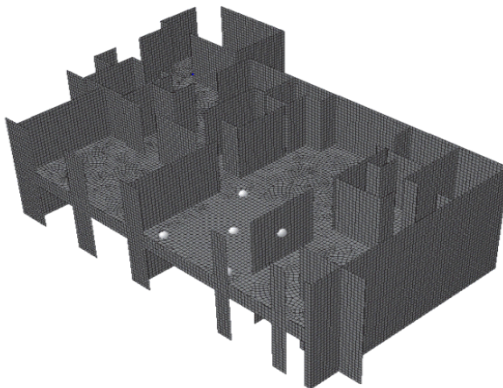
의 형상을 결정하는 영역을 김태민(2021)은 유효평면으로 정의하였으며, 경량벽체는 바닥 슬래브 진동에 영향이 미비한 것으로 분석하였다<sup>53)</sup>.

최근에는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 바닥충격음 예측 방법에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며, 시뮬레이션에서는 구조 진동을 선행적으로 분석 후 구조물의 소음 방사를 분석하여 바닥충격음을 예측한다.

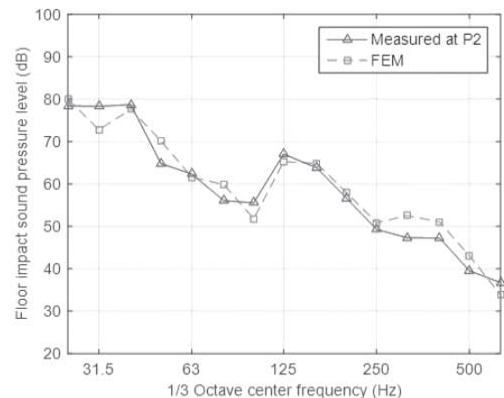
문대호(2020)는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 바닥충격음을 분석하였으며, 옥타브 대역별 편차는 존재하지만 단일수치량에서는 측정 결과 대비 유사한 예측이 가능한 것으로 분석하였다. 단, 해당 연구는 맨슬래브 조건에서 수행되었으며, 천정, 바닥구조 등이 설치되는 경우에는 추가적인 연구가 요구됨을 시사하였다<sup>54)</sup>.

황재승(2021)은 잔향실을 대상으로 콘크리트 슬래브의 방사 소음을 구조-음향 연성 시뮬레이션을 이용하여 분석하였으며, 신뢰성 있는 바닥충격음 예측을 위해 음경계 영역에서의 정밀한 감쇠비 도출의 필요성을 제시하였다<sup>55)</sup>.

따라서 바닥 슬래브 진동은 바닥충격음을 결정하는 주요 요인으로, 바닥 슬래브 진동을 이용하여 바닥충격음 예측이 가능할 것으로 판단된다.



(a) 전산해석 모델



(b) 전산해석 결과

[그림 1-15] 구조 진동과 소음 방사 해석을 이용한 바닥충격음 분석 방법(문대호, 2020)

53) 김태민, 배진영(2021). “경량벽체로 구성된 소형 공동주택의 바닥충격음 특성 연구”, 한국소음진동공학회 논문집, 31(5): 551~562.

54) 문대호(2020), “공동주택 바닥충격음 예측기술과 활용방안”, 소음·진동, 30(4): 6~11.

55) 황재승, 송민정, 류종관(2021), “구조-음향 연성 시스템의 진동모드에 의한 소음 예측”, 한국소음진동공학회논문집, 31(6): 632~641.

## 2. 6. 천정구조

천정 구조는 바닥 슬래브에서 방사된 소음을 최종적으로 저감할 수 있는 구조로, 리모델링, 바닥충격음 사후보강 등과 관련하여 다양한 연구가 진행 중에 있다.

천정을 차음 구조로 가정하고, 차음성능을 개선하여 바닥충격음 저감 효과를 분석한 정환욱(2004) 연구에서는 천정 구조에 차음성능 개선 방안인 진동 절연재와 석고보드를 추가 시공하여 바닥충격음 저감 효과를 실험적으로 분석하였다. 연구 결과 천정 구조의 차음성능 개선에 따라 바닥충격음 저감 효과가 존재하는 것으로 분석하였다<sup>56)</sup>.

다양한 연구에서 천정 구조 구성에 따른 바닥충격음 영향을 실험적으로 분석하였다. 김경우(2005)는 바닥충격음 실험동에서 일반적인 바닥구조를 설치한 후 천정 내부의 구성을 변경하며 바닥충격음 영향을 분석하였다. 해당 연구의 천정 구조의 구성별 실험 결과는 [표 1-11]에 정리하였다.

[표 1-11] 천정 구성에 따른 바닥충격음 영향(김 경우 외, 2004)

구분	구 성	바닥충격음(역A곡선)	
		경량충격음	중량충격음
천정 1	슬래브(210mm) + 공기층 60mm + 석고보드(9.5mm) 1겹	55	49
천정 2	슬래브(210mm) + 공기층 190mm + 석고보드(9.5mm) 1겹	53	50
천정 3	슬래브(210mm) + 공기층 190mm(미네랄울 50mm) + 석고보드(9.5mm) 1겹	51	47
천정 4	슬래브(210mm) + 공기층 190mm(미네랄울 50mm) + 석고보드(9.5mm) 2겹	50	47
천정 5	슬래브(210mm) + 공기층 190mm(방진고무) + 석고보드(9.5mm) 1겹	52	48
천정 6	슬래브(210mm) + 공기층 190mm(미네랄울 50mm, 방진고무) + 석고보드(9.5mm) 1겹	52	47
천정 7	슬래브(210mm) + 공기층 300mm + 석고보드(9.5mm) 1겹	53	49
천정 8	슬래브(210mm) + 공기층 300mm(방진고무) + 석고보드(9.5mm) 1겹	51	49

해당 연구에서는 공기층 공진으로 인해 1/1옥타브밴드 63Hz에서는 바닥충격음 저감 효과는 미비하거나 증폭되는 현상이 존재하였으며, 경량충격음의 경우에는 천정의 공기층의 높이가 증가할수록 바닥충격음 저감 효과가 존재하는 것으로 분석하였다<sup>57)</sup>. 천정의 공기층을 최대(190mm)로 설계하여 흡음재를 설치한 후 석고

56) 정환욱(2004), 공동주택 천장공법별 바닥충격음 저감효과에 관한 연구, 전남대학교 박사학위논문.

57) 김경우, 최현중, 양관섭, 이승언(2004), “천장 및 벽구성 방법에 따른 바닥충격음 특성평가”, 2004년도 추계학술대회 논문



보드를 2겹 설치하는 것이 경량충격음이 약 5dB 저감하여 가장 효과가 좋은 것으로 분석하였다. 하지만 중량충격음(벙머신)의 경우에는 저감 효과가 상대적으로 크지 않은 것으로 분석되었다<sup>58)</sup>. 따라서 천정은 공기층의 높이와 석고보드 개수(면 밀도 증가)가 증가할수록 바닥충격음 저감 효과가 증가하였으며, 공기층 내부의 흡음재 삽입시 추가적인 저감 효과를 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

[표 1-12] 천정 구성에 따른 바닥충격음 영향(정환욱 외, 2001)

구분	구 성	바닥충격음(역A곡선)	
		경량충격음	중량충격음
맨바닥	슬래브(150mm)	75.5	47.8
맨바닥 부착	발포폴리스티렌(15kg/m <sup>3</sup> ) 20mm	80.8	51.2
	흡음재(A) 20mm	74.5	49.1
	흡음재(A) 40mm	68.8	45.5
	흡음재(B) 20mm	76.1	49.1
	흡음재(B) 40mm	75.0	47.6
공기층 4cm	목재반자틀 + 석고보드 9.5mm	63.7	44.7
	목재반자틀 + 석고보드 12mm	61.7	43.7
	목재반자틀 + 석고보드 15mm	60.9	42.8
	발포폴리스티렌(15kg/m <sup>3</sup> ) 20mm + 목재반자틀 + 석고보드 9.5mm	62.5	44.1
	흡음재(A) 20mm+ 목재반자틀 + 석고보드 9.5mm	60.1	41.7
	흡음재(A) 40mm+ 목재반자틀 + 석고보드 9.5mm	60.5	41.5
	흡음재(B) 20mm+ 목재반자틀 + 석고보드 9.5mm	59.7	41.0
공기층 14cm	흡음재(B) 40mm+ 목재반자틀 + 석고보드 9.5mm	59.0	40.2
	발포폴리스티렌(15kg/m <sup>3</sup> ) 20mm + 목재반자틀 + 석고보드 9.5mm	58.9	40.3
	흡음재(A) 20mm+ 목재반자틀 + 석고보드 9.5mm	57.5	35.5
	흡음재(A) 40mm+ 목재반자틀 + 석고보드 9.5mm	56.7	38.8
	흡음재(B) 20mm+ 목재반자틀 + 석고보드 9.5mm	57.2	37.8
	흡음재(B) 40mm+ 목재반자틀 + 석고보드 9.5mm	57.1	38.1

정환욱(2001)은 잔향실에서 공기층의 높이, 내부 공간의 흡음재 구성 및 두께에 따른 바닥충격음 영향을 실험적으로 분석하였다<sup>59)</sup>. 해당 연구에서는 [표 1-12]과 같이 바닥 슬래브 하부면에 흡음재를 부착하는 것은 바닥충격음 영향에 미비하였으

문집, 한국소음진동공학회, pp.261~264.

58) 김경우, 강재식, 이승언, 양관섭(2005), “천장 및 벽구성 방법이 바닥충격음 차단성능에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국소음진동공학회논문집, 15(4): 465~473.

59) 정환욱, 기노갑, 송민정, 김선우(2001), “바닥하부구조(천장구조)의 개선에 따른 차음특성 변화 연구-흡·차음재를 중심으로-”, 대한건축학회 논문집 - 계획계, 17(12): 177~184.

며, 천정 설치시에는 공기층 공명으로 바닥충격음이 증가하는 현상이 존재하는 것으로 분석하였다. 단, 흡음재를 공기층 내부에 추가하는 경우에는 공명 현상이 억제되어 바닥충격음 저감 효과가 존재하는 것으로 분석하였다. 천정 높이가 증가하는 경우에는 차음성능 개선 효과가 존재하였으며, 석고보드 두께를 증가하는 경우에는 중/고주파 대역(500-5000Hz)에서 바닥충격음 저감 효과가 존재하였다. 천정 내부 공기층에 흡음재를 추가하는 경우 땀머신 조건에서 저주파 대역 바닥충격음 변화는 없었으며, 흡음재 두께에 따른 바닥충격음 저감 효과는 미비한 것으로 분석하였다.

기노갑(2001) 연구에서도 천정 내부의 공기층에 의한 바닥충격음 증가 현상은 존재하였으나, 흡음재를 삽입하는 경우에는 공기층의 공명 현상을 최소화하여 바닥충격음 증가 현상을 방지할 수 있는 것으로 설명하였다<sup>60)</sup>.

조창근(2002)은 실제 공동주택을 대상으로 공기층 두께, 흡음재(스티로폼), 차음시트에 따른 바닥충격음 영향을 실험적으로 분석하였으며, 천정 구조의 차음성능 개선이 바닥충격음 저감에 요구됨을 제시하였다. 따라서 공기층과 흡음재를 함께 시공하는 것이 천정 구조의 공명 현상을 억제하기 때문에 효과적인 기존 공동주택의 바닥충격음 저감 방안으로 제시하였다<sup>61)</sup>.

따라서 천정에 흡음재 시공은 천정 내부 공명을 억제하는 역할을 하며, 천정 내부의 공기층에 시공하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 최은석(2007)은 천정의 흡음성능을 개선하여 바닥충격음을 저감하는 실험적 연구를 수행하였으나, 중량충격음에서는 효과가 미비한 것으로 분석하였다<sup>62)</sup>.

연준오(2013) 연구에서는 이중바닥구조와 함께 바닥충격음 저감을 위한 통기성 천장공법을 제시하였고 타공, 흡음재 등의 변수에 따른 충격음 성능을 비교하였으며, 공기층에 의한 증폭현상은 존재하였으나, 중량충격음 개선 효과를 확인하였다<sup>63)</sup>.

60) 기노갑, 정환욱, 송민정, 장길수, 김선우(2001), 공동주택 천장구조 개선에 의한 바닥충격음 저감 연구, 학술발표대회 논문집-계획계, pp.505~508.

61) 조창근, 백용규, 신일섭(2002), “기존 공동주택의 바닥충격음 저감을 위한 천장구조의 개선에 관한 측정연구”, 한국생활환경학회지, 9(1): 38~44.

62) 최은석(2007), 흡음재를 이용한 바닥충격음 저감효과에 관한 실험적 연구, 전남대학교 석사학위논문.

63) 연준오, 김경우, 최현중, 양관섭, 김경호(2013), “건식이중바닥구조의 중량충격음에 대한 실험적 평가-지지구조 및 천장구조 구성에 따른 영향-, 한국소음진동공학회논문집, 23(1): 34~40.

정환욱(2002)은 공동주택 목상 천장구조와 경량철골 천장구조에 대한 바닥충격음 영향을 현장 실험을 통해 비교하였다<sup>64)</sup>. [표 1-13]과 같이 경량철골 천정틀이 바닥충격음 저감에 상대적으로 효과적이었으며, 흡음재를 석고보드 위에 시공하는 경우 표와 같이 바닥충격음 저감 효과가 개선할 수 있는 것으로 분석하였다.

[표 1-13] 천정 구성에 따른 바닥충격음 저감 측정 결과(정환욱 외, 2002)

구 성 (공기층 40mm)	목재반자틀		경량철골 천정틀	
	경량충격음	중량충격음	경량충격음	중량충격음
석고보드(9mm)	4.3	-0.3	3.4	2.8
석고보드(12mm)	4	2.5	4	2.4
발포폴리스틸렌폼(20mm) + 석고보드(9mm)	4.3	-0.7	4.8	2.4
다공성흡음재(25mm) + 석고보드(9mm)	6.4	1.5	4.8	2.3
다공성흡음재(40mm) + 석고보드(9mm)	5.1	2.6	8.8	3.1

박홍근(2014)은 공동주택에서 무달대 천장의 바닥충격음 차단 특성을 기존천장과 비교하여 제시하였으며, 무달대 천장구조는 천장판이 상하로 진동하면서 소음을 흡음하기 때문에 바닥충격음 저감 효과를 기대할 수 있는 것으로 분석하였다. 단, 100Hz 이하에서는 바닥충격음 저감 효과가 미비한 것으로 분석하였다<sup>65)</sup>.

Ryu(2015)<sup>66)</sup>와 송한솔(2018)<sup>67)</sup> 연구에서는 흡음 석고보드의 중량충격음 저감 성능을 분석하였으며, 흡음석고보드+글래스울과 흡음석고보드+이중 천장재를 적용하는 경우 125Hz~500Hz에서 소음 저감 효과가 존재하여 기존 천정 대비 3dB~4dB 바닥충격음 저감 성능이 존재하는 것으로 분석하였다.

결과적으로 천장은 내부 공기층의 공명 현상으로 바닥충격음이 증가할 수 있으나, 흡음재 삽입을 통해 예방이 가능할 것으로 판단된다. 또한, 천정 공기층과 천정 마감 재료를 통과하며 바닥충격음 저감을 예상할 수 있으며, 천정 구조의 차음성능 개선을 통해 바닥충격음 저감 효과 개선을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

64) 정환욱, 기노갑, 송민정, 김선우(2002), "공동주택의 천장틀구조 변화에 따른 바닥충격음 차음특성 연구", 한국소음진동 공학회논문집, 12(8): 573~580.

65) 박홍근, 문대호(2014), "공동주택 무달대 천장의 바닥충격음 차단 특성", 2014년도 추계학술대회 논문집, pp.208~213.

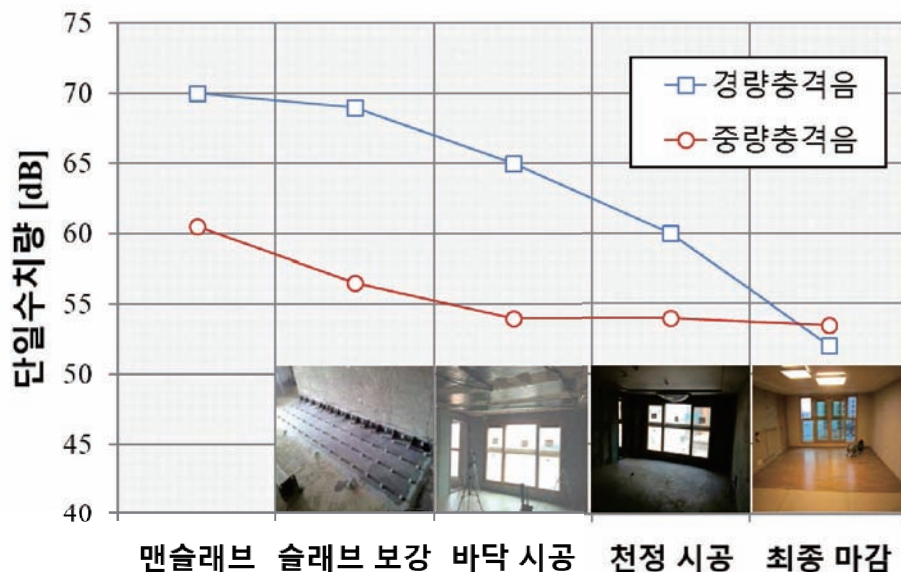
66) Ryu, J. K., Song, H. S., Kim, Y., H.(2018), "Effect of the suspended ceiling with low-frequency resonant panelabsorber on heavyweight floor impact sound in the building", Building and Environment, 139: 1~7.

67) 송한솔, 류종관(2018), "흡음 석고보드 천장재에 의한 저주파 중량 바닥충격음의 저감 효과", 한국음향학회지, pp.323~330.

## 2. 7. 종합

선행 연구 결과와 같이 뜬바닥구조, 천정 구조 등의 시공에 따라 맨슬래브 조건 대비 바닥충격음 저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 앞서 언급된 연구와 달리 동일 현장에서 시공 단계별 바닥충격음 영향을 분석한 연구도 존재한다.

백영수(2015)는 리모델링 주택을 대상으로 시공 공정에 따른 바닥충격음 영향을 실험적으로 분석하였다<sup>68)</sup>. 해당 연구에서는 135mm의 슬래브로 구성된 공동주택을 대상으로 리모델링 과정에 따른 바닥충격음 변화를 분석하였다. [그림 1-16]은 해당 연구 결과에서 측정된 바닥충격음 측정 결과를 재구성하였다. 그림과 같이 바닥 슬래브를 강판 또는 탄소섬유보강시 중량충격음이 4dB 저감으로 가장 큰 저감 효과가 존재하였다. 경량충격음의 경우에는 공정별 약 4dB 저감 효과가 존재하였으며, 최종 마감 조건에서는 맨슬래브 대비 중량은 7dB, 경량은 18dB 저감되는 것으로 분석되었다.

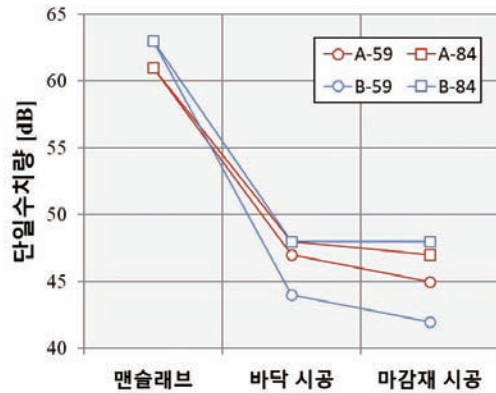


[그림 1-16] 시공 단계별 바닥충격음 저감 효과(백영수, 2015)

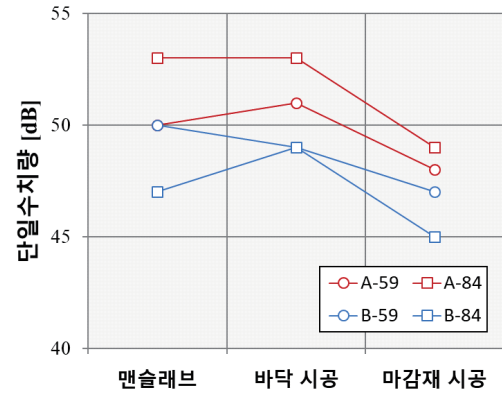
이원학(2020) 연구에서도 시공 단계별 바닥충격음 저감 효과를 실험적으로 분석하였다. 해당 연구에서는 [그림 1-17]와 같이 경량충격음의 경우 바닥구조 시공에 따라 소음 저감 효과를 기대할 수 있었으나, 중량충격음의 경우 특정 완충재에서 맨

68) 백영수, 박성균, 정문영(2014), “시공 공정에 따른 층간 소음 추이 분석 연구”, 2015년도 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.679~681.

슬래브 대비 증가하는 현상이 존재하였다<sup>69)</sup>. [그림 1-17(b)]와 같이 59타입의 맨슬래브 중량충격을 결과는 A현장과 B현장이 동일하였으나, 적용되는 완충재의 동탄성계수에 따라 A현장은 바닥 시공 후 바닥충격음이 증가하였다. 또한 84타입의 경우에도 저감 효과가 미비하거나 증가하는 현상이 존재하는 것으로 분석되었다.



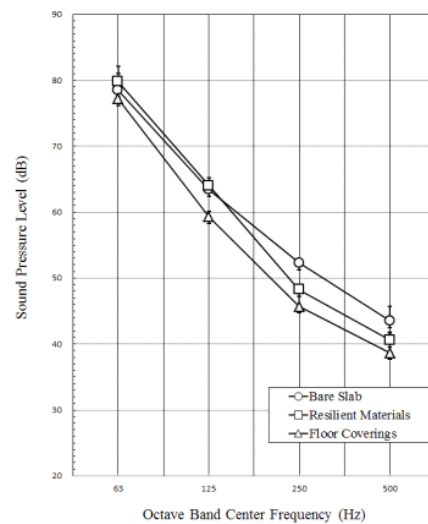
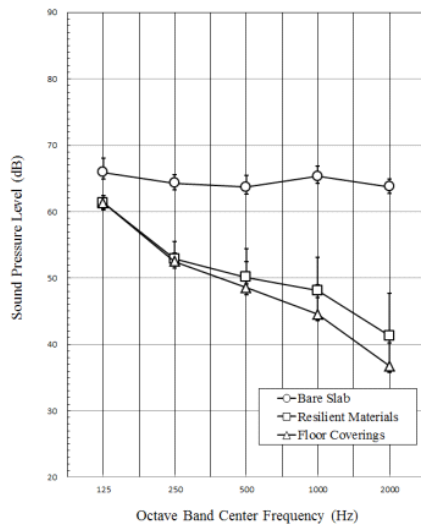
(a) 경량충격음



(b) 중량충격음

[그림 1-17] 바닥구조 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(이원학, 2020)

[그림 1-18]은 동일 연구에서 분석된 시공 단계별 1/1옥타브 밴드의 소음 측정 결과를 나타낸다.



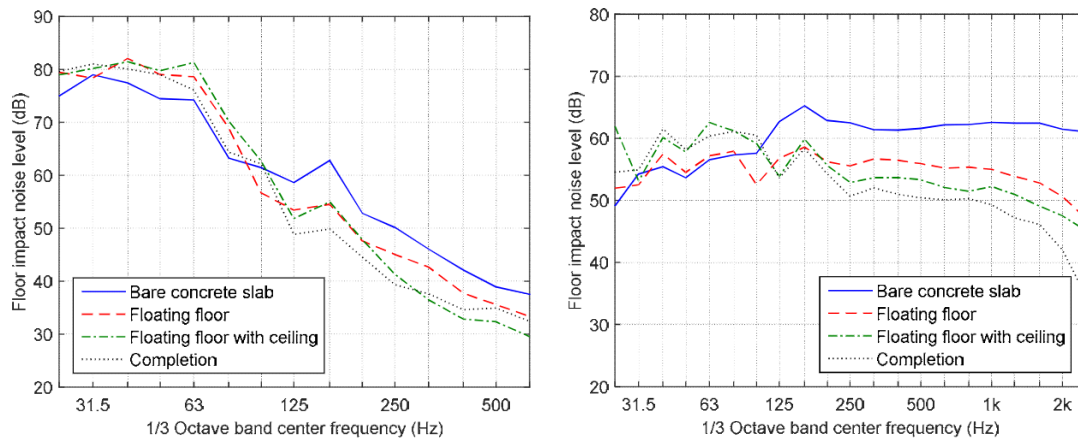
[그림 1-18] 바닥구조 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(1/1옥타브 밴드)(이원학, 2020)

69) 이원학, 송국근, 한찬훈(2020), “공동주택 바닥 공사 공정별 바닥충격음 특성 분석”, 한국소음진동공학학회논문집, 30(1): 29~36.

바닥구조 시공 조건에서 경량충격음의 경우 고주파 대역에서 소음 저감 효과가 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 저주파 대역으로 갈수록 저감 효과는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 중량충격음의 경우에는 충격력이 저주파 대역에 집중되어 있기 때문에 저감 효과가 미비하거나 증가할 수 있는 것을 확인할 수 있다.

문대호(2014) 연구에서도 맨슬래브-튼바닥구조-천장구조-완공 조건에서 시공단계별 바닥충격음 영향을 실험적으로 분석하였다. 해당 연구에서는 완충재와 천장구조가 80Hz 이하에서 바닥충격음을 증폭시키는 것으로 분석되었으며, 100Hz 이상부터는 바닥충격음이 맨슬래브 조건 대비 감소하는 것으로 분석되었다. 해당 연구에서는 시공 단계별 바닥충격음 측정과 함께 바닥 슬래브 진동도 함께 측정하였으며, 바닥충격음과 유사한 저감 효과가 존재하는 것으로 분석하였다. 즉, 바닥충격음과 바닥 슬래브 진동 특성과 상관성이 높은 것을 제시하였다.

추가적으로 안정적인 최종 마감 상태의 바닥충격음 차단성능을 구현하기 위해서는 맨슬래브, 튼바닥구조 시공 조건, 천장구조 시공 조건 등으로 성능을 분석할 필요가 있음을 제안하였다<sup>70)</sup>



(a) 바닥충격음

(b) 바닥 슬래브 진동

[그림 1-19] 바닥구조 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(문대호, 2014)

70) 문대호, 박홍근(2014), “공동주택 시공단계별 바닥충격음 변화”, 2015년도 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.692~697.

### 3. 바닥충격음 관련 국내 제도 현황

#### 3. 1. 바닥충격음 관련 국내 제도 변화

공동주택 층간소음은 이웃간 분쟁을 넘어 심각한 사회적 문제로 부각되고 있다. 특히 층간소음 원인 중 아이들 뛰 등과 같은 바닥충격음은 층간소음 중 70%이상의 가장 많은 비중을 차지하고 있는 상황이다.

정부는 바닥충격음으로 인한 분쟁을 해소하기 위해 바닥충격음 관련 제도를 [그림 1-20]와 같이 개선하고 있으며<sup>71)72)73)74)75)</sup>, 최근에는 사용 검사 전 현장의 바닥 충격음 차단성능을 측정 및 평가하는 사후확인제도를 도입하였다.



[그림 1-20] 공동주택 바닥충격음 관련 주요 제도 변화

2022년 도입된 바닥충격음 사후확인제도와 함께 표준충격원, 평가 방법 및 최소 성능 기준 등이 강화되었으며, 사후확인제도 도입 전/후의 바닥충격음 관련 기준을 [표 1-14]에 정리하였다. 단, 현재까지는 사후확인제도가 도입된 상황에서도 사전 인정제도는 병행하여 운영 중에 있다.

71) 국토교통부고시 제2013-889호, 공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준(2013.12.24.)

72) 국토교통부고시 제2015-319호, 소음방지를 위한 층간 바닥충격음 차단 구조기준(2015.05.21.)

73) 대통령령 제26226호, 주택건설기준 등에 관한 규정 (2015.05.06.)

74) 환경부령 제559호, 국토교통부령 제97호, 공동주택 층간소음의 범위와 기준에 관한 규칙(2014.06.03.)

75) 국토교통부고시 제2004-71호, 공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준(2004.4.23.)

[표 1-14] 바닥충격음 사후확인제도 도입에 따른 제도 변화

	2022년 8월 이전	2022년 8월 이후
제 도 명	사전인정제도	사후확인제도*
대 상	튼바닥구조에 대한 성능 기준(인정구조)	현장 성능 기준
주 체	제조사	시공사
시험 장소	표준시험동/현장	준공 예정 현장
소음 기준	중량충격음 50dB, 경량충격음 58dB 이하	중량/경량충격음 49dB 이하
표준충격원	(중량)뱅머신, (경량)태핑머신	(중량)고무공, (경량)태핑머신
성능 편차	(성능기준 만족) 인정구조 획득 (성능기준 불만족) 사용 불가	(성능기준 만족) 사용검사 승인 (성능기준 불만족) 보상/보완 시공

사후확인제도 평가시 현장 바닥충격음 측정 결과가 최소 소음 기준을 만족하지 못하는 경우, 사업주체는 보상 또는 보강을 권고할 수 있으며, 정부는 이에 대한 가이드라인 마련을 위해 다양한 전문 기관과 연구를 진행 중에 있다.

현재까지 검토된 내용에 따르면 손해배상액은 [표 1-4]와 같이 최대 337,034원/m<sup>2</sup>이 산출되었으며, 소음 보강 방안으로 천정의 흡/차음 보강 등이 검토 중에 있다. 소음 보강 방안의 경우 손해배상액 대비 상대적으로 적은 비용으로 시공이 가능하지만, 보강 시공에 따른 입주 시기 조정 등이 수반될 수 있기 때문에 막대한 비용이 발생될 것으로 예상된다.

최근 정부는 측정 세대 확대(세대수 무작위 2% → 5%), 성능 기준 미달시에는 보완 시공을 권고에서 의무로 변경(준공승인 불허), 손해배상시 정보 공개 등 현행 사후 확인제도 대비 강화된 법률 개정을 예고하고 있다. 이에 따라 바닥충격음 관련 제도는 국민이 체감할 수 있도록 지속적으로 강화되고 있는 것으로 판단된다.



### 3. 2. 바닥충격음 현황

이재원(2013)은 층간소음 바닥충격음 기준(국토교통부) 시행 전/후의 공동주택을 대상으로 바닥충격음 실태 및 현황을 정리하였다. [표 1-15]은 바닥충격음 기준 시행 후 중량충격음, [표 1-16]은 경량충격음 조사 결과를 나타낸다.

단, 여기서 중량충격음의 단일수치량은 역A특성가중바닥충격음레벨, 경량충격음은 표준화바닥충격음레벨로, 현재 바닥충격음 평가 결과와는 상이하다<sup>76)</sup>. 따라서 해당 연구에서는 중량충격음 기준은 50dB, 경량충격음 최소 기준은 58dB이다.

[표 1-15] 중량충격음 조사 결과(이재원, 2013)

충격원		63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	SNQ
뱅머신	평균	82.3	62.8	49.6	41.0	52.8
	표준편차	2.4	3.3	4.3	4.8	2.3
임팩트볼	평균	73.9	62.4	50.7	38.2	47.1
	표준편차	2.9	2.8	4.4	3.5	1.7

[표 1-16] 경량충격음 조사 결과(이재원, 2013)

충격원		125Hz	250Hz	500Hz	1,000Hz	2,000Hz	SNQ
뱅머신	평균	62.1	57.0	51.1	43.9	37.9	49.1
	표준편차	3.7	4.8	6.5	10.4	11.5	5.4

표와 같이 현장 중량충격음은 인정구조 대비 2.8dB 높은 것으로 분석되었으며, 경량충격음의 경우에는 안정적으로 최소 소음 기준을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

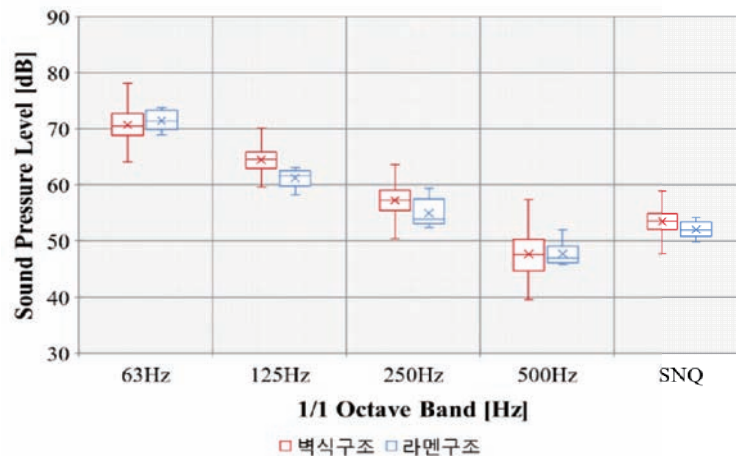
단, 중량충격음의 경우 편차는 2.3dB, 경량충격음의 경우 상대적으로 큰 5.4dB가 존재하는 것으로 분석되어 현장별 바닥충격음 성능 편차는 존재하는 것을 확인할 수 있다.

76) 이재원(2013), “공동주택 층간소음 실태 및 현황”, 소음·진동, 23(3): 4~8.

### 3. 3. 공동주택 바닥충격음 현황(LH 자료)

#### 1) 구조형식에 따른 바닥충격음 현황

LH에서는 샘플세대를 구성하여 맨슬래브 조건과 바닥구조 설치 조건의 바닥충격음 측정 결과를 COTIS에 DB화하여 관리하고 있으며, [그림 1-21]은 최근 공동주택 현장에서 측정된 벽식 구조(163세대)와 라멘 구조(25세대)의 맨슬래브 조건의 현장 바닥충격음 측정 결과를 나타낸다.



[그림 1-21] 맨슬래브 조건에서의 구조 형식별 바닥충격음 측정 결과

벽식 구조의 경우 53.6dB, 라멘 구조는 52.9dB로, 맨슬래브 조건에서는 벽식 구조가 1.5dB 큰 바닥충격음이 발생하는 것으로 분석되었다. 여기서 바닥충격음 단일 수치량은 1/1옥타브 밴드로 계산하였기 때문에 실제 바닥충격음 평가 결과와는 상이할 수 있다.

벽식 구조의 경우 전체 측정 세대에서 11.1dB 편차가 존재하는 것으로 분석되었으며, 라멘 구조의 경우에는 상대적으로 적은 3.6dB 편차가 존재하는 것으로 분석되었다. 일반적으로 벽식 구조는 내력벽 위치 등에 따라 바닥충격음 특성이 다양하게 존재할 수 있는 반면, 라멘 구조의 경우에는 기둥 및 보의 배치로 인해 비교적 바닥 슬래브의 구조적 형상이 유사하기 때문에 편차가 적게 존재하는 것으로 판단된다. 단, 해당 결과는 라멘 구조의 측정 세대가 상대적으로 적기 때문에 추가적인 분석은 요구된다.

옥타브 대역에 따른 바닥충격음 편차에서는 1/1옥타브 대역의 500Hz에서 가장 큰 편차가 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 1/1옥타브 밴드의 125Hz에서 가장 작은

편차가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 표준 중량충격원의 충격력은 1/1옥타브 밴드의 63Hz, 125Hz에 집중되어 있으며, 250Hz, 500Hz에는 상대적으로 미세한 1N 이하의 충격력이 존재한다. 따라서 실험 재현성 측면에서는 일정한 크기의 충격력이 존재하는 1/1옥타브 밴드의 63Hz와 125Hz에서 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

구조 진동 측면에서 1/1옥타브 밴드의 63Hz는 개별적인 진동 특성이 강하게 존재하는 영역으로 내력벽의 위치, 형상 등에 따라 상이할 수 있다. 따라서 벽식구조의 경우에는 동일 평면에서도 내력벽 위치 등이 다양하게 구성될 수 있기 때문에 그림과 같이 바닥충격을 편차가 존재하는 것으로 판단된다.

1/1옥타브 밴드의 250Hz와 500Hz의 경우 충격력 하중이 미비하기 때문에 배경소음 등의 영향이 크게 존재하는 대역으로 그림과 같이 벽식과 라멘식 구조 모두 편차가 상대적으로 크게 존재하는 것으로 판단된다.

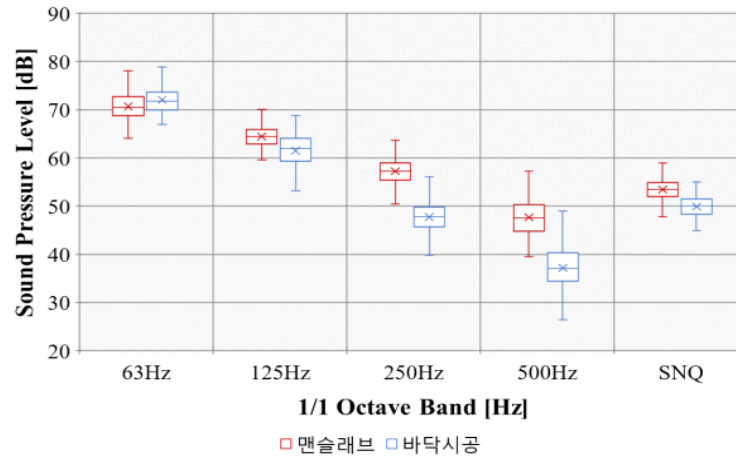
최근 A가중치를 적용한 후 전체소음도를 계산하는 단일수치량 평가 방법의 경우에는 배경소음에 대한 영향이 기존 평가 방법 대비 크게 작용하기 때문에 단일수치량에서 편차가 존재할 수 있을 것으로 판단된다.

결과적으로 벽식구조의 경우 구조평면 형태, 평형 등에 따라 바닥충격을 결정하는 1/1옥타브 밴드의 63Hz에서 편차가 크게 발생할 수 있는 반면, 라멘구조의 경우에는 기둥과 보의 형상이 일반적으로 유사하기 때문에 바닥충격을 편차가 적게 발생하는 것으로 판단된다.

이와 관련하여 벽식구조의 경우 평형 등에 따라 완충재의 성능 편차가 존재할 수 있지만, 라멘구조의 경우에는 평형에 무관하게 유사한 완충재의 성능을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2) 바닥구조 시공에 따른 바닥충격음 현황(벽식구조)

[그림 1-22]는 벽식 구조에서 바닥구조 설치 전/후 바닥충격음 측정 결과를 함께 도식화하였다. 평균적으로 맨슬래브에서는 54dB, 바닥구조 설치 후에는 49dB로 약 5dB가 저감되는 것으로 분석되었다. 바닥구조 설치 후 조건에서도 측정 세대간 편차도 맨슬래브 조건과 유사하게 약 10dB 존재하는 것을 확인할 수 있다.



[그림 1-22] 바닥구조 설치에 따른 바닥충격음 측정 결과 비교(벽식 구조)

일반적인 뜬바닥구조의 경우 저주파 대역 대비 고주파 대역에서 소음 저감 효과가 존재하는 것으로 알려져 있으며, 그림과 같이 맨슬래브 조건 대비 고주파 대역에서 상대적으로 큰 바닥충격음 저감 효과가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 1/1옥타브 밴드의 500Hz의 경우 배경소음 영향으로 맨슬래브 대비 편차가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

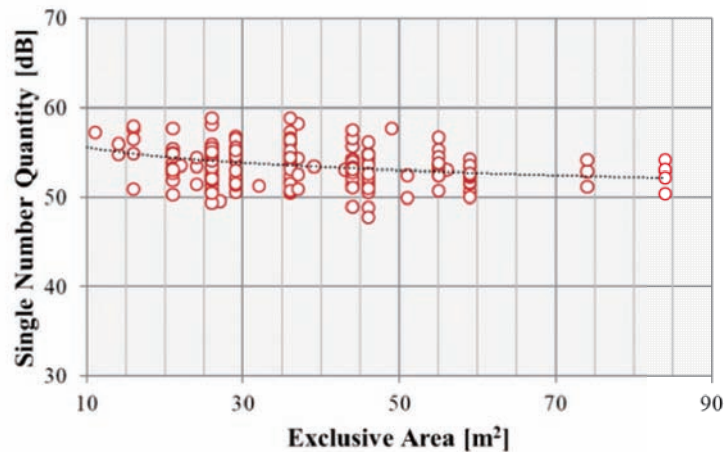
뜬바닥구조의 경우 완충재의 공진현상으로 바닥충격음이 증가하는 현상이 발생할 수 있으며, 전체 세대의 평균 데이터에서도 맨슬래브 대비 바닥구조 설치 후 1/1옥타브 밴드의 63Hz가 약 1dB 증가하는 것으로 분석되었다. 단, 해당 데이터의 경우 공동주택 면적이 다양하지 않고, 소형 공동주택이 다수 존재하기 때문에 중대형 공동주택에 대한 추가적인 분석은 요구된다.

바닥구조 설치에 따라 중량충격음은 4~5dB의 저감되는 것을 확인할 수 있으며, 이에 따라 맨슬래브의 바닥충격음 성능 기준을 마련한다면, 최소 53dB로 설정하는 것이 적정할 것으로 판단된다.

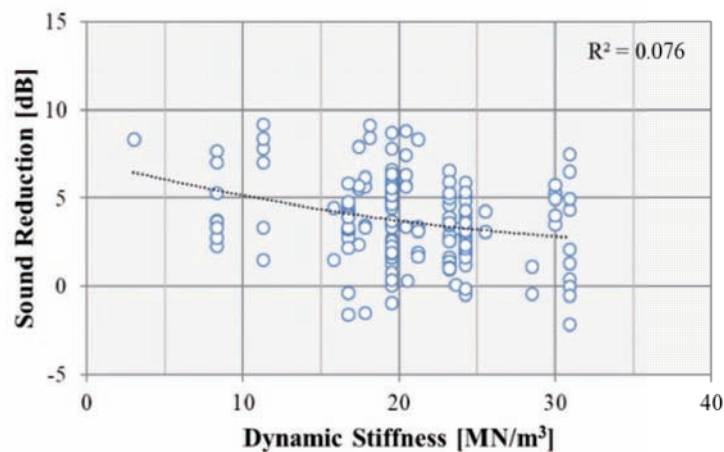
### 3) 공동주택 전용면적 및 동탄성계수에 따른 바닥충격음 현황

[그림 1-23]는 맨슬래브 조건에서 공동주택 전용 면적에 따른 바닥충격음 측정 결과를 나타낸다. 그림과 같이 맨슬래브 조건에서는 전용면적이 증가하는 경우 단일 수치량이 일부 감소하는 것으로 판단할 수 있으나, 바닥구조 설치 후 조건에서는 전용 면적에 무관하게 유사한 바닥충격음이 존재하는 것으로 분석되었다.

해당 데이터의 경우 적용된 바닥구조가 상이하며, LH의 경우 샘플세대의 바닥충격음 측정 결과가 성능 기준 이상인 경우에만 본 시공을 실시하기 때문에 최종 마감 상태에서는 성능 기준 수준의 바닥충격음이 존재하는 것으로 판단된다.



[그림 1-23] 공동주택 전용 면적에 따른 바닥충격음 측정 결과: 맨슬래브



[그림 1-24] 완충재 동탄성계수에 따른 바닥충격음 저감 효과

[그림 1-24]는 완충재 동탄성계수에 따른 바닥충격음 저감량을 나타낸다. 그림과 같이 동일 동탄성계수 조건에서도 저감 성능 편차는 존재하지만, 동탄성계수가 증가하는 경우 평균적인 바닥충격음 저감 효과도 감소하는 것으로 분석되었다.

일반적으로 낮은 동탄성계수의 완충재를 적용하는 경우 바닥충격음 저감 효과가 향상되는 것으로 알려져 있으며, 해당 데이터에서도 낮은 동탄성계수일수록 바닥충격음 저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

단, 완충재의 동탄성계수에 따른 바닥충격음 저감 효과는 공동주택 구조형식, 구조평면 형태, 상부구조의 구성 등에 따라 성능 편차가 존재할 수 있기 때문에 바닥구조 설계시 바닥 슬래브 진동 특성을 고려한 완충재 설계가 요구된다.

## 제2장 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측

### 1. 바닥구조 시공품질 관리 방안 개요

#### 1. 1. 바닥구조의 성능 관리 필요성

##### 1) 바닥충격음 사후확인제도와 보상 비용

정부는 바닥충격음 관련 이웃간 분쟁을 해소하기 위해 공동주택 사용검사 전 대상 현장의 바닥충격음 차단성능을 평가하는 사후확인제도를 2022년 8월 도입하여 운영 중에 있다. 사후확인제도는 사용검사 전 대상 단지 임의의 2%의 세대를 선정하여 표준충격원을 이용하여 바닥충격음 최소 성능 기준 만족 여부를 평가한다.

바닥충격음 측정은 KS F ISO 16283-2에 의거하여 수행되며, KS F ISO 717-2를 이용하여 단일수치량으로 평가한다. 측정된 세대의 중량/경량충격음 평균 바닥충격음 차단성능이 모두 최소 성능 기준 49dB 이상을 만족하는지를 확인하며, 성능 기준 미달시에는 보상 또는 보강을 권고하도록 한다.

[표 2-1] 중량충격음과 경량충격음 모두 성능미달시 배상액 가이드 (단위 : 원/m<sup>2</sup>)

중량충격음	전국	서울	5대 광역시 및 세종시	기타 지방
49dB 초과 ~ 51dB 이하	251,934	313,184	253,404	239,014
51dB 초과 ~ 53dB 이하	256,704	317,954	258,174	243,784
53dB 초과 ~ 55dB 이하	261,474	322,724	262,944	248,554
55dB 초과 ~ 57dB 이하	266,244	327,494	267,714	253,324
57dB 초과 ~ 59dB 이하	271,014	332,264	272,484	258,094
59dB 초과	275,784	337,034	277,254	262,864

이와 관련하여 정부는 전문기관과 함께 성능 기준 미달시 보상 금액 산정 및 소음 보강 방안 관련 연구를 진행 중에 있다.

국토안전관리원에서 수행한 연구 보고서에 따르면 중량/경량충격음 모두 미달 조건에서는 [표 2-1]과 같이 서울 기준 최대 337,034원/m<sup>2</sup>의 보상 비용이 산정되어, 막대한 보상 비용이 발생할 것으로 예상된다<sup>77)</sup>.

한국토지주택공사에서는 한국소음진동공학회와 함께 소음 기준 미달 상황에서 적용할 수 있는 소음 보강 방안을 연구 중에 있으며, 천정 보강시 약 3~4dB 소음 저감 효과가 존재하여 손해배상 대비 저비용으로 소음 보강이 가능할 것으로 기대하고 있다. 하지만, 소음 보강 방안의 경우에도 보강 시공에 따른 입주 지연 등이 발생할 수 있기 때문에 최종적으로 손해배상 금액과 유사한 비용이 소모될 것으로 예상된다<sup>78)</sup>.

따라서 시공사에서는 사후확인제도 평가시 안정적인 성능 구현을 위해 고성능 바닥구조 개발을 진행 중에 있으나, 바닥충격음은 공동주택 세대 특성에 따라 소음 저감 효과가 상이할 수 있기 때문에 실제 대상 현장에서의 현장 성능 확인이 반드시 요구된다.

이상적으로는 시공 단계별 바닥충격음을 측정하고, 최종 마감 상태에서 발생할 수 있는 인정구조 대비 성능 편차 또는 세대간 성능 편차를 시공 단계별 점검하여 즉각적인 조치를 취하는 것이다.

하지만, 바닥충격음 성능 확인을 위해서는 창호 설치, 출입문 설치 등 소음을 측정할 수 있는 실험 환경 조건이 충족되어야 하며, 일반적인 시공 단계에서는 출입문 설치 등이 공정 후반부에 존재하기 때문에 시공 단계별 바닥충격음 측정에 어려움이 존재한다.

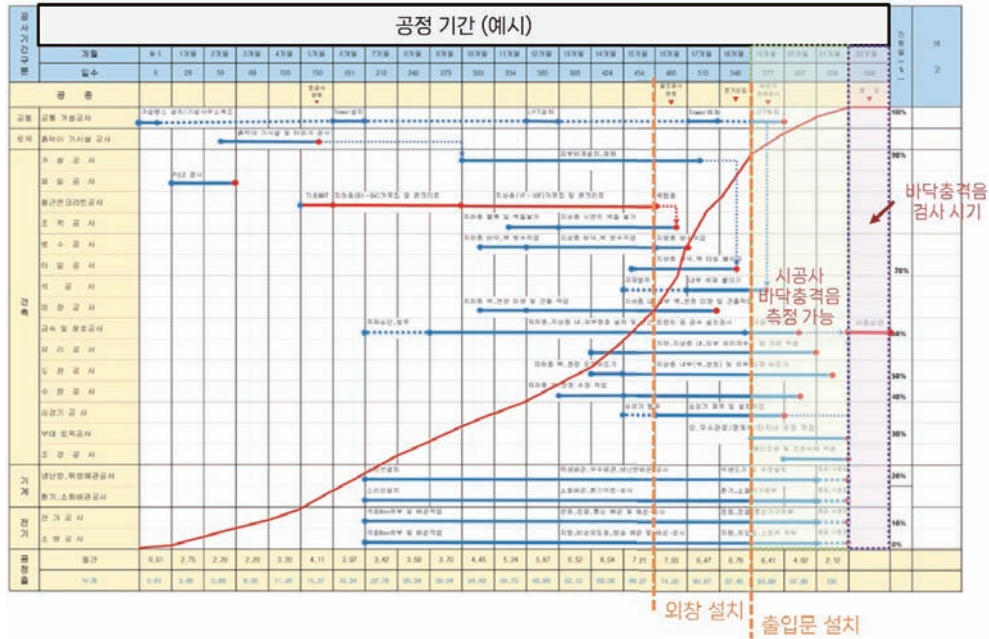
---

77) 국토안전관리원, 공동주택 바닥충격음 손해배상 가이드라인 마련 연구

78) 한국소음진동공학회, 연구



[그림 2-1]은 일반적인 공동주택 시공 현장의 공정표를 나타내며, 그림과 같이 바닥충격음을 측정하기 위한 최소 실험 환경이 완료되는 시기는 준공 기준 약 3개월 전으로 바닥충격음 성능 보강에 대한 대응 시기가 촉박할 것으로 예상된다.



