발간등록번호
11-1613000-001909-01

15CTAP-C097335-01

데이터 기반 인공신경망 이론을 이용한 진동평가방법 개발 및 이를 활용한 최소 바닥두께 제안

국토교통기술촉진연구사업 최종보고서

최종보고서 2017

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

비매품/무료
93540
9 788972 185581
ISBN 978-89-7218-558-1

보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( )
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종보고서

R&D / 15CTAP-C097335-01

데이터 기반 인공신경망 이론을 이용한 진동평가 방법 개발 및 이를 활용한 최소 바닥두께 제안 최종보고서

2017. 09. 11.

주관연구기관 / 한양대학교

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'데이터 기반 인공신경망 이론을 이용한 진동평가방법 개발 및 이를 활용한 최소 바닥두께 제안'(연구개발 기간 : 2015. 06. 18 ~ 2017. 06. 17) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2017. 09. 11.

주관연구기관명 : 한양대학교 (대표자) 성 태 현 (인)

주관연구기관책임자: 이 민 정

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제38조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>15CTAP-C09
7335-01</td><td>해당 단계
연구 기간</td><td>2016.06.18.
~2017.06.17</td><td>단계구분</td><td>2/2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">창의도전연구분야 창조형모험</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">데이터 기반 인공신경망 이론을 이용한 진동평가 방법 개발 및 이를 활용한 최소 바닥두께 제안</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">이 민 정</td><td>해당단계
참여
연구원 수</td><td>총: 1 명
내부: 1 명
외부: 명</td><td>해당단계
연구개발비</td><td>정부: 50,000천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계: 50,000천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간
참여
연구원 수</td><td>총: 1 명
내부: 1 명
외부: 명</td><td>총 연구개발비</td><td>정부:100,000천원
기업: 천원
정부 외: 천원
계:100,000천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소속 부서명</td><td colspan="3">한양대학교 산학협력단
부설 산업과학연구소</td><td colspan="2">참여기업명</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명:</td><td colspan="2">상대국 연구기관명:</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명:</td><td colspan="2">연구책임자:</td></tr>
<tr><td colspan="4">연 구 요 약
○ 다차원 변수가 고려된 수직진동 평가 방법 개발
• 기존 공동주택 바닥진동 DB 11개와 바닥충격음 DB 4개를 수집하고, 바닥진동과 바닥충격음이 연계된 DB 구축을 위하여 현장 및 실험실 진동 실험을 수행하여 5개의 DB를 추가 구축.
• 진동이론과 바닥진동 및 바닥충격음 평가 기준을 고찰하고, 구축된 DB를 분석하여 바닥진동과 바닥충격음 특성을 분석하고, 현행 기준에서 고려하지 않는 지배진동수 대역인 저주파수 대역을 고려할 필요가 있음을 확인.
• 진동 기준 및 DB를 분석하여 바닥진동 및 바닥충격음 영향요소를 파악하고 입력 변수를 추출하여 신경망 이론 맵핑으로 다차원 변수를 고려한 수직진동 평가 및 슬래브 두께 검토 방법을 마련.
○ 개발된 진동 평가 방법을 활용한 슬래브두께 제시
• 신경망 이론에 맵핑된 입력 변수에 대한 고유진동수와 최대 가속도와 기대 성능에 대한 슬래브 두께 기대치를 결정.
•진동성능 및 슬래브 두께 결정 방법을 검토하기 위하여 재료강도와 슬래브 형태 및 규모를 변수로 하는 슬래브 실험체에 대한 진동 실험을 수행하고, 그 적용 범위를 확대하고자 하였음.</td><td colspan="2">보고서 면수