[그림 2-1] 공동주택 시공 공정표 예시

따라서 바닥구조의 바닥충격을 차단성능을 시공단계에서 분석하고, 성능 미달 상황이 예상되는 경우에는 소음 보강을 수행할 수 있는 방안 마련이 시급히 요구된다. 따라서 본 연구에서는 바닥충격을 결정하는 바닥 슬래브의 진동을 이용하여 바닥충격을 예측할 수 있는 방법론을 제시하고자 한다.

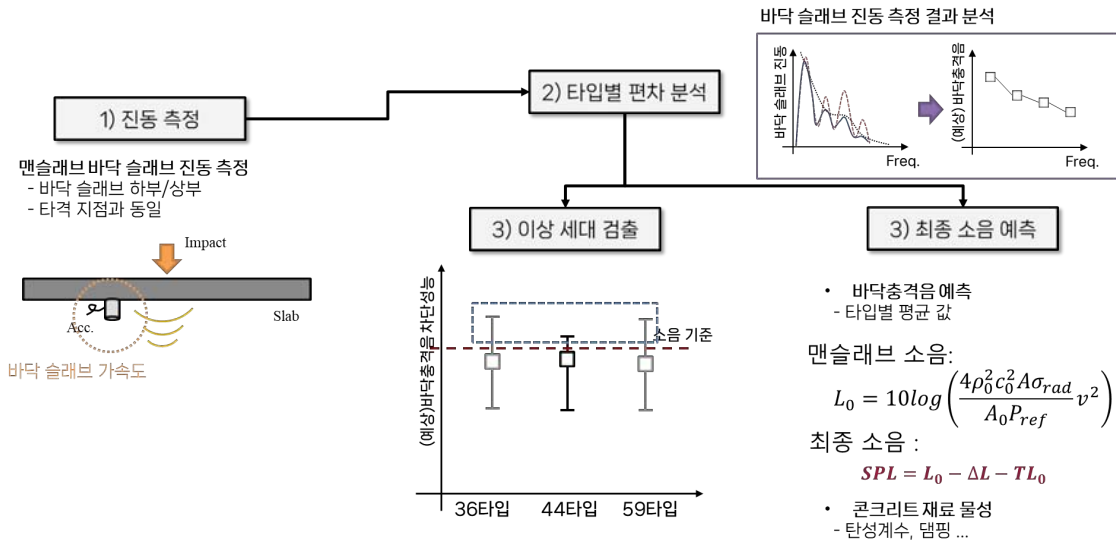
바닥충격음은 공동주택 구조물의 진동에 의한 소음 발생 현상으로, 바닥 슬래브 진동이 바닥충격음을 결정하는 주요 요소이다. 또한 시공 중 발생할 수 있는 재료 물성 기준 미달, 시공 불량(두께 부족 등) 등의 요소들이 복합적으로 적용되어 바닥 슬래브 진동으로 발생하게 된다. 즉, 바닥 슬래브 진동 편차가 크게 존재하는 경우에는 바닥충격음 편차 세대를 의미한다고 할 수 있다.

## 1. 2. 바닥구조의 성능 관리 방안

본 연구에서는 소음 측정 환경이 완벽히 구현되지 않은 조건에서도 바닥충격음을 분석하고, 인정구조 대비 성능 편차 세대 및 세대간 편차 세대를 판별할 수 있는 바닥구조 성능 점검·관리 방안을 검토하였다.

바닥충격음은 바닥 슬래브 진동에 의한 소음 발생 현상으로 바닥 슬래브 진동이 바닥충격음의 주파수 특성 및 크기를 결정하는 주요 요인으로 작용한다. 따라서 바닥 슬래브 진동 응답의 크기와 특성은 닫힌 공간(수음실)의 소음을 결정하며, 동일한 평면 구성 조건인 경우에는 슬래브 진동의 편차는 세대간 바닥충격음의 편차를 의미한다고 할 수 있다.

본 연구에서 제안하는 바닥구조의 시공 품질 방안은 [그림 2-2]와 같이 정리할 수 있으며, 다음과 같이 3단계로 설정할 수 있다.



[그림 2-2] 공동주택 바닥구조 시공 품질 관리 방안

### ① 표준충격원을 이용한 바닥 슬래브 진동 측정

- 골조 공사 단계에서 표준충격원(고무공/태핑머신)을 이용하여 슬래브 가진
- 바닥 슬래브 하부에 진동 센서 설치 및 바닥 슬래브 진동 측정

### ② 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 계산 및 바닥충격음 성능 기준 확인

- 바닥 슬래브 진동을 이용한 수음실 공간의 바닥충격음 계산
- 맨슬래브 조건의 바닥충격음 성능 확인 및 성능 기준 미달/편차 세대 분류

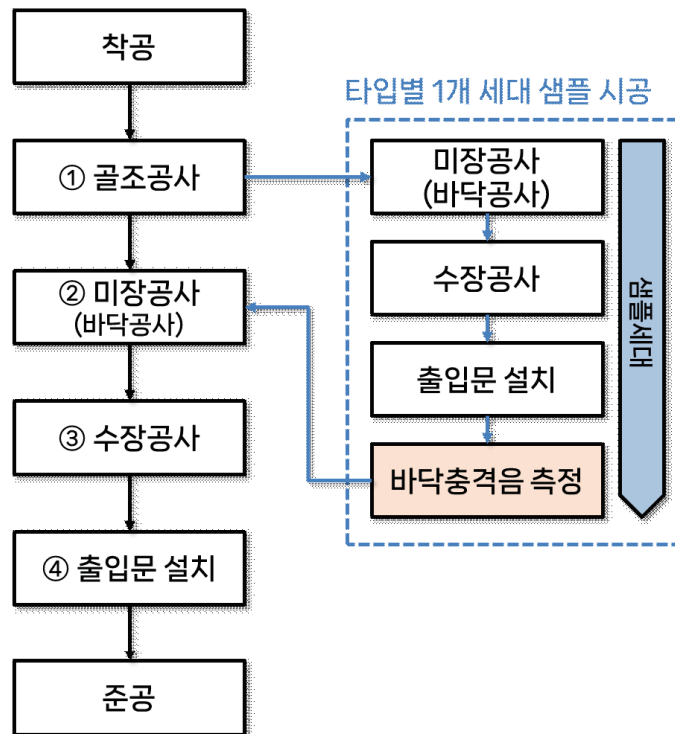
### ③ 바닥구조 시공 단계별 예상 성능 계산

- 바닥구조 시공 단계별 바닥충격음 저감 성능 계산 및 단계별 성능 기준 수립
- 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 및 예상 성능 기준 만족 여부 확인

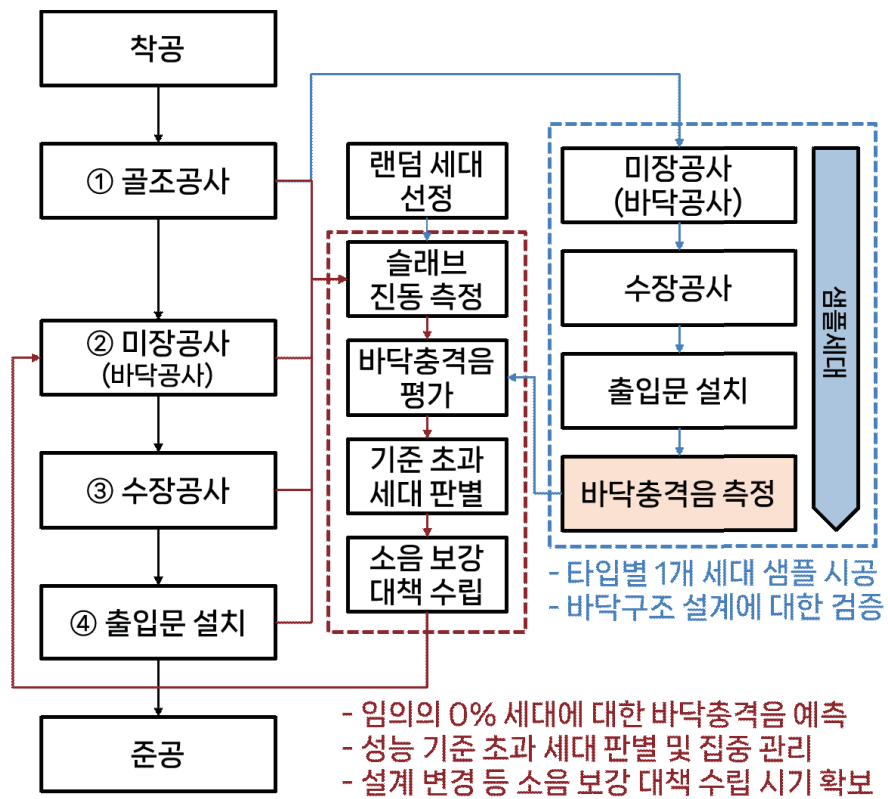
### ④ 바닥구조 소음 보강 방안

- 성능 기준 또는 편차 세대에 대한 집중 품질 관리 세대 선정
- 소음 보강 대책 수립 및 적용

한국토지주택공사의 경우 [그림 2-3(a)]과 같이 타입별 1개 세대를 대상으로 샘플 세대를 구성하여 적용되는 바닥구조에 대한 성능 기준 만족 여부를 확인하여 바닥 충격음 성능 관리를 수행 중에 있다. 본 연구에서는 샘플세대 구성을 통한 설계 검증과 함께 바닥 슬래브 진동을 이용하여 성능 기준 미달이 예상되는 세대를 선별할 수 있도록 [그림 2-3(b)]와 같이 품질 관리 방안을 제안한다. 여기서 바닥 슬래브 진동 측정은 사후확인제도와 동일하게 임의의 2%를 선정하여 수행하며, 이상 세대가 다수 존재하는 경우에는 측정 세대를 확대하는 방안도 검토할 수 있다.



(a) 기존 바닥충격음 차단성능 관리(LH기준)

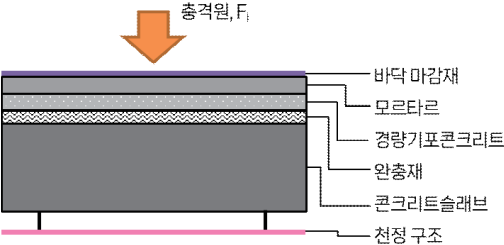
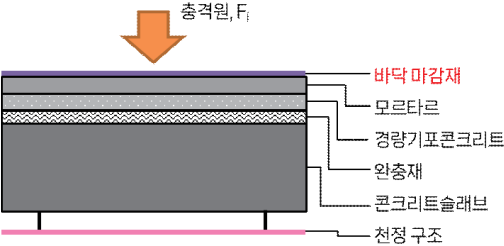
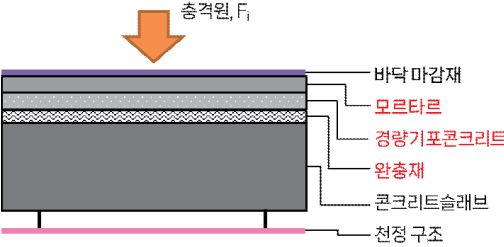
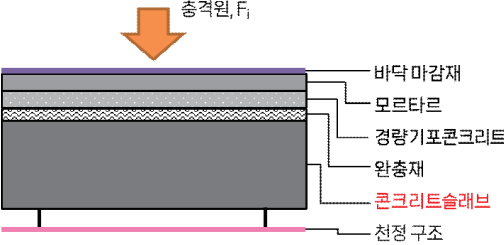
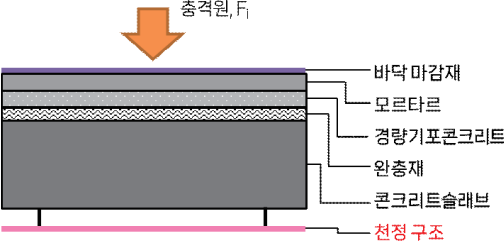


(b) 본 연구에서 제안한 바닥충격음 차단성능 관리  
[그림 2-3] 바닥구조 차단성능 관리 방안 비교

## 2. 바닥 슬래브의 진동을 이용한 바닥충격음 예측

### 2. 1. 배경 이론

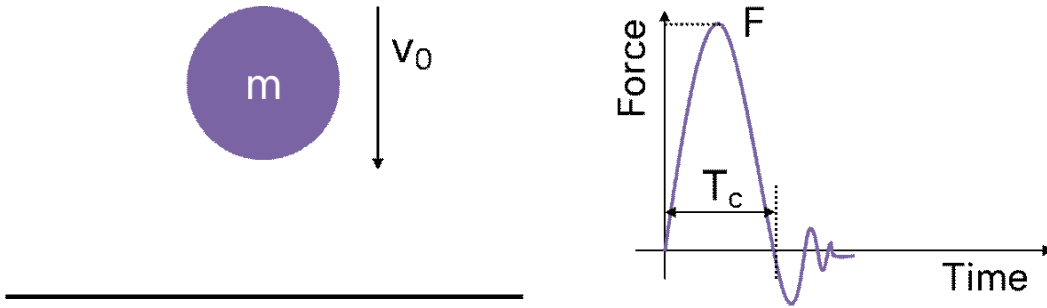
[표 2-2] 바닥충격음 발생 메커니즘과 이론식 요약

단계	계산식
	<p>■ 충격력 : <math>F_i</math></p>
	<p>■ 바닥 마감재의 충격력 : <math>F_f</math></p> $F_f = \frac{\pi}{4} \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} + \frac{\sin \beta}{\beta} \right) F_i$
	<p>■ 바닥 마감재의 충격력 : <math>F_r</math></p> $F_r = \sqrt{\frac{1 + \eta^2 \left( \frac{f}{f_0} \right)^2}{\eta^2 \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 + \left( 1 + \frac{f^2}{f_0^2} \right)^2}} F_f$
	<p>■ 수음실 바닥충격음 : <math>SPL_s</math></p> $\tilde{p}_s^2 = \left( \frac{1.7 \rho_0^2 c_0^2 \sigma_{rad}}{\rho_t^2 h^3 \omega \eta c_l A_0} \right) F_r^2$ $SPL = 20 \log(p_s / p_{ref})$
	<p>■ 천정구조의 소음 저감 : <math>TL_f</math></p> $SPL_f = SPL_s - TL$ $TL_0 = 20 \log(mf) - 47$

## 1) 충격원

### (1) 중량충격원(고무공)

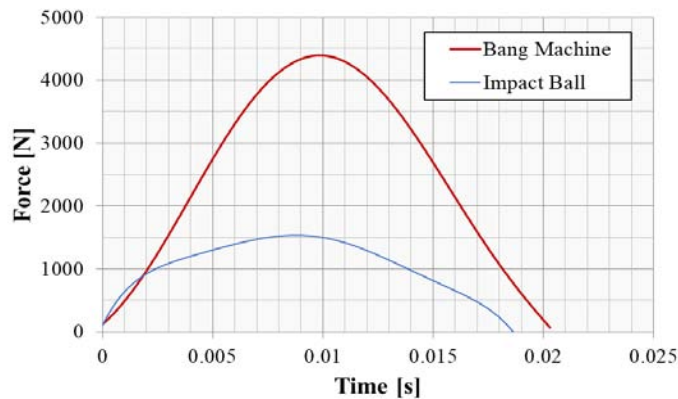
Lyon(1987)은 탄성이 존재하는 충격원의 충격력 특성을 이론적으로 다음과 같이 정의하였다. [그림 2-4]와 같이 질량  $m$ 의 물체가 초기 속도  $v_0$ 로 자유 낙하하는 경우 시간에 따른 충격력을 그림과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 최대 충격력( $F$ )과 접촉시간(지연시간( $T_c$ ))를 이용하여 물체의 충격력 스펙트럼을 식 (1)과 같이 계산할 수 있다. 여기서  $\Omega$ 는  $\omega/\omega_{res}$ 이며,  $\omega_{res}$ 는  $\pi/T_c$ 로 계산할 수 있다<sup>79)</sup>.



[그림 2-4] 고무공에 의한 충격 발생

$$F(\omega) = -\frac{2mv_0}{1-\Omega^2} e^{j\frac{\Omega}{2}} \cos\left(\frac{\pi\Omega}{2}\right) \quad (1)$$

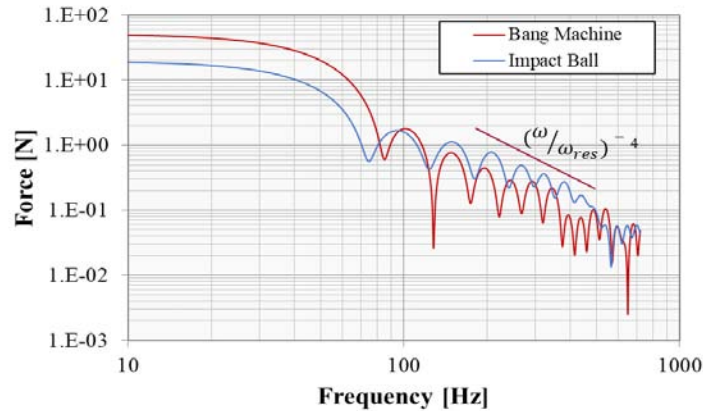
[그림 2-5]는 충격력 측정장치를 이용하여 측정한 표준충격원인 뱅머신과 고무공의 충격력 시간 데이터를 나타낸다.



[그림 2-5] 표준중량충격원의 시간

79) Richard H. Lyon(1987), Machinery noise and diagnostics

그림과 같이 뱅머신의 최대 충격력은 약 4,300N, 고무공은 약 1,600N으로 뱅머신이 약 2.5배 큰 충격력이 존재하며, 충격력 지연시간은 뱅머신이 약 0.0204s, 고무공 약 0.0186s로 존재하였다. 충격력 스펙트럼 분석을 하면 [그림 2-6]와 같다.

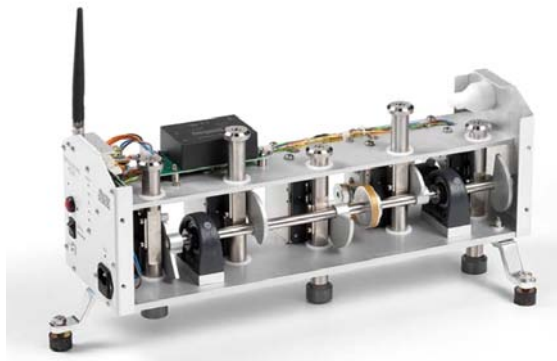


[그림 2-6] 표준중량충격원의 충격력 스펙트럼

이론식과 같이 충격력 지연 시간이 증가하면 충격력은 상대적으로 저주파 대역에 집중되는 반면, 지연 시간이 짧아질수록 충격력이 상대적으로 넓은 주파수 대역으로 분산되는 것을 확인할 수 있다. 즉 동일한 하중 크기의 조건이라도 충격원 지연 시간을 증가시키면, 하중이 분포되어 다양한 중간소음 저감 기술 적용이 가능하다.

## (2) 경량충격원(태핑머신)

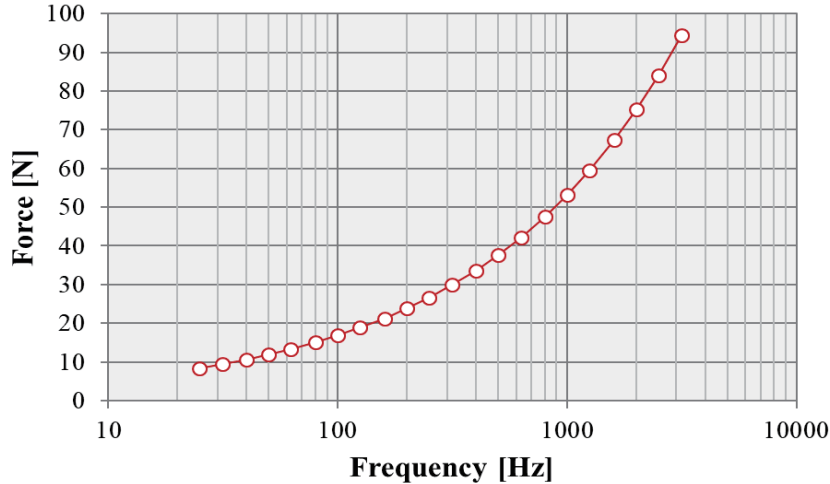
István L. Vér(1971)은 경량표준충격원인 태핑머신의 충격력을 수식으로 정의하였다. 태핑머신에는 [그림 2-7]과 같이 5개의 해머가 하부에 달려 있어 4cm 높이에서 초당 약 10회를 반복적으로 하중을 가한다. 5개의 해머는 총 40cm에서 등간격으로 설치되어 있으며, 각 해머의 질량 0.5kg으로 구성된다.



[그림 2-7] 표준경량충격원: 태핑머신

태핑머신에 대한 하중은 식 (2)를 이용하여 계산할 수 있으며<sup>80)</sup>, [그림 2-8]은 1/3 옥타브 밴드의 충격력 그래프를 나타낸다. 태핑머신은 일정한 하중을 지속적으로 가진하여 정상상태의 바닥 슬래브 진동을 구현하도록 동작한다고 가정할 수 있다.

$$F_s^2 = \frac{4}{\sqrt{2}} f N^2 \quad (2)$$



[그림 2-8] 표준경량충격원의 충격력

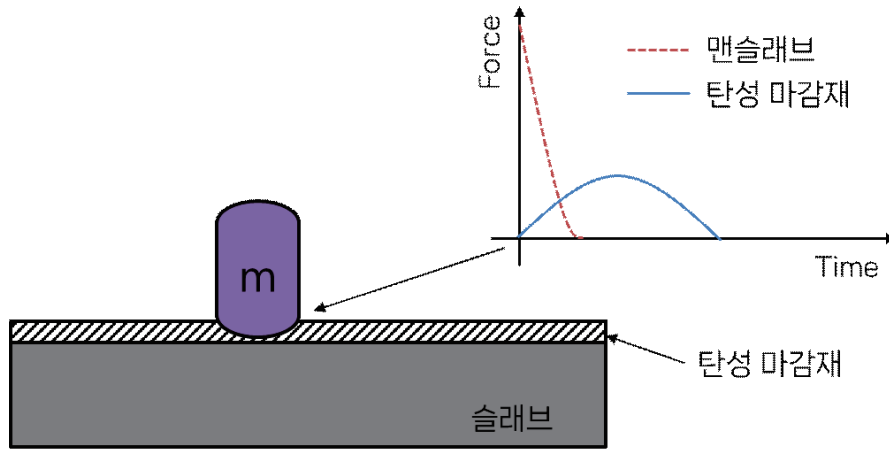
표준중량충격원은 저주파 대역에 하중을 집중되어 있는 반면, 경량충격음의 경우에는 고주파 대역까지 하중이 존재한다. 충격원의 주파수 특성에 따라 고무공을 이용하는 가진 방법의 경우 부드러운 소음이 발생하며, 태핑머신을 이용하는 경우에는 상대적으로 날카로운 소음이 발생한다.

80) Istvan L. Ver(1971). "Impact Noise Isolation of Composite Floors", The Journal of the Acoustical Society of America, 50: 1043~1050.



## 2) 바닥 마감재

[그림 2-9]와 같이 탄성 마감재(Elastic Layer)가 존재하는 바닥 슬래브 상부에 단단한 물체가 낙하하는 경우 충격원의 충격력은 감소된다. 여기서 탄성 마감재에 의한 동탄성계수(Dynamic Stiffness,  $s$ )는 식(3)을 이용하여 계산할 수 있다. 여기서  $E$ 는 마감재의 탄성계수(Young's modulus),  $h$ 는 마감재의 두께,  $A_h$ 는 단단한 물체가 접촉하는 면적(태핑머신의 해머 너비)을 나타낸다.



[그림 2-9] 바닥 마감재 설치에 따른 충격력 변화

$$s = \frac{EA_h}{h} \quad (3)$$

바닥 마감재의 의한 충격력은 식(4)과 같이 다시 계산할 수 있으며, 여기서  $f_0$ 는 식(5)을 이용하여 계산할 수 있다<sup>81)</sup>.

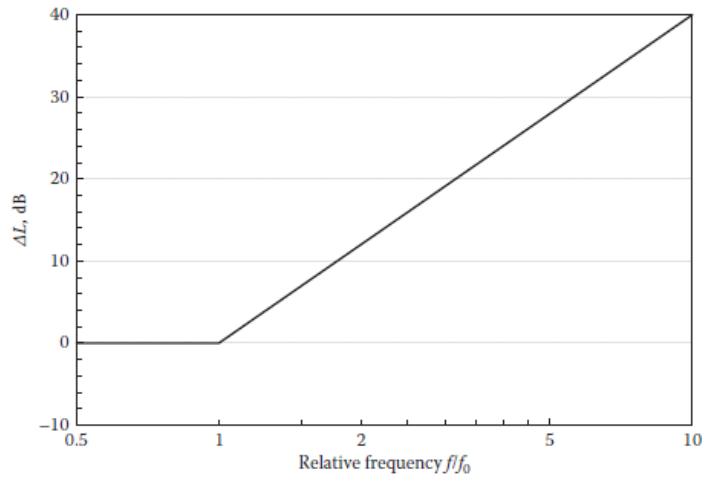
$$F'_n = F_n \frac{\pi}{4} \left( \frac{\sin \alpha}{\alpha} + \frac{\sin \beta}{\beta} \right) \quad \alpha = \frac{\pi}{2} \left( 1 - n \frac{f_r}{f_0} \right), \quad \beta = \frac{\pi}{2} \left( 1 + n \frac{f_r}{f_0} \right) \quad (4)$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{A_h}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{E}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

최종적으로 탄성 마감재 설치에 따른 바닥충격음 저감 효과는 식(6)을 이용하여 계산할 수 있으며, Rindel(2017)은 [그림 2-10]와 같이 주파수 대역에 따른 바닥충격음 저감 효과를 설명하고 있다.

81) Jens Holger Rindel, Sound Insulation in Buildings, CRC Press; 1st edition (November 22, 2017)

$$\Delta L_n = 20 \log \frac{|F_n|}{|F_n'|} = 20 \log \left( \frac{4/\pi}{\sin \alpha / \alpha + \sin \beta / \beta} \right) = 40 \log \left( \frac{f}{f_0} \right) \quad (6)$$



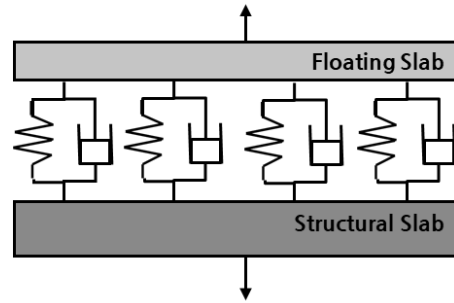
[그림 2-10] 바닥 마감재의 이론적인 소음 감쇠 (Jens Holger Rindel, 2017)

### 3) 바닥구조(완충재)

일반적으로 공동주택에 적용 중인 바닥구조는 [그림 2-11]와 같이 바닥 슬래브와 바닥 상부층(모르타르+경량기포 콘크리트) 사이에 완충재를 포함하여 구성하고 있는 뜬바닥구조로, 여기서 완충재는 공동주택 구조 재료에 비해 탄성계수가 상대적으로 작기 때문에 [그림 2-12]와 같이 1-자유도 진동 시스템의 스프링과 같은 역할을 하게 된다.



[그림 2-11] 일반적인 바닥구조의 구성



[그림 2-12] 1 자유도(1-DOF) 진동 시스템

1 자유도 진동 시스템에서는 1개의 진동 모드가 발생하게 되며, 진동 주파수는 시스템의 질량과 스프링 강성의 비를 이용하여 식(7)을 이용하여 계산할 수 있다<sup>82)</sup>.

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

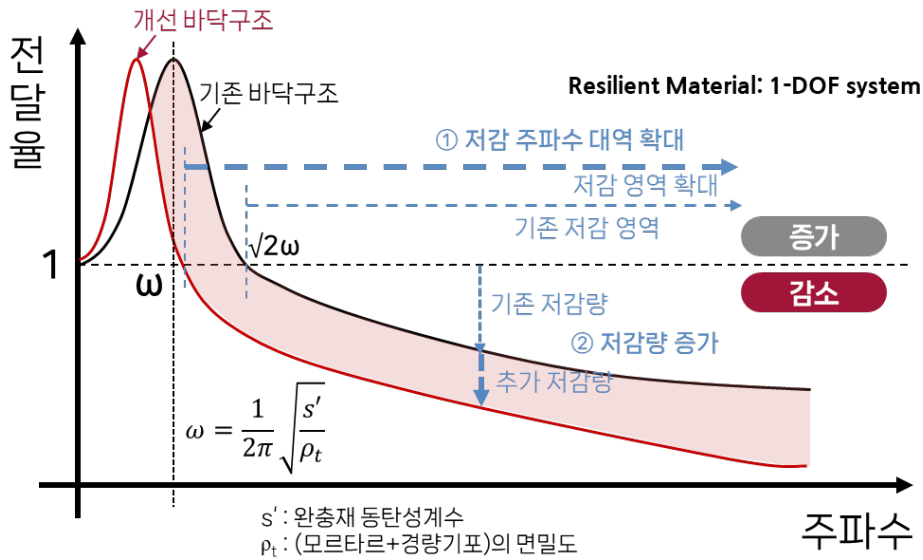
여기서,  $k$ 는 스프링 상수,  $m$ 은 시스템의 질량을 나타낸다. 이러한 진동 특성을 이용하여 KS F 2868에서는 완충재 상부에 질량을 알고 있는 물체를 올려놓고 완충재에 대한 진동 주파수를 측정하여 동탄성계수를 계산한다<sup>83)</sup>. 이 때 완충재의 동탄성계수( $s'$ )는 식(7)을 변형하여 식(8)와 같이 계산할 수 있다.

$$s' = (2\pi f_0)^2 \rho_t \quad (8)$$

여기서,  $f_0$ 는 완충재 진동 모드의 피크 주파수,  $\rho_t$ 는 완충재 상부 구조물의 면밀도를 나타낸다. 면밀도는 단위 면적당 질량을 의미하며, 재료의 밀도에 구조물 두께를 곱하여 계산할 수 있다.

82) Daniel J. Inman(2015), Engineering Vibrations 4<sup>th</sup> edition, Pearson Education Limited

83) KS F 2810-2(2022), 건축물의 바닥충격음 차단성능 현장 측정방법 - 제2부: 표준 중량 충격원에 의한 방법



[그림 2-13] 뜬바닥구조의 에너지 전달율 그래프

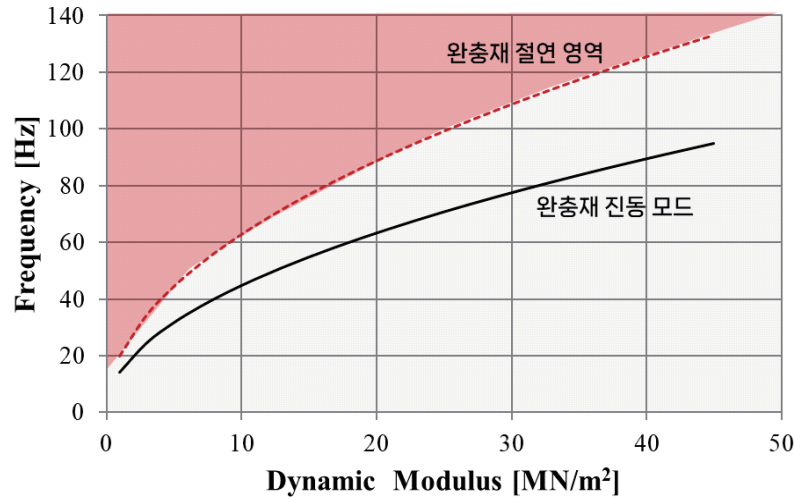
1 자유도 진동 시스템에서 에너지 전달율(Transmissibility)은 [그림 2-13]과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 완충재의 고유진동수( $\omega$ )의 1.4배 지점부터 에너지가 저감된다. 이는 방진시스템 종류 중 절연기(Isolator)라 하며, 바닥충격음의 경우 경량 충격음 저감에 효과가 있음을 의미한다. 반면 완충재 진동 모드가 존재하는 대역에서는 충격력이 입력 신호 대비 증가하게 되며, 이를 공진(Resonance)이라 한다.

황재승(2010)은 완충재에 의한 중량충격음 증폭 현상을 실험적으로 분석하였으며<sup>84)</sup>, 효과적인 바닥충격음 저감을 위해서는 바닥 슬래브 진동 특성을 고려한 뜬바닥구조의 설계가 요구됨을 의미한다. 이론적으로 완충재의 진동 모드를 측정 대역 이전 주파수 대역으로 이동시켜 중량충격음 증폭 현상을 방지할 수 있으며, 동탄성계수가 작은 완충재를 적용하거나, 상부 구조의 질량을 증가시키는 방안이 존재할 수 있다.

모르타르의 밀도를  $2,162\text{kg/m}^3$ , 경량기포 콘크리트의 밀도를  $1,000\text{kg/m}^3$ 으로 가정하여 동탄성계수 변화에 따른 일반적인 뜬바닥구조의 완충재 진동 모드를 계산하면 [그림 1-9]와 같이 나타낼 수 있다.  $7\text{MN/m}^3$ 의 완충재의 경우 완충재 진동 모드가  $37.5\text{Hz}$ 에 존재하며, 절연 작용으로 충격력이 감소되는 영역은  $52.4\text{Hz}$ 부터 가능하다. 중량충격음 측정 대역을 고려한다면 약  $40\text{Hz}$ 에서  $52\text{Hz}$ 까지는 완충재

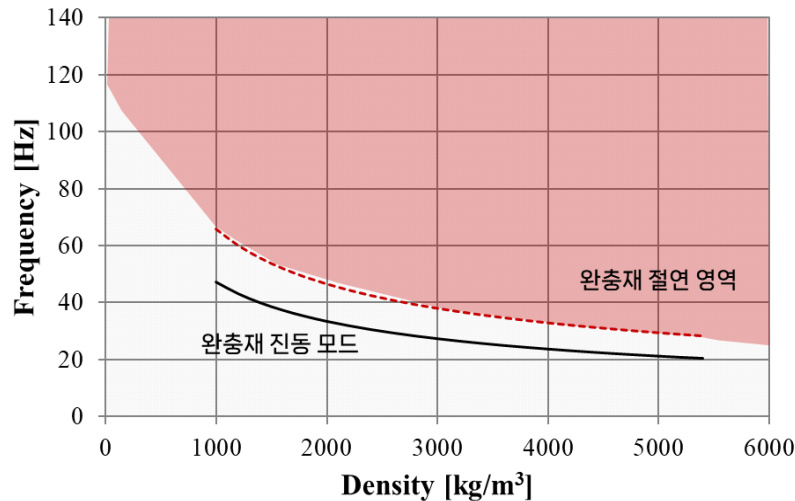
84) 황재승, 문대호, 박홍근, 홍성걸, 홍건호(2010), “완충재의 동특성에 따른 중량충격음 증폭에 관한 해석적 연구”, 한국소음진동공학회논문집, 20(7): 651~657.

의 공진현상으로 인해 충격원의 크기 대비 큰 바닥충격음이 발생할 수 있음을 의미한다. 따라서 완충재의 동탄성계수가 낮을수록 절연 가능한 주파수 대역이 중량충격음 측정 대역에서 벗어나기 때문에 바닥충격음 저감에 효과적이다.



[그림 2-14] 완충재 동탄성계수 변화에 따른 공진 주파수 변화

반대로 완충재의 동탄성계수를  $7\text{MN/m}^3$ 으로 고정하고, 상부층의 질량에 변화에 따른 완충재 공진 주파수와 저감 주파수 영역을 계산하면 [그림 1-10]와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 상부층의 밀도는 경량기포 콘크리트 콘크리트와 모르타르가 각 40mm씩 시공되는 경우 총 80mm에 대한 평균 밀도로 계산하였다.



[그림 2-15] 상부층 평균 밀도 변화에 따른 공진 주파수 변화

만약 경량기포 콘크리트를 삭제하고 모르타르를 80mm로 시공한다면 완충재 진동 모드는 31.7Hz, 절연 가능한 주파수는 약 44.4Hz에 해당하여 일반적인 바닥구조 대비 완충재 진동 모드(37.5Hz)는 약 6Hz 감소하며, 절연 가능한 주파수(52.4Hz)는 8Hz 감소하게 된다. 이때 중량충격음 측정 대역이 약 44Hz부터 시작하기 때문에 완충재에 의한 소음 증폭 현상을 방지할 수 있다.

이러한 완충재 진동 모드의 변화는 [그림 1-8]과 같이 절연 가능한 주파수 대역을 증가시키기 때문에 상대적인 바닥충격음 저감 효과를 기대할 수 있으며, 최근 고중량 모르타르 적용과 같이 상부층 밀도를 증가시키는 방법도 이에 해당된다.

Cremer<sup>85)</sup>는 완충재를 포함한 뜬바닥구조의 바닥충격음 저감 효과를 완충재 진동 모드의 비로 식(9)와 같이 단순 식으로 정리하였다. 여기서 상부층의 구조는 무한한 크기의 평판과 같이 잔향 진동이 존재하지 않는 조건으로 상부 구조에 가해진 충격력이 바닥 슬래브로 즉시 전달되는 경우에 해당한다.

$$\Delta L_n = 20 \log \left[ 1 + \left( \frac{f}{f_1} \right)^2 \right] \approx 40 \log \left( \frac{f}{f_1} \right) \quad (9)$$

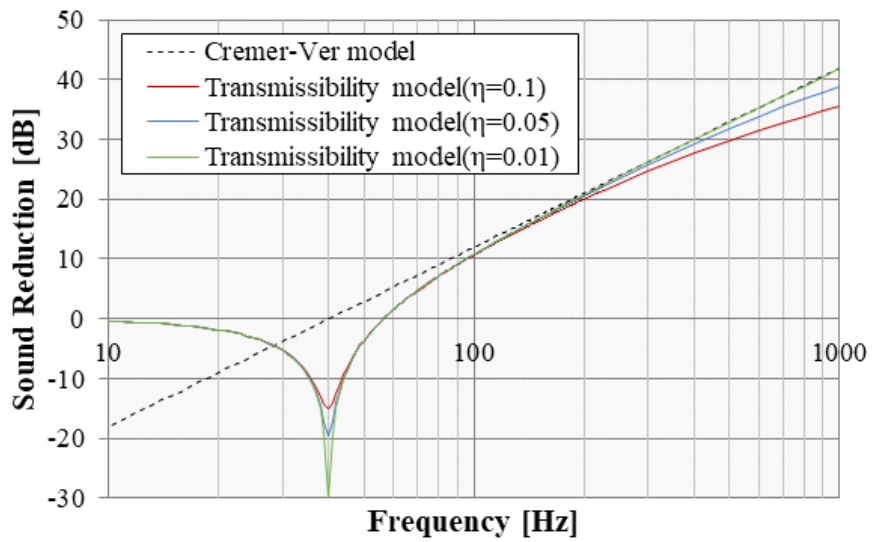
Hopkins[14]는 Cremer의 모델을 더 발전시켰으며, Ver[15, 16]에 의해 고도화된 Cremer-Ver model<sup>86)</sup>이 현재까지 여러 실험식을 보완하여 검증이 수행되었다 [17-29]. 최근에는 바닥구조의 방진 작용으로 인한 충격력 변화를 이용하여 수식이 고도화되어 Transmissibility model이 제시되었으며, 식(10)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\Delta L = 15 \log \left[ \sqrt{\frac{1 + \eta^2 \left( \frac{f}{f_0} \right)^2}{\eta^2 \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 + \left( 1 + \frac{f^2}{f_0^2} \right)^2}} \right] \quad (10)$$

[그림 2-16]은 기존 Cremer-Ver model과 Transmissibility model을 이용한 바닥 충격음 저감량 근사치 결과를 나타낸다.

85) Istvan L. Ver(1971). "Impact Noise Isolation of Composite Floors", The Journal of the Acoustical Society of America, 50: 1043~1050.

86) Alessandro Schiavi(2018), "Improvement of impact sound insulation: A constitutive model for floating floors", Applied Acoustics, 129: 64~71.



[그림 2-16] 뜬바닥구조의 바닥충격음 저감 이론식

기존 수식 대비 전달율 모델은 완충재의 진동 모드를 더욱 정밀하게 묘사할 수 있으며, 바닥충격음의 증폭과 저감 영역을 실제 현상과 가장 유사하게 표현할 수 있는 것으로 판단된다.

#### 4) 바닥 슬래브 진동 및 닫힌 공간의 소음

진동하는 구조물의 표면에 존재하는 공기는 구조물 진동에 의해 진동하게 되며, 공기의 진동은 사람이 소음으로 인식하게 된다. 이와 같이 구조물의 진동으로 소음이 발생하는 현상을 음향 방사(Acoustic Radiation)라 한다.

무한한 크기의 평판에서 발생하는 소음의 세기(음향 파워)는 식 (11)로 계산할 수 있다<sup>87)</sup>.

$$W_{rad} = \langle v \rangle^2 \rho_0 c_0 A \sigma_{rad} \quad (11)$$

여기서  $\nu$ 는 평판의 공간 평균 진동 속도(Space-average mean-squared transverse velocity),  $\rho_0$ 는 공기의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $c_0$ 는 공기의 음속(m/s),  $A$ 는 판의 면적(m<sup>2</sup>),  $\sigma_{rad}$ 는 방사효율(Radiation Efficiency)을 나타낸다.

$$\langle v \rangle^2 = \frac{G_{dp}}{\omega \eta \rho_t A} F^2 \quad (12)$$

무한한 크기의 평판의 진동 속도  $\nu$ 는 식 (12)를 통해 계산할 수 있으며<sup>88)</sup>, 여기서  $\eta$ 는 손실계수(loss factor),  $\rho_t$ 는 평판의 면밀도,  $A$ 는 판의 면적을 나타낸다.  $G_{dp}$ 는 가진점에서의 모빌리티(Driving point mobility)를 나타내며, 식 (8)을 이용하여 계산할 수 있다<sup>(11)</sup>.

$$G_{dp} = \frac{1}{8 \rho_t \kappa c_l} \quad (13)$$

결과적으로 무한한 평판에서 방사된 음향 파워는 식 (11)에 식(12)와 식(13)을 대입하여 식(14)와 같이 단순화 할 수 있다.

$$W_{rad} = \left( \frac{\rho_0 c_0 \sigma_{rad}}{2.3 \rho^2 h^3 \omega \eta c_l} \right) F^2 \quad (14)$$

단, 경계 조건이 존재하는 유한한 평판의 경우에는 정재파(Standing wave)에 의한 진동 현상이 존재하게 되기 때문에 식 (12)의 평판 진동 속도 계산하기에는 한계가 존재한다. 따라서 실제 대상 구조물의 진동을 측정하거나, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 정밀한 진동 분석이 요구된다. 단, 경량충격음과 같이 고주파 대역을 분석하

87) Lyon, R. (1987). Machinery noise and diagnostics, Boston, London, Durban: Butterworths.

88) Istvan, L., Beranek, L.(1992), Noise and vibration control engineering: principles and applications, Wiley.



는 경우에는 모드 밀도가 충분하기 때문에 무한한 평판으로 가정할 수 있으며, 이 때에는 해당 식을 이용한 평판의 진동 속도 근사치 분석은 가능하다.

닫힌 음향 공간의 손실 파워( $D_{i \text{ power}}$ )는 식 (15)과 같이 계산할 수 있다. 여기서,  $p^2$ 은 수음실 공간 평균의 음압레벨(space-average mean-squared sound pressure),  $A_0$ 는 수음실의 흡음력을 나타낸다.

$$W_d = (\tilde{p}^2 / 4\rho c) A_0 \quad (15)$$

만약 무한한 평판에서 발생된 음향 파워가 닫힌 공간으로 완전히 전달되어 에너지 평형이 된다고 가정한다면, 즉 입사된 음향 파워와 음향 공간에서 손실되는 파워가 동일하다고 가정하면, 식(14)와 식(15)을 정리하여 가진력  $F_z$ 에 의한 닫힌 공간의 소음을 식 (16)과 같이 계산할 수 있다.

$$\tilde{p}^2 = \left( \frac{1.7 \rho_0^2 c_0^2 \sigma_{rad}}{\rho_t^2 h^3 \omega \eta c_l A_0} \right) F^2 \quad (16)$$

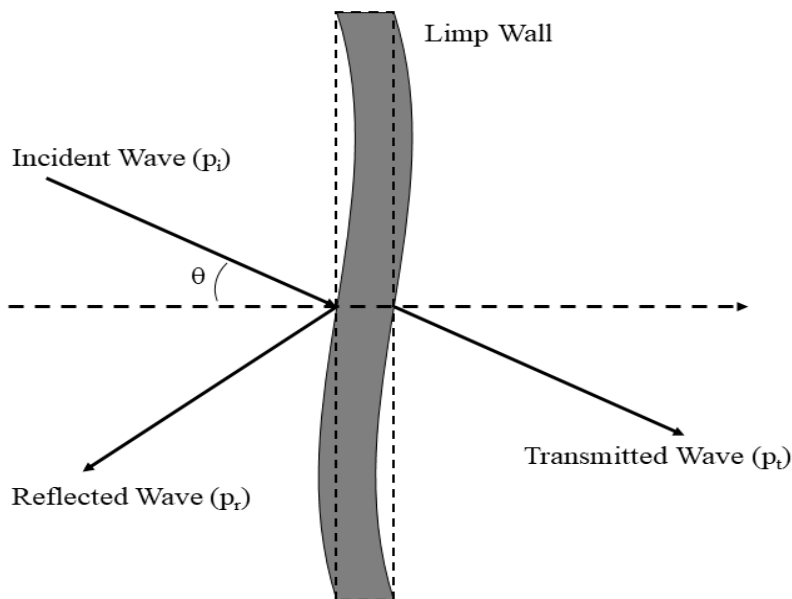
식과 같이 평판에서 방사되는 소음은 밀도의 2승에 비례하며, 평판 두께의 3승에 비례한다. 즉, 바닥충격음을 저감하기 위해서는 콘크리트 슬래브의 두께를 증가시키는 것이 가장 효과적이며, 이론적으로 210mm에서 250mm로 20%를 증가하는 경우 약 2dB 저감 효과를 기대할 수 있다.

## 5) 천정 구조

바닥 슬래브에서 발생된 소음은 천정 구조를 통과하며 소음이 감소하게되며, 이때 바닥충격음과 관련한 천정 구조의 물리적 현상을 차음성능으로 가정할 수 있다<sup>89)</sup>. 단, 천정 구조는 내부 공기층의 공진현상으로 바닥충격음이 증폭될 수 있으며,<sup>90)</sup> 이론적으로 다음과 같이 정리할 수 있다<sup>91)</sup>.

무한한 크기의 평판에 음파가 입사하는 경우 [그림 2-17]과 같이 음파는 구조물 표면에서 반사되는 반사음(Reflected Wave), 구조물을 투과하는 투과음(Transmitted Wave)으로 구분할 수 있다.

여기서, 입사음(Incident Wave)의 세기에 대한 투과음의 세기의 비를 투과율(Transmission coefficient)이라 하며, 투과율을 로그 스케일로 표현하여 차음성능 또는 투과손실(Transmission loss)이라 한다<sup>92)</sup>.



[그림 2-17] 단일 재료로 구성된 무한평판에서의 음의 입사, 반사 및 투과

89) Katsuo Yoshida, Shigeru Hirano (Ohbayashi Corporation T.R.I.), Floor Impact Sound Insulation by Gypsum Board Ceiling, 技術報告 14(4), 1990

90) 조현민 학위논문

91) J. Seidel and K. Hengst (2017). Trittschallminderung und einfügungsdämmung von raumakustik-decken. (Impact sound attenuation and insertion loss of room acoustical ceilings, in German). Proceedings of DAGA 2016, Kiel, Germany

92) 정일록(2005), 소음 진동학, 신광출판사.

이론적으로 무한한 평판에 음의 입사각( $\theta$ )에 따른 차음성능을 이론적으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

[표 2-3] 입사각에 따른 차음성능 이론식

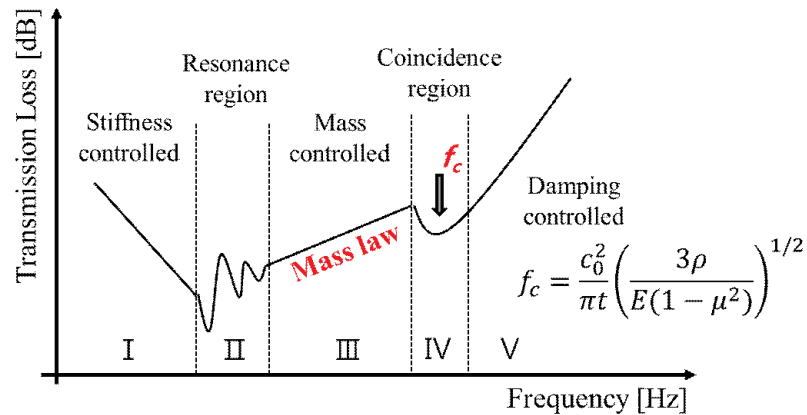
입사음	입사 각도	이론식
수직 입사음	음파가 벽의 수직으로 입사하는 경우	$R_0 = 10\log \left[ 1 + \left( \frac{\omega \rho_s}{2\rho c} \right)^2 \right]$
필드 입사음	음파가 0~78°로 입사하는 경우	$R_{field} = R_0 - 5$
랜덤 입사음	음파가 랜덤하게 입사하는 경우	$R_{random} = R_0 - 10\log(0.23R_0)$

실제 평판은 판의 진동에 의한 차음성능 저하 현상이 존재하며, 식(17)과 같이 유한한 평판의 차음성능을 계산할 수 있다<sup>93)</sup>.

$$TL = 10\log \frac{1}{\tau} \quad (17)$$

$$= 10\log \frac{1}{4} \left[ \left( \frac{\omega m (1 - \omega_0^2/\omega^2)}{Z_0} \right)^2 + \left( 2 + \frac{d}{Z_0} \right)^2 \right]$$

여기서,  $m$ 은 벽의 질량,  $k$ 는 스프링 상수,  $d$ 는 감쇠계수,  $Z_0$ 은 매질의 임피던스,  $\omega$ 은 입사음 주파수(rad/s),  $\omega_0$ 은 판의 공진주파수( $\sqrt{s/m}$ )를 나타낸다. [그림 2-18]은 이론적인 차음성능 그래프를 나타내며, 그림과 같이 차음성능 특징에 따라 5개의 영역으로 구분할 수 있다.



[그림 2-18] 이론적인 차음성능 그래프

93) 김양한(2012), 음향학 강의, 교문사(청문각).

그림에서 I 구역은 평판의 진동 보다 입사파의 주파수가 낮은 영역으로 식 (18)을 이용하여 이론적인 차음성능을 계산할 수 있다. 이 구역은 판의 강성에 의해 차음성능이 결정되는 영역으로 판의 강성이 2배 증가하면 이론적으로 6dB 차음성능 개선 효과를 기대할 수 있다.

$$TL \cong 20 \log \left( \frac{s}{2\omega Z_0} \right) \quad (18)$$

II 구역은 평판의 개별적인 진동 특성이 강하게 존재하는 영역으로 평판의 진동 주파수와 입사파의 주파수가 일치하는 경우 차음성능이 저하되는 공진 현상이 존재한다. 이러한 공진 현상으로 인한 차음성능 저하 현상을 최소화 하기 위해서는 평판의 진동을 저감할 수 있도록 충분한 감쇠계수가 요구된다. 이론적인 차음성능은 식 (19)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$TL \cong 20 \log \left( 1 + \frac{r_d}{2} Z_0 \right) \quad (19)$$

III 구역은 평판의 진동 모드가 충분히 존재하여 개별적인 진동을 무시할 수 있는 영역으로 판의 질량이 차음성능을 결정한다. 이론적으로 평판의 두께가 2배 증가하거나, 주파수가 2배 증가하면 6dB의 차음성능 개선 효과를 기대할 수 있다. 이를 질량법칙(Mass Law)라 한다. 일반적인 공동주택 차음성능, 경량충격음의 경우에는 모드 밀도가 충분한 대역을 측정하기 때문에 해당 영역에 해당된다고 가정할 수 있다.

$$TL \cong 20 \log \left( \frac{\omega m}{2Z_0} \right) \quad (20)$$

IV 구역은 공기의 음속과 판의 진동 주파수가 일치하는 영역으로 입사파의 주파수와 벽체의 굽힘 주파수가 일치하면 공진상태가 되어 차음성능이 크게 저하된다. 이를 일치 주파수(coincidence frequency)라 하며, 식 (21)을 이용하여 이론적으로 계산할 수 있다.

$$f_c = \frac{c_0^2}{\pi t} \left( \frac{3\rho}{E(1-\mu^2)} \right)^{1/2} \quad (21)$$

여기서  $c_0$ 는 공기의 음속,  $t$ 는 벽 두께,  $E$ 는 재료의 영계수,  $\rho$ 는 재료의 밀도,  $\mu$ 는 재료의 포아송비를 나타낸다<sup>94)</sup>.

V 구역은 일치 주파수 이후의 고주파수 대역으로 차음성능이 급격하게 증가하는

영역으로 댐핑에 의해 결정된다.

일반적인 천정 구조의 경우 천정 마감재의 차음 효과도 존재하지만 천정 구조 내의 공기층이 존재하기 때문에 공명 현상으로 인한 소음 증폭 현상이 존재할 수 있다. 공명 주파수는 식(22)로 계산할 수 있으며, 여기서  $\rho_t$ 는 천정 마감재(석고보드)의 면밀도,  $d$ 는 공기층의 두께를 의미한다<sup>95)</sup>.

$$f_{Ceiling,0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(\rho_0 c_0)^2}{\rho_t d}} \quad (22)$$

일반적인 천정 높이는 벽식 구조 기준 180mm 이내로 공명 주파수는 1/1 옥타브 밴드의 63Hz에 존재한다. 따라서 벽식 구조의 경우에는 천정 설치에 따른 바닥충격음 증폭 현상이 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다. 단, 천정 내부의 공명 현상은 흡음재를 삽입하여 억제할 수 있기 때문에 선행 연구 결과와 같이 천정 내부 흡음재 삽입을 통해 제어할 수 있다.

반면, 기둥식 구조는 천정 높이가 290mm 이내로 공명 주파수는 1/1 옥타브 밴드의 31.5Hz에 존재하기 때문에 상대적으로 벽식구조 대비 천정에 의한 증폭 현상 영향이 적으며, 공기층이 증가하여 차음성능 개선 효과도 존재할 수 있다.

94) Fundamentals of acoustics 4th edition, Lawrence

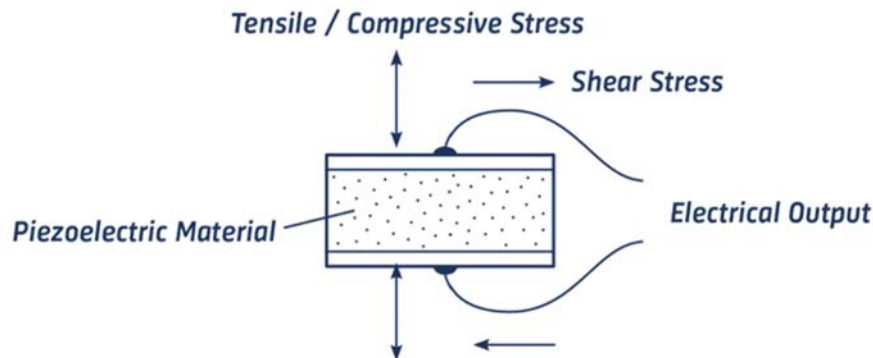
95) J. Seidel and K. Hengst (2017). Trittschallminderung und einfügungsdämmung von raumakustik-decken. (Impact sound attenuation and insertion loss of room acoustical ceilings, in German). Proceedings of DAGA 2016, Kiel, Germany

## 2. 2. 바닥 슬래브의 진동 측정

### 1) 진동 측정 센서 선정

구조물의 진동을 측정하기 위해서는 가속도 측정 센서가 요구되며, 일반적으로 사용되고 있는 가속도계는  $F=ma$  식에 따라 센서 내부의 질량체(m)에 가해지는 힘에 대한 변화를 계측하여 가속도를 측정한다. 변화를 감지하는 방식에 따라 스트레인 게이지(Strain Gage) 방식, 정전용량(Capacitive) 방식, 압전(Piezoelectric) 방식 등이 존재하며, 일반적으로 측정 주파수, 동적 범위 등이 우수한 압전형 가속도계(Piezoelectric Accelerometer)가 사용된다.

압전형 가속도계는 내부에 [그림 2-19]와 같이 압전 소자가 존재하고, 압전 소자는 질량체에 의한 압축 등 기계적인 응력을 받으면 적용된 힘에 비례하는 전하를 생성한다. 압전 소자가 힘을 받는 방식에 따라 압축형과 전단형이 존재하며, 일반적으로 압축형 가속도계를 사용한다. 압축형 가속도계의 내부는 [그림 2-20]와 같다.

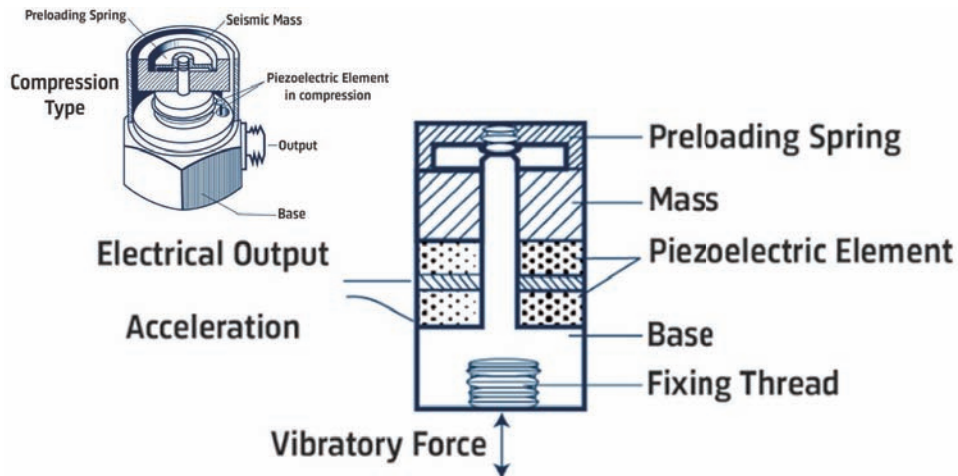


[그림 2-19] 압전형 가속도계의 압전 소자 (자료: B&K)

출력 신호의 방식에 따라 전하(Charge) 타입과 전압(Voltage) 타입으로 구분되며, 전하 타입의 경우에는 별도의 증폭기(Amplifier)가 외부에 존재하기 때문에 고온 환경 또는 상대적으로 먼거리의 신호 측정에 유리하다. 전압 타입의 경우에는 센서 내부에 전기 신호를 전압으로 변환하는 트랜스듀서(Transducer)가 존재하여, 비교적 간단한 실험 환경 구성의 장점이 존재한다.

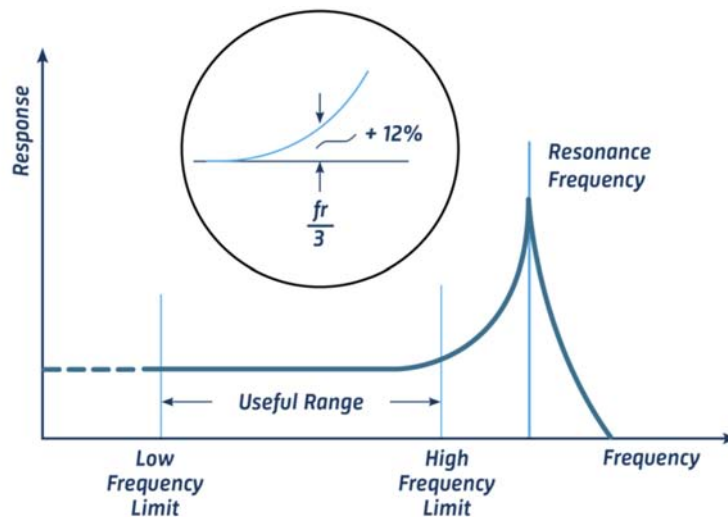
여기서, 물리량에 대한 출력 전압의 비를 감도(Sensitivity)라 하며, 일반적으로 10mV/g 또는 100mV/g 감도의 가속도계를 이용한다. 예를 들어 10mV/g 감도의 가속도계는 1g의 가속도를 10mV의 출력 전압으로 발생시킨다. 감도는 측정 신호

의 최대 크기(Measurement Range)와 최대 크기의 간격을 구분하는 분해능(Resolution)을 결정하는 주요 요소이다. 일반적인 측정 센서는 5V의 출력을 사용하기 때문에 10mV/g 감도의 가속도계의 경우 최대 크기는 500g로 결정된다. 반대로 최대 크기가 낮을수록 분해능은 상대적으로 증가할 수 있다.



[그림 2-20] 질량이 피에조 일렉트로닉스 소자에 압축력을 가하는 압축형 (자료: B&K)

일반적인 가속도계는 스프링-질량 시스템을 이용하여 가속도를 측정하기 때문에 가속도계 내부 시스템의 공진으로 인해 고주파수에서는 [그림 2-21]와 같이 감도가 증가하여 진동 측정이 불가능하다. 따라서 가속도계의 질량 등에 따라 측정 가능한 주파수 범위가 다르기 때문에 가속도계를 선정하는 경우 측정 진동 주파수 대역, 동적 범위 등에 따른 가속도계 선정이 요구된다.



[그림 2-21] 가속도계의 감도 선형성과 측정 주파수 대역 (자료: B&K)

따라서, 가속도계를 선정하는 경우 측정 대상 구조의 진동 특성에 따라 [표 2-4]와 같이 동적 범위, 주파수 응답, 감도, 분해능 등을 고려하여 한다.

[표 2-4] 가속도계의 선정

항 목	설 명
동적 범위 (Dynamic Range)	· 가속도계가 측정 가능한 $\pm$ 최대 진폭
주파수 응답 (Frequency Response)	· 가속도계가 측정 가능한 주파수 범위 · 가속도계 감도 선형성, 질량, 공명 주파수 등에 따라 결정
감도 (Sensitivity)	· g 단위로 측정된 힘에 의하여 생성된 출력 전압의 비율 · 일반적으로 낮은 민감도 가속도계는 높은 진폭 신호 측정, 높은 민감도 가속도계는 낮은 진폭 신호를 측정
분해능 (Resolution)	· 측정된 신호의 크기를 구분할 수 있는 사이즈 · 신호의 변화가 큰 경우 높은 분해능이 요구

중량충격음의 경우 측정 주파수 대역이 약 40~700Hz인 반면, 충격력의 변화가 크기 때문에 넓은 동적 범위와 분해능이 요구된다. 반면, 경량충격음의 경우에는 약 80~3,600Hz까지의 넓은 주파수 대역의 감도 선형성이 요구되지만, 상대적으로 작은 동적 범위가 요구된다.

따라서 [그림 2-22]과 같이 충격원 특성, 주파수 범위 등을 고려한 가속도계를 선정하거나 범용적으로 적용할 수 있는 가속도계를 선정하는 것이 정밀한 바닥 슬래브 진동 분석을 위해 요구된다.

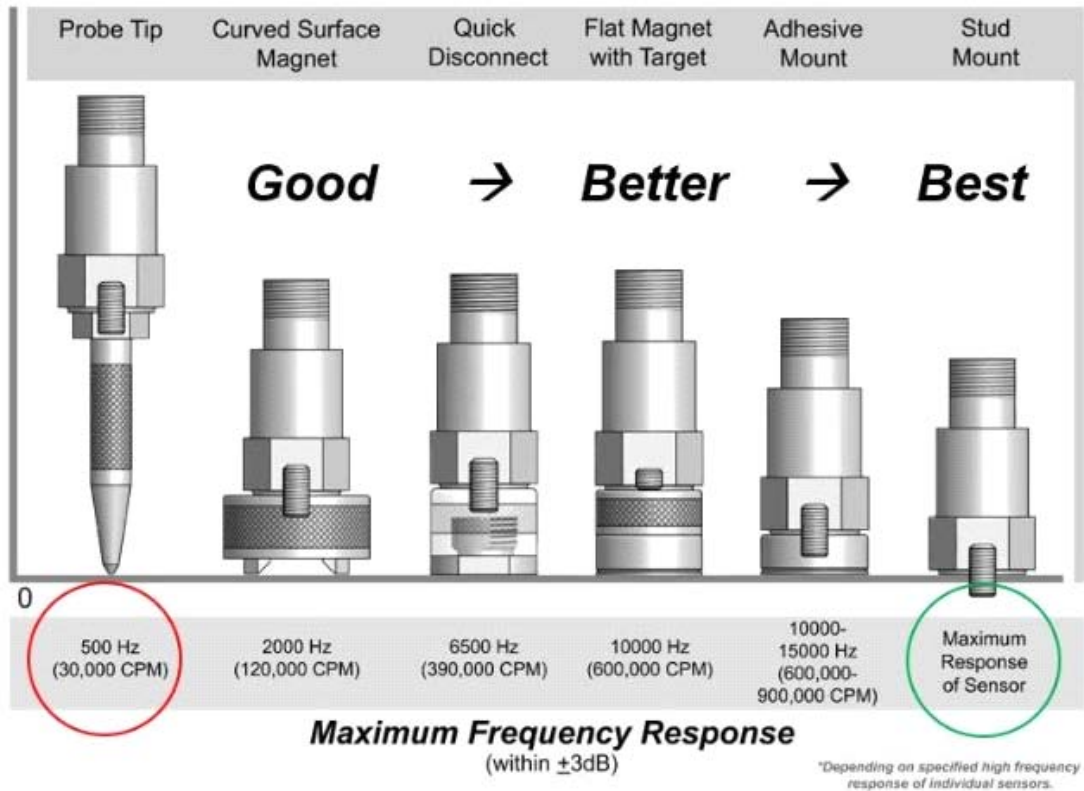
Performance			중량충격원	중량/경량충격원
Sensitivity (±5%)	10.0 V/g	—	—	100 mV/g
Sensitivity (±10%)	—	1000 mV/g	10 V/g	—
Measurement Range	0.5 g pk	±5 g pk	0.5 g pk	±50 g pk
Frequency Range (±5%)	0.1 to 200 Hz	0.06 to 450 Hz	0.7 to 450 Hz	1 to 4000 Hz
Frequency Range (±10%)	0.07 to 300 Hz	0.05 to 750 Hz	0.5 to 750 Hz	0.7 to 7000 Hz
Frequency Range (±3dB)	—	—	0.2 to 1700 Hz	0.35 to 12000 Hz
Resonant Frequency	≥700 Hz	≥2300 Hz	≥2500 Hz	≥22 kHz
Broadband Resolution	0.000001 g rms	0.000003 g rms	0.000004 g rms	—
Non-Linearity	≤1 %	≤1 %	≤1 %	≤1 %
Transverse Sensitivity	≤5 %	≤5 %	≤5 %	≤5 %
Environmental			진동 크기 고려	주파수 대역 고려
Overload Limit (Shock)	172.20, 102.234 / 2024-09-21 ±40 g pk	±300 g pk	±300 g pk	±10000 g pk
Temperature Range	-15 to +150 °F	-15 to +176 °F	-15 to +176 °F	—
Base Strain Sensitivity	≤0.0005 g/μs	≤0.0005 g/μs	≤0.0005 g/μs	0.0002 g/μs
Temperature Range (Operating)	—	—	—	-65 to +250 °F

[그림 2-22] 가속도계의 사양 예시(P사)



## 2) 센서 설치 방법

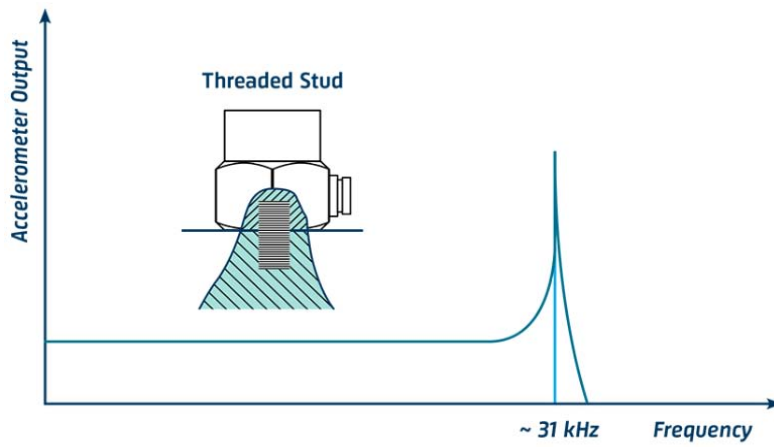
바닥 슬래브의 정밀한 진동 측정을 위해서는 가속도계의 선정과 함께 가속도계 설치 방법에 대한 고려도 요구된다. [그림 2-23]은 가속도계 설치 방법에 따른 측정 가능 주파수 대역을 나타낸다<sup>96)</sup>.



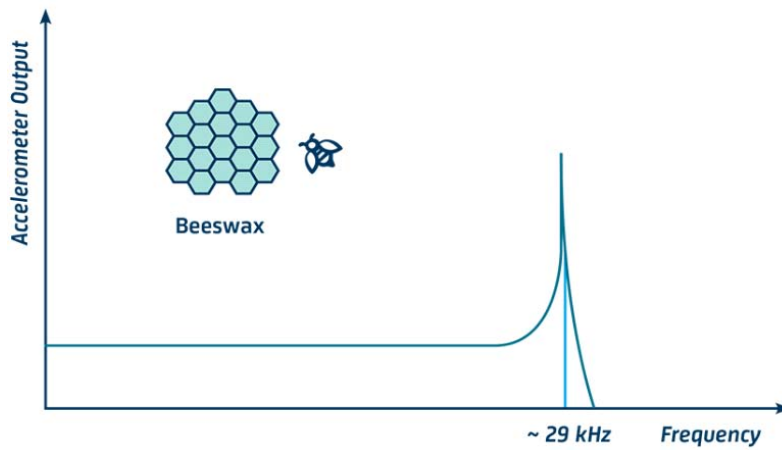
[그림 2-23] 가속도계 설치 방법에 따른 최대 측정 가능 주파수<sup>96)</sup>

그림과 같이 정밀한 신호 측정을 위해서는 평평하고 매끄러운 표면에 나사선 스티드를 사용하는 것이 이상적인 방안이나, 스티드를 깊게 설치하여야 하기 때문에 대상 구조물의 훼손 등이 발생할 수 있다. 따라서 [그림 2-24]와 같이 밀랍층 또는 본딩을 이용하여 가속도계를 설치하며, 그림과 같이 스티드 대비 유사한 정밀도를 요구할 수 있는 것을 예상할 수 있다.

96) [https://www.caskorea.co.kr/shop/item.php?it\\_id=1627201630](https://www.caskorea.co.kr/shop/item.php?it_id=1627201630)



(a) 스터드 형식의 가속도계 설치에 따른 주파수 응답 특성



(b) 본딩 방식

[그림 2-24] 가속도계 설치 방법에 따른 주파수 응답 특성 (자료: B&K)

따라서 스터드 설치 보다는 임시적으로 센서를 설치할 수 있도록 얇은 밀랍 층 또는 현장에서는 밀착 부착을 위해 본당을 통해 가속도계 설치를 제안한다.

### 3) 바닥 슬래브 진동 측정 방법

표준충격원에 대한 바닥 슬래브의 진동을 측정하는 국가 표준 시험 방법은 존재하지 않지만, 바닥충격음 시험 방법인 KS F ISO 16283-2에 의거하여 다음과 같이 바닥 슬래브 진동 시험 방법을 정리하였다.

거실 공간의 모서리 4지점(750mm 이격, 20m<sup>2</sup> 이하인 경우에는 500mm)과 중앙 지점을 각각 가진하고, 하부층의 가진 위치와 동일한 위치의 총 5개 지점에 가속도계를 설치하여 슬래브의 공간 평균 진동을 측정한다.

#### (1) 가속도계 설치 위치

가속도계의 설치 위치는 [그림 2-25]와 같이 수음실의 마이크로폰 설치 위치(모서리 4개지점, 중앙 지점)와 동일하게 바닥 슬래브 하부면에 설치한다. [그림 2-25(b)]는 바닥 슬래브 하부에 설치된 가속도계 설치 예시를 나타낸다.

가속도계 설치 방법은 스티드를 이용하는 것이 이상적이지만, 신속한 실험 및 구조물의 훼손을 최소화 하기 위해 비교적 표면이 평평한 슬래브 하부면에 접착제 등을 이용하여 밀착하여 부착한다. 이 때 가속도계의 방향은 바닥 슬래브에 최대한 수직할 수 있도록 부착한다.



(a) 가속도계 설치 위치



(b) 슬래브 하부에 설치된 가속도계

[그림 2-25] 바닥 슬래브 진동 측정을 위한 가속도계 설치

## (2) 표준충격원을 이용한 바닥 슬래브 가진

바닥 슬래브 가진은 바닥충격을 실험과 동일하게 표준충격원을 이용하여 5개 지점을 각각 가진한다. 단, 태핑머신을 이용하는 경우에는 진동 센서의 오버로드가 발생할 수 있기 때문에 해당 센서의 감도를 조정하는 것을 제안한다.



(a) 가속도계 설치 위치



(b) 슬래브 하부에 설치된 가속도계

[그림 2-26] 바닥 슬래브 진동 측정을 위한 가속도계 설치

## (3) 바닥 슬래브 진동 측정

공동주택 바닥충격음은 일반적으로 1/3 옥타브 밴드로 측정한다. 따라서 바닥 슬래브의 진동도 1/3 옥타브 밴드로 측정할 수 있으나, 스펙트럼으로 분석하는 것이 바닥 슬래브의 고유진동수, 재료 물성 분석 등에 활용이 가능하기 때문에 본 연구에서는 스펙트럼 분석을 선행적으로 수행하고 옥타브 밴드로 변환을 제안한다

일반적으로 공동주택 시공 중인 현장은 잔향시간이 2s, 주방 가구 등이 설치된 준공 조건의 공실의 잔향시간은 1s 이내로 존재한다.

반면, 구조물의 댐핑은 수음실 공간 대비 크게 존재하며, 구조물 잔향시간은 0.2s 이내로 존재한다. 이와 관련하여 신호의 감쇠도 빠른 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 맨슬래브 조건의 바닥충격음 분석을 선행적으로 수행하기 때문에 2s의 샘플데이터를 권장하며, 샘플링 타임은 경량충격음 분석을 위해 약 0.1ms를 제안한다.

바닥 슬래브 진동 측정은 바닥 슬래브 하부에 가속도계를 설치하며, 가진 조건 및 위치는 KS F ISO 16283에서 마이크론 위치와 동일하도록 선정하도록 한다.

#### 4) 바닥 슬래브 진동 측정 시기 및 공정 영향

LH 주택건설공사 공사기간 산정지침에 따르면 작업일수는 습식마감공사 125일, 건식마감공사 30일로 총 155일을 기준으로, 비작업일수를 추가하여 최종 마감공사 기간을 산정하게 된다.

155일에 해당하는 공사는 공동주택 건설공사의 품질확보를 위한 표준공사기간 산정기준 연구(2014), LH 주택건설공사 공사기간 산정기준 연구(2019), LH 주택건설공사 공사기간 산정기준 고도화 연구(2023)에 따르면 견출/떡매김, 조적공사, 창호공사(1), 벽체미장, 단열공사, 경량칸막이, 경량기포 콘크리트, 난방코일/방바닥 미장, 타일공사, 천정/수장공사, 가구공사, 도배공사, 주방/가구(2), 마루공사, 기구취부, 기타공사 16개의 공정으로 구성되어 있다. [그림 2-27]의 16개 공종은 공사기간에 직접적으로 영향을 주는 CP이며, 이는 F-S 관계의 Logic으로 구성되어 있다.



[그림 2-27] 마감공사 표준 공정흐름

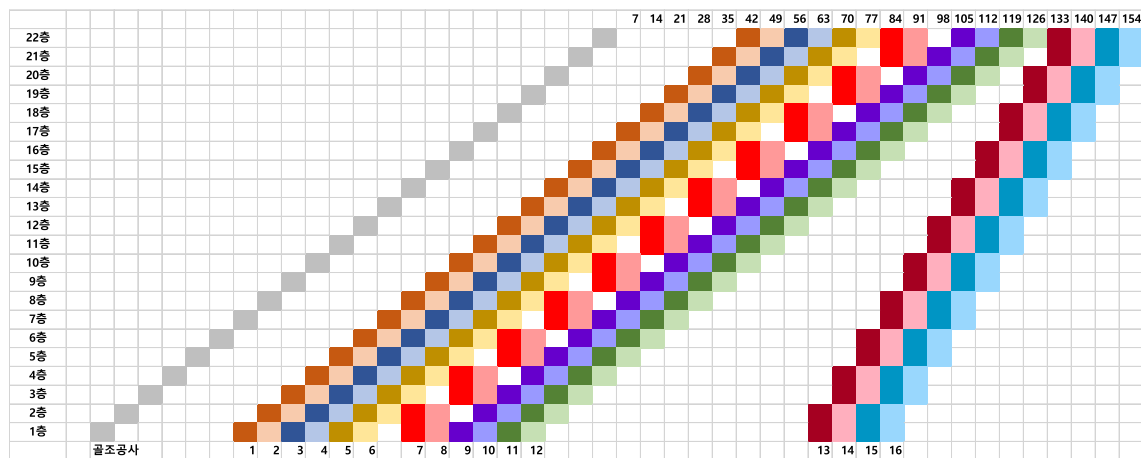
여기서, 경량기포 공사를 기준으로 견출/떡매김에서부터 경량 칸막이 공사까지는 경량기포 선행공사로, 타일공사에서부터 기타공사까지는 경량기포 후행공사로 구분하고 있다. 그림과 같이 경량기포 선행공사는 42일, 경량기포 공사는 14일, 경량기포 후행공사는 56일로 공사 기간을 설정하고 있다.

마감공사 공종별 공사기간은 모두 7일이며, 경량기포콘크리트, 바닥미장, 주방/가구, 바닥공사, 기구취부, 기타공사는 2개층 기준, 나머지는 1개층 기준으로 설정되어 있다.

[표 2-5] 마감공사 공종별 공사기간

구분	공종		총당공사기간	비고
1	경량기포 선행공사	건출/먹메김	7일	
2		조적공사	7일	
3		창호공사(1)	7일	
4		벽체미장	7일	
5		단열공사	7일	
6		경량칸막이	7일	
7	경량기포 공사	경량기포 콘크리트	7일	2개층 기준
8		바닥미장	7일	2개층 기준
9	경량기포 후행공사	타일공사	7일	
10		천정/수장공사	7일	
11		창호공사(2)	7일	
12		도배공사	7일	
13		주방/가구	7일	2개층 기준
14		바닥공사	7일	2개층 기준
15		기구취부	7일	2개층 기준
16		기타공사	7일	2개층 기준

경량기포콘크리트 및 바닥미장 공사와 주방/가구, 바닥공사, 기구취부, 기타공사는 2개 층 기준이며, 이외 공사는 1개층을 기준으로 하고 있다. 이를 바탕으로 기본층 수 22층을 기준으로 LOB(Line of Balance)공정표를 작성하면 [그림 2-28]와 같다.



바닥 슬래브 진동 측정을 위한 작업을 실험계획, 바닥 맨슬래브 진동 측정과 미장 후 진동 측정으로 구분하였으며, 진동 측정 기간은 각각 1일로 가정하였다.

하지만 측정 후 측정값이 만족한 결과를 얻지 못한다면 후속 조치를 위해 추가 실험을 수행해야 할 수 있으므로 이에 대한 기간은 작업 방법에 따라 별도로 산정해야 할 것으로 판단된다. 단, 실험 계획은 직접적으로 공사에 영향을 미치는 작업이 아니므로 이는 분석에서 제외하였다.

[표 2-6] 마감공사 공종별 공사기간

구분	작업	총당 작업시간	비고
1	실험 계획	1달	
2	슬라브 진동 측정 및 분석	1일	샘플세대 대상
3	미장 후 진동 측정 및 분석	1일	

측정과 관련한 작업이 후속 공정에 영향을 주는지에 대해 가장 중요한 요소는 후속 작업을 반드시 측정 후 해야 하는지 아니면 측정 작업과 다른 작업을 동시에 수행하는 것이 가능한지가 가장 중요한 요소이다. 측정 작업이 다른 공사와 동시에 수행이 가능하다면 분석이 필요 없다. 단, 측정 후 결과값이 기준에 미달 된다고 하면 조치계획 및 작업을 수행하기 위해서 후행 공정에 대한 작업을 지연시켜야 한다.

바닥 슬래브를 측정한 후에 후속 작업을 수행해야 한다는 가정하에 분석하면 아래와 같다. LH 기준으로 분석을 해보면 골조공사 후 양생기간이 35일로 견줄/먹메김 작업 들어가기전에 맨슬라브를 대상으로 진동 측정 및 분석을 하더라도 공기에 영향을 주지 않는다.

방바닥 미장 후 진동 측정 작업은 마감작업이 연속적으로 수행되고 있는 상태에서 진동을 측정하는 것으로 영향을 주지만 짝수층에 해당하는 마감공사는 방바닥 미장후 7일여유시간이 발생하므로 이를 활용하여 측정한다면 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 위의 결과는 단순 LH의 공기 산정 기준에 의한 것으로 실제 공사와는 다를 수 있다.

“LH 주택건설공사 공사기간 산정 연구”에서 언급하고 있는 실제 마감공사 네트워크 공정표는 [그림 2-29]과 같으며, 이를 활용하여 분석하면 아래와 같다.





것으로 이러한 공중 기준과는 다르게 현장에서는 모든 세대를 대상으로 동시에 작업을 하지 않는다. WBS 기준을 세대 단위 기준으로 하향시킨다면 콘크리트 양생 후 또는 방바닥 미장 후 제일 마지막에 후속 공정을 시작하는 세대를 대상으로 바닥 진동 측정이 가능할 것으로 판단되며, 이는 공기에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

## 2. 3. 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 계산

### 1) 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 계산

본 연구는 시공 단계에서 빠르게 바닥충격음 차단성능 편차를 확인하고 신속한 대응이 가능하도록 바닥충격음 측정 조건이 구성되지 않은 상황에서도 바닥충격음을 분석할 수 있는 방법론 개발을 목적으로 한다.

앞장에서 이론적으로 확인하였듯이 바닥충격음은 바닥 슬래브 진동으로 발생하는 현상이며, 바닥 마감재와 뜬바닥구조에 의한 충격력 변화로 최종 바닥 슬래브 진동이 결정된다.

추가적으로 공동주택 시공 중 바닥 슬래브 재료의 물성, 두께 편차 등의 시공 요인들은 바닥 슬래브 진동 응답을 변경시킬 수 있다. 즉, 이론적인 바닥 슬래브 진동 대비 실제 시공 중 발생할 수 있는 시공 오차 요인들로 인해 최종 바닥 슬래브의 진동 응답과 바닥충격음이 상이할 수 있다. 따라서 동일 단지, 평면에서도 바닥충격음 편차가 존재할 수 있음을 의미한다.

따라서 바닥 슬래브 진동을 이용하여 시공 요인으로 발생할 수 있는 바닥충격음 편차를 분석할 수 있다. 즉, 바닥 슬래브 진동의 편차는 바닥충격음 편차를 의미하며, 바닥 슬래브 진동 측정만을 통해 이상 세대 검출이 가능하다.

ISO 12354-2에서는 다음 식을 통해 바닥 슬래브 진동에 의한 규준화된 바닥충격음(Normalized impact sound Pressure)을 계산할 수 있다. 여기서 바닥충격음은 1/3 옥타브 밴드로 계산 가능하며, 경량충격음 분석 등을 위해 사용되고 있다.

$$L_n = L_F + 10\log(Re(Y)) + 10\log\sigma + 10\log(T_s) - 10\log(m') + 10.6$$

여기서  $L_F$ 는 태핑머신의 충격력 레벨(Force Level, ref  $10^{-6}$ ),  $Re(Y)$ 는 슬래브 모빌리티의 실수부( $T=v/F$ ),  $\sigma$ 는 방사효율,  $m'$ 는 면밀도,  $T_s$ 는 구조 잔향시간을 의미한다.

일반적인 바닥 슬래브의 진동을 이용하여 닫힌 공간의 바닥충격음 예측은 식(16)을 이용하여 이론적으로 계산할 수 있다. 여기에는 바닥 슬래브 진동의 요인은 진동 데이터에 포함되어 있지만 음향 공간에 대한 요인들은 편차가 발생할 수 있다. 단, 해당 연구에서는 동일 단지를 대상으로 이상 세대를 판별하기 위한 방안으로 음향 공간의 크기 및 마감재료는 동일하기 때문에 바닥 슬래브 진동 대비 음향 특

성에 의한 편차는 크지 않을 것으로 예상된다. 다음식은 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측식을 나타낸다.

$$SPL = 20\log(a) + 10\log\sigma + 10\log(A) - 20\log f + 126.25$$

여기서,  $a$ 는 바닥 슬래브의 진동,  $\sigma$ 는 방사 효율,  $A$ 는 방사 면적,  $f$ 는 중심주파수를 나타낸다.

해당 식은 바닥 슬래브 진동만을 이용한 바닥충격음 예측 방법으로, 벽식구조와 같이 내력벽이 존재하는 경우에는 내력벽의 가속도를 포함하여 보다 정밀한 분석이 가능할 것으로 판단된다.

## 2) 바닥구조 시공단계별 바닥충격음 저감식 적용

앞서 맨슬래브의 바닥 슬래브 진동을 이용하여 수음실 공간의 바닥충격음,  $L_n$ 을 계산하였다면, 바닥구조 시공에 따른 바닥충격음 저감 효과를 다음 이론식을 이용하여 계산할 수 있다.

최종적인 바닥충격음은 다음과 같이 정의할 수 있으며, 여기서  $L_{Finishing}$ ,  $L_{Floating}$ ,  $L_{Ceiling}$ 은 각각 바닥 마감재의 소음 저감량, 뜬바닥구조의 소음 저감량, 천정 구조의 소음 저감량을 의미한다. 각 구조의 바닥충격음 저감량은 다음과 같이 이론적으로 계산할 수 있다.

$$L_{Total} = L_n - L_{Floating} - L_{Finishing} - L_{Ceiling}$$

### (1) 완충 구조에 의한 소음 저감

일반적으로 설치되는 뜬바닥구조 형태인 완충재 및 상부구조(경량기포 콘크리트+모르타르)를 적층한 경우 다음 식을 이용하여 맨슬래브 대비 바닥충격음 저감 효과를 이론적으로 계산할 수 있다.

$$L_{Floating} = 15\log \left[ \sqrt{\frac{1 + \eta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}{\eta^2 \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + \left(1 + \frac{f^2}{f_0^2}\right)^2}} \right]$$

여기서,  $f$ 는 주파수,  $f_0$ 는 바닥구조의 공진 주파수( $\sqrt{s'/m'}$ ),  $\eta$ 는 완충재의 손실계수를 나타낸다.

## (2) 바닥 마감재에 의한 소음 저감

바닥 마감재에 의한 소음 저감 효과는 다음 식을 이용하여 이론적으로 계산할 수 있다. 여기서  $f_0$ 는 바닥 마감재에 의한 공진 주파수를 나타낸다.

$$L_{Finishing} = 40 \log \left( \frac{f}{f_0} \right)$$

## (3) 천정 구조에 의한 소음 저감

천정 구조는 다양한 소음 영향이 존재하나, 본 연구에서는 지배적인 소음 영향을 차음으로 가정하여 다음식을 이용하여 바닥충격음 저감 효과를 계산하였다.

$$L_{Ceiling} = TL_{Ceiling} = (TL_{Gypsum} - TL_{air})$$

여기서  $TL_{Gypsum}$ 은 천정 마감재인 석고보드의 차음성능,  $TL_{air}$ 은 천정 내부 공기층으로 인한 차음성능을 나타낸다.

# 제3장 목업 실험동을 이용한 예측식 검증

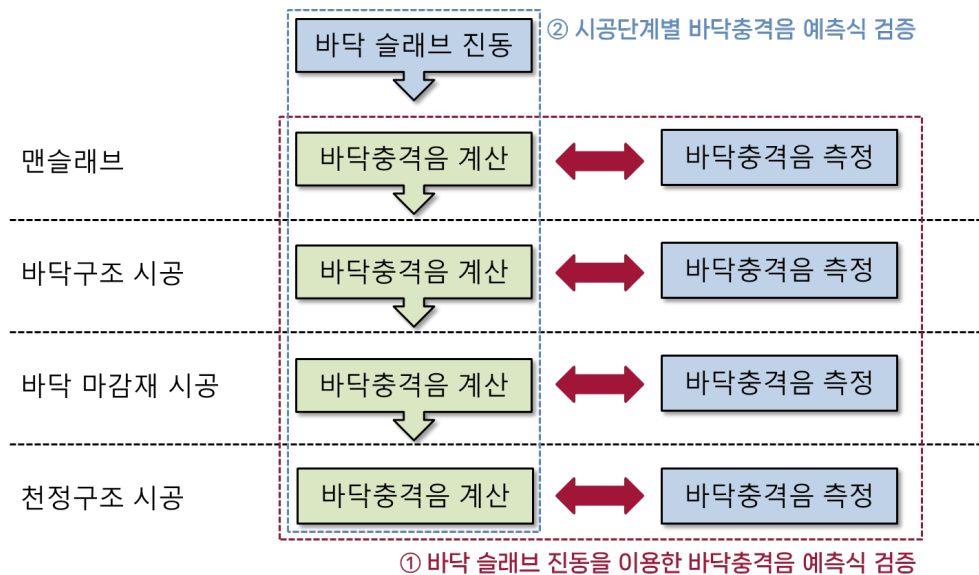
## 1. 바닥구조 시공 단계별 바닥충격음 측정

### 1. 1. 실험 개요

본 장에서는 앞서 설명한 바닥충격음 계산식에 대해 목업실험실을 대상으로 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음을 측정하고, 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 결과에 대한 검증을 수행하였다. 목업실험실은 실험 환경 구성(창호, 천정, 출입문 등)이 완료된 상태에서 수행되었다.

[그림 3-1]은 본 장에서 수행하는 실험 구성을 나타낸다. 그림과 같이 본 장에서 크게 1)바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측식에 대한 검증 및 2)시공단계별 바닥충격음 저감식에 대한 검증을 수행하였다.

시공 단계는 맨슬래브 조건, 바닥구조 시공 조건, 바닥 마감재 시공 조건 및 천정구조 시공 조건으로 4단계로 구분하였으며, 각 단계별 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음을 측정하였다.



[그림 3-1] 목업실험실을 이용한 바닥충격음 계산식 검증

1. 2. 실험 방법

1) 실험 대상 목업실험동 및 실험 환경 구성

목업실험동은 LH 토지주택연구원 내 벽식 구조의 목업주택을 대상으로 하였으며, [그림 3-2]와 같이 전용면적 29, 36 및 46㎡의 3개 세대로 구성되어 있다. 그림에서 바닥 슬래브 진동을 결정하는 내력벽은 검정색으로 표시하였다.



[그림 3-2] 실험 대상 목업주택의 평면도

바닥충격음 측정은 그림의 표시된 거실 공간을 대상으로 수행하였으며, 46타입의 경우에는 거실과 주방 공간이 구분되어 있지 않기 때문에 내력벽 기준으로 거실 공간을 가정하여 산출하였다. [표 3-1]은 국토부 고시<sup>97)</sup>에 제시된 방법으로 산출된 거실 공간의 슬래브 면적과 유효평면<sup>98)</sup>을 기준으로 산출된 면적을 나타낸다.

[표 3-1] 목업실험동의 거실 크기 비교

전용 면적	거실			유효면적		
	가로 길이 [m]	세로 길이 [m]	면적 [m2]	가로 길이 [m]	세로 길이 [m]	면적 [m2]
29㎡	4.22	3.17	13.38	4.22	7.82	33.00
36㎡	4.22	3.41	14.39	4.22	5.86	24.73
46㎡	3.02	5.83	17.61	3.09	8.27	25.55

97) 국토교통부, 공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준(2023. 2. 9.)

98) 김태민, 배진영, 양홍석(2020), “바닥 슬래브 진동 특성을 이용한 바닥충격음 요인 분석 연구 : 유효 평면”, 한국소음진동 공학회논문집, 30(3): 276~285

표와 같이 실제 거실의 크기와 유효평면의 크기는 차이가 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 세대 평형은 작지만 바닥 슬래브 진동 특성에서는 29타입의 유효평면의 면적이 가장 크게 존재하는 것을 확인할 수 있다.

본 실험은 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 영향 분석을 목적으로 하며, [표 3-2]와 같이 실험 계획을 구성하였다.

[표 3-2] 바닥구조 시공 단계별 실험 계획

단계	바닥 구성	측정 내용
1단계	바닥 슬래브(210mm)	바닥 슬래브 진동(5지점) 하부층 바닥충격음(5지점)
2단계	바닥 슬래브 + 뜯바닥구조	바닥 슬래브 진동(5지점) 하부층 바닥충격음(5지점)
3단계	바닥 슬래브 + 뜯바닥구조 + 바닥 마감재(루카펫)	바닥 슬래브 진동(5지점) 하부층 바닥충격음(5지점)
4단계	천정 + 바닥 슬래브 + 뜯바닥구조 + 바닥 마감재	하부층 바닥충격음(5지점)

1단계는 맨슬래브 조건으로, 바닥구조와 천정구조가 설치되지 않은 골조 상태에 유사한 조건에서 실험을 수행하였다. 초기 목업 주택의 경우 천정이 설치되어 있었기 때문에 천정구조에 따른 바닥충격음 영향을 최소화하기 위해 [그림 3-3]과 같이 석고보드를 철거 후 실험이 수행되었다.



[그림 3-3] 목업 실험동 천정 석고보드 철거

2단계 바닥구조는 일반적인 뜬바닥구조로 중량충격음 3등급, 경량충격음 1등급인 인정구조(완충재(30mm) + 경량기포콘크리트(40mm) + 모르타르(40mm))를 선정하여 모든 세대에 동일하게 시공하였다. [그림 3-4]는 목업실험동에 시공 중인 바닥구조를 나타내며, 구성층의 두께는 줄자를 이용하여 그림과 같이 확인하였다.



(a) 바닥면 정리

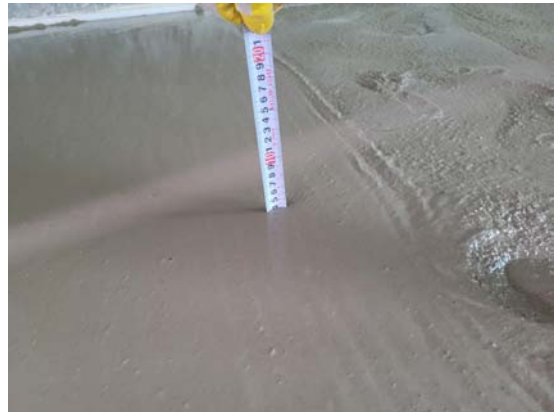


(b) 완충재 설치(좌:측면완충재, 우:바닥 완충재)



(c) 경량기포 콘크리트 시공





(d) 마감 모르타르 시공



(e) 바닥 마감재 시공

[그림 3-4] 목업실험동 바닥구조 시공

경량기포 콘크리트 및 모르타르 양생 기간은 ‘LH시방서’에 의거하여 7일을 준수하였다. 적용된 바닥구조의 인정서에 명시된 구성 재료의 규격은 [표 3-3]와 같으며, 바닥 마감재는 립카펫(6T)을 시공하였다.

[표 3-3] 인정구조의 구성재료 재질 및 규격

구성재료	재 질	규 격
마감물탈	현장배합 또는 공장배합형	KS L 5220에 의거하여 시공, 현장 배합 또는 공장배합용 시멘트 및 모래의 혼합비 1:3 비율, 두께 : 40 mm 이상
기포콘크리트	현장시공형 경량기포콘크리트 0.5품	KS F 4039의 규격에 따름, 두께 : 40 mm 이상
SIB30A완충재	상부부직포 마감 + 하부요철형상 (흑연중합발포폴리스틸렌)	요철너비 : 18 mm $\pm$ 2 mm, 26 mm $\pm$ 2 mm 요철높이 : 3.5 mm $\pm$ 1.5 mm 요철간격 : 18 mm $\pm$ 2 mm, 26 mm $\pm$ 2 mm 나비 : 880 mm $\pm$ 30 mm, 길이 : 1,780 mm $\pm$ 40 mm 두께 : 30 mm $\pm$ 3 mm
측면완충재	PE발포 폴리에틸렌폼	두께 : 10 mm $\pm$ 3 mm, 나비 : 90 mm $\pm$ 20 mm

## 2) 바닥충격음 측정

바닥충격음 측정은 KS F ISO 16283-2에 의거하여 [그림 3-5]와 같이 표준충격원 (임팩트볼, 태핑머신)을 이용하여 거실의 모서리 4개 지점과 중앙 지점을 각각 가진하였으며, 충격원 위치와 동일한 지점의 수음실 1.2m 높이에서 마이크로폰을 설치하여 음압을 측정하였다.



(a) 중량충격원(고무공)



(b) 경량충격원(태핑머신)  
[그림 3-5] 바닥충격음 측정을 위한 표준충격원

바닥 슬래브 진동은 가진 지점과 동일한 위치의 바닥 슬래브 하부에 가속도계를 부착하여 바닥충격음과 동시에 슬래브 진동을 측정하였다. [그림 3-6]은 목업실험동 내부에 설치된 가속도계와 마이크론을 나타낸다.