86 pages</td></tr>
</table>

〈 요 약 문 〉

연구의 목적 및 내용	○ 연구의 목적 ◦ 사회문제화 되고 있는 층간소음 문제의 경우 건물 내부 수직 진동에 의해 유발되는 것임에도 불구하고 수직 진동에 관한 설계기준 및 평가방법은 명확하지 않다. - 국외 설계기술 및 평가방법론은 국내 실정(거주자의 인지수준 등)과 맞지 않으며, 현행 수직 진동 평가방법의 경우 진동영향의 다양성으로 인해 제한적인 평가기준을 바탕으로 진동영향을 평가하고 있다. - 때문에 실제 건물에 대한 진동평가에 있어 이론적 기준값과 실측값과는 큰 오차가 발생한다. 이는 제한적 기준으로 설계된 설계값의 신뢰성에 문제가 있으며 합리적인 진동평가가 수행되지 못함을 나타낸다. ◦ 따라서, 본 연구의 최종목표는 (상시 변동가능하며 무수히 많은 정보를 담고 있는) Data와 인공신경망이론을 이용하여 “다양한 변수가 반영된 수직진동 평가방법 개발”을 목표로 한다. ◦ 또한, 이를 활용하여 각 재료별, 구조형식별 합리적인 슬래브두께를 산정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. ○ 연구의 내용 ◦ 본 연구는 상시 변동가능하며 무수히 많은 정보를 담고 있는 Data를 활용하여, 일정한 의미를 발견하는 Data 처리 및 분석기술과 이를 당 연구에 필요한 Data로 활용하기 위한 인공신경망이론과 접목시켜 새로운 진동평가 방법을 개발하는 것이다. ◦ 데이터 기반의 진동특성 평가를 위해 본 연구과제는 Data 수집 및 처리방법을 연구하는 Group1과 이를 검증 및 수정 보완하는 성능평가 Group2으로 분리하여 진행하였다. ◦ Group1은 Data 수집과 처리의 두 단계로 이루어진다. - 1단계 : 국내외 진동평가 기준 분석을 포함한 기존 연구문헌 분석 및 데이터 수집 단계이며, 확대된 기술적 DB 구축을 위해 건설분야에서 이루어진 실험 및 해석 Data를 수집 및 분석한다. - 2단계 : 수집된 DB의 효율적 처리방법에 관한 것으로서, 본 연구에서 필요로 하는 진동관련 상관변수와의 변동성예측을 위해 다층인공신경망을 구축한다. ◦ Group2는 성능평가 단계로 다음 내용을 포함한다. - 완성된 DB와 인공신경망과의 연계작업을 바탕으로 다양한 영향인자들이 반영된 진동평가방법을 개발한다. - 재료 강도와 구조 형태를 변수로 실험적 해석적 데이터를 이용하여 개발된 평가방법을 검증 및 보완 검토하고 현행 진동평가 기준의 합리화 방안을 마련하고자 하였다. - 연구의 최종단계로서 각 변수별(입력데이터 별) 바닥진동을 평가하고, 이를 활용하여 효율적인 바닥판 두께를 검토하였다.

연구개발성과	◦ 본 연구의 핵심 성과는 ① 다차원 변수가 고려된 수직진동 평가 방법과 ② 개발된 수직진동 평가방법을 활용한 효율적 슬래브 두께를 제시하는 것이다. ◦ 이는 설계 Data(재료 조건, 구조형식 등)의 간단한 입력을 통해 수직 진동의 영향력을 도출할 수 있는 평가방법으로서, 현행 국외 기준의 문제점(이론과 실제값의 편차)을 해결할 수 있으며 수직 진동평가 방법의 척도가 될 수 있다. ◦ 이러한 평가방법은 Open source 기반으로 방대한 DB구축(Big Data화 가능)이 가능하여 관련 기술 발전이 유연하다.
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	본 연구는 무한한 데이터를 기반으로 제약 없는 평가방법을 개발하고자 하는 연구로 그 결과는 다음과 같이 활용할 수 있을 것이다. ◦ Data의 간단한 입력 방법으로 원하는 결과를 도출할 수 있는 평가방법으로서 진동평가 기준의 척도가 될 수 있다. ◦ 상기와 같은 평가방법은 다변화하는 건설기술에 능동적으로 대응이 가능하다. ◦ 수직 진동 영향 평가 방법 및 효율적인 슬래브두께 산정방법은 국내 대다수를 차지하고 있는 주거형태인 아파트의 주거 쾌적성 향상에 기여할 것으로 기대된다. ◦ 평가방법의 유연도가 높아(Open source 기반) 관련 분야 및 유사분야의 무한 발전가능성을 제공할 것으로 기대된다.