(a) 가속도계



(b) 마이크론

[그림 3-6] 바닥충격음 측정을 위한 센서 설치

[표 3-4] 바닥충격음 측정 장비의 제원

실험 장비		모델 및 제원
FFT 분석기		SCADAS mobile/LMS · 진동 FFT 주파수 범위 : Dc to 100KHz · 측정 파라미터: 가속도, 속도, 변위, dB · 주파수 형식 : Hz, CPM, Order, Octave · 센서 : 진동-Accelerometer (Sensitivity: 0.1V/g, 0.01V/g)
표준충격원	중량충격원(고무공)	RION 社 (YI-01) · 외경 : 180 mm, 표피두께 : 30 mm · 충격원의 등가질량 : $2.5\text{kg} \pm 0.1\text{kg}$ · 반발계수 : $0.8 \pm 0.1$
	경량충격원(태핑머신)	Type 211A · 헤머의 질량 : $(500 \pm 12)\text{g}$ · 충돌순간의 속도 : $(0.886 \pm 0.022)\text{m/s}$ · 곡률반지름 : $(500 \pm 100)\text{mm}$
마이크로폰		GRAS, 46AE · Sensitivity : 50 mV/Pa · Dynamic Range : 14 ~ 135 dB · Frequency Range : 3.15 ~ 20k Hz
가속도계		9100T/Allen bradley · Sensitivity : 100mV/g · Measurement Range: $\pm 50\text{ g}$ · Frequency Range : 0.58 ~ 4k Hz

바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 측정을 위해 사용된 측정 센서 및 충격원은 [표 3-4]에 정리하였다. 본 연구에서는 바닥 슬래브 진동을 세밀하게 분석하기 위해 스펙트럼 분석을 선행적으로 수행하였으며, 소음의 잔향시간을 기준으로 약 2s의 Block time을 설정하였다. 샘플링 타임은 3600Hz까지 0.5Hz 간격으로 분석이 가능하도록 약 0.7ms로 설정하였다.

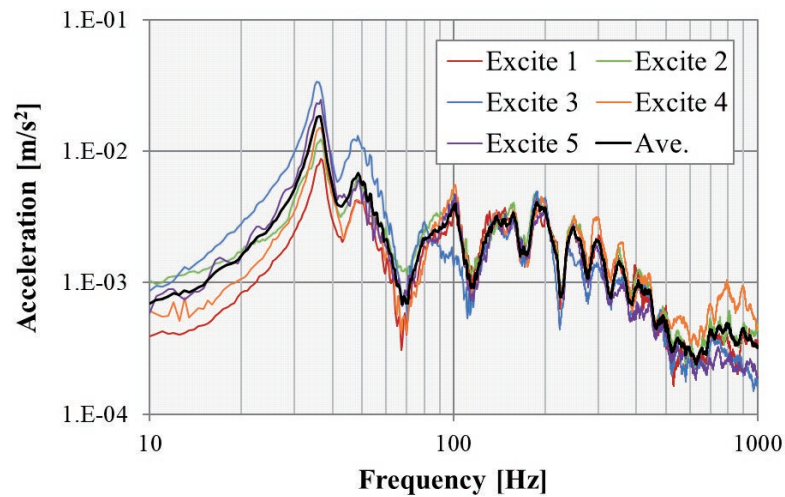
중량충격음 분석은 Trigger를 설정하여 피크 신호 시점에서 2s 데이터를 'Peak Hold'로 분석하였으며, 경량충격음은 Overlap 75%로 하여 약 5s의 평균 데이터로 분석하였다.

### 1. 3. 바닥 슬래브 진동 측정 결과

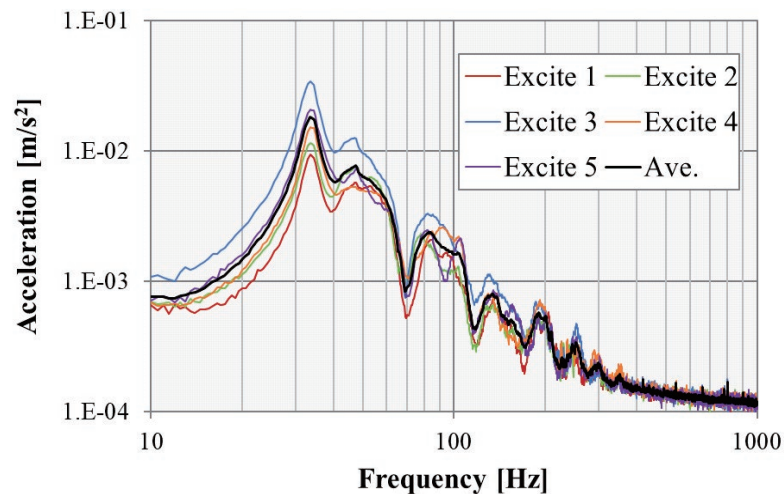
#### 1) 29타입

##### (1) 중량충격원

[그림 3-7]은 고무공 가진 조건에서 가진 위치별 바닥 슬래브 진동 측정 결과를 나타낸다. 그림과 같이 중앙 지점(3번 지점)을 가진하는 경우가 가장 큰 바닥 슬래브 진동 응답이 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 상대적으로 1번과 4번 가진 지점의 가속도 응답이 작은 것으로 분석되었다.

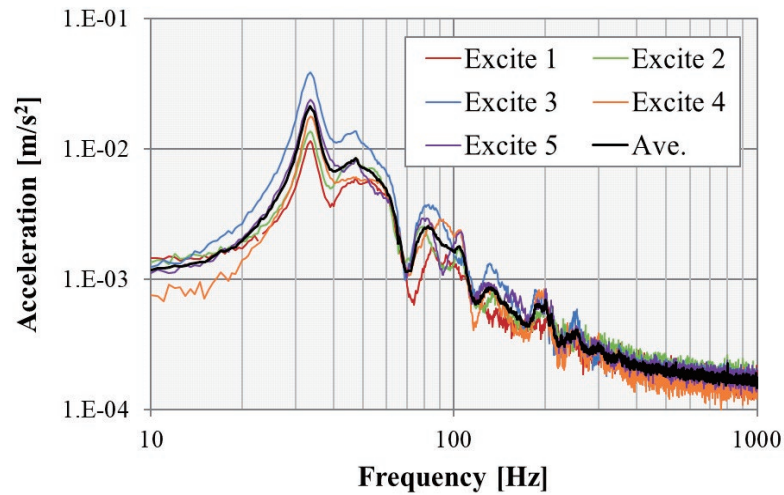


##### (a) 1단계 : 맨슬래브



##### (b) 2단계 : 바닥구조 시공

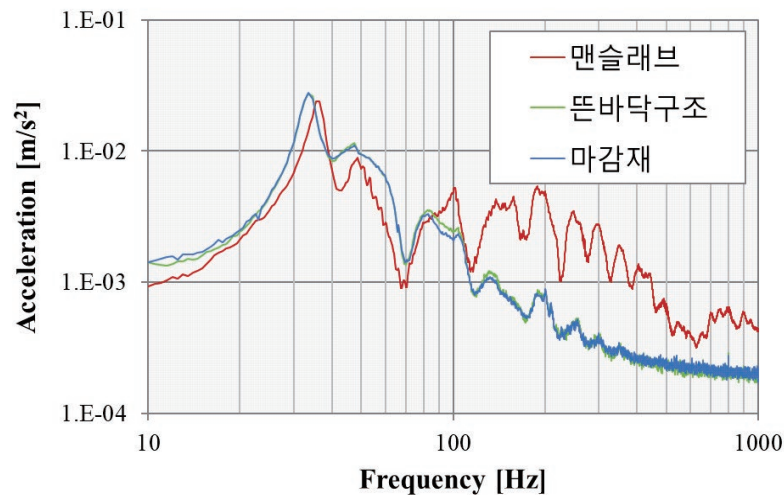




(c) 3단계 : 바닥 마감재 시공

[그림 3-7] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(중량충격원)(29타입)

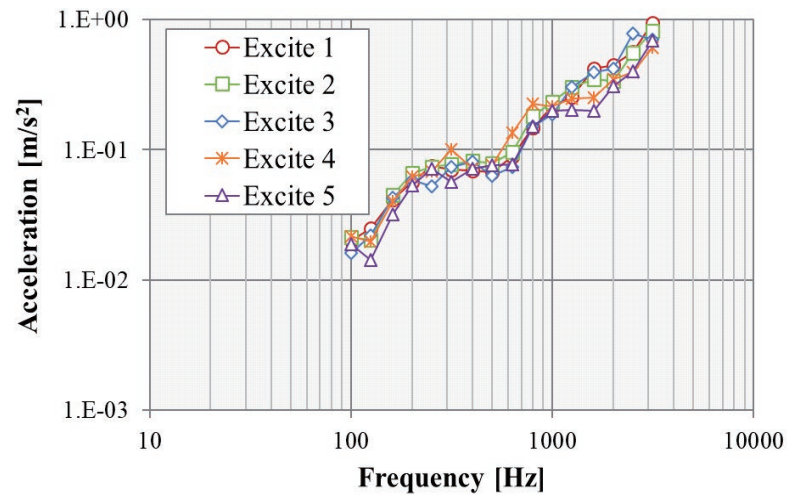
[그림 3-8]은 시공 단계별 바닥 슬래브의 평균 진동 측정 결과를 나타낸다. 그림과 같이 맨슬래브 조건에서 1차 피크 주파수는 36Hz에서 바닥구조 시공후 1차 피크 주파수가 34Hz로 낮아진 것을 확인할 수 있으며, 마감재 설치에 따른 슬래브 진동 특성 영향은 그림과 같이 미비한 것으로 분석되었다. 바닥구조 시공에 따라 바닥 슬래브의 진동 피크 주파수가 저주파 대역으로 낮아진 것을 확인할 수 있으며, 이는 바닥구조 시공에 따른 질량 증가 영향으로 판단된다.



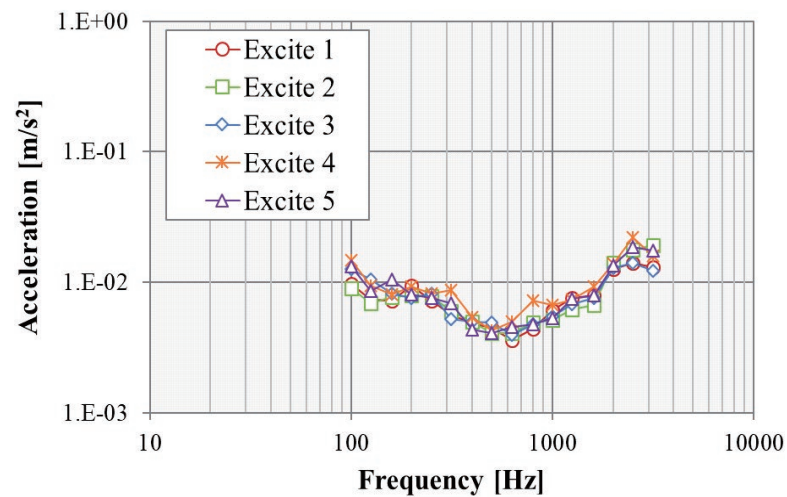
[그림 3-8] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 영향(중량충격원)(29타입)

## (2) 경량충격원

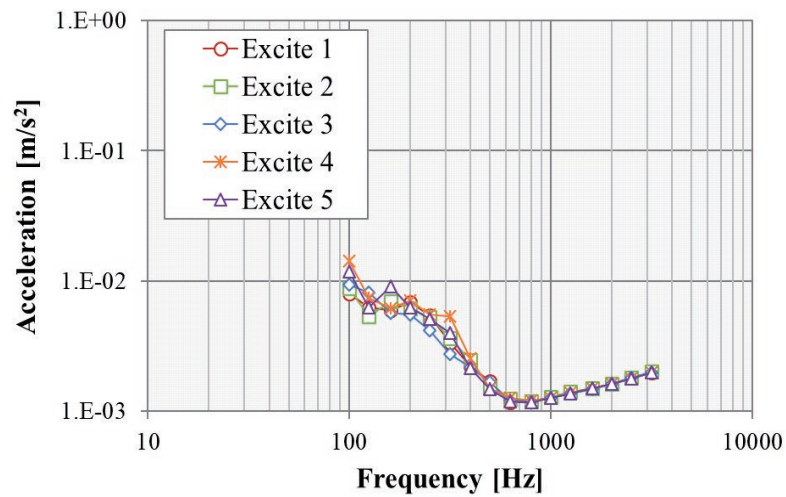
[그림 3-9]은 경량충격원 조건에서의 바닥 슬래브 진동 측정 결과를 나타낸다. 경량충격원에 대한 바닥 슬래브 진동은 1/3 옥타브 밴드로 변환하여 나타내었다. 경량충격원의 경우 그림과 같이 가진 지점에 따른 편차는 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있다.



(a) 1단계 : 맨슬래브

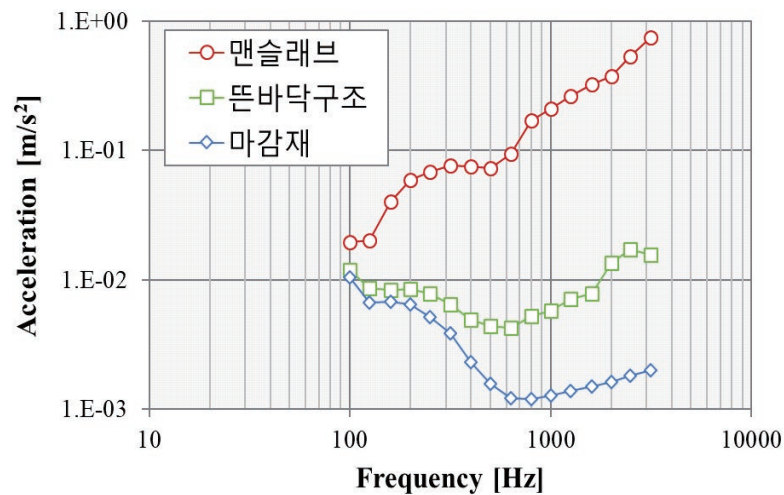


(b) 2단계 : 바닥구조 시공



(c) 3단계 : 바닥 마감재 시공  
[그림 3-9] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(경량충격원)(29타입)

[그림 3-10]은 시공 단계별 바닥 슬래브의 평균 진동 측정 결과를 나타낸다. 그림과 같이 맨슬래브 대비 바닥구조 시공시 바닥 슬래브 진동 저감 효과를 확인할 수 있으며, 경량충격원의 경우에는 바닥 마감재 시공에 따른 가속도 응답 저감 효과가 존재하는 것으로 분석되었다.



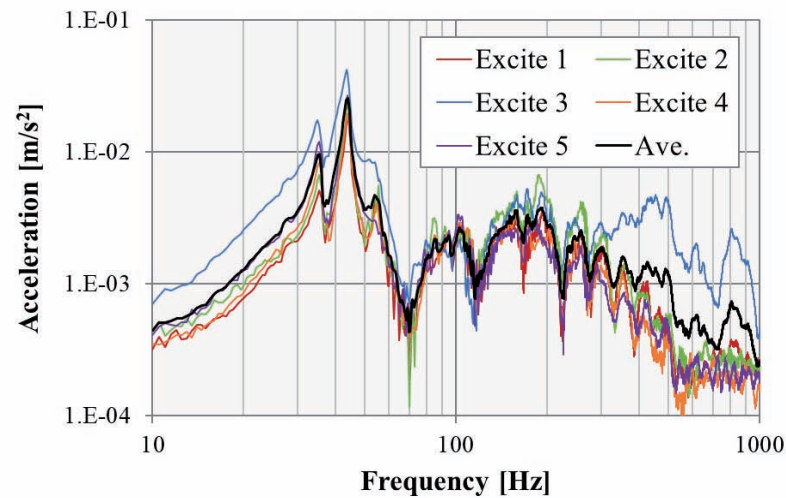
[그림 3-10] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 영향(경량충격원)(29타입)



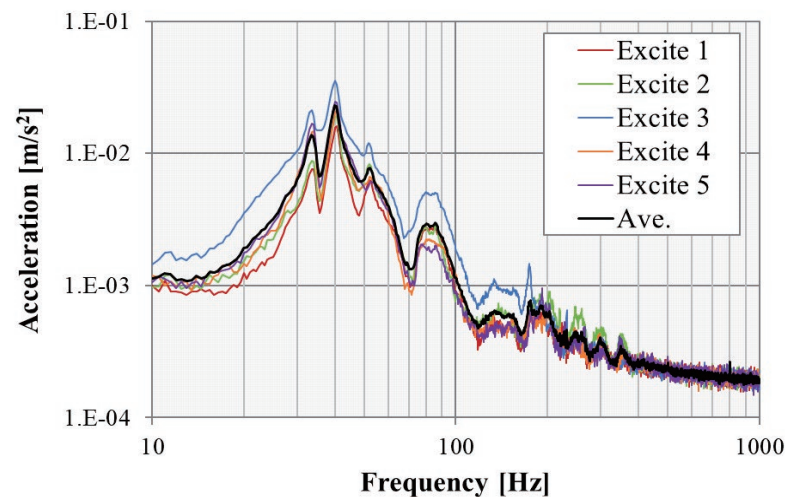
## 2) 36타입

### (1) 중량충격원

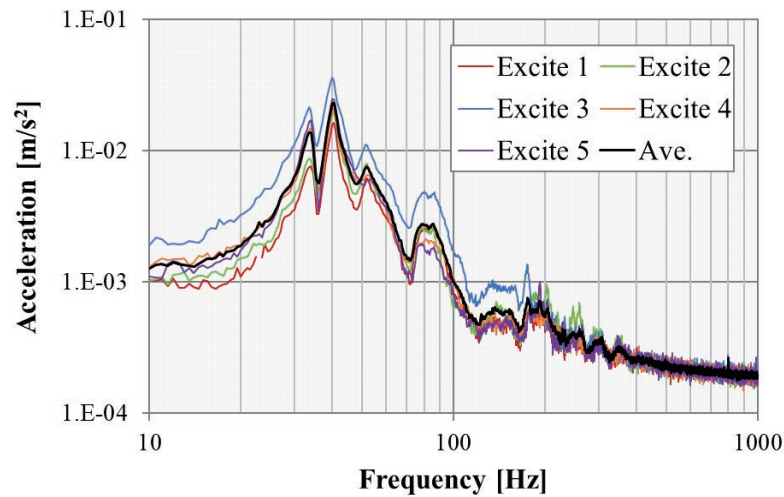
[그림 3-11]은 36타입의 가진 위치별 바닥 슬래브 진동 측정 결과를 나타낸다. 중앙 지점을 가진하는 경우가 가장 큰 바닥 슬래브 진동 응답이 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 상대적으로 내려벽 인근에 위치한 나머지 네 개 지점의 가속도 응답은 중앙 지점 대비 응답의 크기가 작으며, 네 개 지점의 응답의 크기는 유사한 것으로 분석되었다.



#### (a) 1단계 : 맨슬래브

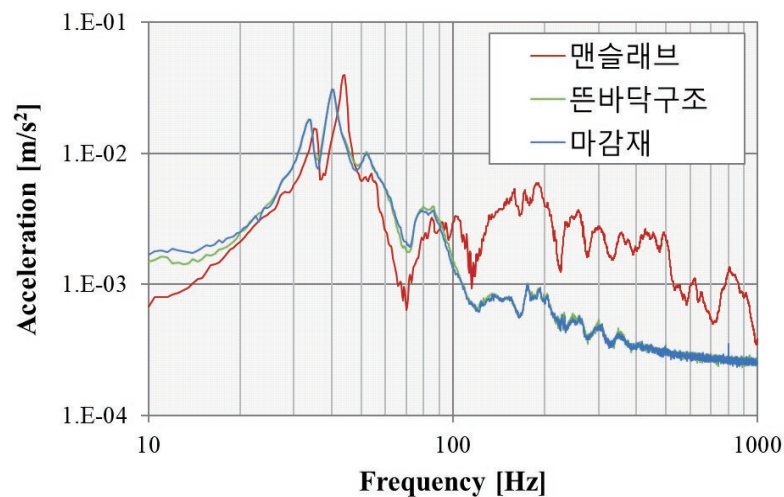


#### (b) 2단계 : 바닥구조 시공



(c) 3단계 : 바닥 마감재 시공  
[그림 3-11] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(중량충격원)(36타입)

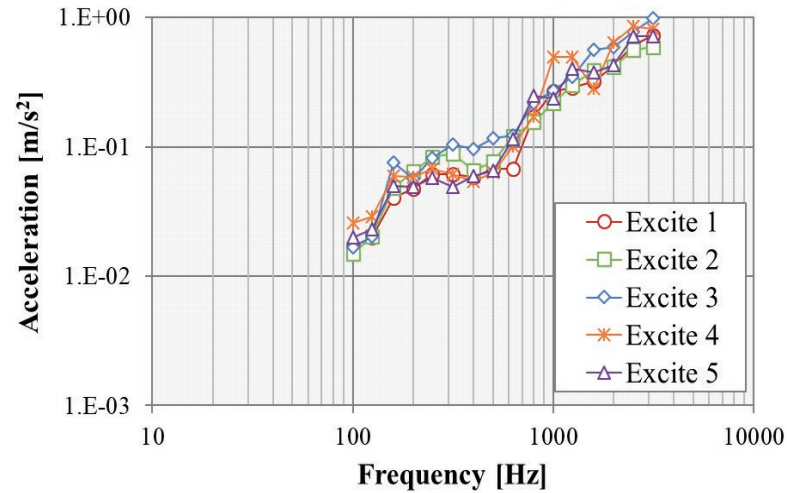
[그림 3-12]는 시공 단계별 바닥 슬래브의 평균 진동 측정 결과를 나타낸다. 그림과 같이 맨슬래브 조건에서 1차 피크 주파수는 34Hz에서 바닥구조 시공후 1차 피크 주파수가 33Hz로 낮아진 것을 확인할 수 있으며, 2차 피크 주파수의 경우에는 43Hz에서 40Hz로 낮아지는 것으로 분석되었다. 마감재 설치에 따른 진동 영향은 미비한 것으로 분석되었다.



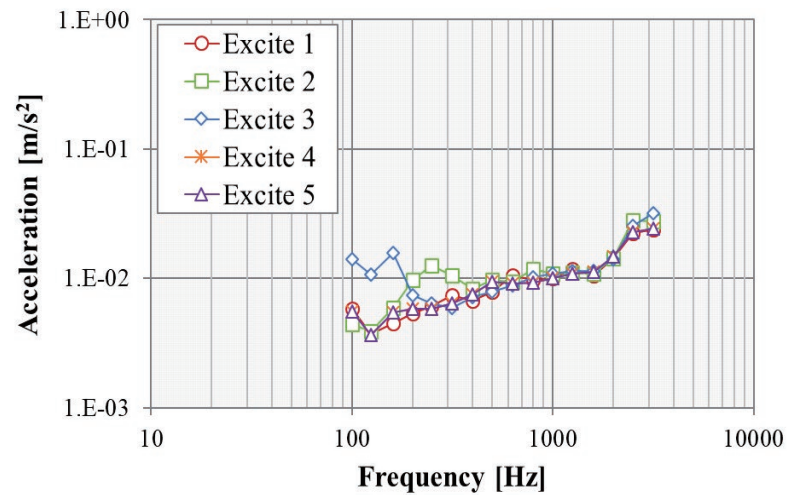
[그림 3-12] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 영향(중량충격원)(36타입)

## (2) 경량충격음

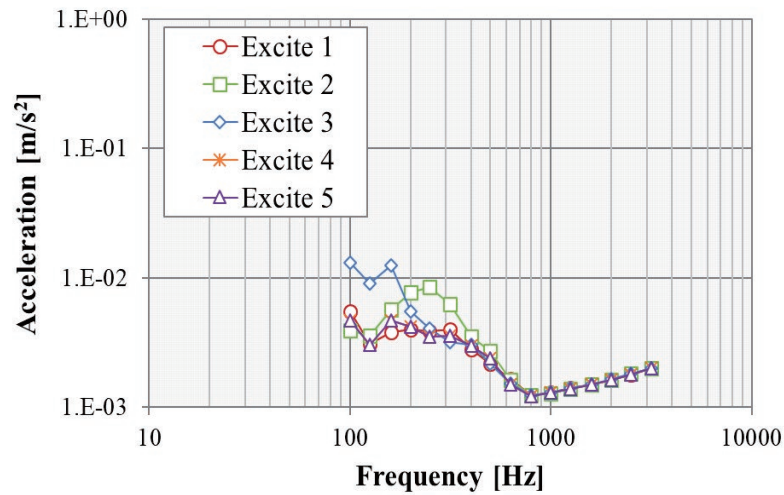
[그림 3-13]은 경량충격원에 대한 1/3 옥타브 밴드의 바닥 슬래브 진동 측정 결과를 나타낸다. 36타입도 동일하게 경량충격원으로 가진하는 경우에는 가진 지점에 따른 편차가 상대적으로 적은 것으로 분석되었다.



(a) 1단계 : 맨슬래브

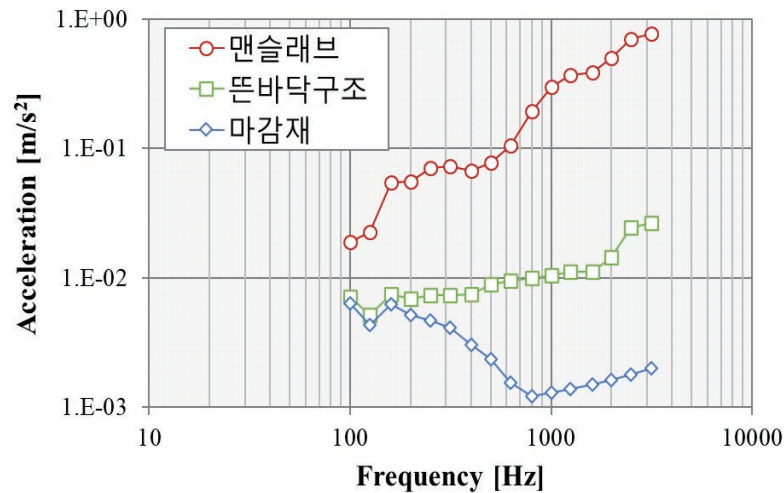


(b) 2단계 : 바닥구조 시공



(c) 3단계 : 바닥 마감재 시공  
[그림 3-13] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(경량충격원)(36타입)

[그림 3-14]은 시공 단계별 바닥 슬래브의 평균 진동 측정 결과를 나타낸다. 36타입 입에서도 맨슬래브 대비 바닥구조 및 바닥 마감재 시공에 따른 바닥 슬래브 진동 저감 효과가 1/3옥타브 밴드의 200Hz부터 존재하는 것으로 분석되었다.

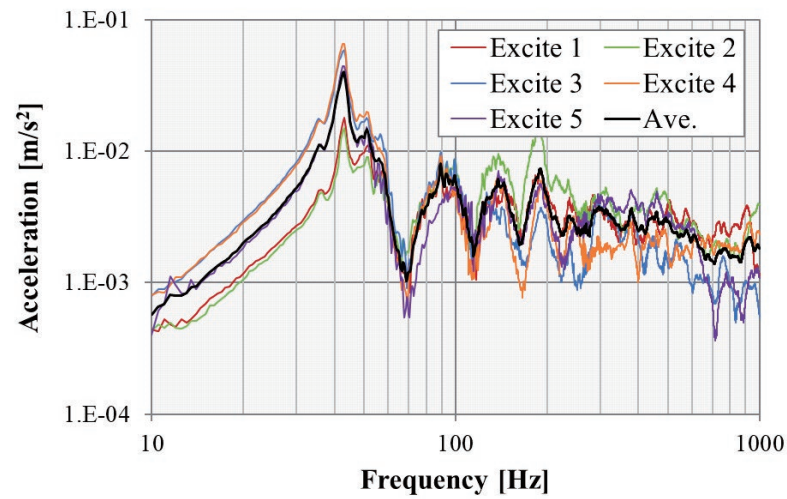


[그림 3-14] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 영향(경량충격원)(36타입)

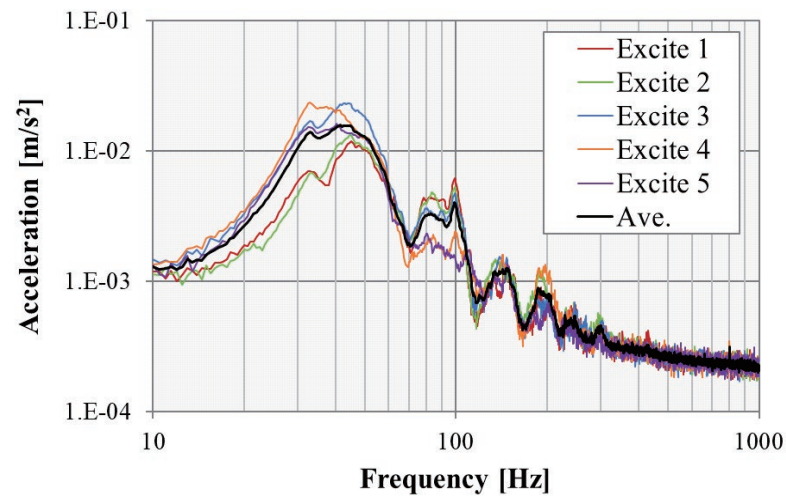
### 3) 46타입

#### (1) 중량충격원

[그림 3-15]는 46타입의 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과를 나타낸다. 중앙 지점과 4번 지점(내력벽이 없는 주방 방향)을 가진하는 경우가 상대적으로 큰 바닥 슬래브 진동 응답이 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 상대적으로 1번과 2번 가진 지점의 가속도 응답이 작은 것으로 분석되었다.

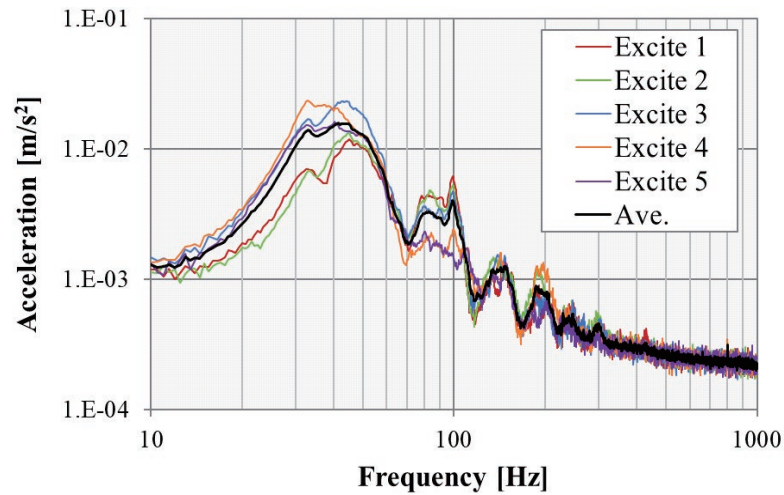


#### (a) 1단계 : 맨슬래브



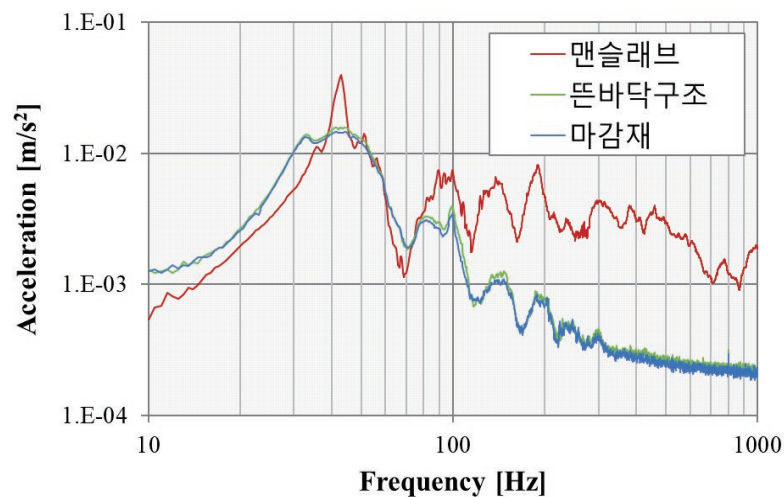
#### (b) 2단계 : 바닥구조 시공





(c) 3단계 : 바닥 마감재 시공  
[그림 3-15] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(중량충격원)(46타입)

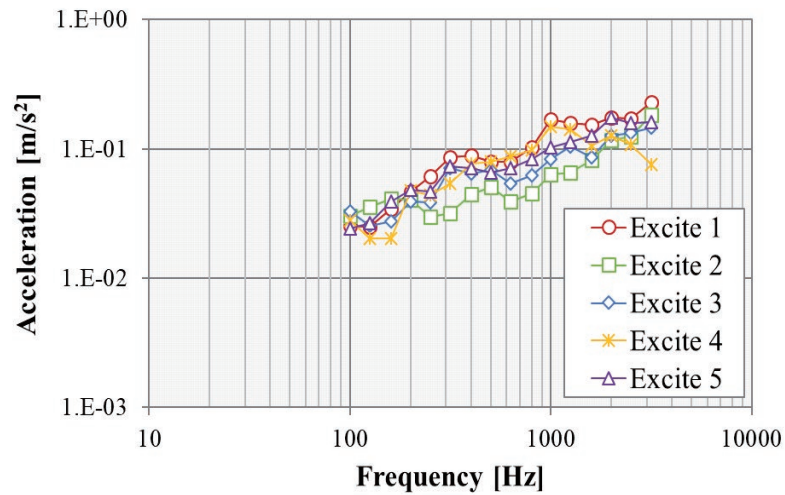
[그림 3-16]은 시공 단계별 바닥 슬래브의 평균 진동 측정 결과를 나타낸다. 46타입의 경우 1차 피크는 36Hz에서 34Hz로 낮아진 것을 확인할 수 있으며, 2차 피크 주파수의 경우에는 바닥 마감재 설치 후 진동 피크 주파수가 다른 타입에 비해 크게 저감되는 것으로 분석되었다. 이는 완충재 진동 주파수와 유사한 대역에 존재하던 진동 피크 주파수와 중첩되어 발생한 현상으로 판단된다.



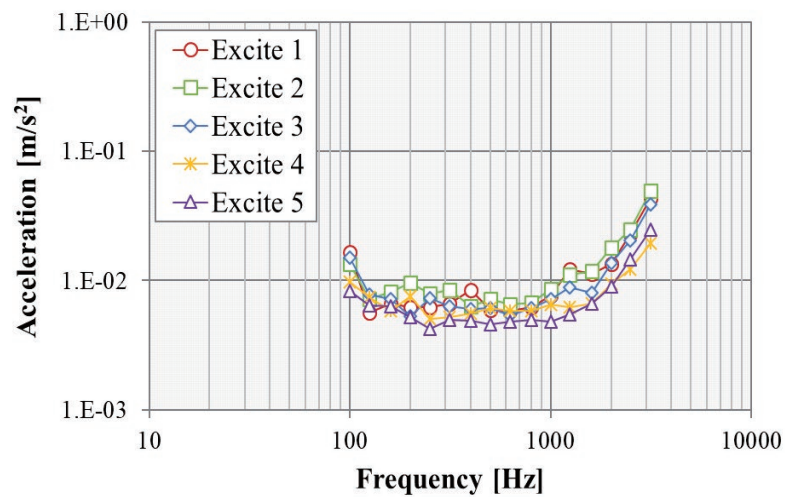
[그림 3-16] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 영향(중량충격원)(46타입)

## (2) 경량충격음

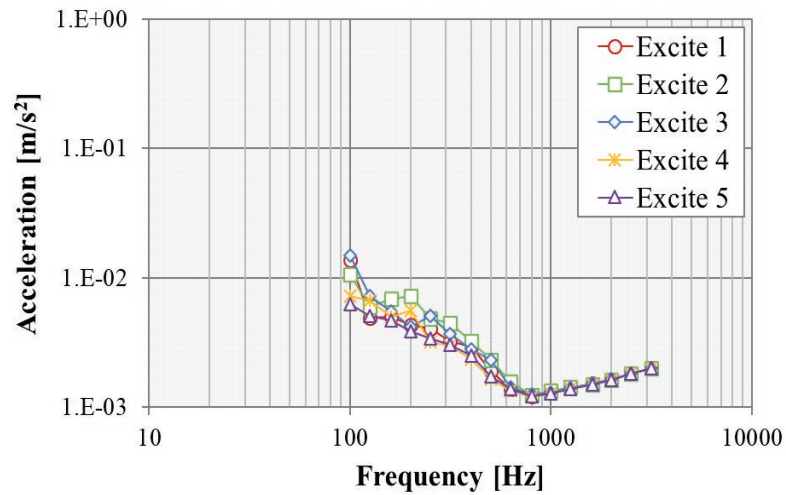
[그림 3-17]은 시공 단계별 슬래브 하부에서 측정된 바닥 슬래브 진동의 공간 평균 가속도 결과를 나타내며, 1/3 옥타브 밴드로 변환하여 도식화하였다. 46타입도 경량충격원을 이용하는 경우에는 가진 지점에 따른 편차는 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있다.



(a) 1단계 : 맨슬래브

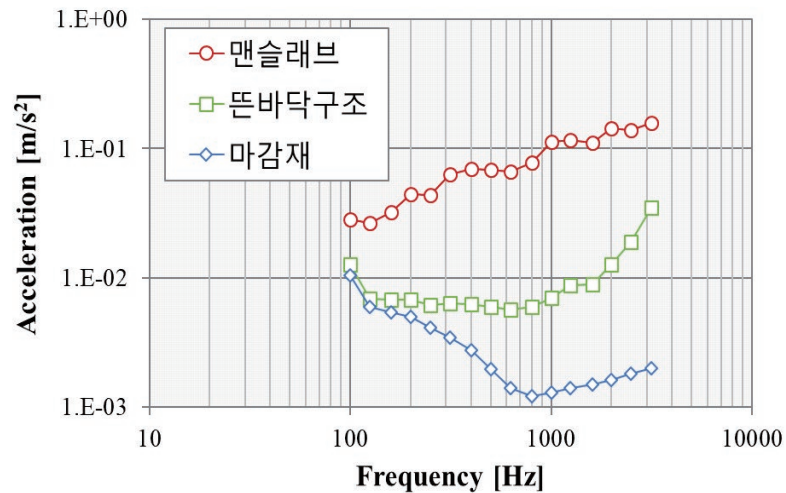


(b) 2단계 : 바닥구조 시공



(c) 3단계 : 바닥 마감재 시공  
[그림 3-17] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(경량충격원)(46타입)

[그림 3-18]은 시공 단계별 바닥 슬래브의 평균 진동 측정 결과를 나타낸다. 그림과 같이 바닥구조 설치 및 바닥 마감재 시공에 따른 바닥 슬래브 진동 저감 효과가 존재하는 것을 확인할 수 있다.



[그림 3-18] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 영향(경량충격원)(46타입)



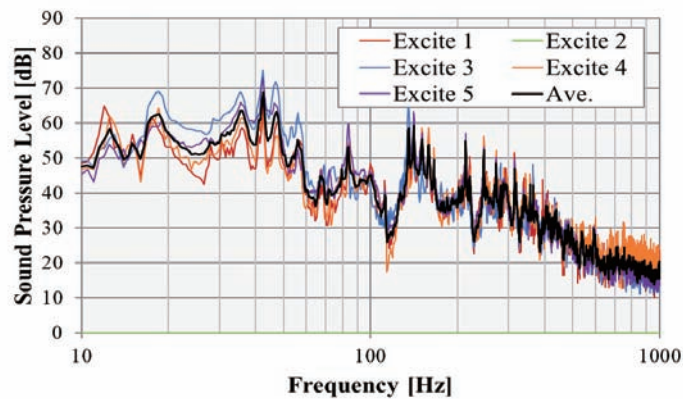
## 1. 4. 바닥충격음 측정 결과

### 1) 29타입

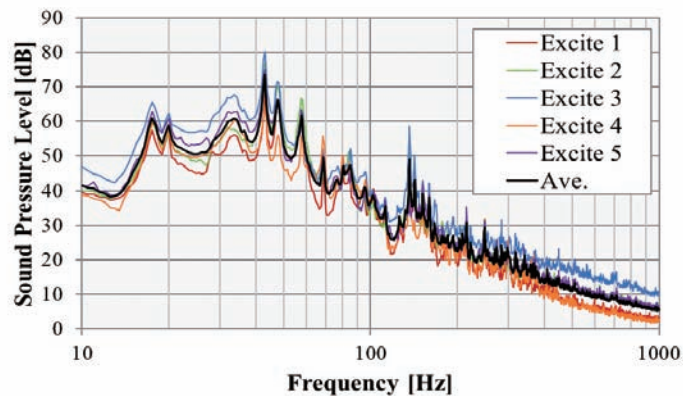
#### (1) 중량충격원

[그림 3-19]는 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과를 나타낸다. 바닥 슬래브 진동과 동일하게 거실 양 옆에 내력벽이 존재하는 실험 대상 세대의 경우 중앙 지점을 가 진하는 경우가 가장 큰 바닥충격음이 존재하였다.

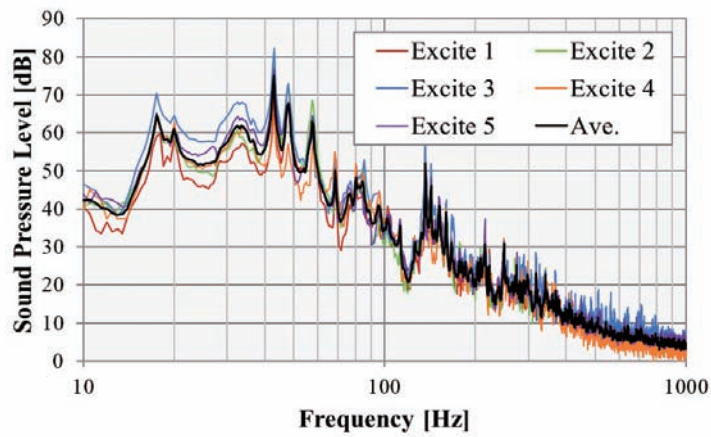
[그림 3-20]은 시공 단계별 수음실 5개 지점에서 측정된 평균 바닥충격음 결과를 나타내며, 1/3 옥타브 밴드로 변환하여 도식화하였다. 바닥 슬래브 진동과 동일하 게 바닥구조 시공 조건에서 약 100Hz 이전 주파수 대역에서는 바닥충격음이 증가 하고, 100Hz 이후 대역부터 소음 저감 효과가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 바닥 마감재 및 천정 설치에 따른 중량충격음 저감 효과는 미비한 것으로 분석되었다.



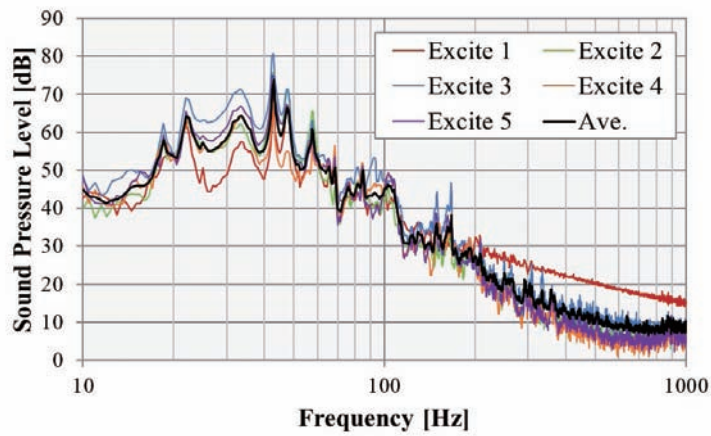
(a) 1단계 : 맨슬래브



(b) 2단계 : 바닥구조 시공

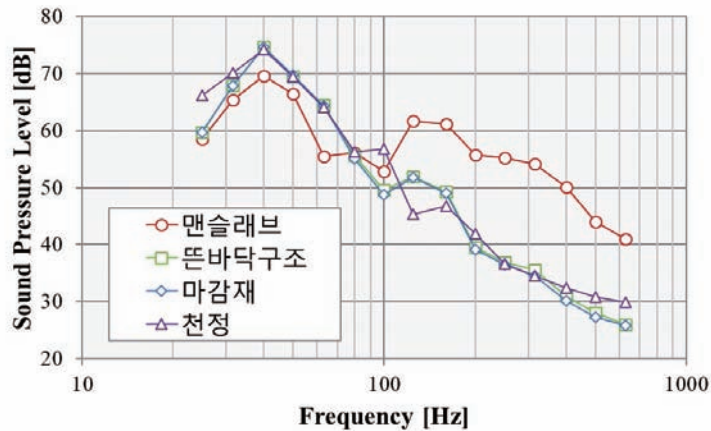


(c) 3단계 : 바닥 마감재 시공



(d) 4단계 : 천정 구조 시공

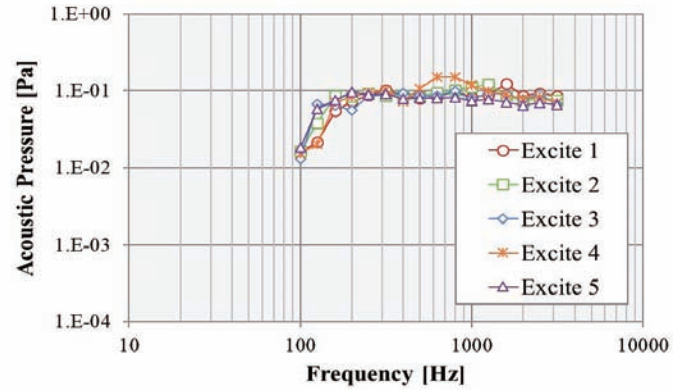
[그림 3-19] 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(중량충격원)(29타입)



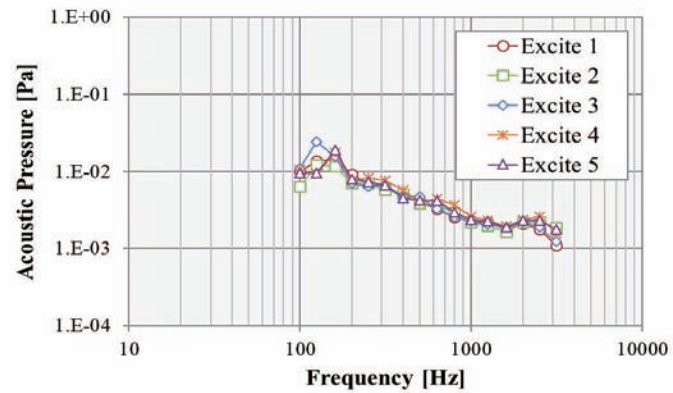
[그림 3-20] 시공 단계별 바닥충격음 영향(중량충격원)(29타입)

## (2) 경량충격원

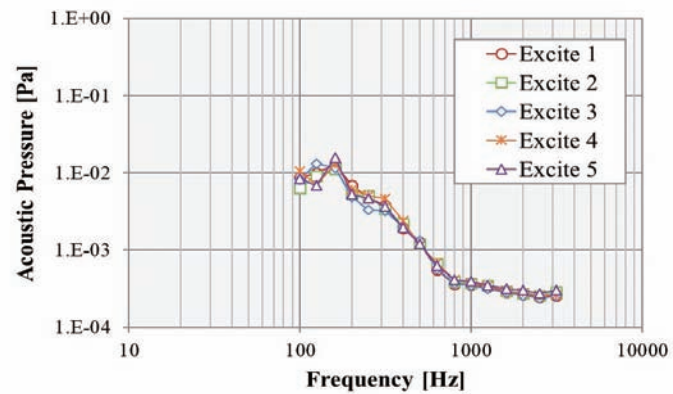
[그림 3-21]은 29타입의 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과를 나타낸다. 바닥충격음 측정 결과도 1/3 옥타브 밴드로 변환하여 도식화하였다.



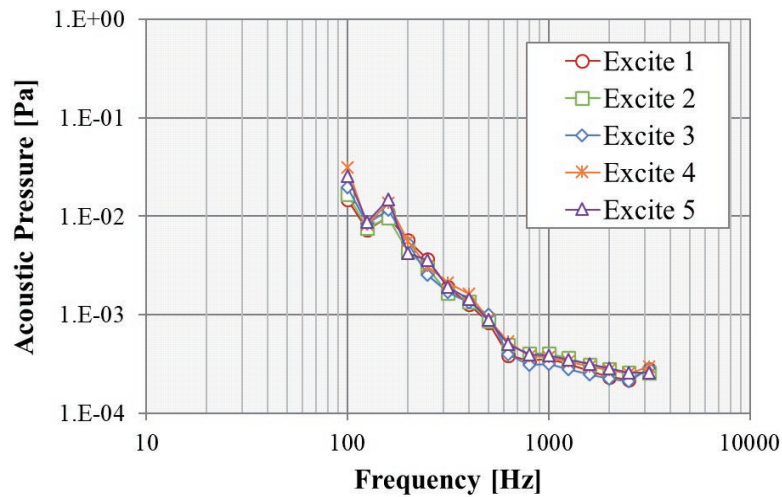
(a) 1단계 : 맨슬래브



(b) 2단계 : 바닥구조 시공



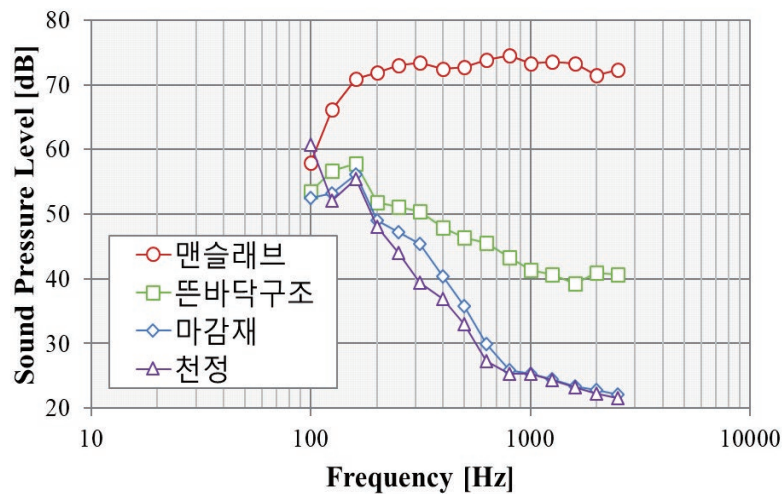
(c) 3단계 : 바닥 마감재 시공



(d) 4단계 :천정 구조 시공

[그림 3-21] 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(경량충격원)(29타입)

[그림 3-22]은 시공 단계별 평균 바닥충격음 결과를 나타내며, 1/3 옥타브 밴드로 변환하여 도식화하였다. 경량충격음의 경우에는 바닥구조 및 바닥 마감재 시공에 따른 바닥충격음 저감 효과가 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 천정 설치에 따른 추가적인 바닥충격음 저감도 존재하는 것으로 분석되었다.

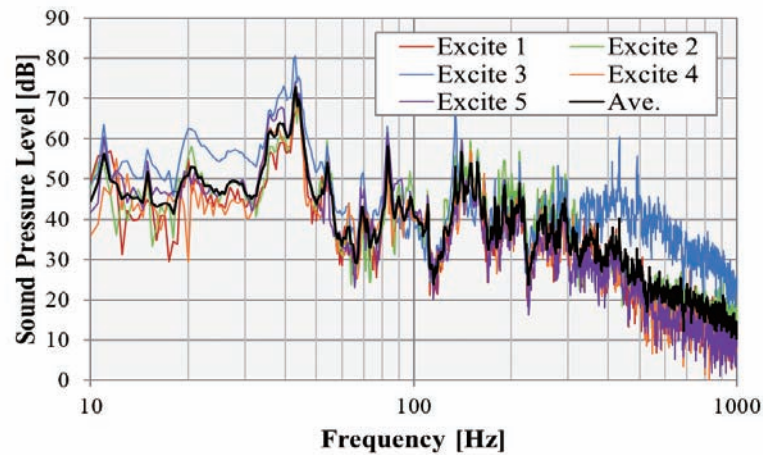


[그림 3-22] 시공 단계별 바닥충격음 영향(경량충격원)(29타입)

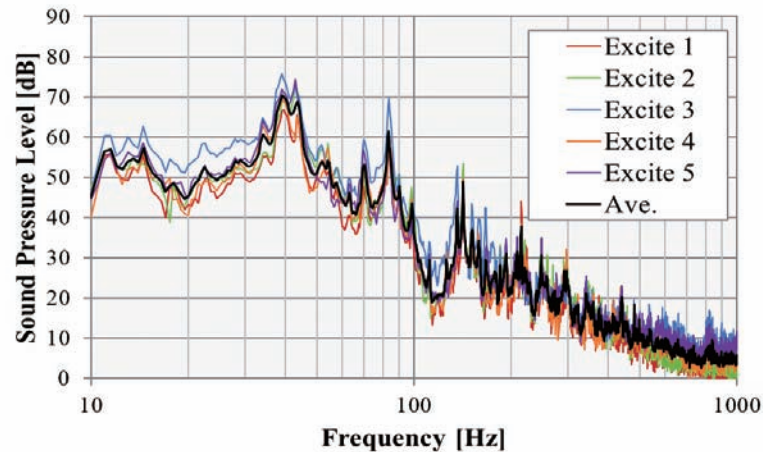
## 2) 36타입

### (1) 중량충격원

[그림 3-23]은 시공 단계별 수음실 5개 지점에서 측정된 평균 바닥충격음 결과를 나타내며, [그림 3-24]은 시공 단계별 수음실 평균 바닥충격음 측정 결과를 나타낸다. 중량충격원을 이용하여 가진하는 경우에는 중앙 지점을 가진하는 경우가 가장 큰 바닥충격음이 존재하는 것으로 분석되었으며, 바닥구조 시공 조건 외에는 바닥 충격음 저감 영향이 미비한 것으로 분석되었다.

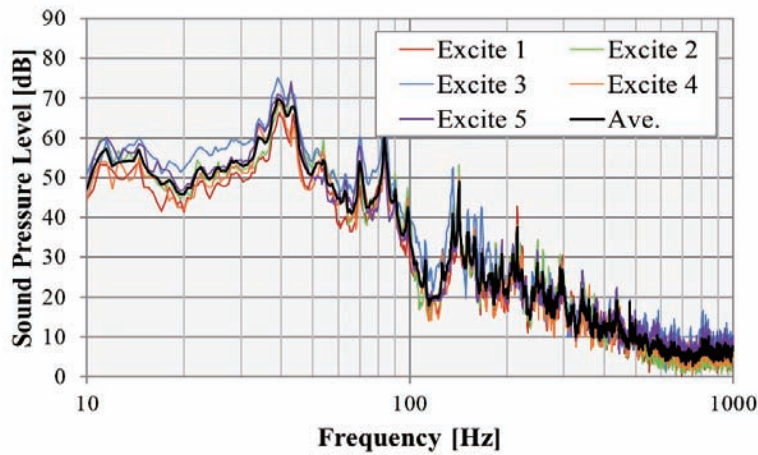


(a) 1단계 : 맨슬래브

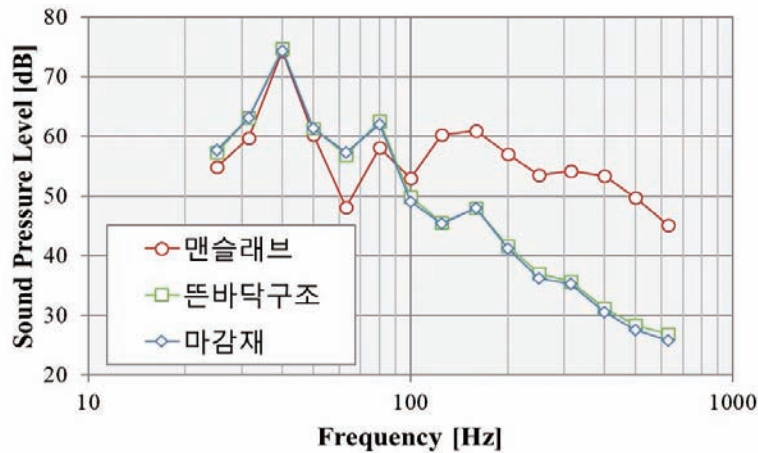


(b) 2단계 : 바닥구조 시공





(c) 3단계 : 바닥 마감재 시공  
[그림 3-23] 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(중량충격원)(36타입)



[그림 3-24] 시공 단계별 바닥충격음 영향(중량충격원)(36타입)

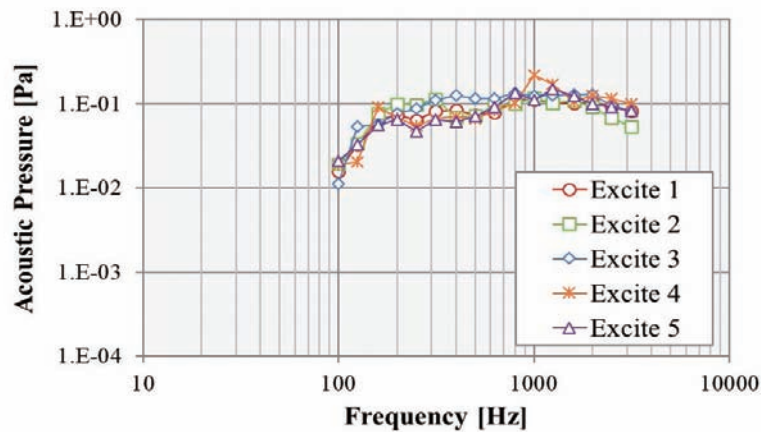
36타입의 경우 바닥충격음 차단구조 성능 실험과 동일한 방법으로도 추가 실험을 수행하였으며, 최종 마감상태(바닥구조 설치)에서 단일수치량 44dB로 분석되었다. 본 연구의 분석 방법에서는 최종 마감상태에서 42dB로 분석되어 약 2dB 편차가 존재하는 것으로 분석되었다. 1/3 옥타브 밴드로 변환하여 측정 방법에 대한 결과를 비교하면, 고주파 대역에서 편차가 존재하는 것으로 확인되었으며, FFT 분석시 고주파 대역에서의 필터 또는 측정 시기가 동일하지 않았기 때문에 외부 소음 유입으로 인한 측정 오차 수준인 것으로 판단된다.

## (2) 경량충격음

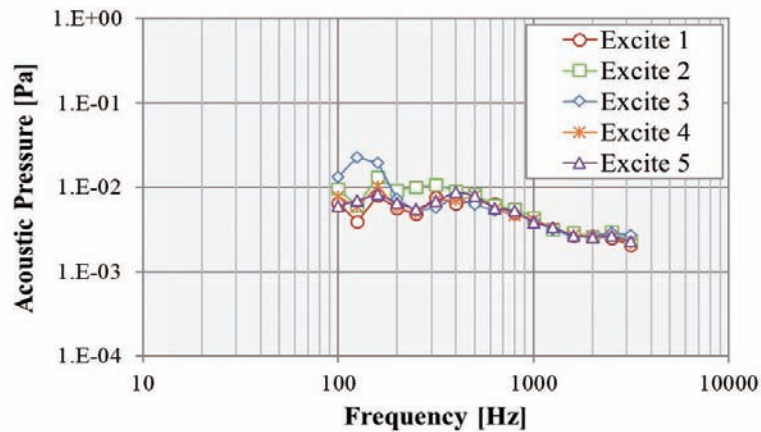
[그림 3-25]은 시공 단계별 36타입의 경량충격음 측정 결과를 나타내며, 1/3 옥타브 밴드로 변환하여 도식화하였다. 36타입도 경량충격원을 이용하는 경우에는 가진 지점에 따른 편차는 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있다.

[그림 3-26]은 경량충격원에 대한 시공 단계별 평균 바닥충격음 측정 결과를 나타낸다. 36타입에서도 바닥구조 시공에 따른 바닥충격음 영향이 가장 크게 존재하였으며, 마감재 시공에 따른 바닥충격음 저감 효과도 존재하는 것으로 분석되었다.

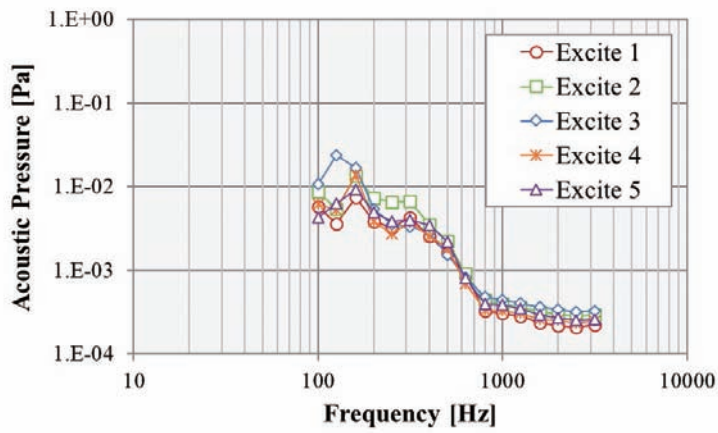
바닥충격음 차단구조 성능 실험과 동일한 방법으로 단일수치량을 계산하면, 최종 마감상태에서 본 연구에서 수행한 방법과 동일하게 37dB가 분석되는 것으로 확인되어, 본 연구의 분석 결과의 신뢰성을 확인하였다.



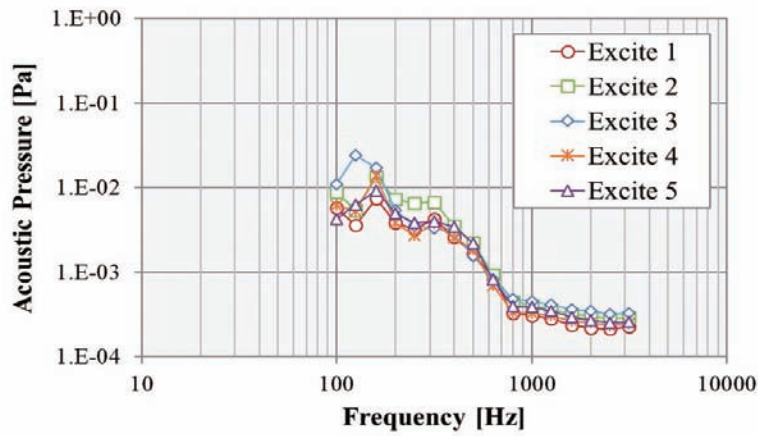
(a) 1단계 : 맨슬래브



(b) 2단계 : 바닥구조 시공

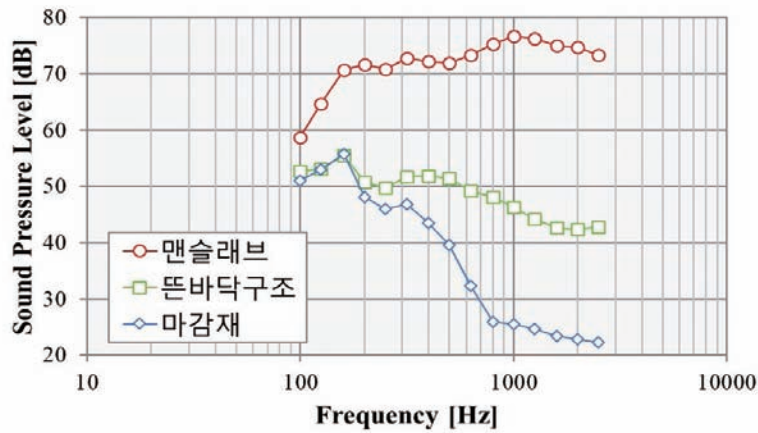


(c) 3단계 : 바닥 마감재 시공



(d) 4단계 : 천정 구조 시공

[그림 3-25] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 측정 결과(경량충격원)(36타입)



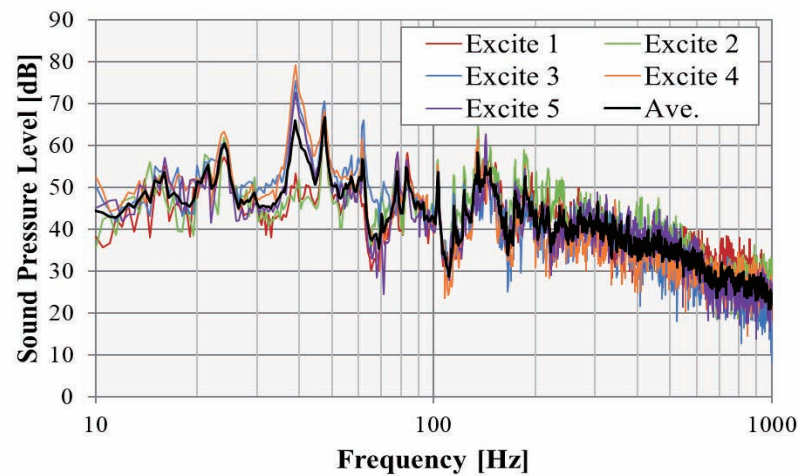
[그림 3-26] 시공 단계별 바닥충격음 영향(경량충격원)(36타입)



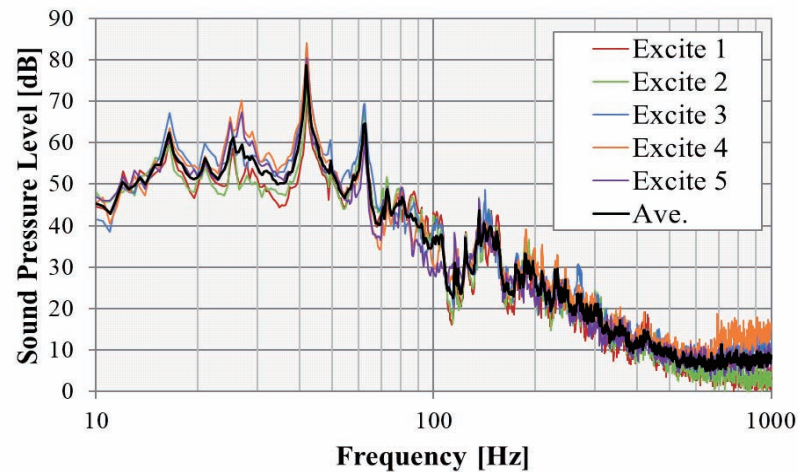
### 3) 46타입

#### (1) 중량충격원

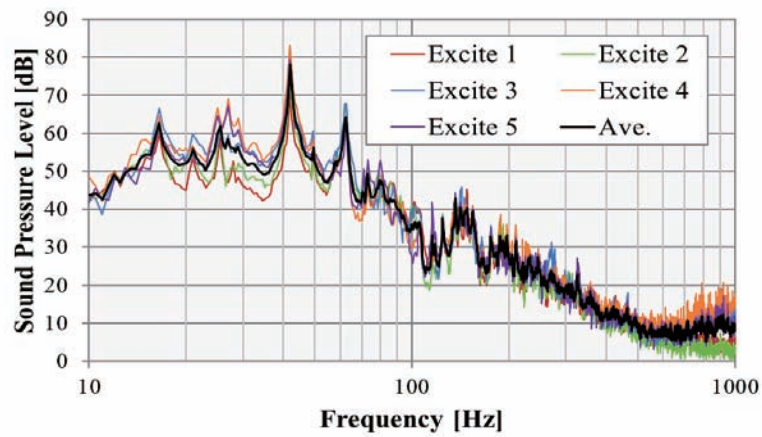
[그림 3-27]은 시공 단계별 수음실 5개 지점에서 측정된 평균 바닥충격음 결과를 나타내며, [그림 3-28]은 시공 단계별 수음실 평균 바닥충격음 측정 결과를 나타낸다. 46타입에서는 슬래브 진동 측정 결과와 유사하게 중앙 지점과 4번 지점을 가진 하는 경우가 가장 큰 바닥충격음이 존재하는 것으로 분석되었으며, 바닥구조 시공 조건 외에는 바닥충격음 저감 영향이 미비한 것으로 분석되었다.



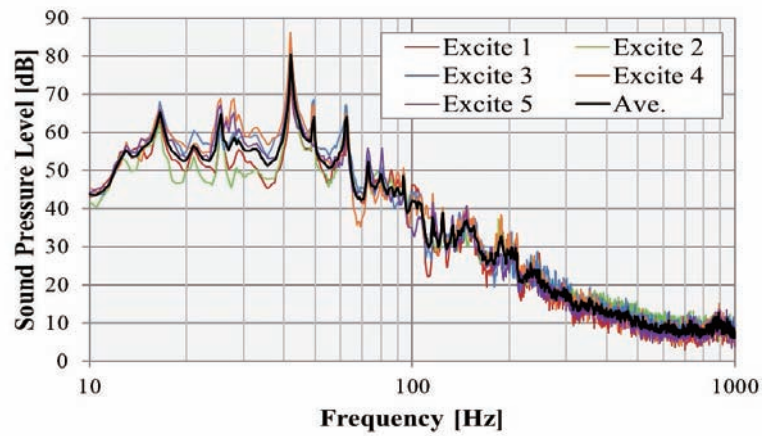
(a) 1단계 : 맨슬래브



(b) 2단계 : 바닥구조 시공

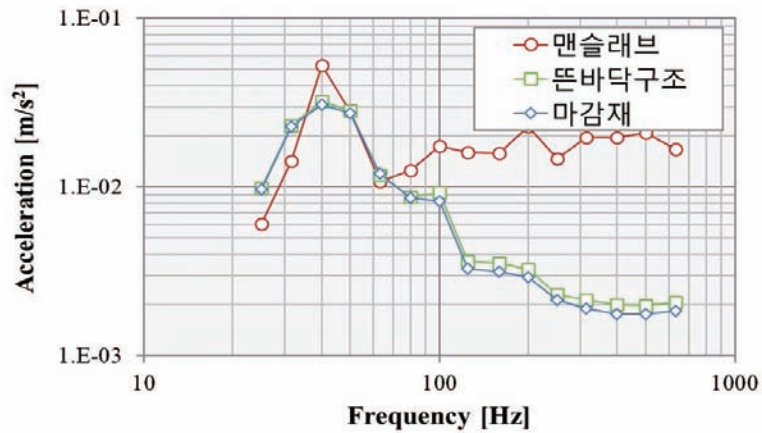


(c) 3단계 : 바닥 마감재 시공



(d) 4단계 : 천정 구조 시공

[그림 3-27] 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(중량충격원)(46타입)

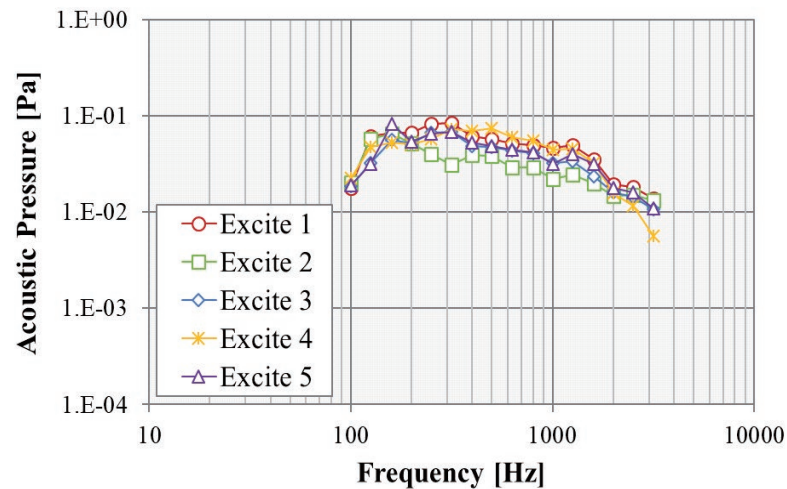


[그림 3-28] 시공 단계별 바닥충격음 영향(중량충격원)(46타입)

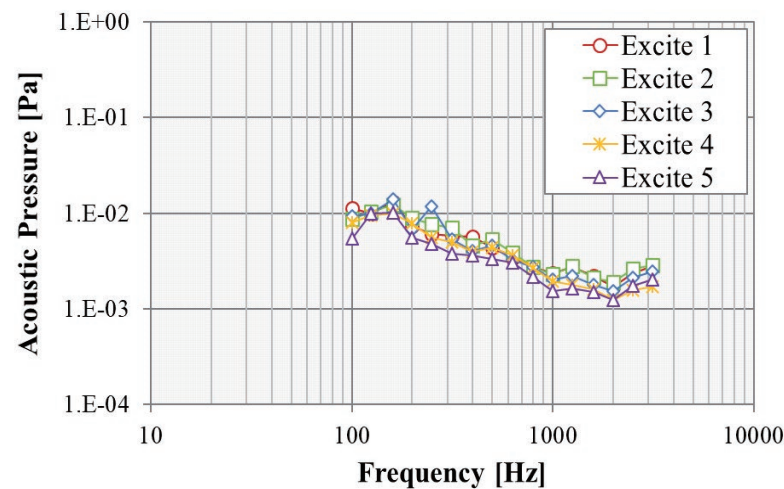
## (2) 경량충격음

[그림 3-29]는 가진 위치별 수음실의 바닥충격음 측정 결과를 나타내며, 1/3 옥타브 밴드로 변환하여 도식화하였다. 46타입도 경량충격원을 이용하는 경우에는 가진 지점에 따른 편차는 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있다.

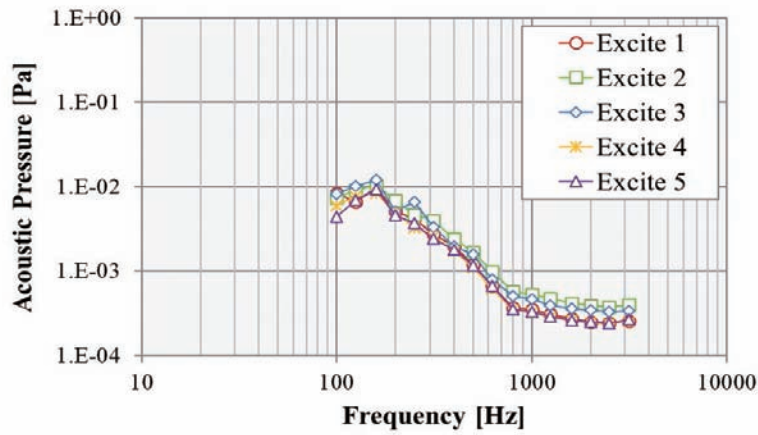
[그림 3-30]은 시공 단계별 수음실 평균 경량충격음 측정 결과를 나타내며, 바닥 슬래브 진동과 동일하게 고주파 대역에서 바닥충격음 저감 효과가 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 천정 설치에 따른 추가적인 바닥충격음 저감 효과도 존재하는 것으로 분석되었다.



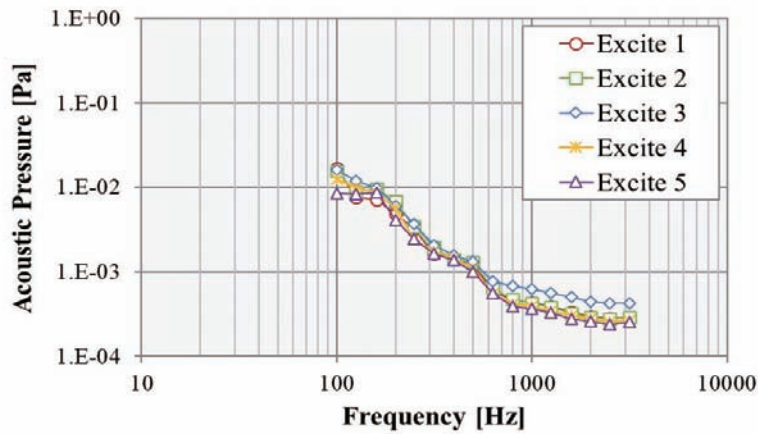
(a) 1단계 : 맨슬래브



(b) 2단계 : 바닥구조 시공

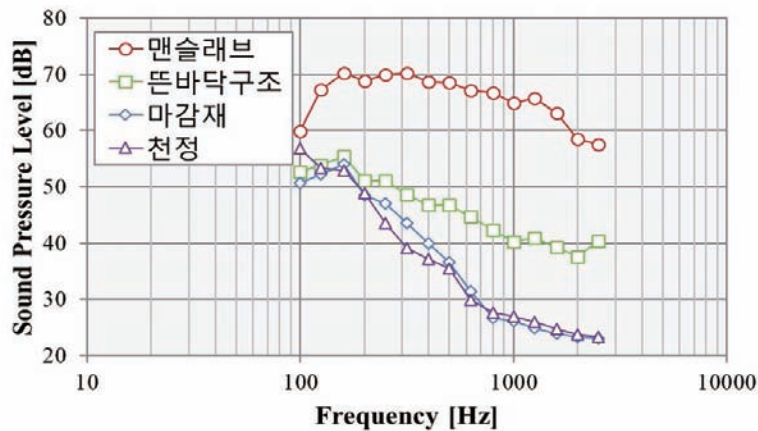


(c) 3단계 : 바닥 마감재 시공



(d) 4단계 : 천정 구조 시공

[그림 3-29] 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과(경량충격원)(46타입)



[그림 3-30] 시공 단계별 바닥충격음 영향(경량충격원)(46타입)

#### 4) 종합

[표 3-5]은 목업실험동의 바닥충격음 측정 결과를 나타낸다. 여기서 중량충격음은 KS F ISO 717-2의 단일수치량을 계산하였으나, 1/1 옥타브 밴드를 이용하였기 때문에 바닥충격음 차단성능 측정 결과와는 편차가 존재할 수 있다.

경량충격음은 KS F ISO 717-2와 동일하게 기준곡선을 이용하여 단일수치량을 분석하였다.

[표 3-5] 바닥충격음 측정 결과(단일수치량)

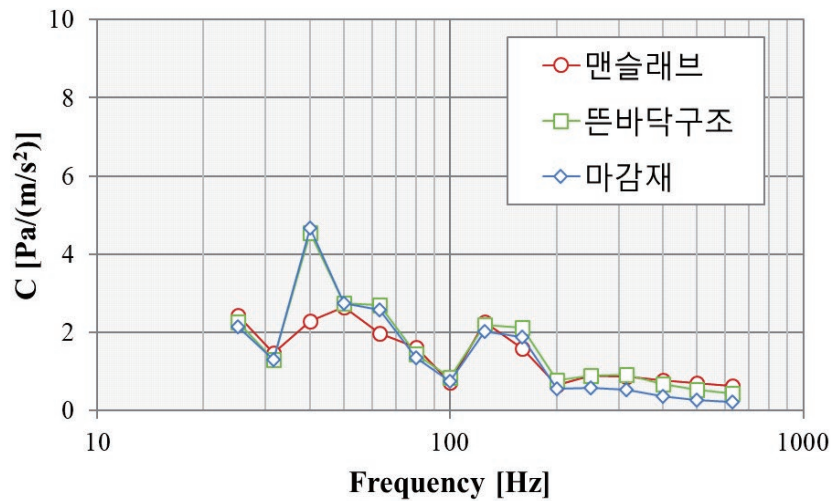
단계		중량충격음	경량충격음
29타입	맨슬래브	54.6	73
	바닥구조	46.1	45
	마감재	46.0	38
	천정	46.7	40
36타입	맨슬래브	55.7	75
	바닥구조	42.6	45
	마감재	42.3	38
	천정	-	-
46타입	맨슬래브	58.3	62
	바닥구조	43.1	43
	마감재	42.9	37
	천정	44.7	37

## 2. 바닥충격음 측정 결과 분석

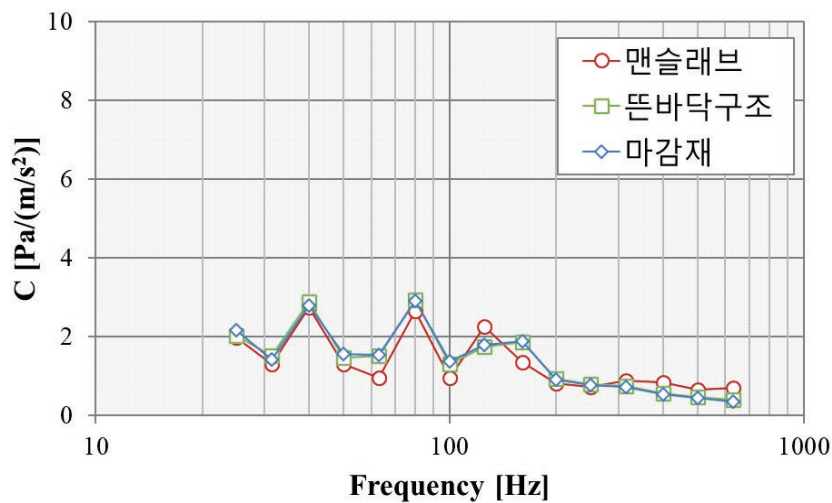
### 2. 1. 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음 상관성 분석

#### 1) 중량충격원

[그림 3-31]은 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 비율을 나타낸다. 해당 결과는 수음실 5개 지점의 평균 바닥충격음 측정 결과를 슬래브 하부 5개 지점에서 측정된 평균 진동의 단순 비율로 계산하였다.

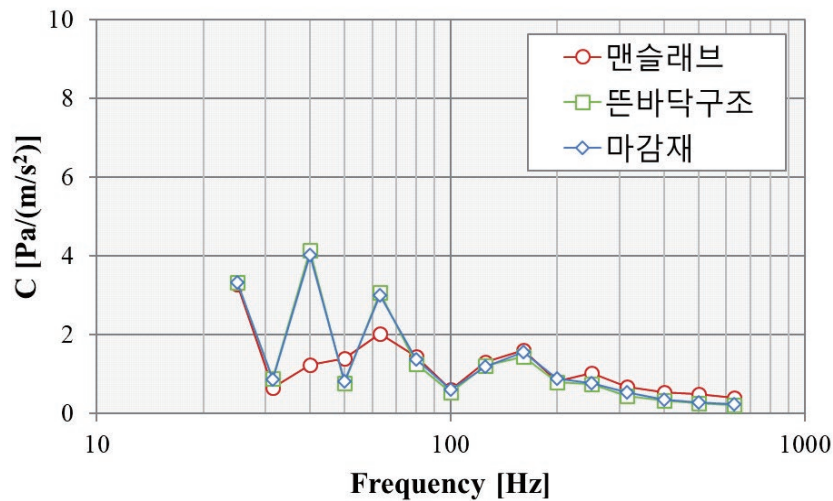


(a) 29타입



(b) 36타입





(c) 46타입

[그림 3-31] 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 상관 계수(중량충격원)

이론적으로 바닥 슬래브의 진동과 바닥충격음 비는 시공 단계에 무관하게 동일하지만, 본 연구의 결과에서는 맨슬래브 조건에서 소음-진동 비가 바닥구조 시공 이후의 소음-진동 비와 편차가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

그림과 같이 100Hz 이하 대역에서는 상대적으로 큰 시공 단계에 따른 소음-진동 비율의 편차가 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 상대적으로 맨슬래브 조건에서의 소음-진동 비가 작은 것을 확인할 수 있다. 즉, 맨슬래브 조건에서는 바닥 슬래브 진동에 따른 바닥충격음 발생이 유사한 반면, 바닥구조 설치 이후에는 바닥 슬래브 진동 대비 상대적으로 큰 바닥충격음이 존재함을 의미한다.

바닥구조 설치후 가진 조건에서는 바닥구조의 상부구조를 가진하고, 충격력이 완충재를 통해 분포 하중으로 슬래브로 전달되는 반면, 맨슬래브 조건에서는 지점 가진 조건에 해당 되어 진동 특성을 결정하기 때문인 것으로 판단된다.

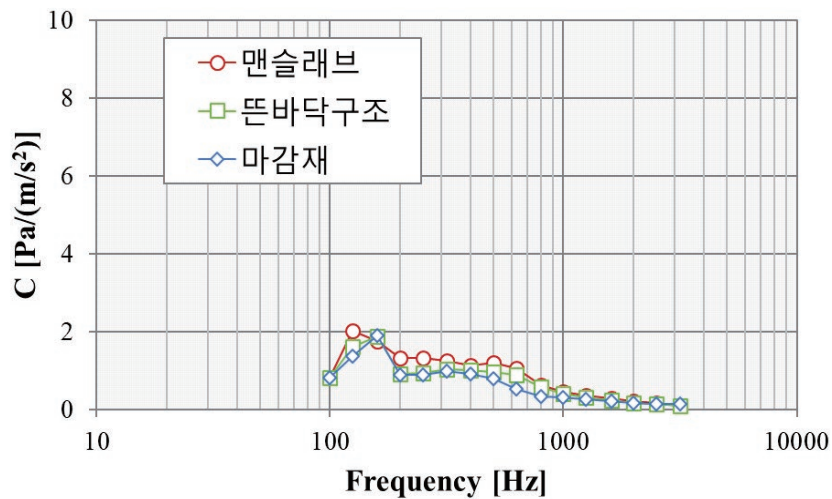
즉, 맨슬래브 조건은 직접적인 점 가진 조건이기 때문에 소음-진동 비의 주파수 대역별 편차가 적으며, 바닥구조 설치 이후에는 면 조건으로 바닥 슬래브를 가진하기 때문에 상대적으로 주파수별 편차가 크게 존재하는 것으로 판단된다.

또한 중량충격음은 저주파 대역을 측정하기 때문에 개별적인 구조 진동 및 음향 모드 특성이 강하게 존재하기 때문에 이와 같은 편차가 존재하는 것으로 판단된다.

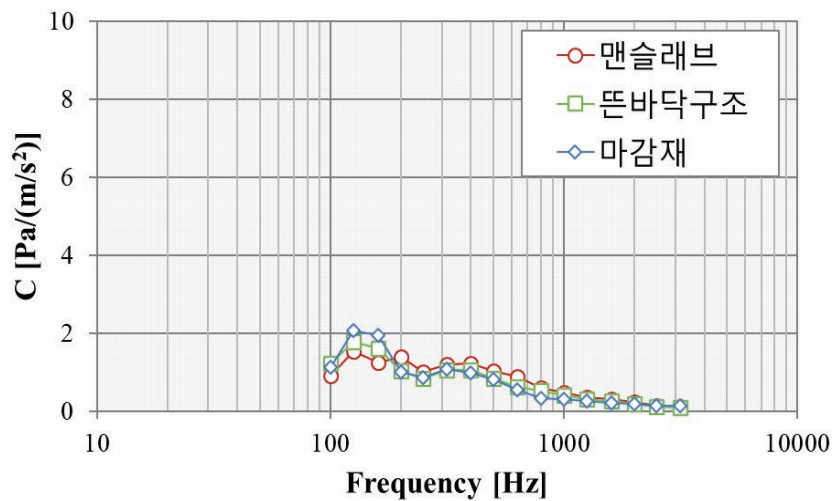
하지만 그림과 같이 주파수별 편차는 크지 않은 것을 확인할 수 있다.

## 2) 경량충격원

[그림 3-32]은 경량충격원으로 가진하는 경우 각 세대별 바닥 슬래브 진동과 바닥 충격음 비를 나타낸다. 경량충격음의 경우에는 개별적인 진동 특성 영향이 작기 때문에 그림과 같이 소음-진동 비가 시공 단계에 무관하게 유사한 것을 확인할 수 있다. 즉, 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음은 유사한 비율로 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 모드 밀도가 증가하여 개별적인 진동 특성이 약화되는 고주파 대역에서는 소음-진동 비가 일정해 지는 것을 확인할 수 있다.

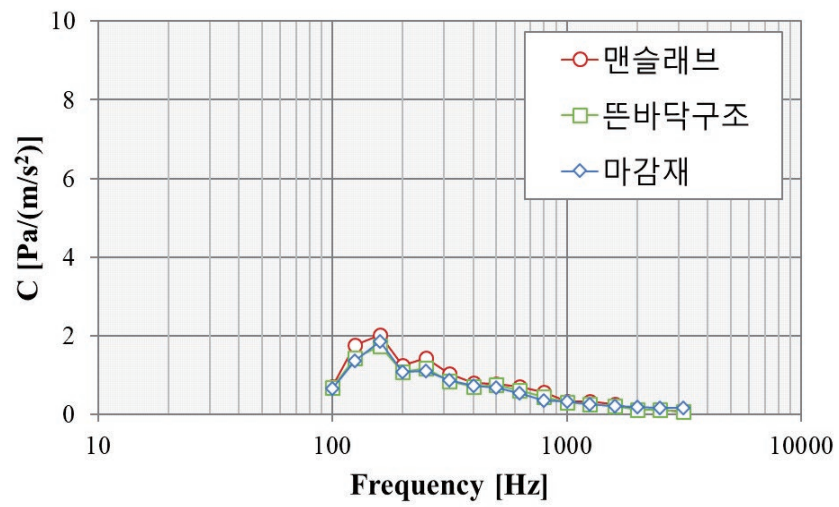


(a) 29타입



(b) 36타입





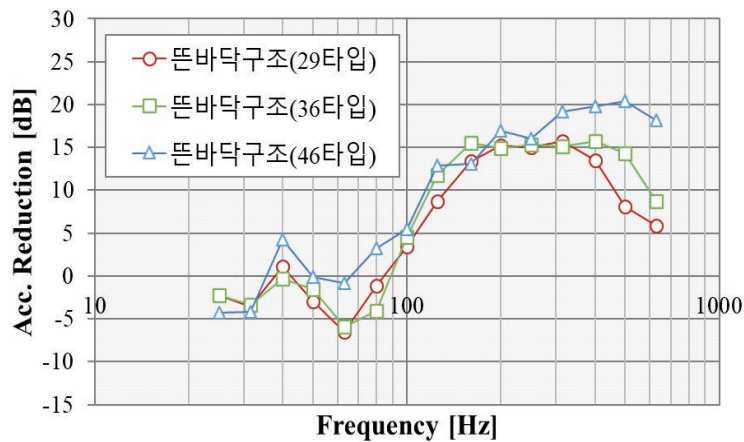
(c) 46타입

[그림 3-32] 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 상관 계수(경량충격원)

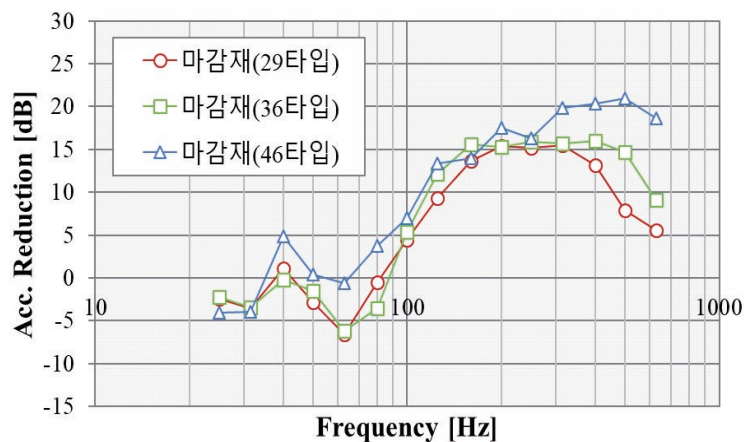
## 2. 2. 시공 단계별 바닥충격음 영향 분석

### 1) 중량충격원

[그림 3-33]은 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 저감량을 나타낸다. 그림과 같이 바닥구조 설치시 1/3옥타브 밴드의 60Hz 이후 주파수 대역부터 이론과 동일하게 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음이 동일하게 저감되는 것을 확인할 수 있으며, 해당 세대의 경우에는 저주파 대역에서 바닥구조 설치에 따른 소음 증폭 현상을 확인할 수 있다. 바닥 슬래브 진동의 경우에는 저주파 대역에서도 진동 저감이 존재하는 것으로 분석되었으나, 이는 측정 위치에 따른 편차로 판단된다.

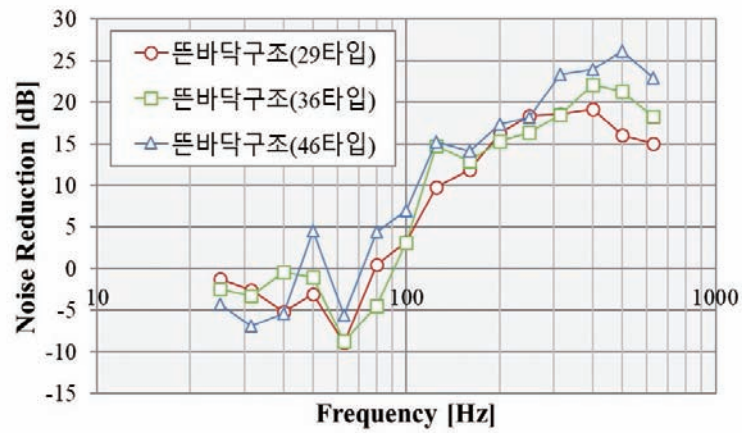


(a) 맨슬래브 대비 바닥구조 시공후

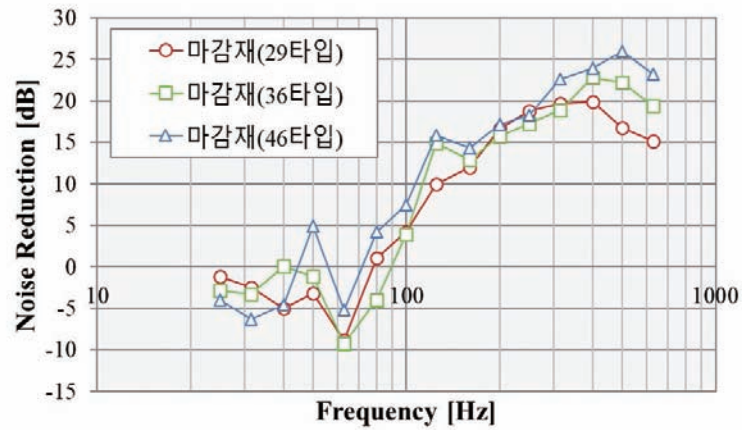


(b) 맨슬래브 대비 바닥구조/바닥 마감재 시공후

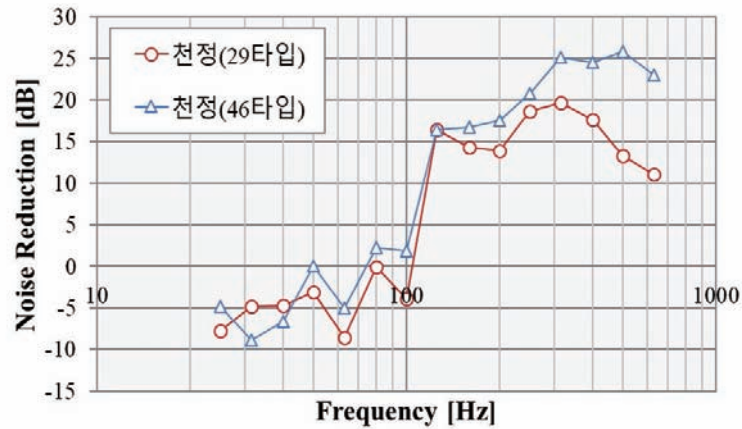
[그림 3-33] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 저감량 비교(중량충격원)



(a) 맨슬래브 대비 바닥구조 시공후



(b) 맨슬래브 대비 바닥구조/바닥 마감재 시공후



(c) 맨슬래브 대비 바닥구조/바닥 마감재/천정 시공후  
[그림 3-34] 시공 단계별 중량충격음 저감량 비교(중량충격원)

[그림 3-34]은 맨슬래브 대비 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 저감량을 나타낸다. 이론식과 유사하게 고주파 대역으로 이동할수록 저감 효과는 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 특정 저주파 대역에서는 맨슬래브 대비 증폭 현상이 존재하였다.

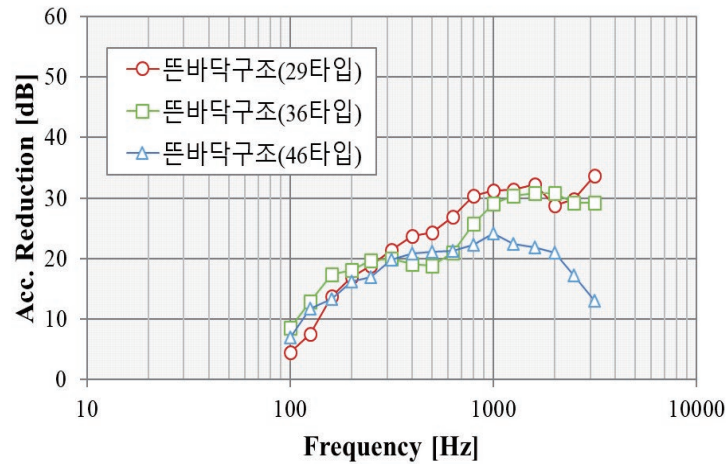
바닥구조 설치에 따른 바닥충격음 효과는 그림과 같이 고주파 대역일수록 기대할 수 있을 것으로 판단되나, 중량충격음의 특성 상 저주파 대역에서의 저감 효과가 상대적으로 적기 때문에 이를 보완할 수 있는 소음 저감 기술이 요구될 것으로 판단된다.

바닥 마감재 설치에 따른 효과는 상대적으로 미비한 것으로 분석되었으며, 천정 설치에 따른 효과는 바닥 마감재 대비 크게 존재하나 100Hz 대역에서는 바닥구조의 소음 저감 효과를 증폭할 수 있는 것으로 분석되었다.

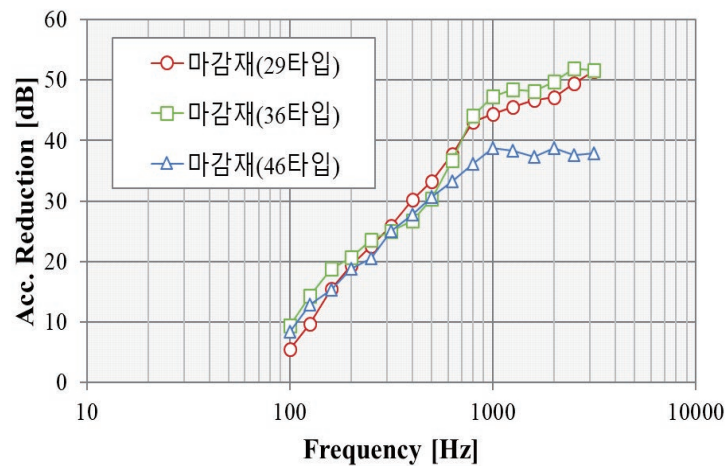
보다 정밀한 분석은 다음장에서 경량충격음 측정 결과와 함께 이론적으로 분석하였다.

## 2) 경량충격원

[그림 3-35]은 경량충격원으로 가진하는 경우 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 저감량을 나타낸다. 경량충격음의 경우 29타입과 36타입은 유사한 저감량이 존재하였으나, 46타입의 경우에는 저감량 차이가 존재하였다.