핵심어 (5개 이내)	바닥판	진동	빅데이터	인공신경망	부재 두께

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	○ Purpose ◦ Even though noise complaint problem among neighbors mainly caused by vertical vibration induced inside building, design and evaluation criteria for floor vertical vibration do not clear. - Vibration criteria developed in other countries do not appropriate for domestic circumstances (structural system and human perception levels etc.), because of diverse factors of vibration problem floor vibration is evaluated by current criteria with limitations. - This results in remarkable difference between theoretical and measured values. Designed values or evaluations with criteria having some limitations appear to lack credibility. ◦ Thus, the purpose of this study is the development of the evaluation method of floor vibration using neural networks based on data, ◦ and to propose the minimum slab thickness based on the developed evaluation method in this study. ○ Contents ◦ This study attempted to develop new evaluation method for floor vibration using data having a lot of and changable informations and artificial neural network. ◦ For the purpose this study was executed with two distinguished Groups. ◦ Group1 is the stage for acquisition and analysis of data and is composed of two steps. - Step1 : ■ Review of vibration criteria ■ Acquisition and analysis of data from references and existing experiment results - Step2 : ■ Data mining and construction of multilayered artificial neural network to predict changeable factors ◦ Group2 is the stage for performance evaluation. - Developing vibration evaluation method considering various factors based on mapping DB on artificial neural network. - Verifying developed method using experimental and analytical studies. - The last step of this study, efficient slab thickness was checked from floor vibration evaluation using developed method and variables.
Results	◦ Results of this study ① Development of floor vibration evaluation method considering multidimensional variables. ② Suggestion on the slab thickness based on the development evaluation method. ◦ From this method the effect of floor vibration will be derived using design element as input data.

Expected Contribution	The result of this study for developing new evaluation method for floor vibration using data having a lot of and changable informations and artificial neural network can be utilized as follows. ◦ The effect of floor vibration will be derived with simple input data by using the developed method that can be the scale of application of other criteria ◦ This method can cope actively with diversified construction technique. ◦ And suggested slab thickness will be contributed to improve the serviceability of apartment buildings.				
Keywords	Slab	Vibration	Big Data	Artificial neural network	Member thickness

〈 CONTENTS 〉

Chapter 1. Overview of Research ····· 9
Chapter 2. State of the Relevant Technology Development ····· 11
Chapter 3. Research Contents and Results ····· 22
Chapter 4. Level of Contribution and Achievement ····· 68
Chapter 5. Application Plane of the Results ····· 75
Chapter 6. Foreign Scientific Technologies ····· 77
Chapter 7. Security Level ····· 81
Chapter 8. Research Facilities and Equipments Registered in the National Science and Technology Information Service ····· 81
Chapter 9. Implementation Result of Safety Measures ····· 82
Chapter 10. Key Achievements ····· 83
Chapter 11. Others ····· 84
Chapter 12. Reference ····· 85