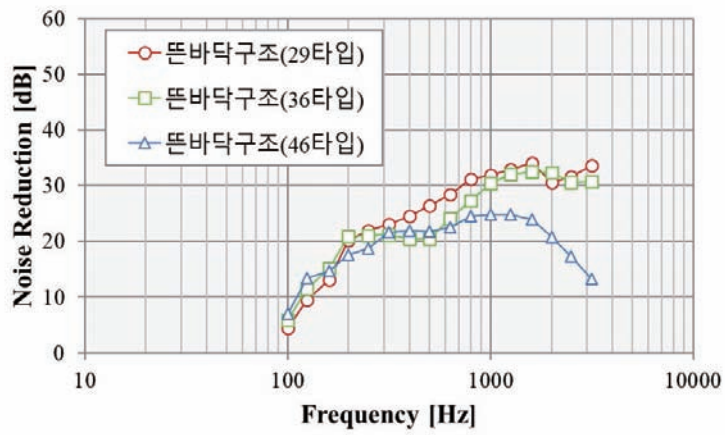


(a) 맨슬래브 대비 바닥구조 시공후

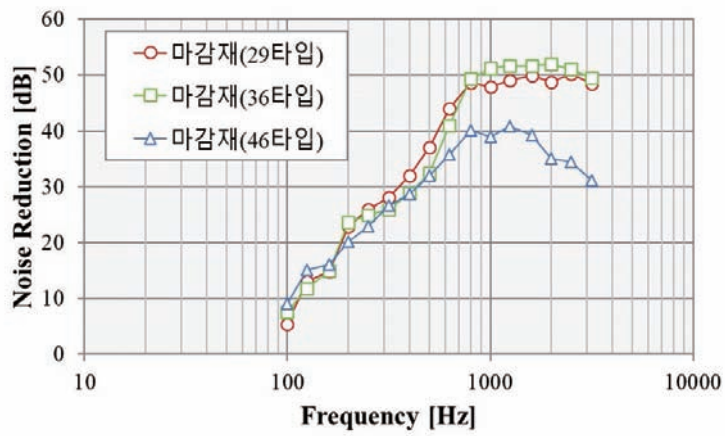


(b) 맨슬래브 대비 바닥구조/바닥 마감재 시공후

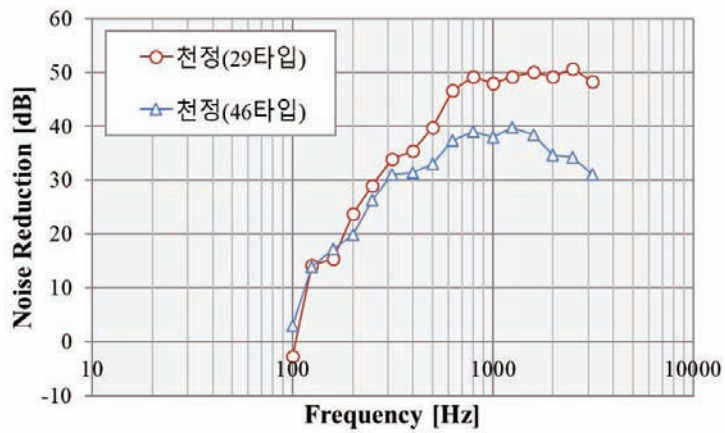
[그림 3-35] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 저감량 비교(경량충격원)



(a) 맨슬래브 대비 바닥구조 시공후



(b) 맨슬래브 대비 바닥구조/바닥 마감재 시공후



(c) 맨슬래브 대비 바닥구조/바닥 마감재/천정 시공후  
[그림 3-36] 시공 단계별 경량충격음 저감량 비교(경량충격원)

[그림 3-26]은 경량충격원에 대한 시공 단계별 바닥충격음 저감량을 나타낸다. 경량충격음에서는 중량충격원 대비 측정 대역이 고주파 대역에 존재하기 때문에 바닥구조 시공 및 마감재 시공에 따른 저감 효과가 확인되는 것을 알 수 있다.

단, 29타입과 36타입의 경우에는 시공 단계에 따른 바닥충격음 저감량이 유사한 반면, 46타입의 경우에는 편차가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

이는 목업실험동의 맨슬래브 상태가 [그림 3-27]과 같이 46타입이 고르지 못하였기 때문에 완충재가 슬래브 표면에 밀착시공되지 않았기 때문에 완충재의 의한 절연작용이 완벽하게 구현되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 정리된 슬래브 표면(29타입)



(b) 시공불량 슬래브 표면(46타입)

[그림 3-37] 목업실험동의 맨슬래브 표면 상태

이와 같이 맨슬래브의 표면 상태가 정리된 경우에는 이론식 적용이 가능한 것으로 판단되며, [그림 3-37]과 같이 맨슬래브의 표면 상태가 고르지 못하거나, 불량인 경우에는 이론식 적용에 한계가 존재하는 것으로 판단된다.



### 3. 측정 결과 종합 분석

중량충격원과 경량충격원의 주파수 대역별 하중 분포는 상이하며, 일반적으로 중량충격원의 경우에는 1/1옥타브 밴드의 125Hz까지 충격력이 집중되어 있으며, 경량충격원의 경우에는 전주파수 대역에 유사한 충격력이 분포되어 있다. 따라서 본 장에서는 표준충격원의 충격력 특성을 고려하여 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음 비율 및 시공 단계별 저감량을 분석하였다. 1/1 옥타브 밴드의 125Hz까지는 중량충격원을 이용한 측정 결과를 적용하였으며, 1/1 옥타브 밴드의 250Hz 이후는 경량충격원을 이용한 측정 결과를 적용하여 도식화 하였다.

#### 3. 1. 시공단계별 바닥충격음 저감량 분석

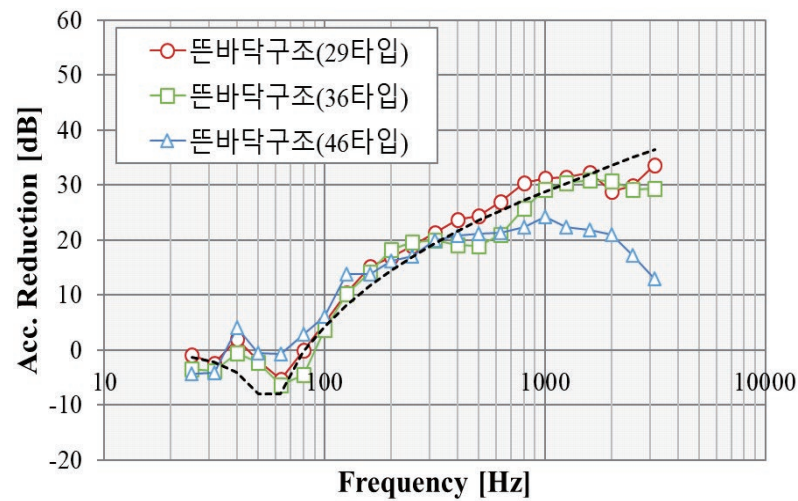
[그림 3-38]은 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 저감량을 나타낸다. 여기서 저감량은 중량충격원과 경량충격원 측정 결과를 충격력 특성을 고려하여 종합하였다. 1/1옥타브 밴드의 125Hz까지는 중량충격원에 의한 측정 결과를, 1/1 옥타브 밴드의 125Hz 이후부터는 경량충격원에 의한 측정 결과를 적용하였다.

[그림 3-38(a)]와 같이 완충재를 적층한 뜬바닥구조를 적용하는 경우 공동주택 타입에 무관하게 유사한 슬래브 진동 저감량을 확인할 수 있으며, 이론식(Transmissibility Model) 대비 유사한 저감량이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

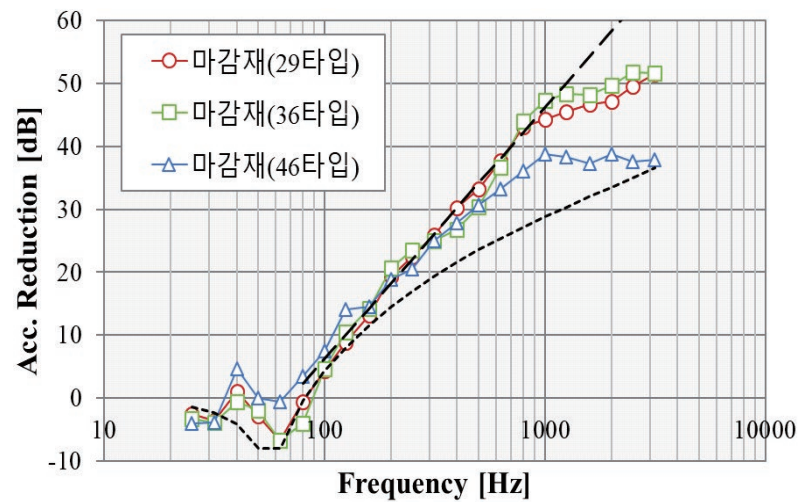
단, 고주파 대역에서는 이론식 대비 편차가 상대적으로 크게 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 46타입의 경우에는 바닥 슬래브 진동 저감 효과가 크게 저하되고 있는 것으로 분석되었다. 이는 앞서 설명하였듯이 46타입의 맨슬래브 표면 상태가 고르지 못하였기 때문에 바닥구조 시공 조건에 따른 저감 효과가 구현되지 못하는 것으로 판단된다.

[그림 3-38(b)]는 바닥 마감재 적용에 따른 맨슬래브 조건 대비 바닥 슬래브 진동 저감량을 나타내며, 이론적 저감량을 함께 도식화하였다. 바닥 마감재에 따른 저감량은 뜬바닥구조의 충격력 저감 메커니즘이 상이하기 때문에 바닥구조의 충격력 저감 효과와 함께 추가적인 충격력 저감이 가능한 것으로 판단된다. 바닥구조의 저감량을 고려하여 46타입에서도 유사한 수준의 바닥 마감재 저감량이 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 저감 효과는 이론적 접근이 가능할 것으로 판단된다.





(a) 바닥구조 시공

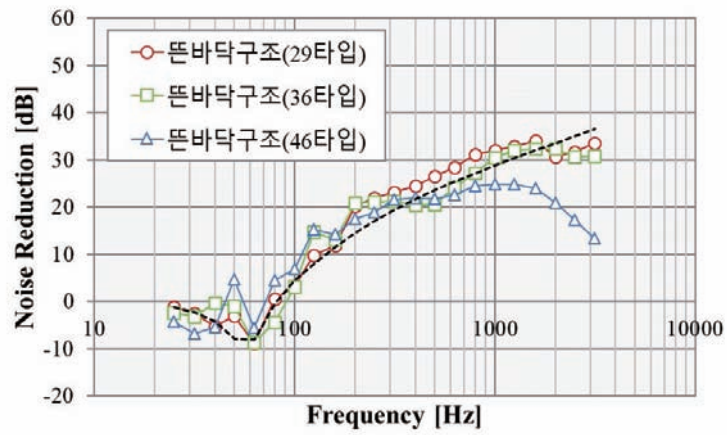


(b) 바닥구조 및 바닥 마감재 시공

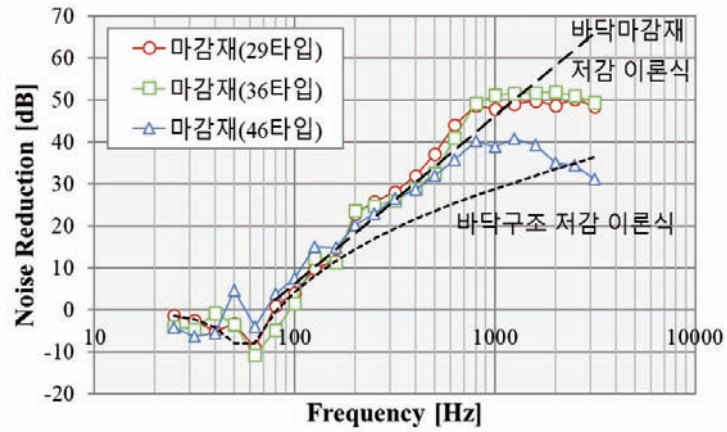
[그림 3-38] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 저감량(종합)

[그림 3-39]은 시공 단계별 바닥충격음 측정 결과를 나타내며, 이론적 저감량을 함께 도식화하였다. 바닥충격음 측정 결과에서도 저주파 대역에서는 공동주택 타입별 편차가 존재하였으나, 약 100Hz 이후 대역부터는 공동주택 타입별 편차는 상대적으로 미비한 것으로 분석되었다.

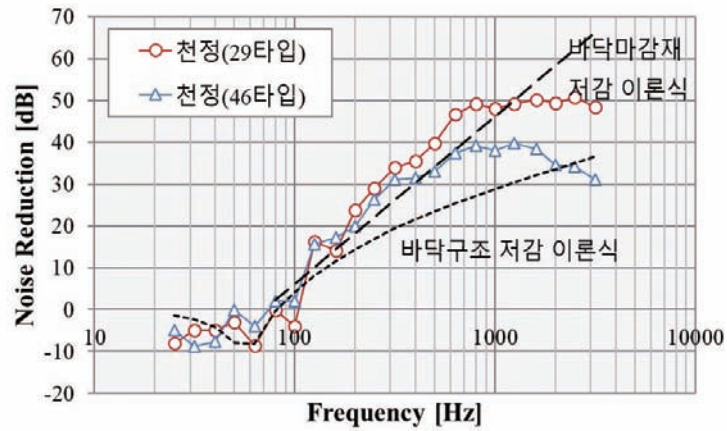
바닥충격음 저감 이론식 대비 바닥충격음 측정 결과에서도 이론식 대비 유사한 저감량이 존재하는 것을 확인할 수 있으며, 46타입의 경우에는 바닥 슬래브 진동 저감량과 동일하게 이론식 대비 저감량이 하락되어 있는 것을 확인할 수 있다.



(a) 바닥구조 시공



(b) 바닥구조 및 바닥 마감재 시공



(c) 바닥구조 및 바닥 마감재 시공  
[그림 3-39] 시공 단계별 바닥충격음 저감량(종합)

천정 시공에 따른 바닥충격음 저감은 [그림 3-39(c)]와 같이 1/3 옥타브 밴드의 125Hz부터 전체 주파수 대역에서 약 2~3dB 저감 가능한 것으로 분석되었다. 단, 100Hz 이후 특정 주파수 대역에서 약 7dB 증가하는 것으로 분석되었다.

천정 구조의 경우 바닥 슬래브에서 방사된 소음이 수음실로 전파를 저감시키는 역할을 하기 때문에 바닥구조와는 별도의 저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 단, 일반석고보드의 이론적 차음성능 대비 실제 천정 구조에서는 이론적 저감량 대비 저감량은 편차가 존재하는 것으로 분석되었다.

하지만 질량 법칙 적용이 가능한 주파수 대역에서는 바닥충격음 저감이 가능한 것으로 분석되었기 때문에 차음석고보드를 적용하는 경우 바닥충격음 저감 효과 개선을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 천정 내부 공기층의 공명 현상으로 인해 29타입의 경우 1/1 옥타브 밴드 100Hz에서 바닥충격음이 최대 8dB 증가되는 것으로 분석되었다. 공기층의 공명 현상은 천정 내부 흡음재 삽입 등으로 공명 현상을 억제할 수 있기 때문에 향후 후속 연구를 통해 추가 분석할 예정이다.

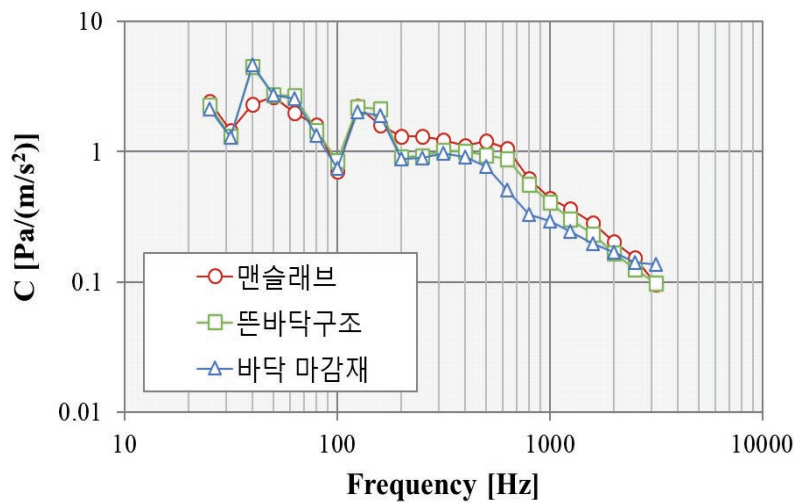
결과적으로 저주파 대역을 측정하는 중량충격음의 경우 이론식을 이용한 중간소음 저감량 분석은 가능하나 편차가 상대적으로 크게 존재할 것으로 판단되며, 경량충격음의 경우 이론식을 이용한 바닥충격음 분석이 가능할 것으로 판단된다.

또한 맨슬래브 시공 상태에 따라 이론식 대비 편차가 크게 존재하는 것으로 분석되었으며, 시공 상태 점검에도 활용 가능할 것으로 판단된다.

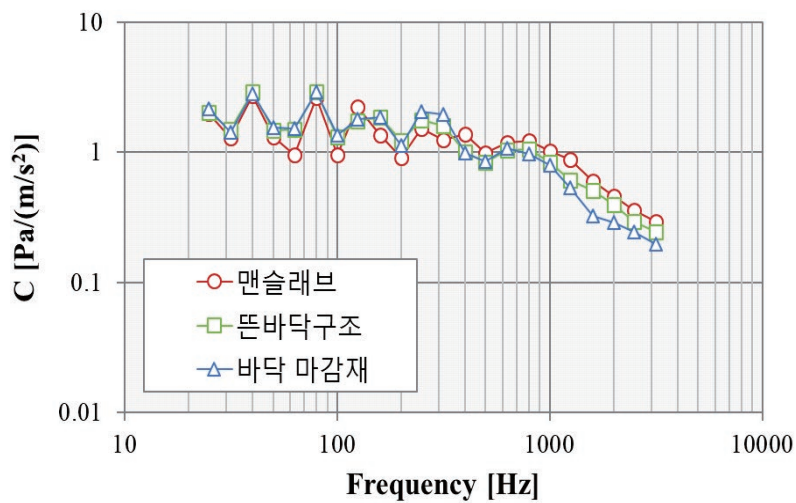
천정 구조에 의한 바닥충격음 효과 분석은 일반적인 차음 이론식으로 분석에는 한계가 존재할 것으로 판단되며, 일정 크기 이상의 차음성능이 존재하는 경우에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

### 3. 2. 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 상관 계수

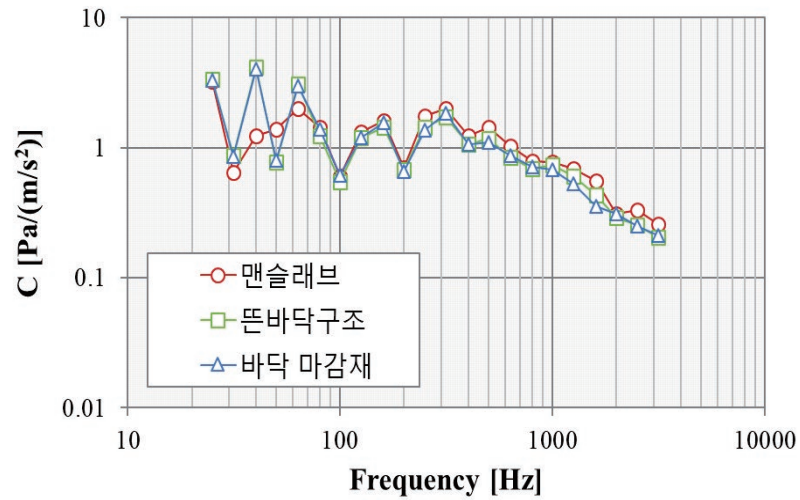
[그림 3-40]은 중량충격원과 경량충격원에 대한 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음 비를 정리하였다. 바닥충격음 저감 효과 분석 방법과 동일하게 중량충격원의 경우 1/1옥타브 밴드의 125Hz까지 충격력이 집중되어 있기 때문에 125Hz까지는 중량 충격원에 대한 결과를 적용하고, 1/1 옥타브 밴드의 250Hz부터는 경량충격원에 대한 결과를 그림과 같이 정리하였다.



(a) 29타입



(b) 36타입



(c) 46타입

[그림 3-40] 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 상관 계수(종합)

그림과 같이 100Hz 이하 주파수 대역에서는 시공 단계별 진동-소음 비의 편차가 존재하는 반면, 100Hz 이후 주파수 대역에서는 시공 단계에 따른 진동-소음 비가 유사한 것을 확인할 수 있다.

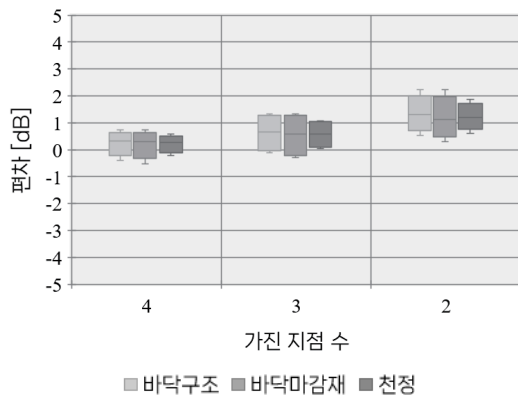
시공 단계에 따라 바닥충격음 저감 효과는 존재하지만, 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 비는 유사한 것을 확인할 수 있다. 즉, 시공 조건에 따라 바닥충격음이 변화되어도 질량-소음 비는 일정한 것을 확인할 수 있다. 즉, 바닥 슬래브 진동을 이용하여 바닥충격음 분석이 가능할 것으로 판단된다.

### 3. 3. 측정/가진 지점별 바닥충격음 결과 분석

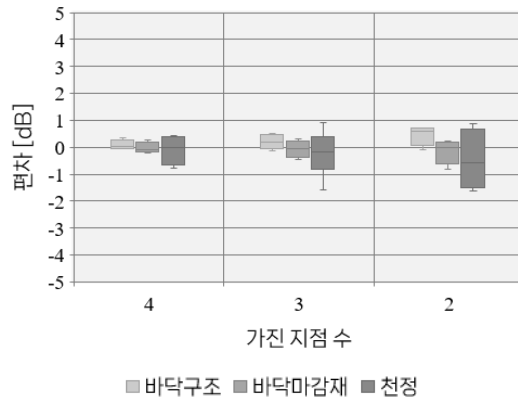
#### 1) 타격 지점에 따른 분석

본 절에서는 가진 지점 수 변경에 따른 바닥충격음 결과 편차를 분석하였다. [그림 3-41]~[3-43]은 5개 지점의 평균 가진 조건에서의 바닥충격음 대비 타격 지점 수에 따른 바닥충격음 편차를 나타낸다.

단, 본 연구에서는 측정 공간의 양 옆에 내력벽이 존재하는 벽식 구조를 대상으로 하였으며, 해당 조건의 벽식 구조 조건에서는 중앙 지점이 가장 큰 바닥충격음이 발생한다. 따라서 본 분석에서도 중앙 지점을 포함하는 조건에서 가진 지점 수를 조정하였으며, 이에 따라 가진 지점 수 변화에 따른 편차는 미비한 것으로 판단된다.

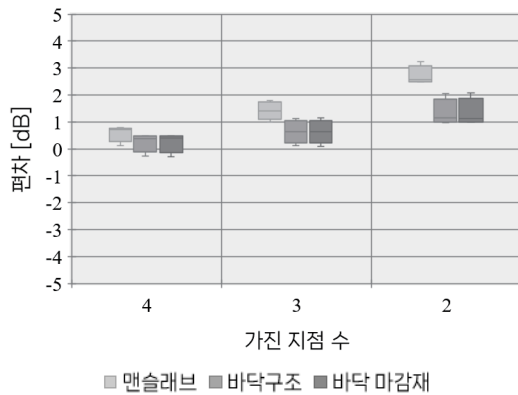


(a) 중량충격음

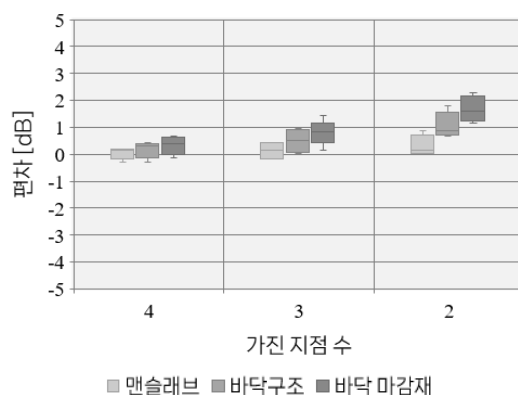


(b) 경량충격음

[그림 3-41] 타격 지점 변경에 따른 바닥충격음 편차(29타입)

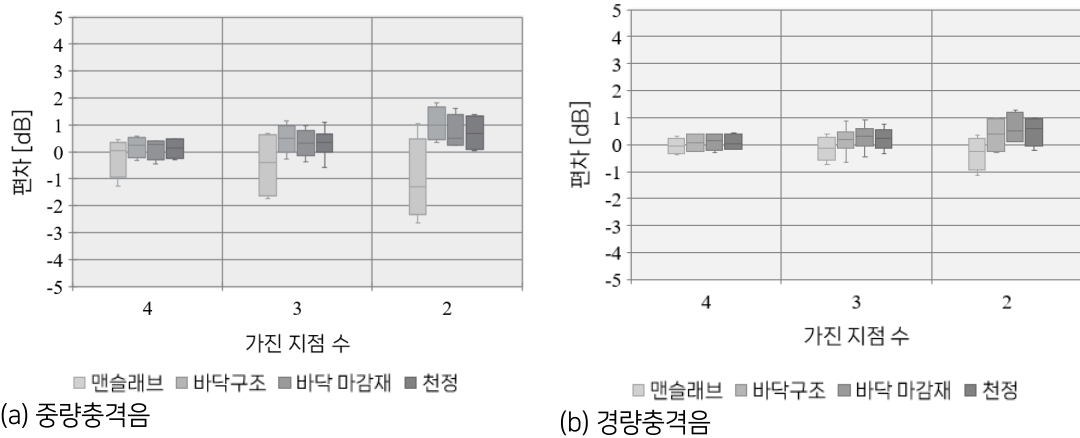


(a) 중량충격음



(b) 경량충격음

[그림 3-42] 타격 지점 변경에 따른 바닥충격음 편차(36타입)



[그림 3-43] 타격 지점 변경에 따른 바닥충격음 편차(46타입)

가진 지점 수 변화에 따른 바닥충격음 단일수치량 편차를 분석한 결과, 중량충격음에서는 최대 3dB 편차가 존재하였으며, 가진 지점 수가 줄어들수록 바닥충격음 단일수치량이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

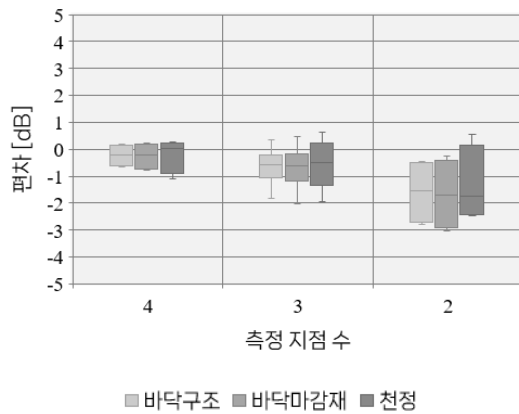
현재 바닥충격음 평가 방법은 5개 지점을 가진하여 평균 소음도를 계산하고 있으며, 중앙 지점이 가장 크게 존재하기 때문에 나머지 4개 지점의 측정 결과는 평균 소음도를 저감 시키는 경향이 존재한다. 본 연구의 분석 방법과 같이 중앙 지점을 포함하고 그 외 가진 지점을 제외하는 경우는 그림과 같이 바닥충격음 단일수치량이 증가하게 된다. 단, 이러한 결과는 측정 대상 공간의 양 옆에 내력벽이 존재하는 조건으로 구조 평면이 다른 경우에는 경향이 다르게 존재할 수 있다.

따라서 내력벽이 측정 대상 공간의 양 옆에 존재하는 본 연구의 실험동과 같은 조건에서는 중앙 지점을 포함한 2개 지점을 가진하여도 바닥충격음 편차가 3dB 이내로 분석이 가능할 것으로 판단된다.

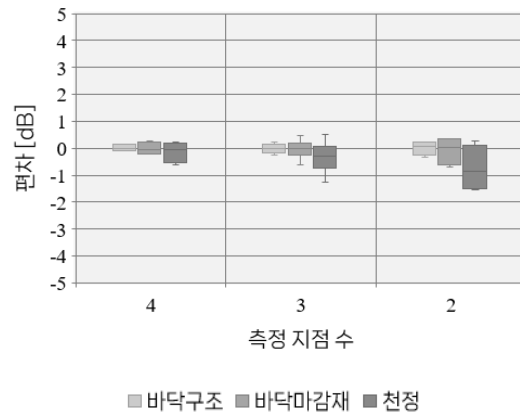
경량충격음의 경우에는 중량충격음 대비 가진 지점수를 변경하여도 편차 약 2dB 이내로 존재하는 것으로 분석되었으며, 이는 모드 밀도가 높아 개별적인 진동 특성 영향이 감소되는 주파수 영역을 측정하기 때문에 가진 위치에 따른 편차가 적게 존재하며, 이에 따라 가진 지점 수 변경에 따른 편차도 크지 않은 것으로 판단된다.

## 2) 측정 지점에 따른 분석

[그림 3-44]~[그림 3-46]은 측정 지점 수 변화에 따른 바닥충격음 측정 결과를 나타내며, 측정 지점에서도 중앙 지점을 포함한 조건에서 5개 지점 평균 바닥충격음 결과와 비교하였다. 그림과 같이 중앙 지점을 포함한 경우에는 2개 지점으로도 바닥충격음 분석이 가능한 것으로 분석되었다. 측정 지점의 경우에도 주방 공간을 포함하는 경우에는 편차가 존재할 수 있기 때문에 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

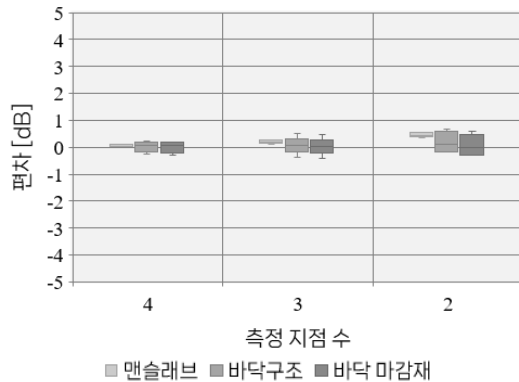


(a) 중량충격음

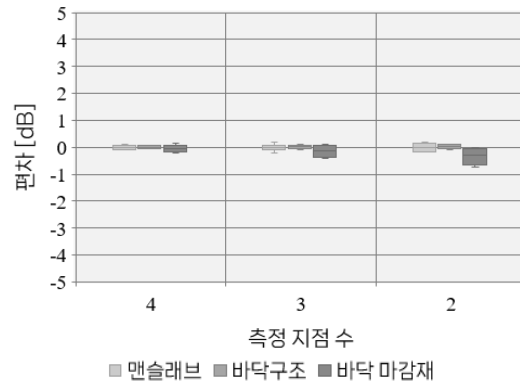


(b) 경량충격음

[그림 3-44] 측정 지점 변경에 따른 바닥충격음 편차(29타입)



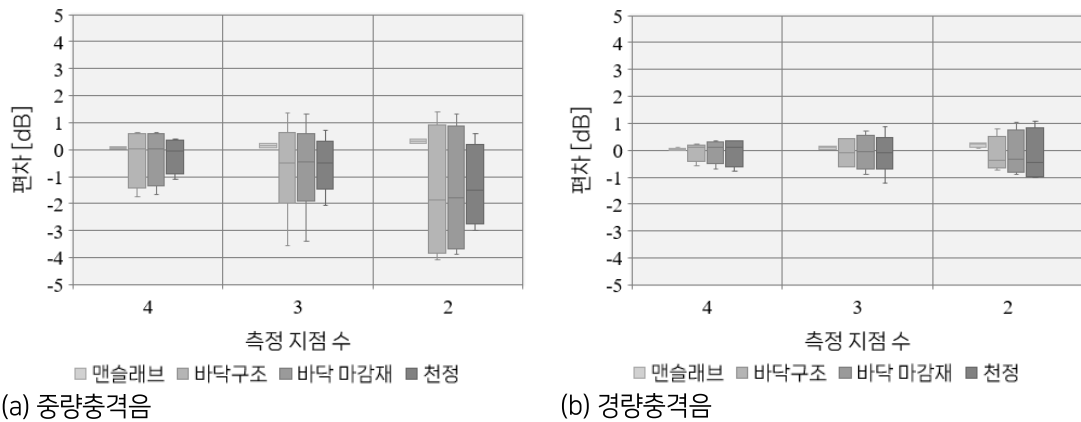
(a) 중량충격음



(b) 경량충격음

[그림 3-45] 측정 지점 변경에 따른 바닥충격음 편차(36타입)





[그림 3-46] 측정 지점 변경에 따른 바닥충격음 편차(46타입)

실험 대상인 29타입과 36타입의 경우에는 거실 공간이 거실 분합문으로 구분되어 있기 때문에 측정 지점 수 변경에 따른 편차는 상대적으로 크지 않은 것으로 분석되었다.

하지만 46타입의 경우에는 주방 공간을 포함하여 음향 모드가 존재하기 때문에 다른 타입 대비 상대적으로 큰 편차가 존재하였다.

따라서 소형 공동주택 또는 측정 대상 공간이 분합문 설치와 같이 별도의 음향 공간으로 구분되는 경우에는 측정 지점 수 변경에 따른 편차는 상대적으로 크지 않을 것으로 예상되며, 주방 공간이 포함하여 음향 공간이 구성되는 경우에는 최소 3개 이상의 측정 지점이 요구될 것으로 판단된다.

## 4. 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측식 검증

### 4. 1. 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 및 검증

각 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 결과는 측정 결과와 함께 [표 3-6]에 정리하였다. 여기서 중량충격음은 1/3 옥타브 밴드가 아닌 1/1 옥타브 밴드로 단일수치량을 계산하였으며, 경량충격음은 KS F 717-2의 단일수치량과 1/3옥타브 밴드 100~3,50Hz의 전체소음도를 함께 계산하여 정리하였다

표와 같이 맨슬래브 조건에서는 바닥 슬래브에 충분한 충격력이 가진되기 때문에 최대 1.9dB오차 수준으로 유산 것으로 분석되었다. 단, 중량충격음에서는 최대 4.5dB 편차가 존재하였으며, 충격력이 미비한 1/3 옥타브 밴드의 250, 500Hz에서 편차가 발생한 것으로 판단된다.

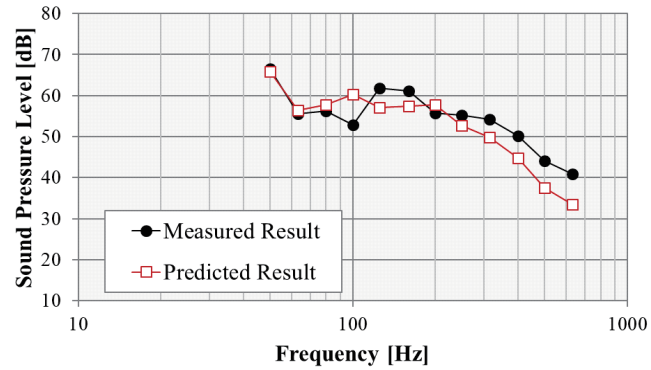
충격력이 측정 주파수 전체 대역이 균일하게 존재하는 경량충격음의 경우에는 중량충격음 대비 상대적으로 유사한 바닥충격음 분석되었다.

[표 3-6] 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 결과 비교

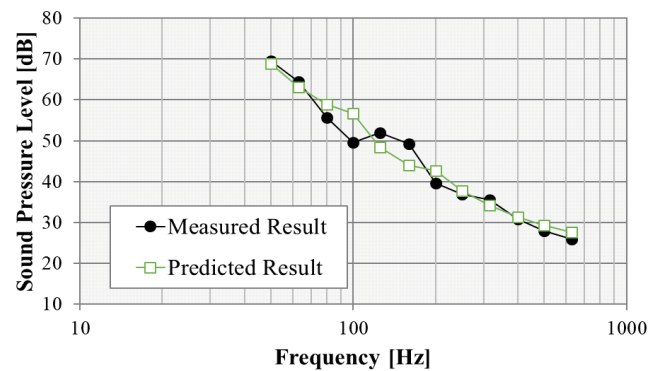
단계		중량충격음			경량충격음		
		측정	예측	편차	측정	예측	편차
29타입	맨슬래브	54.6	53.1	-1.5	73(81.1)	71(79.5)	-2(-1.6)
	바닥구조	46.1	46.4	0.3	45(59.8)	46(61.5)	1(1.7)
	마감재	46.0	46.1	0.1	38(56.9)	41(59.2)	3(2.3)
36타입	맨슬래브	55.7	54.9	-0.8	75(82.1)	73(80.8)	-2(-1.3)
	바닥구조	42.6	44.2	1.6	45(59.2)	45(60.1)	0(0.9)
	마감재	42.3	43.9	1.6	38(56.4)	39(57.2)	1(0.8)
46타입	맨슬래브	58.3	57.1	-1.2	62(76.0)	61(75.0)	-1(-1.0)
	바닥구조	43.1	47.6	4.5	43(58.1)	44(59.2)	1(1.1)
	마감재	42.9	46.9	4.0	37(55.4)	39(56.8)	2(1.4)

## 1) 29타입

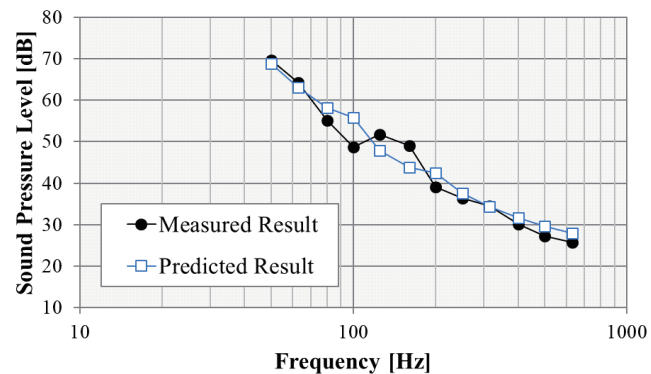
[그림 3-47]은 바닥 슬래브 진동을 이용하여 계산된 바닥충격음 예측 결과와 바닥 충격음 측정 결과를 1/3 옥타브 밴드로 함께 도식화하여 비교하였다.



(a) 맨슬래브



(b) 바닥구조 시공

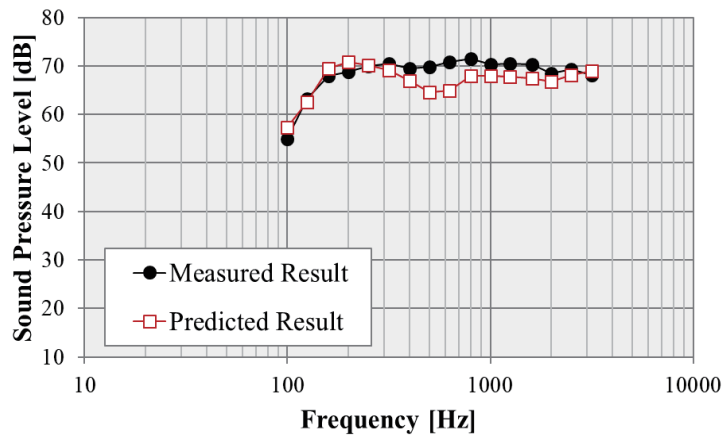


(c) 바닥구조, 바닥 마감재 시공

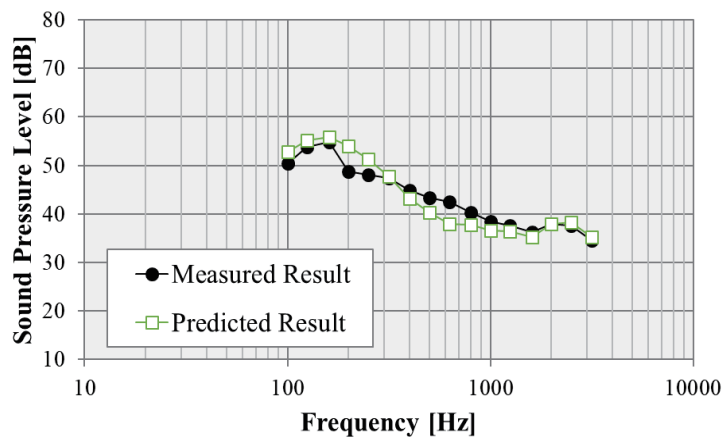
[그림 3-47] 바닥 슬래브 진동을 이용한 중량충격음 계산(29타입)

그림과 같이 맨슬래브, 바닥구조 시공, 바닥 마감재 시공 조건의 바닥충격음 계산 결과에서 옥타브별 편차는 존재하지만 주파수 특성은 유사한 것으로 분석되었으며, 단일수치량에서도 최대 1.5dB로 유사한 것으로 분석되었다.

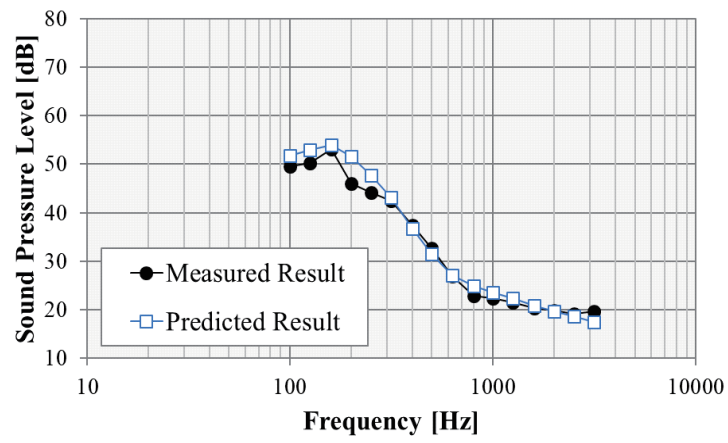
[그림 3-48]은 경량충격원에 대한 바닥충격음 예측 결과와 측정 결과를 함께 도식화하였다. 그림과 같이 경량충격음의 경우에는 중량충격음 대비 상대적으로 유사한 바닥충격음 예측 결과를 확인할 수 있으며, 옥타브 별 편차는 존재하나 바닥충격음 저감 효과 분석이 가능할 것으로 판단된다. 단, 전체소음도에서는 마감구조 설치 후 3.9dB의 상대적으로 큰 편차는 존재하였다.



(a) 맨슬래브



(b) 바닥구조 시공

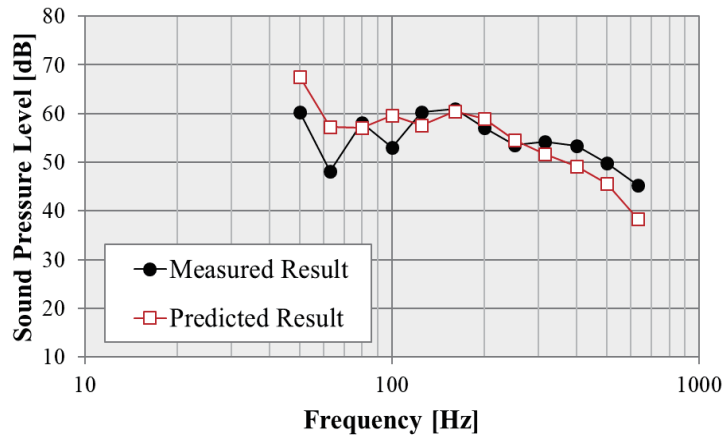


(c) 바닥구조, 바닥 마감재 시공  
 [그림 3-48] 바닥 슬래브 진동을 이용한 경량충격음 계산(29타입)

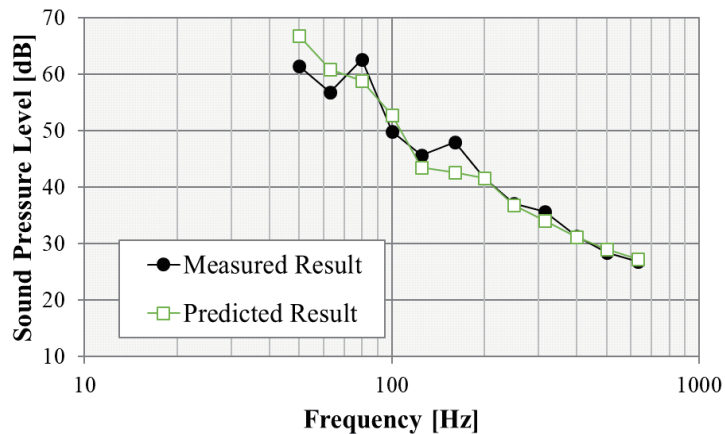
## 2) 36타입

[그림 3-49]은 1/3 옥타브 밴드로 계산된 바닥충격음 결과와 측정 결과를 함께 도식화하여 비교 하였다. 그림과 같이 1/3 옥타브 밴드의 50Hz와 60Hz에서 약 6dB의 편차는 존재하였으나, 단일수치량에서 최대 1.6dB로 사공 단계별 유사한 바닥충격음 예측이 가능한 것으로 분석되었다.

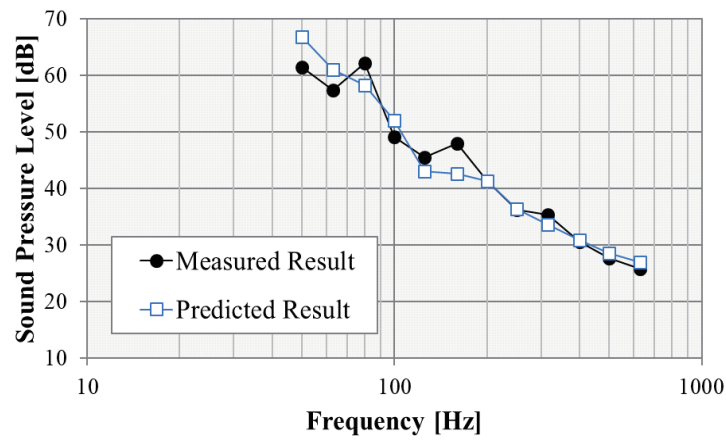
[그림 3-50]은 경량충격음 예측 결과와 측정 결과를 함께 도식화하여 비교하였다. 36타입에서도 경량충격음의 경우에는 상대적으로 편차가 측정 결과 대비 유사한 바닥충격음 예측이 가능하였으며, 전체소음도에서는 바닥 마감재 사공 조건에서 최대 2.8dB의 편차가 존재하였다. 하지만 주파수 파형은 측정 결과 대비 유사한 경향을 확인할 수 있다.



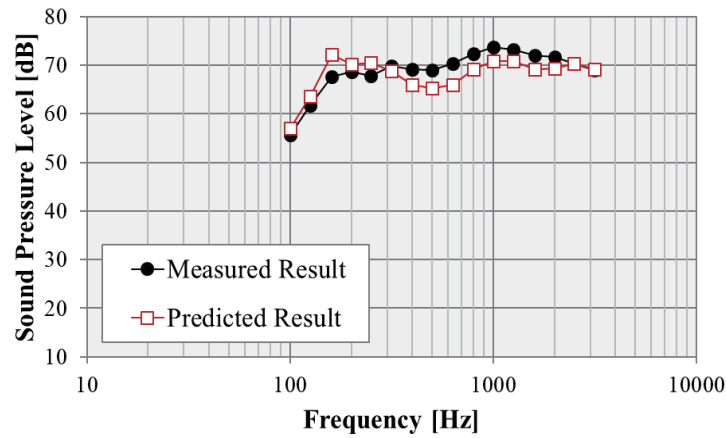
(a) 맨슬래브



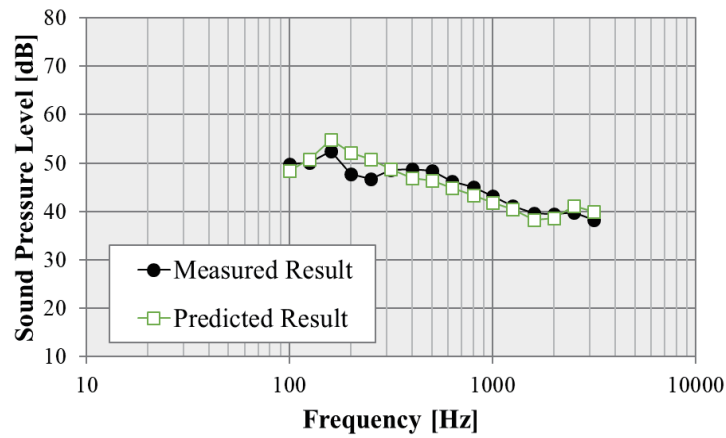
(b) 바닥구조 시공



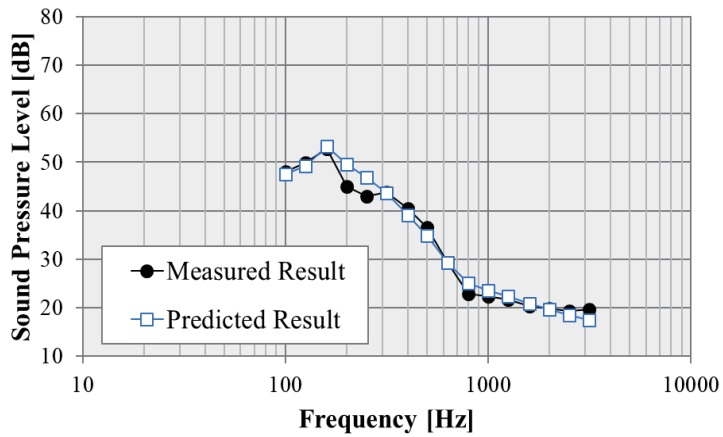
(c) 바닥구조, 바닥 마감재 시공  
[그림 3-49] 바닥 슬래브 진동을 이용한 중량충격음 계산(36타입)



(a) 맨슬래브



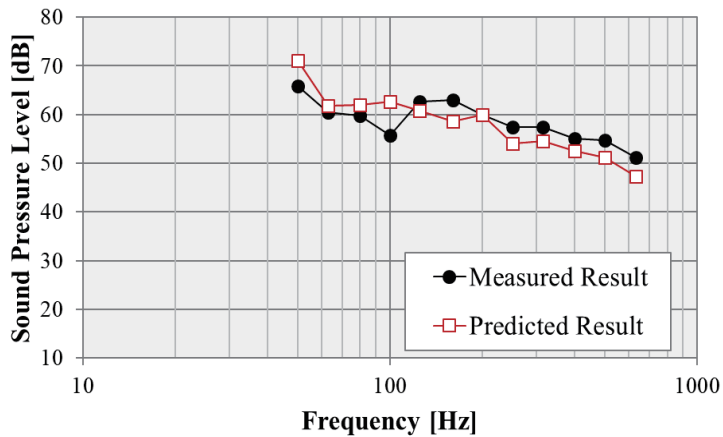
(b) 바닥구조 시공



(c) 바닥구조, 바닥 마감재 시공  
[그림 3-50] 바닥 슬래브 진동을 이용한 경량충격을 계산(36타입)

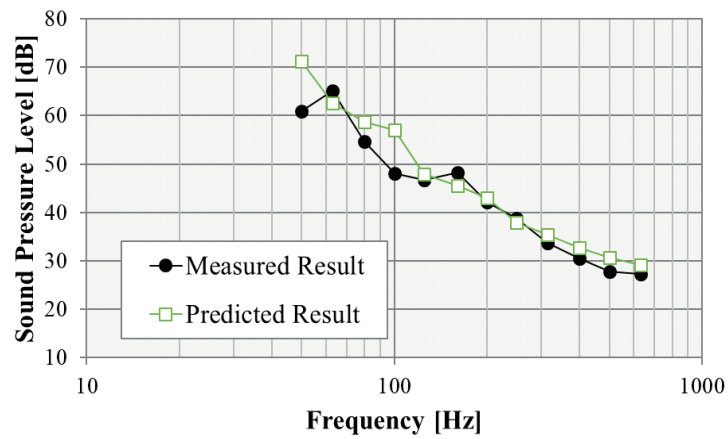
#### 4) 46타입

[그림 3-51]은 1/3 옥타브 밴드로 계산된 바닥충격음 결과와 측정 결과를 함께 도식화하여 비교하였다. 그림과 같이 주파수 파형은 유사한 것으로 분석되었으나, 1/3 옥타브 밴드의 80Hz와 100Hz에서 약 10dB 편차가 존재하여 다른 타입 대비 큰 편차가 존재하였다. 맨슬래브 조건에서는 1.2dB의 편차로 상대적으로 유사한 것으로 분석되었으나, 바닥구조 시공 이후에는 최대 4.5dB로 편차가 크게 발생하였다.

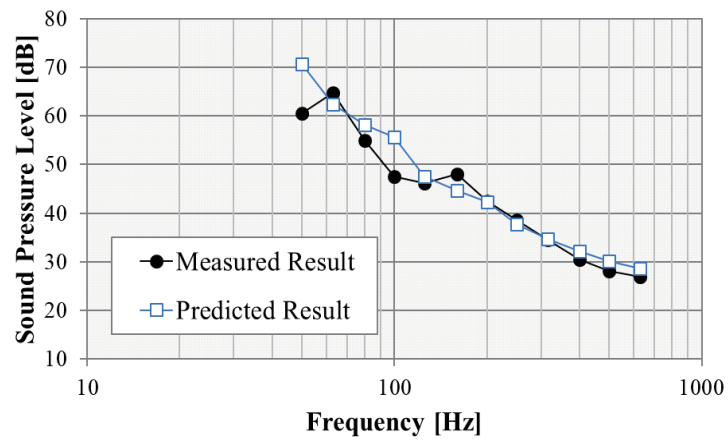


(a) 맨슬래브

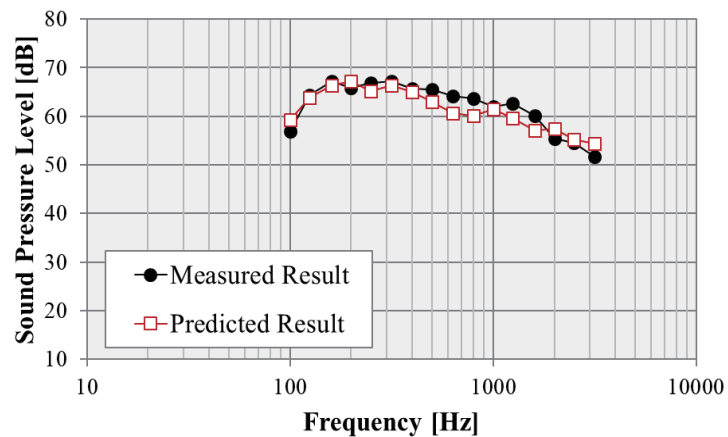




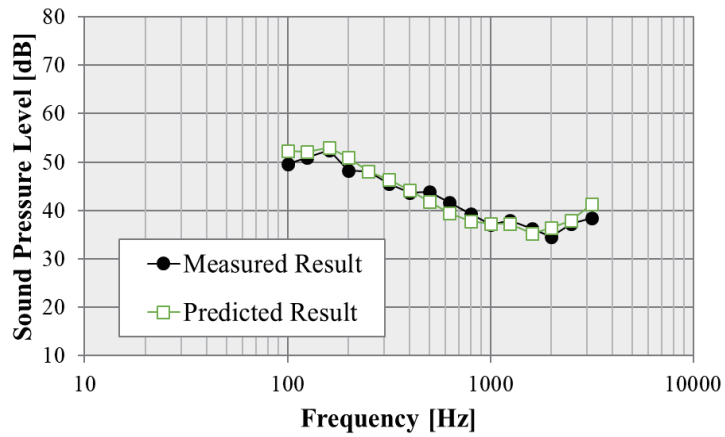
(b) 바닥구조 시공



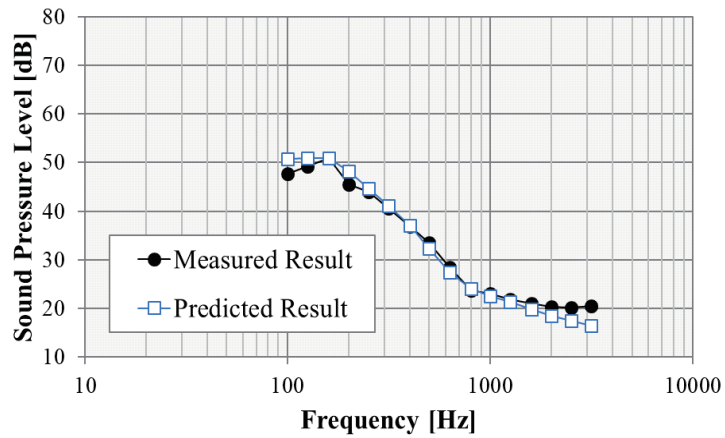
(c) 바닥구조, 바닥 마감재 시공  
[그림 3-51] 바닥 슬래브 진동을 이용한 중량충격을 계산(46타입)



(a) 맨슬래브



(b) 바닥구조 시공



(c) 바닥구조, 바닥 마감재 시공

[그림 3-52] 바닥 슬래브 진동을 이용한 경량충격음 계산(46타입)

[그림 3-52]는 1/3 옥타브 밴드로 계산된 바닥충격음 결과와 측정 결과를 함께 도식화하여 비교하였다. 46타입에서도 경량충격음의 경우에는 중량충격음 대비 최대 1.6dB 편차로 유사한 바닥충격음 분석이 가능한 것으로 분석되었으며, 옥타브 밴드의 파형에서도 유사한 바닥충격음 예측 결과를 확인할 수 있다.

#### 4) 소 결 론

바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 결과는 바닥충격음 측정 결과 대비 주파수 특성이 유사한 것으로 분석되었으며, 단일수치량에서 평균 1dB 편차 수준으로 분석이 가능하였다.

중량충격음의 경우 46타입에서 최대 4.5dB 편차가 존재하였으나, 맨슬래브 표면 상태가 고르지 않았기 때문에 편차가 크게 발생한 것으로 분석되었다. 표면 상태가 고르게 정리되었던 26타입과 36타입의 경우에는 최대 1.6dB 편차로 측정 결과 대비 유사한 것을 확인할 수 있다.

경량충격음의 경우에는 기준 곡선을 이용하여 단일수치량을 분석하기 때문에 상대적으로 적은 편차로 분석되었으며, 최대 3dB 편차 수준으로 분석이 가능하였다.

선행 연구에서는 내력벽 진동을 고려한다면 보다 정밀한 분석이 가능한 것으로 제시하였으나, 시공 단계에서 편차 발생 세대를 판별하는 목적에서는 바닥 슬래브 진동을 이용한 방식이 적용 가능할 것으로 판단된다.

후속 연구를 통해 실제 공동주택을 대상으로 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 측정을 수행할 예정이며, 본 연구에서 제안한 방식을 통해 편차 세대를 분석할 예정이다.

## 4. 2. 시공 단계별 바닥충격음 저감식 적용 및 검증

본 연구에서는 맨슬래브의 바닥충격음 차단성능을 기준으로 시공 단계별 바닥충격음 차단성능을 예측하고, 시공 단계별 성능 기준을 설정하고자 한다.

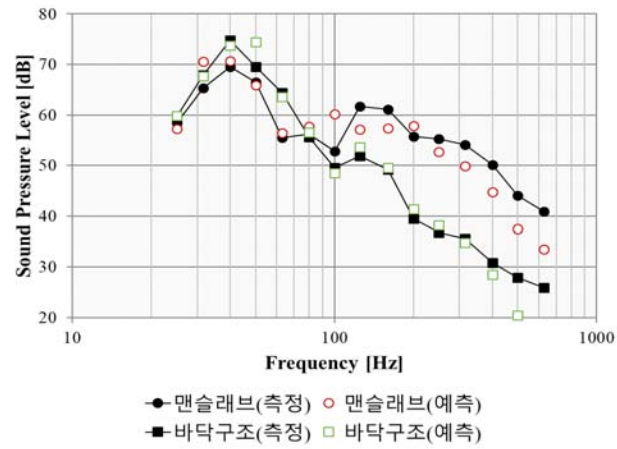
[표 3-7]은 시공 단계별 바닥충격음 저감식을 이용한 바닥충격음 예측 결과를 나타낸다. 단일수치량은 KS F ISO 717-2을 이용하였으나, 1/1옥타브 밴드로 계산하였기 때문에 공식 실험 결과와는 편차가 존재할 수 있다.

경량충격음의 경우에는 정밀한 주파수 분석을 위해 KS F ISO 717-2의 단일수치량과 전체 소음도를 함께 정리하였다.

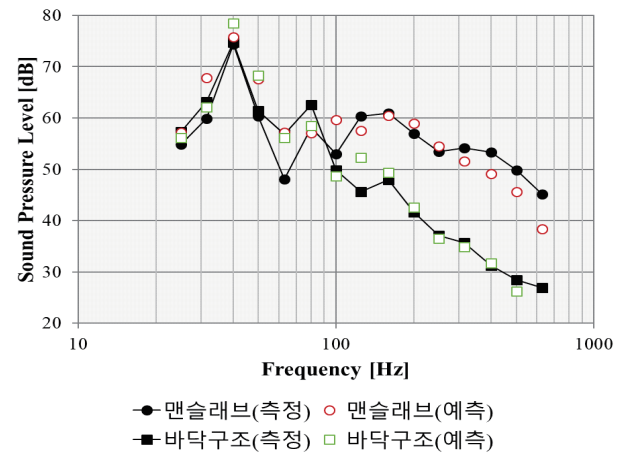
[표 3-7] 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 결과 비교

단계		중량충격음			경량충격음		
		측정	예측	편차	측정	예측	편차
29타입	맨슬래브	54.6	53.1	-1.5	73(81.1)	70(79.5)	-3(-1.6)
	바닥구조	46.1	49.3	3.2	45(59.8)	46(62.8)	1(3.0)
	마감재	46.0	-	-	38(56.9)	42(59.6)	4(2.7)
	천정	46.7	-	-	40(59.5)	-	-
36타입	맨슬래브	55.7	54.9	-0.8	75(82.1)	73(80.8)	-2(-1.3)
	바닥구조	42.6	44.9	2.3	45(59.2)	46(61.7)	1(2.5)
	마감재	42.3	-	-	38(56.4)	40(58.0)	2(1.6)
	천정	-	-	-	-	-	-
46타입	맨슬래브	58.3	57.1	-1.2	62(76.0)	61(75.0)	-1(-1.0)
	바닥구조	43.1	49.9	6.8	43(58.1)	43(61.2)	0(3.1)
	마감재	42.9	-	-	37(55.4)	39(58.3)	2(2.9)
	천정	44.7	-	-	37(57.0)	-	-

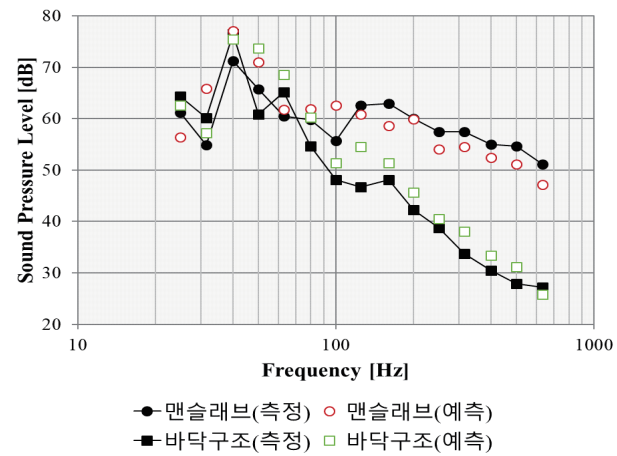
[그림 3-53]은 바닥충격음 저감식을 이용하여 예측한 바닥충격음 결과와 바닥충격음 측정 결과를 함께 도식화하였다. 그림과 같이 측정 결과 대비 옥타브 별 편차는 존재하지만, 유사한 경향의 바닥충격음이 예측된 것을 확인할 수 있다.



(a) 29타입



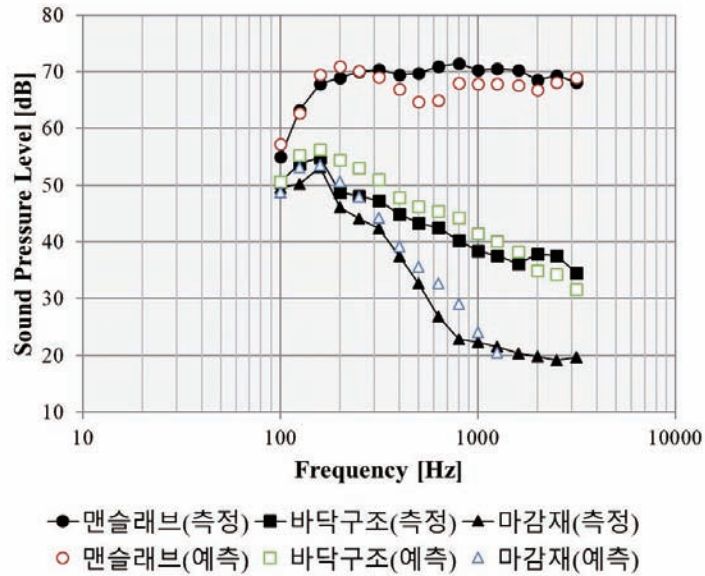
(b) 36타입



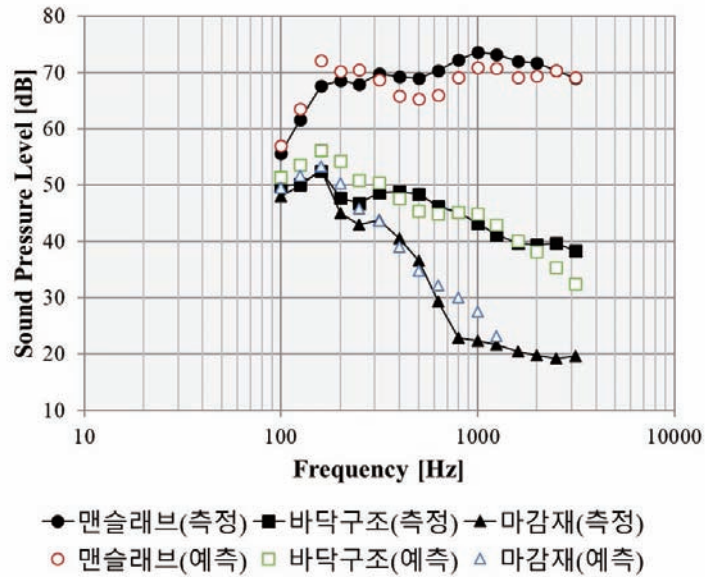
(c) 46타입

[그림 3-53] 시공 단계별 바닥충격음 예측 결과(중량충격원)

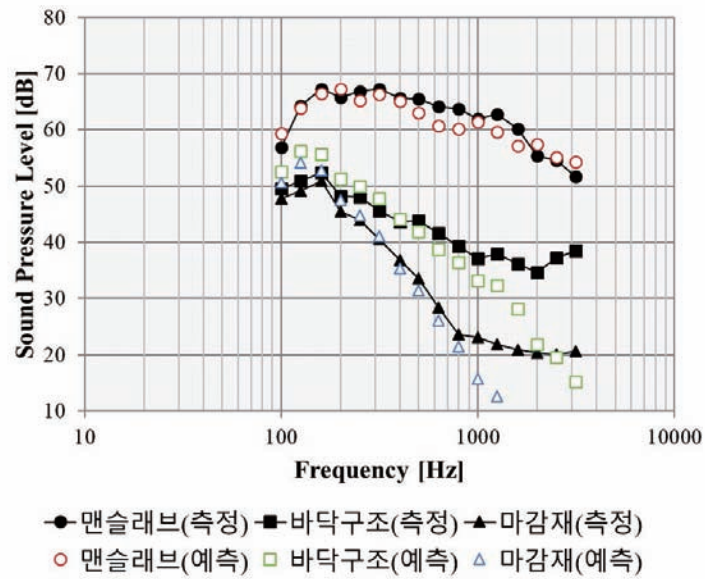
[그림 3-54]는 경량충격원에 대한 그림과 같이 이론식을 적용한 시공 단계별 바닥 충격음 예측 결과에서 옥타브 별 예측 결과의 편차는 존재하나, 저감효과 및 주파수 특성은 측정 결과 대비 유사한 수준으로 분석이 가능한 것으로 분석되었다.



(a) 29타입



(b) 36타입



(c) 46타입

[그림 3-54] 바닥충격음 저감식 검증(경량충격음)

맨슬래브 조건의 바닥충격음 차단성능에서 이론적인 시공 단계별 성능 분석은 단일수치량 기준 최대 3dB 오차 수준으로 분석이 가능한 것으로 분석되었으며, 이론적 접근을 통해 공동주택 설계의 예상 성능도 분석이 가능할 것으로 판단된다.

단, 실제 바닥충격음 차단성능과는 옥타브 대역에 따른 편차는 존재하기 때문에 샘플 세대를 확보하여 분석 세대의 평균 결과를 적용하는 것이 향후 발생할 수 있는 편차를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.





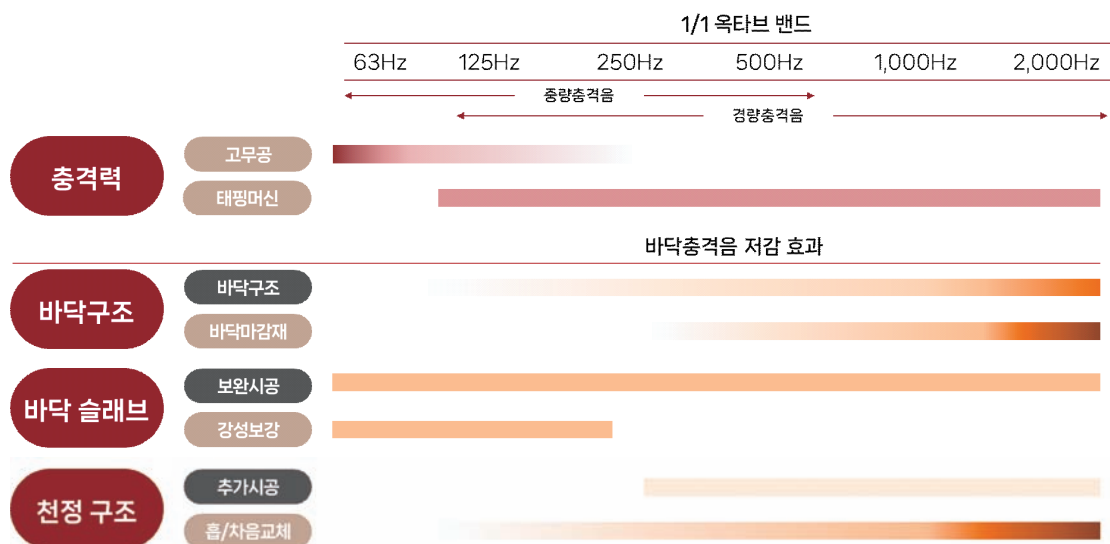
## 제4장 소음 보강 방안

### 1. 바닥충격음 편차 저감 방안

바닥충격음 성능 편차 발생시 해당 단계의 구조를 재시공하는 것이 이상적일 수 있으나, 재시공에 따른 성능 복구가 미비한 경우에는 지속적인 재시공 비용이 요구될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 편차 저하 현상이 발생하는 경우 상대적으로 성능 개선이 가능한 소음 보강 방안 적용을 검토하였다.

[그림 4-1]은 시공 이후 적용 가능한 소음 보강 방안의 주파수별 저감 효과를 나타낸다. 그림과 같이 고무공을 이용한 중량충격음의 경우에는 저주파 특성이 강하게 존재하기 때문에 슬래브 보완 시공(맨슬래브 조건) 또는 강성 보강 구조 설치가 이론적으로 효과가 우수한 것으로 판단된다. 단, 바닥구조가 시공된 상태에서는 천정 교체가 상대적으로 저비용으로 소음 보강이 가능한 것으로 판단된다.

태핑머신을 이용하는 경량충격음의 경우에는 상대적으로 높은 주파수 대역을 평가하기 때문에 적용 가능한 보강 방안이 다양하게 존재하며, 바닥 마감재 변경 및 흡/차음재의 천정 구조 교체가 가능할 것으로 판단된다.



[그림 4-1] 주파수 대역별 소음 보강 방안의 주파수 대역별 저감 효과



[그림 4-2] 바닥충격음 보강 방안

정량충격음의 경우에는 바닥 마감재 변경 등으로도 최종 마감 상태에서 소음 보강이 가능하기 때문에 본 연구에서는 중량충격음의 성능 개선을 목적으로 [그림 4-2]와 같이 3가지 보강 방안을 검토하였다.

바닥 슬래브의 표면 상태가 고르지 못한 경우 연구 결과와 같이 완충재의 저감 성능이 저하될 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서 바닥 슬래브의 표면을 모르타르 등으로 표면을 고르게 미장하는 방법을 검토하였다.

바닥구조 설치 이후에는 재시공 외에는 보수 방안이 존재하지 않기 때문에 바닥 슬래브 강성을 확보할 수 있는 방안을 검토하였다. 바닥 슬래브 보강은 선행 연구 결과를 고려하여 FRP 또는 강판 보강을 검토하였다.

마지막으로 최종 시공 조건에서 성능 개선이 요구되는 경우에는 천정의 흡음재 충전 또는 석고보드 겹시공을 검토하였다.

## 2. 바닥 슬래브 보완 시공(맨슬래브 조건)

물리적으로 공동주택 구조물, 바닥구조, 평면 등이 동일하다면 세대별 바닥충격음 성능은 이론적으로 동일하여야 한다. 하지만 실제 공동주택의 경우 이웃 세대 구성(동 평면 설계 등), 콘크리트 재료 물성, 시공 상태 등으로 인해 동일 타입에서도 성능 편차가 발생할 수 있다.

기하학적(Geometric) 요인인 공동주택의 평면 구성은 단위 세대의 경계 조건 및 진동 에너지 손실량 등을 결정하지만, 설계 단계에서 결정되는 요소이기 때문에 편차 저감을 위한 설계 변경 등은 어려움이 존재한다.

바닥 슬래브를 구성하는 콘크리트의 재료 물성은 슬래브의 진동 특성을 결정하는 중요한 요소이지만, 시공이 완료된 구조물의 재료 물성 변경은 철거 및 재시공 등이 요구되기 때문에 현실적으로 적용이 불가능하다.

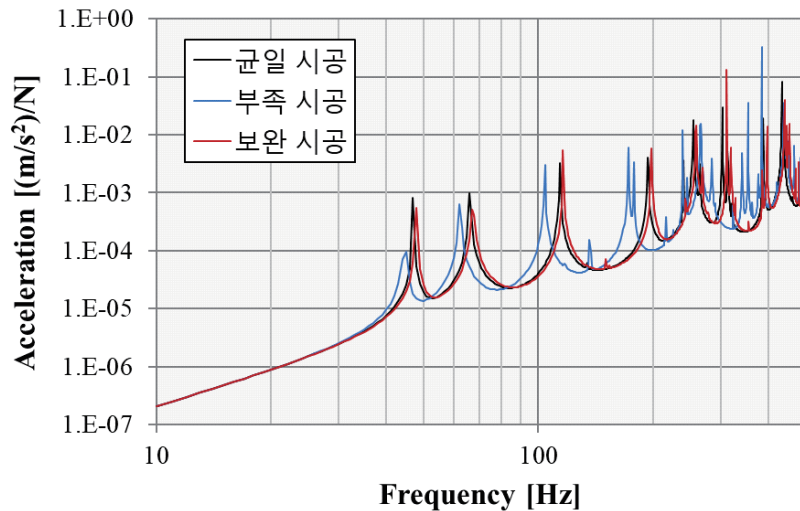
따라서 본 연구에서는 맨슬래브의 두께를 비파괴 시험법을 이용하여 표면 상태를 점검하고 부족 시공된 두께 만큼을 고밀도의 모르타르로 보완 시공하는 것을 검토하였다. 여기서 고밀도 모르타르는 최대한 철근콘크리트와 유사한 밀도(약  $2,300\text{kg/m}^3$ )를 갖는 재료를 적용하는 것을 제안한다.

[그림 4-3]와 [그림 4-4]는 전산해석을 이용한 바닥 슬래브의 진동 해석 결과를 나타낸다. [그림 4-3(a)]은 균일 시공된 바닥 슬래브를 나타내며, [그림 4-3(b)]는 일부 부족 시공된 바닥 슬래브, [그림 4-3(c)]은 고밀도 모르타르를 보완 시공하는 경우의 바닥 슬래브를 나타낸다.

여기서 콘크리트의 밀도는  $2,300\text{kg/m}^3$ 으로 가정하였으며, 고밀도 모르타르의 밀도는  $1,800\text{kg/m}^3$ 로 가정하였다. 실제 두 재료의 탄성계수 차이는 존재하지만, 해당 해석에서는  $25\text{GPa}$ 로 동일한 것으로 가정하여 분석하였다. 슬래브의 크기는 가로 4m, 세로 9m로 가정하였다.



[그림 4-3] 바닥 슬래브 시공 불량 및 보완 시공 예시



[그림 4-4] 보완 시공에 따른 바닥 슬래브 진동 해석 결과

[그림 4-4]와 같이 균일 시공된 조건 대비 일부 부족 시공된 경우 바닥 슬래브 진동 해석 결과 차이가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 부족 시공으로 인한 슬래브 강성 및 질량 저하로 인해 피크 주파수가 저주파 대역으로 이동한 것을 확인할 수 있으며, 이는 향후 바닥충격음 편차를 발생시키게 된다.

[그림 4-3(c)]와 같이 부족 시공된 부분을 고밀도 모르타르로 균일하게 보완 시공하는 경우 그림과 같이 균일 시공된 슬래브 대비 유사한 슬래브 진동 응답이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 바닥 슬래브의 부족 시공된 부분을 고밀도 모르타르로 보완 시공하는 경우 설계 성능을 일부 회복 가능할 것으로 판단된다.

단, 본 해석 결과는 바닥 슬래브의 부족 시공을 극단으로 가정하였기 때문에 실제 바닥 슬래브의 진동 영향은 상대적으로 크지 않을 수 있다. 하지만 해석 결과와 같이 모르타르로 보완 시공 조건에서 이론적으로 성능 회복이 가능할 것으로 판단된다. 향후 후속 연구를 통해 고밀도 모르타르 보완 시공에 따른 편차 저감 효과를 검증 예정이다.

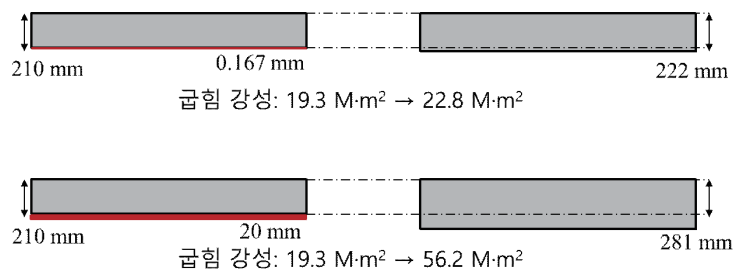
### 3. 바닥 슬래브 강성 보강

바닥 슬래브의 표면을 보수하여 맨슬래브의 성능을 복구하는 방법이 있다면, 바닥 슬래브 하부 또는 상부면에 고강성의 재료를 부착하여 슬래브 강성을 개선하는 방법도 존재한다.

선행 연구<sup>99)</sup>에서는 바닥 슬래브 하부에 고강성의 재료를 보강하여 바닥충격을 저감 효과를 분석하였다. [그림 4-5]와 같이 바닥 슬래브 하부에 고강성 재료(CFRP)를 20mm 부착하는 경우 약 281mm의 철근콘크리트와 유사한 강성을 확보할 수 있는 것으로 분석되었다.

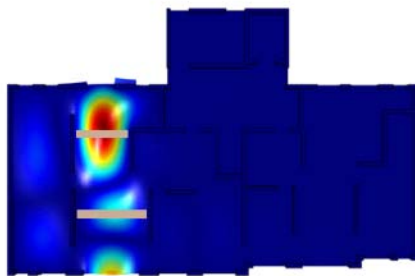
Concrete	Value
Elastic Modulus	25 GPa
Density	2,500 kg/m <sup>3</sup>
Thickness	210 mm

cFRP	Value
Elastic Modulus	200 GPa
Density	1,700 kg/m <sup>3</sup>
Thickness	0.176 m

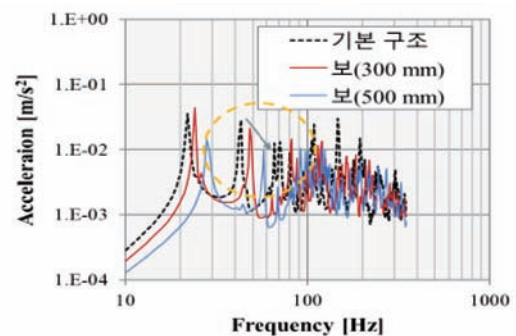


[그림 4-5] FRP 보강에 따른 바닥 슬래브의 강성 영향

선행 연구에서는 벽식 구조에 보 설치와 동일한 효과를 구현하기 위해 [그림 4-6]과 같이 진동에 취약한 위치에 고강성 재료를 설치하였으며, 전산해석을 이용하여 바닥충격음 저감 효과를 분석하였다.



(a) 보강 위치



(b) 전산해석 결과

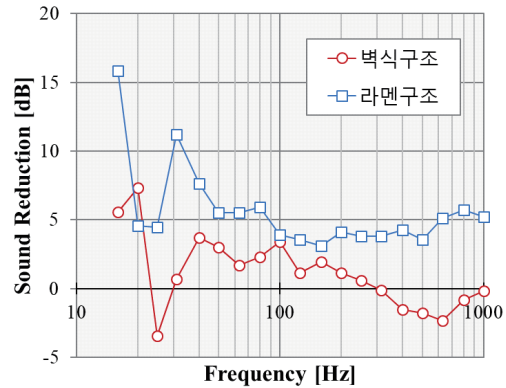
[그림 4-6] 바닥 슬래브 하부 보강에 따른 바닥 슬래브 진동 저감(김태민 외, 2023)

99) 김태민, 곽병창, 박시현, 김민준, 박원확(2023), 공동주택 층간소음 저감을 위한 사후 구조 보강 방안 연구: 시공 단계 적용 방안, 토지주택연구원

목업주택을 이용한 바닥충격음 실험에서도 [그림 4-7]과 같이 바닥충격음 저감 효과를 확인할 수 있었으며, 벽식구조 대비 기둥식구조에서 상대적으로 큰 바닥충격음 저감 효과를 기대할 수 있는 것으로 분석되었다.



(a) 강성 보강 구조 설치



(b) 바닥충격음 저감량

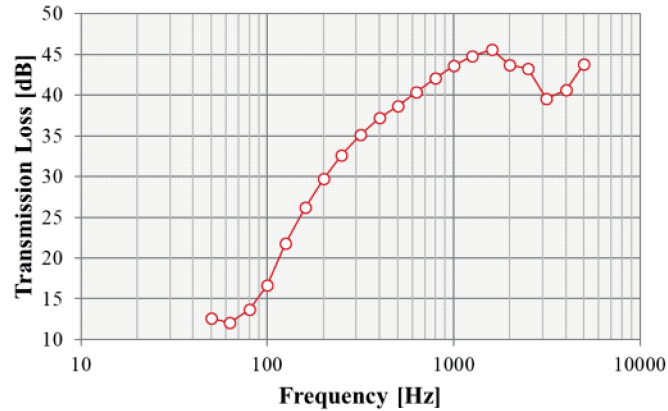
[그림 4-7] 바닥 슬래브 하부 보강에 따른 바닥충격음 저감 효과 분석

바닥 슬래브 하부 전체 면에 보강 구조를 설치하는 것이 바닥충격음 저감 효과가 가장 클 것으로 예상되지만, 선행 연구 결과와 같이 일부 위치에 보강 구조를 설치하는 것만으로도 바닥충격음 저감 효과를 기대할 수 있는 것으로 판단된다.

단, 보강 위치가 바닥 슬래브 진동 특성에 무관하게 설치되는 경우 바닥충격음 저감 효과가 미비할 수 있기 때문에 반드시 보강 위치에 대한 분석은 선행적으로 요구된다.

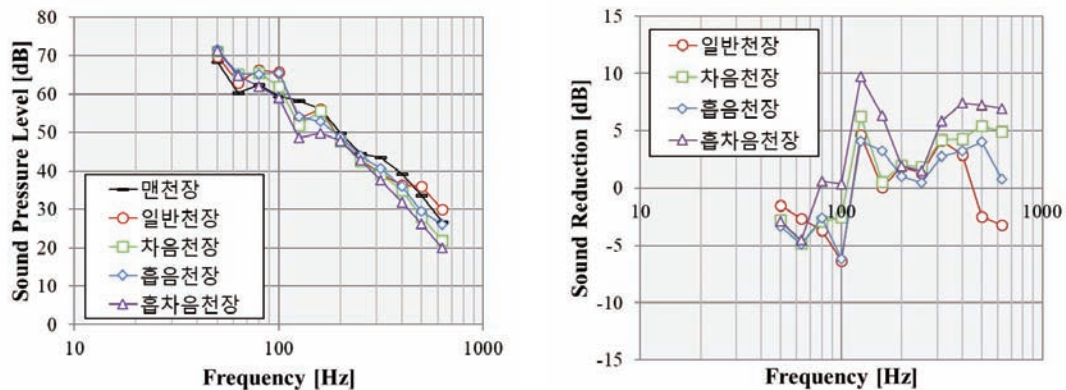
#### 4. 천정 마감재 변경

일반적으로 천정 마감재는 9.5T 일반석고보드를 적용하고 있으며, 일반 석고보드의 이론적인 차음성능은 [그림 4-8]과 같다. 하지만 앞장의 목업실험동 실험 결과와 같이 천정 시공에 따른 바닥충격을 저감 효과는 이론적 차음성능 대비 효과가 차이가 존재하는 것으로 분석되었다.



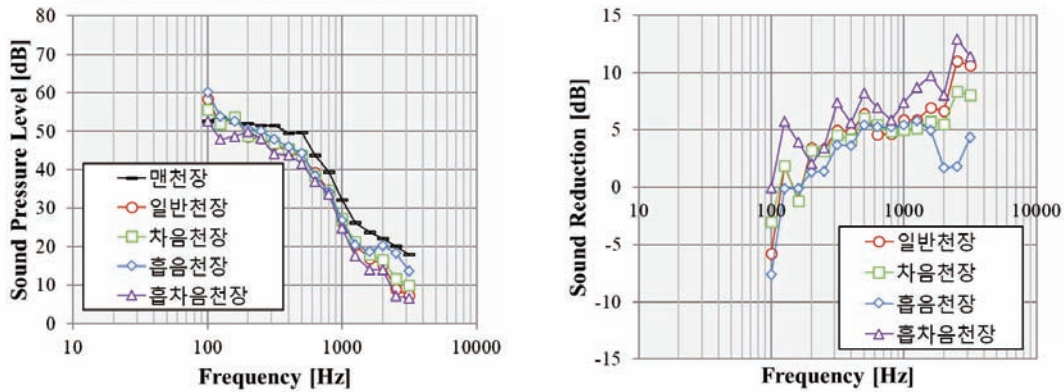
[그림 4-8] 일반석고보드의 이론적 차음성능

최근 수행한 LH 주택품질처의 연구 내용에 따르면, 천정 마감재를 일반석고보드에서 차음성능을 개선(일반석고보드 2겹)을 통한 바닥충격음 저감 효과를 실험적으로 분석하였다. 차음성능 개선 외 천정 내부 공기층의 공명 현상을 억제하기 위해 흡음재를 삽입하였으며, [그림 4-9]는 천정의 차음성능 개선을 통한 바닥충격음 측정 결과를 나타낸다.



(a) 중량충격음





#### (b) 경량충격음

[그림 4-9] 천정 보강에 따른 바닥충격음 저감 효과(LH 주택품질처)

이론적으로 석고보드를 2겹 시공하는 경우 1겹 시공 조건 대비 면밀도가 2배 증가하기 때문에 차음성능은 약 6dB 개선된다. 실제 현장을 대상으로 바닥충격음 저감 효과를 실험적으로 분석한 결과 그림과 같이 전체 주파수 대역에서 약 2dB 저감 가능한 것으로 분석되었으며, 특히 중량충격음의 경우에는 200Hz 이하 주파수 대역에서 최대 7dB 까지 저감 되는 것으로 분석되었다.

이론적인 차음성능 개선 효과인 6dB 대비 바닥충격음 저감 효과는 약 2dB로 이론식 대비 효과는 크지 않았으나, 전체 주파수 대역에서 바닥충격음 개선 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 저주파 대역에서는 바닥충격음 개선 효과가 상대적으로 크게 존재하였으며, 이는 선행 연구 결과와 같이 흡음재 추가에 따른 천정 내부의 공기층에 의한 공명 현상 억제에 따른 효과로 판단된다. 단, 대상 현장의 경우 천정 높이 가 약 120mm로 공명 주파수가 약 50Hz에 존재하지만, 라멘 구조와 같이 천정 높이가 300mm인 경우에는 공명 주파수가 측정 대역 이하 주파수 대역에 존재하기 때문에 흡음재 추가에 따른 저주파 대역의 소음 저감 효과는 차이가 존재할 수 있다.

결과적으로 최종 마감 상태에서 성능 편차가 존재하는 경우 천정 마감재를 차음석고보드로 변경하는 방안이 존재하며, 이론식 대비 성능 저감 효과의 편차는 존재하나 약 2dB의 바닥충격음 저감 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.



## 제5장 결 론

### ■ 인정 바닥구조의 현장 성능 편차

- 이웃사이센터에 접수된 공동주택 층간소음 관련 민원은 지속적으로 증가하여 2023년 기준 약 4만건이 접수되었으며, 층간소음 원인으로는 상부층 생활충격(보행, 뛰 등)에 의해 발생하는 바닥충격음이 약 70%로 가장 많은 비중을 차지하고 있음
- 정부는 바닥충격음 피해를 저감하기 위해 최소 성능 기준 이상의 바닥충격음 차단 성능을 인정받은 바닥구조를 적용하도록 바닥구조의 성능 기준 관련 제도를 운영 중임
- 2019년 실시된 감사원의 ‘아파트 층간소음 저감제도 운영실태’ 보고서에 따르면, 현장 바닥충격음을 측정한 세대 중 약 96%가 인정구조 대비 성능 편차가 존재하는 것으로 분석됨
  - 184세대(96%)는 인정받은 성능등급 대비 현장 성능등급 하락
  - 114세대(60%)는 최소 성능 기준 미달(등급 외)

[표 5-1] 바닥충격음 측정 결과(감사원 보고서)

구 분		등급 상황	등급 유지	등급 하락		
				하락(등급 만족)	하락(등급 외)	합계
공공아파트 (126)	세대수	2	5	52	67	119
	비율	2	4	41	53	94
민간아파트 (65)	세대수	0	0	18	47	65
	비율	0	0	28	72	100
합 계 (191)	세대수	2	5	70	114	184
	비율	1	3	36	60	96

- 정부는 바닥충격음 피해를 저감하기 위해 다양한 개선 방안을 발표함
  - 지어질 주택: 사후확인제도 시행, 점검 강화(1회 → 3회), 우수기업 인센티브 확대 등
  - 지어진 주택: 소음저감매트 지원, 층간소음관리위원회 의무화, 층간소음 우수단지 선정 등
  - 우수기술: 라멘구조 효과 검증, 고성능 바닥구조 선도 적용 등

■ 정부의 공동주택 바닥충격음 저감 대책 : 사후확인제도

- 국민이 체감할 수 있는 바닥충격음 저감 정책으로 사용검사 전 현장의 바닥충격음 차단성능을 측정·평가하는 ‘사후확인제도’를 도입하였으며(‘22.08), 이와 관련하여 바닥충격음 측정 방법 및 소음 기준 등을 강화함

[표 5-2] 바닥충격음 사후확인제도 도입에 따른 제도 변화

	2022년 8월 이전	2022년 8월 이후
제 도 명	사전인정제도	사후확인제도*
대 상	튼바닥구조에 대한 성능 기준(인정구조)	현장 성능 기준
주 체	제조사	시공사
시험 장소	표준시험동/현장	준공 예정 현장
소음 기준	중량충격음 50dB, 경량충격음 58dB 이하	중량/경량충격음 49dB 이하
표준충격원	(중량)뱅머신, (경량)태핑머신	(중량)고무공, (경량)태핑머신
성능 편차	(성능기준 만족) 인정구조 획득 (성능기준 불만족) 사용 불가	(성능기준 만족) 사용검사 승인 (성능기준 불만족) 보상/보완 시공(권고)

\*바닥구조 사전인정제도 병행 유지(‘24.09 기준)

- 공동주택 바닥충격음 관련하여 공동주택 공급자 뿐만 아니라 사용자에게 요구되는 성능 기준도 함께 강화됨
  - (공동주택 공급자) 최소 성능 기준 이상의 바닥구조를 공급하도록 유도
  - (공동주택 사용자) 성능 기준 이상의 소음을 발생시키지 않도록 유도

[표 5-3] 공동주택 공급자와 사용자의 바닥충격음 기준

	공동주택 공급자	공동주택 사용자
적용 근거	주택건설기준 등에 관한 규정	공동주택 층간소음의 범위와 기준에 관한 규칙
측정 방법	KS F ISO 16283-2	소음·진동 공정시험 기준(ES 03305.1)
측정 시기	사용검사 전	층간소음 민원 발생시
충 격 원	표준충격원(고무공, 태핑머신)	생활충격원
소음 기준	경량/중량충격음 49dB 이하	[주간] (최고소음도)57dBA, (1분 등가소음도)39dBA [야간] (최고소음도)52dBA, (1분 등가소음도)34dBA
기준 초과	보완 시공/보상 (권고)	소음 발생세대 과태료

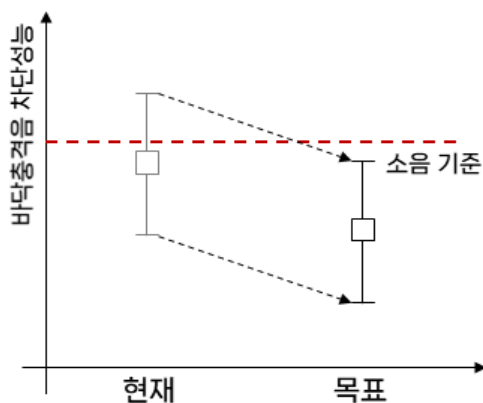
## ■ 바닥충격음 성능 기준 미달시 보수·보강 방안

- 바닥충격음 사후확인제도 평가에서 최소 성능 기준을 미달하는 경우, 사업주체는 보상·보강을 권고할 수 있으며, 최근 보완 시공 의무화 등 강화된 법률 개정을 예고함
  - 현장 바닥충격음 측정 세대 수 확대(세대수 무작위 2%에서 5%)
  - 성능 기준 미달시 보완 시공을 권고에서 의무로 변경(준공승인 불허)
  - 손해배상 시 정보 공개
- 사후확인제도 도입과 관련하여 최소 성능 기준 미달시 막대한 비용 발생이 예상됨
  - 정부는 최소 성능 미달 상황 발생시 보상 및 보강 방안에 대해 전문 기관과 연구를 진행 중에 있으며, 국토안전관리원에서 수행한 손해배상 관련 연구 보고서에 따르면, 중량/경량충격음 기준 미달시 최대 337,034원/m<sup>2</sup>이 예상(서울 기준)
  - 국토안전관리원, 공동주택 바닥충격음 손해배상 가이드라인 마련 연구(2024)
  - 소음 보강 관련 연구도 진행 중에 있으며, 천정 보강 방안 등이 중점적으로 검토 중임
  - 단, 보강 공법 적용에 따른 입주 지연 등이 발생할 수 있기 때문에 배상금액과 유사한 비용이 발생할 수도 있을 것으로 판단됨
- 따라서, 안정적인 현장의 공동주택 바닥충격음 차단성능 구현을 위한 기술 개발이 시급히 요구되는 상황임

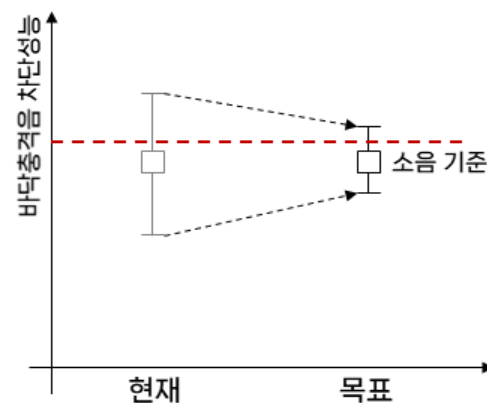
## ■ 바닥구조 시공품질 관리의 필요성

- 고성능 바닥구조, 흡/차음형 천정 개발 등 정숙한 공동주택을 구현할 수 있는 기술 개발이 진행 중에 있으나, 고성능 저감 기술이 적용된 세대에서도 시공품질 등에 따라 인정구조 대비 현장 성능 편차 및 세대별 성능 편차가 발생할 수 있음
  - 일반적으로 바닥충격음 저감을 위해 완충재를 적용한 뜬바닥구조를 적용하고 있음
  - 바닥구조는 시공품질 등에 따라 동일 단지, 동일 층에서도 바닥충격음 편차가 다수 존재할 수 있으며, 편차가 크게 존재하는 세대가 사후확인제도의 임의의 세대에 다수 포함되는 경우 성능 기준을 초과하는 문제가 발생할 수 있음
  - 따라서, 소음 기준을 만족하는 고성능 기술 개발 뿐만 아니라, 세대간 성능 편차를 저감하여 일정한 성능을 확보 할 수 있는 시공품질 관리 방안이 필수적으로 요구됨
- 준공 단계에서 발생할 수 있는 바닥충격음 편차를 저감하기 위한 방안은 시공 단계별 바닥충격음을 측정하고, 목표 성능 대비 성능 편차 또는 세대간 성능 편차가 발생하는 세대에 대해 시공 단계별 보완을 적용하는 것이 이상적인 방안임

- 단, 바닥충격음 측정을 위해서는 수음실의 실험 환경 조건이 충족되어야 함. 일반적인 공동주택 시공 단계에서 바닥충격음을 측정할 수 있는 시기는 준공 직전에 가능함
  - 시공 중 바닥충격음 측정을 위해서는 수음실에 외부 소음이 유입되지 않도록 창호, 출입문 등이 설치되어야 하며, 외부 소음이 발생하지 않도록 현장 협조가 요구됨
  - 일반적인 공동주택 시공에서는 자재 운반 등 시공 효율성을 위해 창호 및 출입문 설치가 공정 후반부에 존재하며, 외부 소음이 발생하지 않도록 시공을 일시 중단하기에는 한계가 존재함
- 따라서, 본 연구는 소음 실험 환경 조건이 충족되지 않는 시공 단계에서도 바닥충격음 성능을 예측하고, 편차 발생이 예상되는 경우 사전에 보수·보강이 가능한 바닥구조의 시공품질 관리 방안을 제시하고자 함
  - 바닥 슬래브 진동은 바닥충격음을 결정하는 주요 인자이며, 진동 측정은 골조 공사가 완료된 공정 초기시점부터 수행이 가능한 장점이 존재함
  - 또한, 공동주택 재료 품질, 시공 품질 등에 따른 성능 편차는 바닥 슬래브 진동에서도 복합적으로 계측이 가능하기 때문에 시공 단계별 편차 세대 판별이 가능함
  - 따라서 본 연구에서는 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 방법론 및 시공 단계별 바닥충격음 저감 효과 분석 방안을 제안하고자 함
    - 1) 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 차단성능 예측 방법론 개발 및 신뢰성 검증
    - 2) 시공 단계에서 세대간 편차 세대 판별 및 해당 세대에 대한 관리 방안 제시
    - 3) 시공 단계별 예상 성능 기준 수립 방안(성능 저하가 예상되는 경우 설계 변경 등)