〈 목 차 〉

제1장. 연구개발과제의 개요 ····· 9
1. 연구개발 목적 ····· 9
2. 연구개발의 필요성 ····· 9
3. 연구개발 범위 ····· 10
제 2장. 국내외 기술 개발 현황 ····· 11
1. 진동 평가 기준 ····· 11
2. 바닥충격음 평가 기준 ····· 15
3. 바닥 중량충격음 관련 연구 ····· 19
제 3장. 연구 수행 내용 및 성과 ····· 22
1. DB 구축화 작업 ····· 22
1. 바닥진동과 바닥충격음 특성 분석 ····· 31
1. 진동특성 주요 설계 요소 간 상관관계 도출 ····· 48
2. 데이터 기반의 진동성능 및 슬래브 두께 평가 ····· 53
제 4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 68
제 5장. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 75
제 6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 77
제 7장. 연구개발성과의 보안등급 ····· 81
제 8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 81
제 9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 82
제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 83
11. 기타 사항 ····· 84
12. 참고 문헌 ····· 85

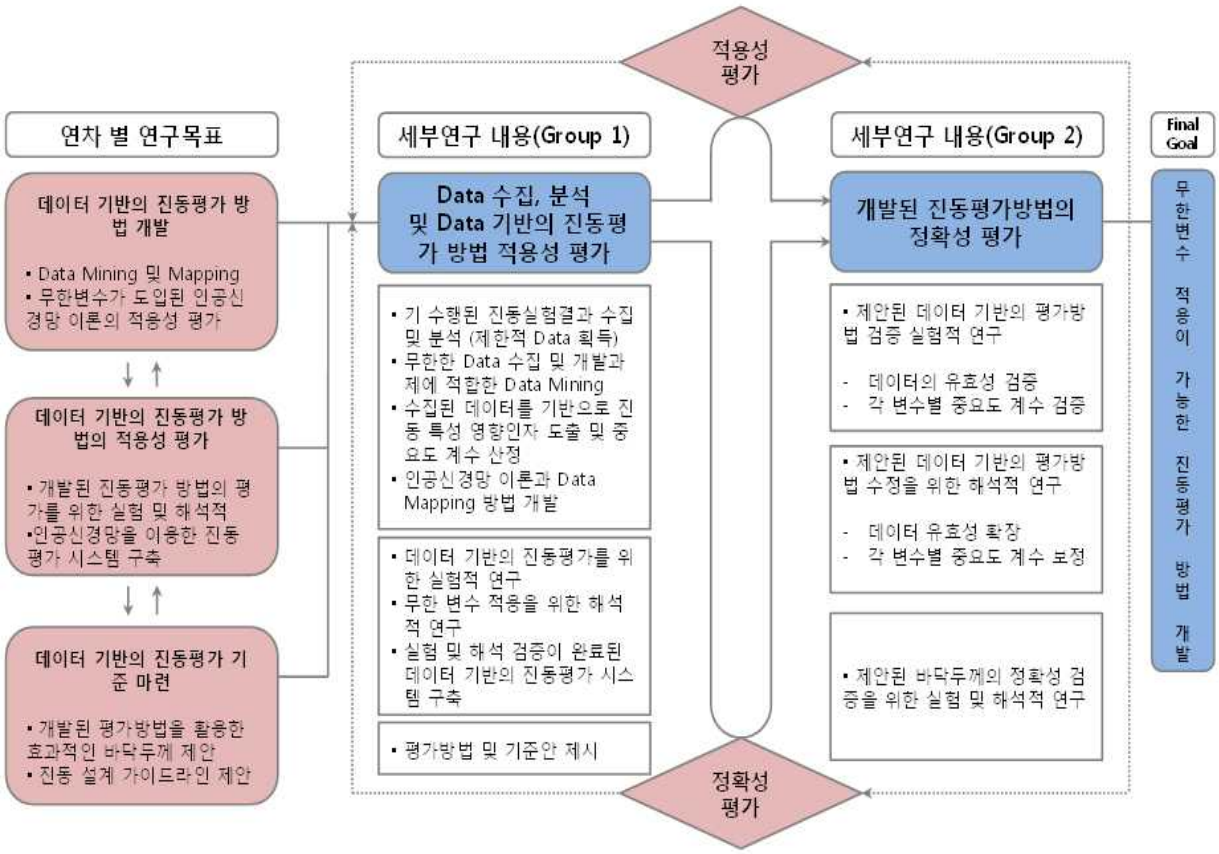
제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

○ 본 연구의 최종목표는 (상시 변동가능하며 무수히 많은 정보를 담고 있는) Data와 인공신경망이론을 이용하여 “다양한 변수가 반영된 수직진동 평가방법 개발”을 목표로 한다.