(a) 기존 바닥충격음 저감 연구 방향



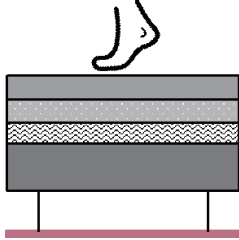
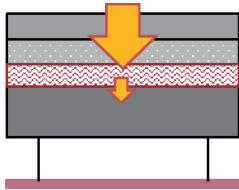
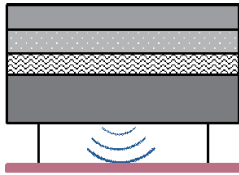
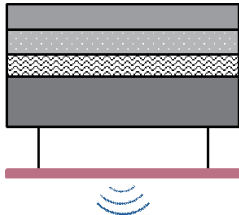
(b) 본 과제의 연구 방향

[그림 5-1] 기존 바닥충격음 저감 연구와 본 과제의 차별성

## ■ 공동주택 바닥충격음 발생 메커니즘

- 지배적인 물리현상으로 공동주택 바닥충격음 발생 현상을 정의할 수 있음
- 바닥충격음은 바닥 슬래브의 진동으로 발생하는 소음 방사(Sound Radiation) 현상으로, 바닥 슬래브 진동이 바닥충격음의 크기 및 주파수 특성을 결정함
  - 바닥 슬래브가 진동하는 경우 구조물 표면의 공기를 진동시켜 하부층으로 소음을 발생, 따라서 바닥 슬래브 진동 피크와 바닥충격음의 피크가 동일하게 나타남
  - 공동주택 재료 품질, 시공 품질 등에 따라 바닥 슬래브 진동의 편차가 발생하며, 이는 최종 마감 상태의 바닥충격음 편차를 의미한다고 할 수 있음

[표 5-4] 바닥충격음 발생 메커니즘

단계	대상	물리현상	특징
	생활충격원	충격원	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 거주자 생활 중 바닥을 가진하는 생활충격원 (아이들 뒹, 보행 등)</li> <li>· 충격원과 바닥면의 접촉 시간으로 충격원의 주파수 특성이 결정</li> </ul>
	튼바닥구조 (완충재 +상부구조)	방진시스템 (절연기)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 튼바닥구조가 1자유도 진동 시스템으로 운동</li> <li>· 충격력을 저감, 방진시스템(절연기)</li> <li>· 완충재의 동탄성계수가 낮을수록, 상부구조(모르타르, 경량콘크리트)의 질량이 클수록 충격력 저감에 유리</li> </ul>
	바닥 슬래브	구조 진동 + 소음 방사	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 바닥 슬래브 진동에 의한 소음 방사</li> <li>· 바닥 슬래브의 강성이 증가할수록 소음 저감에 유리</li> <li>· 바닥 슬래브 진동 특성이 바닥충격음의 크기, 주파수 특성 등을 결정</li> <li>· 하부층 거실(수음실)의 음향 모드에 따라 소음 증폭 가능</li> </ul>
	천정 구조	차음	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 바닥 슬래브에서 방사된 소음을 차단</li> <li>· 고밀도 천정 마감재(차음석고보드 등) 적용시 소음 저감 효과 기대 가능</li> <li>· 천정내 공기층의 공진현상으로 증폭 발생 가능</li> <li>· 천정 높이 증가 또는 흡음재 삽입시 공진현상 억제 가능</li> </ul>

## ■ 목업실험동을 이용한 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 측정

- 토지주택연구원 내 위치한 목업실험동을 대상으로 표준충격원에 대한 바닥충격음 측정
  - 실험 대상 목업실험동은 일반적인 소형 공동주택인 전용면적 29, 36 및 46㎡의 3개 세대로 구성되어 있음
  - 각 세대는 음원실과 수음실로 구성되어 있으며, 바닥 슬래브의 두께는 210mm로 구성되어 있음
  - 표준충격원(고무공, 태핑머신)을 이용하여 KS F ISO 16283-2에 의거하여 바닥충격음 측정 및 가진 위치와 동일한 바닥 슬래브 하부에서 슬래브 진동을 동시 측정함



[그림 5-2] 실험 대상 목업주택의 평면도

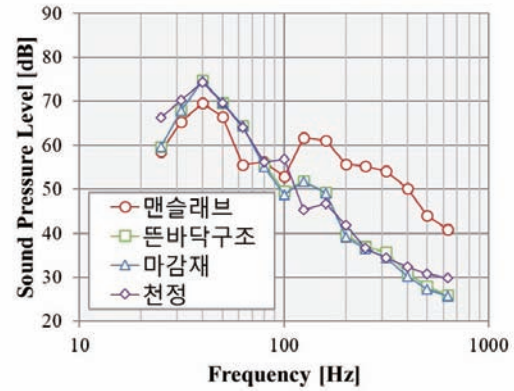
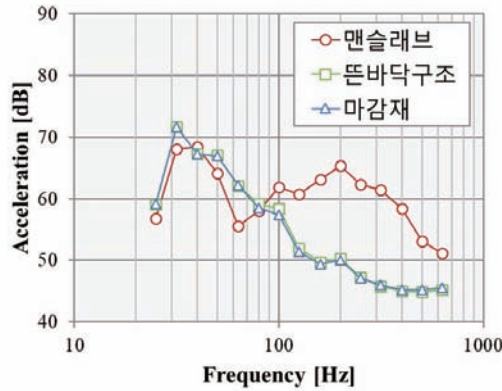
- 바닥구조 시공단계별 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음을 분석하기 위해 아래와 같이 4단계로 시공 계획을 구성하여 실험을 수행함

[표 5-5] 바닥구조 시공 단계별 실험 계획

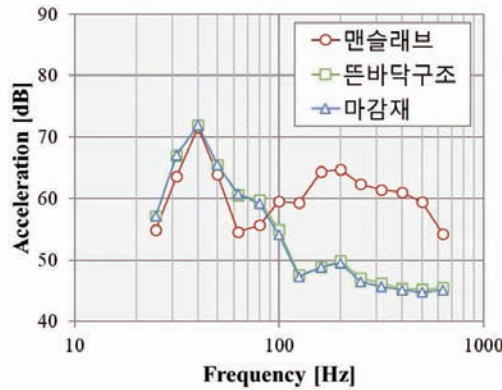
단계	바닥 구성	측정 내용
1단계	바닥 슬래브(210mm)	바닥 슬래브 진동(5지점) 하부층 바닥충격음(5지점)
2단계	바닥 슬래브 + 뜯바닥구조	바닥 슬래브 진동(5지점) 하부층 바닥충격음(5지점)
3단계	바닥 슬래브 + 뜯바닥구조 + 바닥 마감재(러그펫)	바닥 슬래브 진동(5지점) 하부층 바닥충격음(5지점)
4단계	천정 + 바닥 슬래브 + 뜯바닥구조 + 바닥 마감재	하부층 바닥충격음(5지점)

○ 바닥충격음 및 바닥 슬래브 진동 측정 결과(중량충격원)

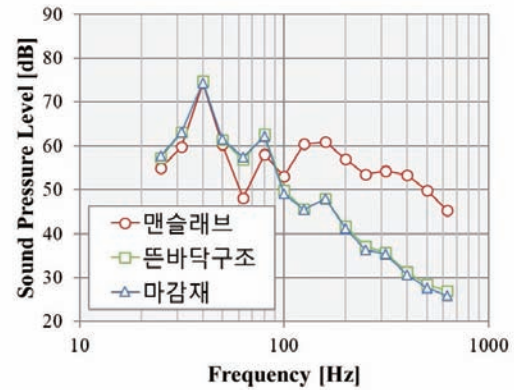
- 고무공을 이용한 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 동시 측정 결과
- 10~710Hz까지 슬래브 진동 및 바닥충격음 측정(1/3옥타브 밴드 25~600Hz)



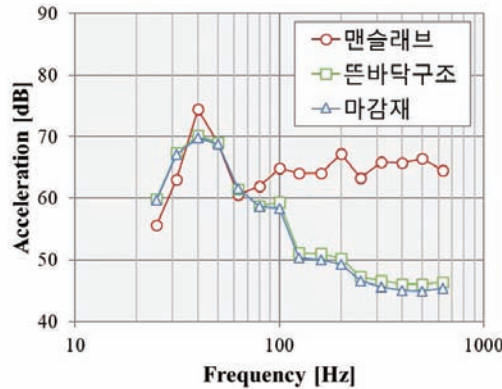
(a) 29타입



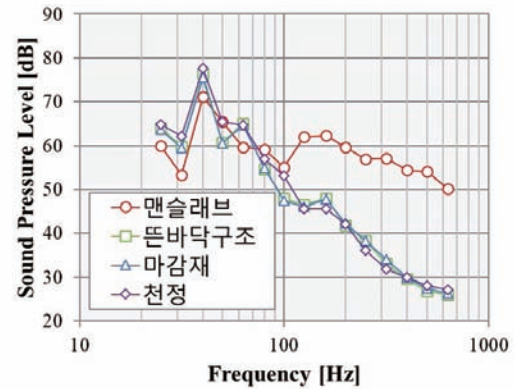
(a) 29타입



(b) 36타입



(b) 36타입



(c) 46타입

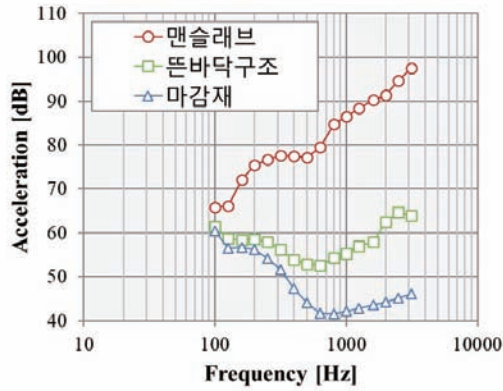
[그림 5-3] 바닥 슬래브 진동 측정 결과(중량충격원)

(c) 46타입

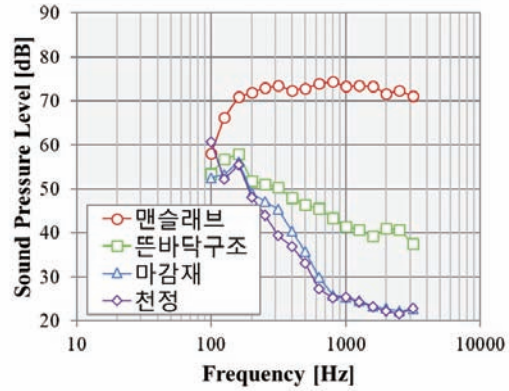
[그림 5-4] 바닥충격음 측정 결과(중량충격원)

○ 바닥충격음 및 바닥 슬래브 진동 측정 결과(경량충격원)

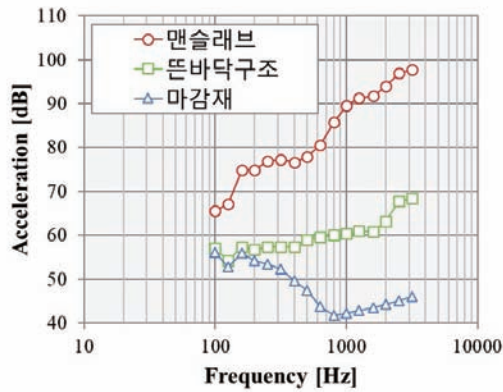
- 태핑머신을 이용한 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 동시 측정 결과
- 90~3,600Hz까지 슬래브 진동 및 바닥충격음 측정(1/3옥타브 밴드 100~3,150Hz)



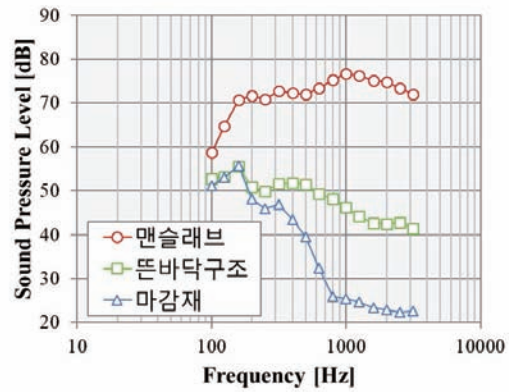
(a) 29타입



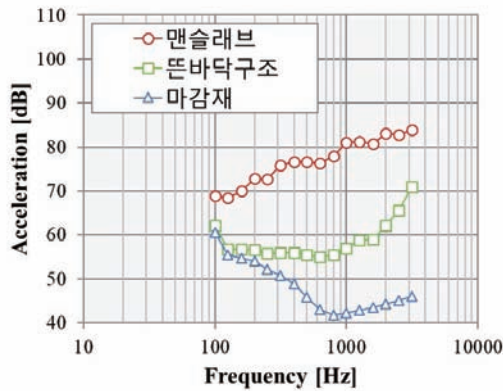
(a) 29타입



(b) 36타입

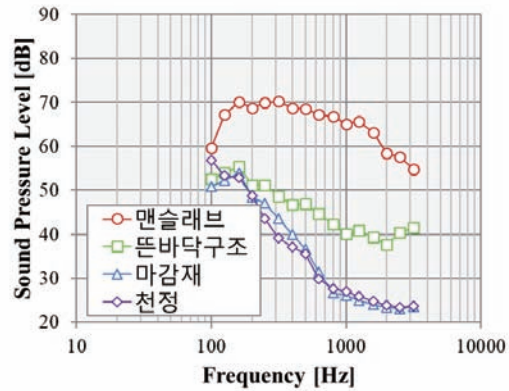


(b) 36타입



(c) 46타입

[그림 5-5] 바닥 슬래브 진동 측정 결과(경량충격원)



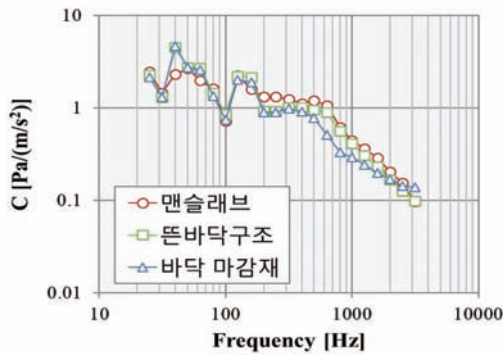
(c) 46타입

[그림 5-6] 바닥충격음 측정 결과(경량충격원)

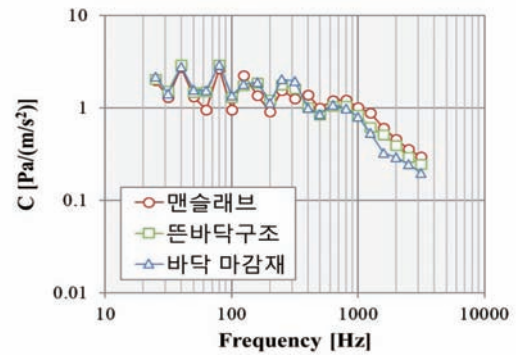


○ 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 측정 결과의 비율을 계산한 결과 시공 단계별 편차는 존재하나, 평형별 분석 결과는 유사한 것으로 분석됨

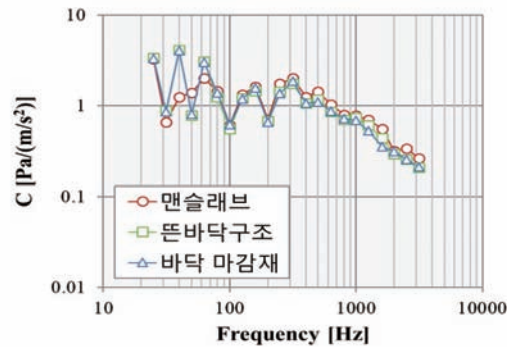
- 1/3옥타브 밴드의 125Hz까지는 중량충격원에 대한 측정 결과를, 125Hz 이후 옥타브 밴드 대역은 경량충격원에 대한 측정 결과를 이용하여 바닥 슬래브 진동과 바닥충격음 비율을 아래와 같이 계산함
- 100Hz 이전 주파수 대역에서 시공 단계별 편차는 존재하나, 바닥구조 설치 이후에는 진동-소음비가 유사한 것으로 분석됨
- 100Hz 이후 주파수 대역에서는 공동주택 평형, 시공 단계에 무관하게 유사한 수준으로 분석됨
- 맨슬래브 조건에서는 직접 바닥 슬래브를 가진하는 반면, 바닥구조 설치 후에는 상부 구조를 가진하기 때문에 면(Plane) 가진 조건과 유사할 것으로 판단됨. 따라서 바닥 슬래브의 충격력 위치가 분산되기 때문에 시공 단계별 편차가 존재하는 것으로 판단됨
- 바닥 슬래브 진동은 바닥충격음을 결정하는 주요 인자로 작용하는 것을 의미하며, 바닥 슬래브 진동을 이용하여 바닥충격음 예측이 가능할 것으로 판단됨



(a) 바닥구조 시공



(b) 바닥구조 시공



(c) 바닥 마감재 시공

[그림 5-7] 바닥 슬래브 진동 대비 바닥충격음 비율(종합)

## ■ 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측

- 바닥 슬래브 진동을 이용하여 바닥충격음 예측 결과, 맨슬래브 조건에서 약 2dB 오차 수준으로 신뢰성 있는 바닥충격음 예측이 가능할 것으로 판단됨
  - 단일수치량은 KS FISO 717-2에 의거하여 산출하였으며, 중량충격음의 경우 1/1옥타브 밴드의 A가중최대바닥충격음레벨로 분석함
  - 경량충격음은 측정 결과 대비 평균 0.8dB 편차 수준으로 분석되었으며, 29타입의 바닥 마감재 설치 조건에서는 최대 3dB 편차가 존재하였음
  - 중량충격음은 측정 결과 대비 평균 1.0dB 편차 수준으로 분석되었으며, 49타입의 모르타르 시공 조건에서 최대 4.5dB 편차가 존재하였음
- 중량충격음의 경우 1/3 옥타브 밴드의 250Hz 이후에는 상대적으로 충격력이 미비하기 때문에 경량충격음 대비 상대적으로 큰 편차가 존재하는 것으로 판단됨
  - 고무공은 충격력이 1/3 옥타브 밴드의 125Hz까지 존재하기 때문에 250Hz 이후 주파수 대역은 충분한 바닥 슬래브의 진동 응답이 존재하지 않음
  - 따라서 바닥 슬래브 진동보다는 수음실 배경 소음의 영향이 크게 존재하기 때문에 충분히 충격력이 감소된 바닥 마감재 설치 이후에는 소음 편차가 증가하는 것으로 판단됨

[표 5-6] 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 결과 비교

단계		중량충격음			경량충격음		
		측정	예측	편차	측정	예측	편차
29타입	맨슬래브	54.6	53.1	-1.5	73(81.1)	71(79.5)	-2(-1.6)
	바닥구조	46.1	46.4	0.3	45(59.8)	46(61.5)	1(1.7)
	마감재	46.0	46.1	0.1	38(56.9)	41(59.2)	3(2.3)
36타입	맨슬래브	55.7	54.9	-0.8	75(82.1)	73(80.8)	-2(-1.3)
	바닥구조	42.6	44.2	1.6	45(59.2)	45(60.1)	0(0.9)
	마감재	42.3	43.9	1.6	38(56.4)	39(57.2)	1(0.8)
46타입	맨슬래브	58.3	57.1	-1.2	62(76.0)	61(75.0)	-1(-1.0)
	바닥구조	43.1	47.6	4.5	43(58.1)	44(59.2)	1(1.1)
	마감재	42.9	46.9	4.0	37(55.4)	39(56.8)	2(1.4)

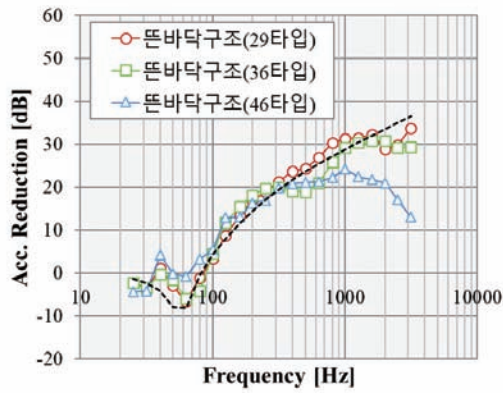
## ■ 시공 단계별 바닥충격음 저감량 분석

- 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 저감량을 이론식과 비교하여 분석한 결과, 1/3 옥타브 밴드의 80Hz 이후 주파수 대역에서는 이론식 대비 유사한 저감량이 존재하는 것으로 분석됨
  - 뜬바닥구조 및 바닥 마감재 시공 조건은 이론식 대비 바닥 슬래브 진동 및 바닥충격음 저감량은 2dB 편차 수준으로 유사한 것으로 분석되어 이론적 접근이 가능한 것으로 판단됨

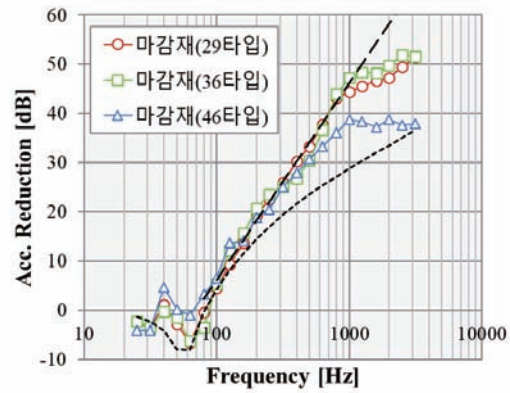
[표 5-7] 바닥 슬래브 진동을 이용한 바닥충격음 예측 결과 비교

단계		중량충격음			경량충격음		
		측정	예측	편차	측정	예측	편차
29타입	맨슬래브	54.6	53.1	-1.5	73(81.1)	70(79.5)	-3(-1.6)
	바닥구조	46.1	49.3	3.2	45(59.8)	46(62.8)	1(3.0)
	마감재	46.0	-	-	38(56.9)	42(59.6)	4(2.7)
	천정	46.7	-	-	40(59.5)	-	-
36타입	맨슬래브	55.7	54.9	-0.8	75(82.1)	73(80.8)	-2(-1.3)
	바닥구조	42.6	44.9	2.3	45(59.2)	46(61.7)	1(2.5)
	마감재	42.3	-	-	38(56.4)	40(58.0)	2(1.6)
	천정	-	-	-	-	-	-
46타입	맨슬래브	58.3	57.1	-1.2	62(76.0)	61(75.0)	-1(-1.0)
	바닥구조	43.1	49.9	6.8	43(58.1)	43(61.2)	0(3.1)
	마감재	42.9	-	-	37(55.4)	39(58.3)	2(2.9)
	천정	44.7	-	-	37(57.0)	-	-

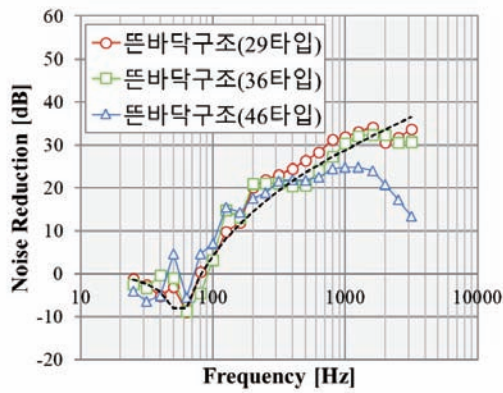
- 천정 구조의 경우 이론식에서는 전주파수 대역에서 약 6dB 바닥충격음 저감 효과를 예상할 수 있으나, 실제 바닥충격음 저감량은 약 2dB 존재하는 것으로 분석됨
- 천정 구조의 바닥충격음 저감 효과는 후속 연구를 통해 저감식을 개선할 예정임



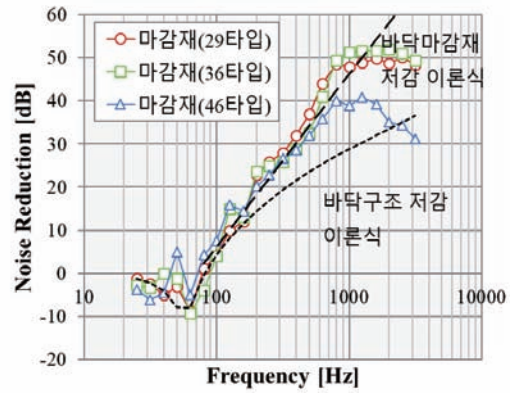
(a) 바닥구조 시공  
[그림 5-8] 시공 단계별 바닥 슬래브 진동 저감량



(b) 바닥 마감재 시공



(a) 바닥구조 시공  
[그림 5-9] 시공 단계별 바닥충격음 저감량



(b) 바닥구조 시공

### ■ 측정, 가진 지점 수 변화에 따른 바닥충격음 영향

- 가진 및 측정 지점 수의 변화에 따라 바닥충격음은 증가하는 경향이 존재하였으나, 약 3dB 편차 수준으로 분석이 가능하였음
- 단, 본 연구에서는 중앙 지점을 가진하는 조건을 포함하여 가진 및 측정 지점 수를 변경하였기 때문에 공동주택 구조 평면 등에 따라 편차 수준은 상이할 수 있음
  - 실험 대상 공간은 거실 공간의 양 끝단에 내력벽이 구성되어 있으며, 이에 따라 중앙 지점이 가장 큰 바닥충격음이 발생함
  - 위와 같은 조건인 경우에는 중앙 지점을 제외한 4개 지점을 가진하는 조건이 수음실 평균 소음도를 저감 시키는 역할을 하며, 이에 따라 가진 지점 수가 저감할수록 바닥충격음이 증가하는 것으로 분석됨
  - 따라서 내력벽이 존재하지 않는 경우 또는 기둥식 구조의 경우에는 반드시 가진 지점 수 변경에 따른 바닥충격음 영향 분석이 요구됨
- 측정 지점 수 변경은 바닥충격음 결과의 영향이 상대적으로 작게 존재하였으나, 공간 구성(거실과 주방의 배치 등)에 따른 영향은 추가적으로 분석할 필요가 있음
- 중량충격음 대비 경량충격음이 가진 및 측정 지점 수 변경에 따른 영향이 적은 것으로 분석됨
  - 중량충격음의 경우 개별적인 진동 특성이 강한 주파수 대역을 측정하기 때문에 가진 위치 및 측정 위치에 따른 편차가 존재할 수 있음
  - 반면, 경량충격음은 개별적인 진동 특성이 약해지기 때문에 가진 위치 및 측정 위치에 따른 영향이 감소하는 것으로 판단됨

### ■ 보수 보강 방안

- 바닥 슬래브의 시공 상태에 따른 바닥충격음 편차 요인이 가장 큰 것으로 판단되며, 바닥 슬래브 성능 편차가 존재하는 경우에는 모르타르로 표면 마감을 하는 것을 제안함
- 바닥구조 시공 편차는 재시공이 이상적이거나, 현실적으로 많은 어려움이 존재하기 때문에 바닥 마감재 변경 등을 통해 성능 편차를 저감할 수 있을 것으로 판단됨
- 최종 마감 상태에서 발생한 편차는 천정 구조의 차음성능 개선을 통해 저감 가능할 것으로 판단됨(석고보드의 면밀도 증가)

## ■ 향후 계획

- 본 연구는 시공 단계에서 바닥 슬래브의 진동을 측정하여 바닥충격음을 예측할 수 있는 방법론을 제안하였으며, 약 2dB 편차 수준으로 분석이 가능한 것으로 분석됨
- 바닥구조 및 바닥 마감재 시공 조건의 바닥충격음 저감식 예측 결과는 측정 결과 대비 약 3dB 편차가 존재하였으며, 천정 구조는 저감식을 이용한 예측에서 상대적으로 큰 편차가 존재함.
- 후속 연구에서는 실제 공동주택 시공 현장을 대상으로 본 연구에서 제안한 바닥충격음 예측 방법론을 이용하여 바닥구조의 성능 관리 방안을 시범적으로 적용할 예정임

## 참고문헌 Reference

- 아웃사이센터 홈페이지(<https://floor.noiseinfo.or.kr/floornoise/home/statistics/all.do>)
- 감사원(2019), 아파트 층간소음 저감제도 운영실태
- 국토교통부, 주택건설기준 등에 관한 규정(시행 2024. 7. 17.)
- 국토교통부, 공동주택 층간소음의 범위와 기준에 관한 규칙(시행 2023. 1. 2.)
- 국토안전원(2024), 공동주택 바닥충격음 손해배상 가이드라인 마련 연구
- 김태민, 곽병창, 박시현, 김민준, 박원확(2023), 공동주택 층간소음 저감을 위한 사후 구조 보강 방안 연구: 시공 단계 적용 방안, 토지주택연구원
- 아웃사이센터 홈페이지(<https://floor.noiseinfo.or.kr/floornoise/home/statistics/all.do>)
- 김경우, 최경석, 정영선, 양관섭(2005), “실충격원(어린이)의 충격 발생행위에 따른 충격력 특성에 관한 연구”, 한국소음진동공학회 논문집, 15(5): 542~549.
- 전진용, 정정호(2005), “임팩트 볼을 활용한 바닥충격음 측정 및 평가”, 한국소음진동공학회 논문집, 15(10): 1160~1168.
- 이평직, 정정호, 박준홍, 전진용(2006), “바닥충격음 측정용 표준충격원과 실충격원의 특성 비교”, 한국소음진동공학회 논문집, 16(8): 789~796.
- 박현구, 김경모, 김선우(2013), “실생활 충격소음을 통한 표준 바닥충격원의 실효성 검증, 한국소음진동공학회 논문집”, 23(12): 1117~1126.
- 정정호(2008). “임팩트볼(Impact Ball)을 활용한 바닥충격음 측정 및 평가”, 방재기술, 45: 28-36.
- 전진용, 정정호(2004), “바닥충격음 평가를 위한 Impact Ball의 특성 및 주관적 반응”, 대한건축학회 학술발표대회 논문집-계획계, 대한건축학회, pp.614~617.
- 문대호, 서울대학교 박사학위 논문 2018
- 문대호(2015), 공동주택의 바닥충격음 영향요인 분석, 서울대학교 박사학위 논문
- 집꾸미기(2017), “바닥재의 종류 및 특징에 대해 알아봅시다.”, 11월 03일 기사, 2022.08.01. (<https://www.ggunim.co.kr/star/view/727>).

- 송국곤, 박현구, 이태강, 김진성, 김선우(2008), “공동주택 바닥마감재에 따른 경량충격음 저감에 관한 실험적 연구”, 2008년도 추계학술대회 논문집, 한국소음진동학회, pp.433~434
- 송국곤, 이철승, 최은수(2013), “바닥마감재의 바닥충격음 저감 성능 실태 연구”, 2013년도 추계학술대회 논문집, 한국소음진동학회, pp.384~385
- 연준오, 김명준, 이성찬(2018), “바닥 표면 마감재에 의한 실충격원 및 중량충격음 저감량 평가”, 한국건축친환경설비학회 논문집, 12(4): 361~372.
- 김학천, 김용길, 김상철, 이현열, 조형호(2008), “표준시험동에서 바닥마감재에 따른 바닥 충격음 특성평가”, 2008년도 추계학술대회 논문집, 한국소음진동학회, pp.439~440.
- 기노갑, 권현중, 송민정, 김선우(2002), “바닥마감재에 의한 바닥충격음 차음특성 연구”, 한국소음진동학회 심포지엄자료집, 한국소음진동학회, pp.682~686.
- 김학천, 김용길, 김상철, 이현열, 조형호(2008), “표준시험동에서 바닥마감재에 따른 바닥 충격음 특성평가”, 2008년도 추계학술대회 논문집, 한국소음진동학회, pp.439~440.
- 이수규(2022), 공동주택 층간소음 저감을 위한 바닥마감재 및 저감매트 성능 연구, 토지주택연구원
- 전진용, 유승엽, 정영, 정정호(2006), “철근콘크리트 슬래브의 설계요소에 따른 중량 충격음의 영향”, 대한건축학회 논문집 계획계, 22(10): 329~337.
- 박지훈, 송국곤, 이원학, 김소영(2019), “바닥 표면 마감재의 충격음 저감량 실험실 측정 방법 고찰”, 2019년도 추계학술대회 초록집, 한국소음진동학회, pp.358~358.
- 이원학, 김용희, 송국곤, 윤용진, 윤창연(2016), “바닥마감재의 층간소음저감 성능평가를 위한 측정방법 고찰”, 2016년도 추계학술대회 초록논문집, 한국소음진동학회, pp.75~75.
- 방종대, 이범식, 김상연, 천영수, 김홍재, 조완제, 유송이, 김외학(2013), 공동주택 중량바닥충격음 저감을 위한 기술개발 방향설정 연구, 토지주택연구원
- 이원학, 송국곤, 한찬훈(2020), “현장시험을 통한 공동주택 바닥충격음 차단성능 분석”, 한국건축친환경설비학회 논문집, 14(1): 19~31.



- 정진연, 임정빈, 이성찬(2012), “바닥충격음 인정구조 성능 현황”, 2012년도 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.805~806.
- 정진연, 이상우, 임정빈, 정갑철(2008), “슬래브의 동특성과 중량충격음의 상관관계에 관한 연구”, 2008년도 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.829~833.
- 문대호, 박홍근, 황재승, 홍건호(2014), “시스템 해석을 이용한 뜬바닥구조에서의 바닥구조 동특성과 뱅머신의 충격력 특성 분석”, 한국소음진동공학회 논문집, 24(5): 390~398.
- 황재승, 문대호, 박홍근, 홍성길, 홍건호(2010), “완충재의 동특성에 따른 중량충격음 증폭에 관한 해석적 연구”, 한국소음진동공학회 논문집, 20(7): 651~657.
- 김홍식, 주시웅, 진필화(2006), “모의실험을 통한 완충재별 진동전달량과 동적특성과의 상관성 분석에 관한 연구”, 2006년도 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp. 1290~1296.
- 송국곤, 김용희, 류종관, 김명준(2018), “EPS 완충재의 동탄성계수 및 두께에 따른 중량 바닥충격음 레벨 분석”, 한국소음진동공학회 논문집, 28(6): 713~720.
- 김경우, 정갑철, 손장열(2008), “완충재 동탄성계수와 경량바닥충격음 저감량의 상관성”, 한국소음진동공학회 논문집, 18(8): 886~895.
- 임정빈, 정진연, 김경우, 정갑철(2007), “완충재의 구성에 따른 동탄성계수 변화에 관한 연구”, 2007년도 추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.1143~1146.
- 윤세철, 오종민(2005), “완충재의 종류에 따른 공동주택 바닥충격음 차단성능에 관한 실험연구”, 환경영향평가, 14(4): 217~225.
- 양수영, 이동훈, 홍병국, 송화영, 이주원(2005), “바닥충격음 완충재의 동적특성과 소음저감 성능 비교” 2005년도 춘계학술대회 논문집, pp.275~278.
- 김경우, 최현중, 연준오, 양관섭(2011), “완충재 잔류변형과 동탄성계수”, 2011년도 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.234~237.
- 김경우, 연준오, 양관섭(2012), “완충재 장기처짐과 ISO 20392 대응 연구”, 한국소음진동공학회논문집, 22(12): 1250~1256.
- 김홍식, 진필화, 주시웅, 정성원(2005), “바닥충격음 완충재의 재하시간에 따른 동적 특성 연구”, 2005년도 후계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.942~945.

- 박종영, 정갑철, 임정빈(2009), “동탄성 계수와 재하시간과의 상관성 연구”, 2009년도 춘계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.392~393.
- 이원학, 송국곤, 한찬훈(2020), “현장시험을 통한 공동주택 바닥충격음 차단성능 분석”, 한국건축친환경설비학회 논문집, 14(1): 19~31.
- 이원학, 송국곤, 한찬훈(2020), “현장시험을 통한 공동주택 바닥충격음 차단성능 분석”, 한국건축친환경설비학회 논문집, 14(1): 19~31.
- 황재승, 이강석, 이태진, 박희준, 박세훈(2016), “콘크리트 슬래브 진동모드의 중량충격음 참여특성”, 대한건축학회연합논문집, 18(6): 127~134.
- 윤세철, 오종민(2005), “완충재의 종류에 따른 공동주택 바닥충격음 차단성능에 관한 실험연구”, 환경영향평가, 14(4): 217~225.
- 김태민, 배진영, 양홍석(2020), “바닥 슬래브 진동 특성을 이용한 바닥충격음 요인 분석 연구 : 유효 평면”, 한국소음진동공학회논문집, 30(3): 276~285.
- 정진연, 이상우, 임정빈, 정갑철(2008), “슬래브의 동특성과 중량충격음의 상관관계에 관한 연구”, 2008년도 춘계학술대회 논문집, pp.829~833.
- 송민정, 김선우(2000), “축소실험실에서의 진동가속도 레벨과 잔향실험실 음압 레벨의 상관관계에 관한 실험적 연구 - 비닐계 바닥마감재의 경량충격음을 대상으로 -”, 대한건축학회 논문집-계획계, 16(1): 109~116.
- 송민정, 장길수, 김선우(2000), “축소실험실을 이용한 바닥완충구조의 경량충격음 차음성능 예측방법에 관한 실험적 연구”, 소음·진동, 10(1): 82~96.
- 김명준, 김홍식, 김하근(2003), “수음실 내 구조체의 진동량 계측을 통한 바닥충격음레벨 예측”, 한국소음진동공학회논문집, 13(1): 3~9.
- 김정철, 조호규, 김태희(2008), “평균진동량을 이용한 바닥충격음 평가”, 건설안전기술, 47: 79~87.
- 김태민, 배진영(2021), “경량벽체로 구성된 소형 공동주택의 바닥충격음 특성 연구”, 한국소음진동공학회 논문집, 31(5): 551~562.
- 문대호(2020), “공동주택 바닥충격음 예측기술과 활용방안”, 소음·진동, 30(4): 6~11.
- 황재승, 송민정, 류종관(2021), “구조-음향 연성 시스템의 진동모드에 의한 소음 예측”, 한국소음진동공학회논문집, 31(6): 632~641.

- 정환욱(2004), 공동주택 천장공법별 바닥충격음 저감효과에 관한 연구, 전남대학교 박사 학위논문.
- 김경우, 최현중, 양관섭, 이승언(2004), “천장 및 벽구성 방법에 따른 바닥충격음 특성평가”, 2004년도 추계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.261~264.
- 김경우, 강재식, 이승언, 양관섭(2005), “천장 및 벽구성 방법이 바닥충격음 차단성능에 미치는 영향에 관한 연구”, 한국소음진동공학회논문집, 15(4): 465~473.
- 정환욱, 기노갑, 송민정, 김선우(2001), “바닥하부구조(천장구조)의 개선에 따른 차음특성 변화 연구-흡음재를 중심으로-”, 대한건축학회 논문집 - 계획계, 17(12): 177~184.
- 기노갑, 정환욱, 송민정, 장길수, 김선우(2001), 공동주택 천장구조 개선에 의한 바닥충격음 저감 연구, 학술발표대회 논문집-계획계, pp.505~508.
- 조창근, 백용규, 신일섭(2002), “기존 공동주택의 바닥충격음 저감을 위한 천장구조의 개선에 관한 측정연구”, 한국생활환경학회지, 9(1): 38~44.
- 최은석(2007), 흡음재를 이용한 바닥충격음 저감효과에 관한 실험적 연구, 전남대학교 석사학위논문.
- 연준오, 김경우, 최현중, 양관섭, 김경호(2013), “건식이중바닥구조의 중량충격음에 대한 실험적 평가-지지구조 및 천장구조 구성에 따른 영향-”, 한국소음진동공학회논문집, 23(1): 34~40.
- 정환욱, 기노갑, 송민정, 김선우(2002), “공동주택의 천장틀구조 변화에 따른 바닥충격음 차음특성 연구”, 한국소음진동공학회논문집, 12(8): 573~580.
- 박홍근, 문대호(2014), “공동주택 무달대 천장의 바닥충격음 차단 특성”, 2014년도 추계 학술대회 논문집, pp.208~213.
- Ryu, J. K., Song, H. S., Kim, Y., H.(2018), “Effect of the suspended ceiling with low-frequency resonant panelabsorber on heavyweight floor impact sound in the building”, Building and Environment, 139: 1~7.
- 송한솔, 류종관(2018), “흡음 석고보드 천장재에 의한 저주파 중량 바닥충격음의 저감 효과”, 한국음향학회지, pp.323~330.
- 백영수, 박성균, 정문영(2014), “사공 공정에 따른 층간 소음 추이 분석 연구”, 2015년도

- 준계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.679~681.
- 이원학, 송국곤, 한찬훈(2020), “공동주택 바닥 공사 공정별 바닥충격음 특성 분석”, 한국소음진동공학회논문집, 30(1): 29~36.
- 문대호, 박홍근(2014), “공동주택 사공단계별 바닥충격음 변화”, 2015년도 준계학술대회 논문집, 한국소음진동공학회, pp.692~697. 32
- 국토교통부고시 제2013-889호, 공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준 (2013.12.24.)
- 국토교통부고시 제2015-319호, 소음방지를 위한 층간 바닥충격음 차단 구조기준 (2015.05.21.)
- 대통령령 제26226호, 주택건설기준 등에 관한 규정 (2015.05.06.)
- 환경부령 제559호, 국토교통부령 제97호, 공동주택 층간소음의 범위와 기준에 관한 규칙 (2014.06.03.)
- 국토교통부고시 제2004-71호, 공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준 (2004.4.23.)
- 이재원(2013), “공동주택 층간소음 실태 및 현황”, 소음·진동, 23(3): 4~8. 35
- 국토안전관리원, 공동주택 바닥충격음 손해배상 가이드라인 마련 연구
- 한국소음진동공학회, 연구
- Richard H. Lyon(1987), Machinery noise and diagnostics
- Istvan L. Ver(1971). “Impact Noise Isolation of Composite Floors”, The Journal of the Acoustical Society of America, 50: 1043~1050.
- Jens Holger Rindel, Sound Insulation in Buildings, CRC Press; 1st edition (November 22, 2017)
- Daniel J. Inman, 최신기계진동학 3판(황재혁 번역), Prentice Hall
- KS F 2810-2(2022), 건축물의 바닥충격음 차단성능 현장 측정방법 - 제2부: 표준 중량 충격원에 의한 방법
- 황재승, 문대호, 박홍근, 홍성걸, 홍건호(2010), “완충재의 동특성에 따른 중량충격음 증폭에 관한 해석적 연구”, 한국소음진동공학회논문집, 20(7): 651~657.
- Istvan L. Ver(1971). “Impact Noise Isolation of Composite Floors”, The Journal of

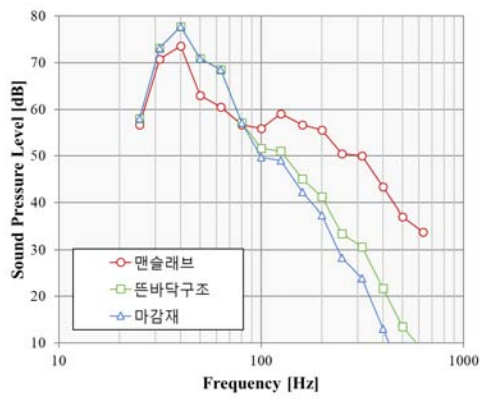
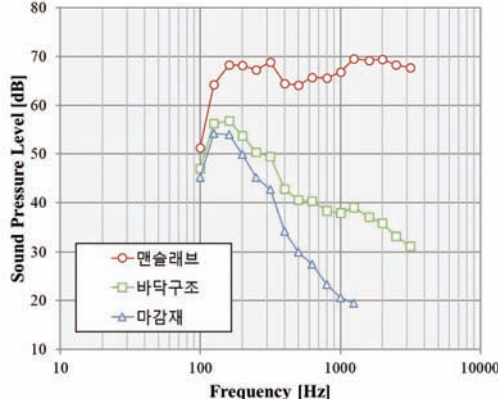
- the Acoustical Society of America, 50: 1043~1050.
- Alessandro Schiavi(2018), “Improvement of impact sound insulation: A constitutive model for floating floors”, Applied Acoustics, 129: 64~71. 56
- Lyon, R. (1987). Machinery noise and diagnostics, Boston, London, Durban: Butterworths.
- Istvan, L., Beranek, L.(1992), Noise and vibration control engineering: principles and applications, Wiley.
- Katsuo Yoshida, Shigeru Hirano (Ohbayashi Corporation T.R.I.), Floor Impact Sound Insulation by Gypsum Board Ceiling, 技術報告 14(4), 199060
- 조현민(2020), 서울시립대학교 박사 학위논문 2020
- J. Seidel and K. Hengst (2017). Trittschallminderung und einfügungsdämmung von raumakustik-decken. (Impact sound attenuation and insertion loss of room acoustical ceilings, in German). Proceedings of DAGA 2016, Kiel, Germany 60
- 정일록(2005), 소음 진동학, 신광출판사.
- 김양한(2012), 음향학 강의, 교문사(청문각).
- Fundamentals of acoustics 4th edition, Lawrence
- J. Seidel and K. Hengst (2017). Trittschallminderung und einfügungsdämmung von raumakustik-decken. (Impact sound attenuation and insertion loss of room acoustical ceilings, in German). Proceedings of DAGA 2016, Kiel, Germany
- [https://www.caskorea.co.kr/shop/item.php?it\\_id=1627201630](https://www.caskorea.co.kr/shop/item.php?it_id=1627201630)
- 국토교통부, 공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준(2023. 2. 9.)
- 김태민, 배진영, 양홍석(2020), “바닥 슬래브 진동 특성을 이용한 바닥충격음 요인 분석 연구 : 유효 평면”, 한국소음진동공학회논문집, 30(3): 276~285

## 부 록 Appendix

### ■ 현장 바닥충격음 분석 결과(예시): 고양장항 A 현장 (2F)

현장개요	현장명	고양장항 A-2BL		측정일자	2024.09.00.
	측정세대	000동 200호		세대 타입	55A
	바닥구성	바닥 마감재(6T) + 모르타르(40T) + 경량기포콘크리트(40T) + 완충재(30T)			
		바닥마감재	모르타르	완충재	바닥 슬래브
		0000	0000	0000	0000


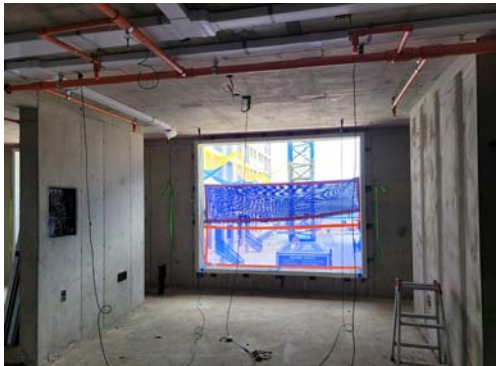
측정세대	현장 도면	현장 사진
		

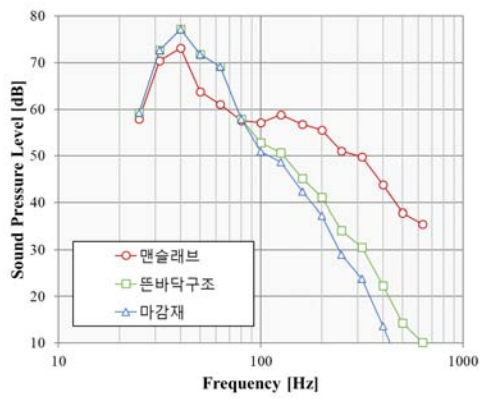
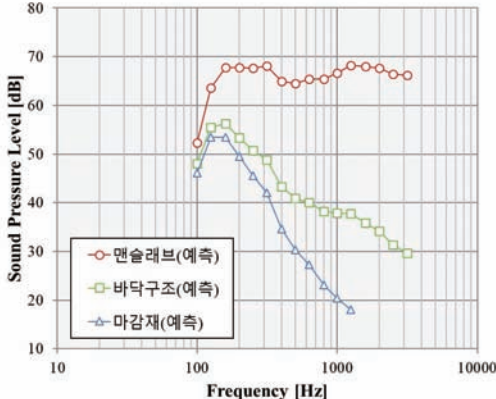
측정결과	중량충격음		경량충격음	
				
	맨슬래브	52dB	맨슬래브	72dB
	바닥구조	47dB	바닥구조	45dB
	바닥마감재	47dB	바닥마감재	40dB
	천정구조	—	천정구조	38dB

## 부 록 Appendix

### ■ 현장 바닥충격음 분석 결과(예시): 고양장항 A 현장 (3F)

현장개요	현장명	고양장항 A-2BL		측정일자	2024.09.00.
	측정세대	000동 300호		세대 타입	55A
	바닥구성	바닥 마감재(6T) + 모르타르(40T) + 경량기포콘크리트(40T) + 완충재(30T)			
		바닥마감재	모르타르	완충재	바닥 슬래브
		0000	0000	0000	0000

측정세대	현장 도면	현장 사진
		

측정결과	중량충격음		경량충격음	
				
	맨슬래브	52dB	맨슬래브	71dB
	바닥구조	48dB	바닥구조	45dB
	바닥마감재	48dB	바닥마감재	40dB
	천정구조	—	천정구조	38dB