○ 또한 이를 활용하여 각 재료별, 구조형식별 합리적인 슬래브두께를 산정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

○ 본 연구의 최종목표 달성을 위한 세부 목표 및 연구 내용은 [그림 1.1.1]과 같다. 데이터 기반의 진동특성 평가를 위해 Data 수집 및 처리방법을 연구하는 Group1과 이를 검증 및 수정 보완하는 성능평가 Group2으로 분리하여 연구를 진행하였다.



[그림 1.1.1] 연구 최종 목표 도달을 위한 각 연차별 연구목표 및 연구내용

2. 연구개발의 필요성

○ 사회적으로 쾌적한 주거활동에 관한 요구가 점차 증가되고 있으며, 건설 기술은 점차 첨단화 지능화되고 있다. 시공기술 및 재료성능은 높은 기술적 발달을 이루었으나, 주거환경의 쾌적성을 좌우하는 사용성, 특히 층간소음 문제는 심각한 사회문제화 되고 있다.

○ 거주자들의 거동으로 인해 발생되는 바닥 수직진동은 층간소음의 주원인이다. 특히, 바닥 수직진동은 진동원을 제거하거나 분리할 수 없으므로 구조물 설계단계에서 평가가 절대적으로 필요하나, 수직 진동에 관한 설계기준 및 평가방법은 명확하지 않다.

- 현행 진동기준(국내 및 국외) 적용에 있어 적용 한계값이 광범위하여 적용 기준에 따른 편차가 발생할 수 있다.

- 국외 진동 기준 및 평가 방법은 각국 환경에 맞게 결정된 것으로 국내 실정과 맞지 않다.

- 국내의 벽식 구조, 주상복합 등의 구조 시스템은 일반적인 구조물의 진동특성과 차이를 보이며, 또한 인지 수준은 환경의 영향 등을 복잡하게 받으므로 해외 기준에서 고려하는 성능 수준과 국내 거주자와는 인지수준차가 존재하며 이를 고려할 수 있는 평가기준 마련이 필요하다.

○ 국내기준에서 층간소음 문제에 대처하는 기술적 권고사항은 공동주택에 대하여 슬래브 두께를 증가시키는 방법을 제시하고 있다. 그러나 구조적으로 문제가 없는 슬래브 두께 증가는 구조물 중량을 증가시켜 경제적으로 불합리하며, 슬래브 두께 증가로 층간 소음을 일부 감소시킬 수는 있으나 근본적 해결책이 되지 못한다.

○ 또한 시스템 및 재료 발전과 더불어 진동과 같은 사용성 기준의 정립이 필요하나, 기준 마련에 대한 체계적인 연구는 미흡한 실정으로 고성능계 재료 및 새로운 시스템 도입 시 수직 및 수평 진동등과 같은 사용성 검증은 이루어지지 않고 있다.

○ 이에 본 연구에서는 다양한 변수 반영이 가능한 데이터 기반의 합리적인 수직 진동 평가 방법 및 이를 활용한 설계기술을 개발하고자 한다.

3. 연구개발 범위

○ 본 연구는 상시 변동가능하며 무수히 많은 정보를 담고 있는 Data를 활용하여, 일정한 의미를 발견하는 Data 처리 및 분석기술과 이를 당 연구에 필요한 Data로 활용하기 위한 인공신경망이론과 접목시켜 새로운 진동평가 방법을 개발하는 것으로 연구개발 범위는 다음과 같다.

○ DB 구축화 작업

- 기존 연구문헌 및 국내외 진동평가 기준을 분석하고, 확대된 기술적 DB를 구축하고자 건설 분야에서 이루어진 실험 및 해석 Data를 수집 및 분석하고, 현장 및 실험실에서 소음 · 진동 측정을 수행한다.

○ 진동 특성 및 주요 설계 요소 간 상관관계 도출 및 DB와 신경망 이론의 맵핑

- 수집된 DB의 효율적 처리방법으로서, 무한한 양의 데이터(Data mining화)와 본 연구에서 필요로 하는 진동관련 상관변수와의 변동성예측을 위해 다층인공신경망을 구축한다.

-이를 위해 진동이론 및 등가모델의 타당성을 바탕으로 입력 변수를 추출하고, 재료단계에서부터 부재단위, 실물단위까지의 실험적 해석적 연구를 진행한다.

○ 연구의 최종단계로서 각 변수별(입력데이터 별) 바닥진동을 평가하고, 이를 활용하여 효율적인 바닥판 두께를 제시한다.

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 진동 평가 기준

가. 국내 기준

○ 국내의 진동 기준으로는 소음·진동관리법에서 “공장 건설공사장 도로 철도 등으로부터 발생하는 소음 진동으로 인한 피해를 방지하고 소음 진동을 적정하게 관리하여 모든 국민이 조용하고 평온한 환경에서 생활할 수 있게 함을 목적”으로 소음·진동을 규제하고 있다.

○ 주거지역에 대한 생활 진동 규제 기준은 주간(06:00～22:00)은 65dB(V), 야간(22:00～06:00)은 60dB(V) 이하이다.

○ 국내에는 바닥 진동에 대한 구체적인 평가 기준이 마련되어 있지 않으며, 실무에서는 바닥 진동 평가 시 독일, 스위스 및 ISO 규격 등의 해외 기준을 인용하여 사용하고 있다.

나. 국외 기준

(1) 국제규격 ISO

○ 국제규격 ISO는 ISO 2631-2(1989)에서 진동 전신 폭로 기준인 ISO 2631-1을 근거로 교통, 기차, 건설 및 산업활동, 폭파 및 기계장치에 의하여 발생하는 1～80 Hz범위의 건물진동 평가 방법 및 제한값을 제시하고 있다.

○ 이후 2003년 개정된 ISO 2631-2(2003)에서는 건물 용도별 진동 제한값을 삭제하였으나, 건물 및 보행교의 진동에 대한 사용성 평가 기준 ISO 10137(2007)에서 ISO 2631-2(1989)의 건물 용도별 제한값을 평가 기준으로 소개하고 있어, 건물 진동에 대한 사용성 기준으로 인용되고 있다.

○ ISO 10137(2007)은 건물 용도와 시간대 및 진동 빈도에 따라 기준곡선에 곱할 계수 값을 제시하고 있는데, 주거 건물의 경우 연속적이거나 빈번한 진동에 대하여 야간 1.4, 주간 2～4이다.

(2) 독일 기준 DIN 4150-2

○ DIN 4150-2(1986)는 교통, 기차, 건설 및 산업활동, 폭파 및 기계장치에 의하여 발생하는 1～80 Hz범위의 건물진동 평가 방법을 제시하고 있다.

○ 진동수와 진동응답을 무차원 변수 KB값을 식(2.1.1)과 같이 제시하여 건물 용도, 시간대 및 진동 특성에 따라 KB값으로 평가한다.

$$KB = a_p \frac{C_1}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}} = \upsilon_p \frac{C_2 f}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}} = d_p \frac{C_3 f^2}{\sqrt{1+(f/f_0)^2}} \qquad (2.1.1)$$

$$C_1 = \frac{1.98}{\%gravity}, \quad C_2 = \frac{0.13}{mm/s}, \quad C_3 = \frac{0.80}{mm}, \quad f_0 = 5.6\,Hz \qquad (2.1.2)$$

여기서,

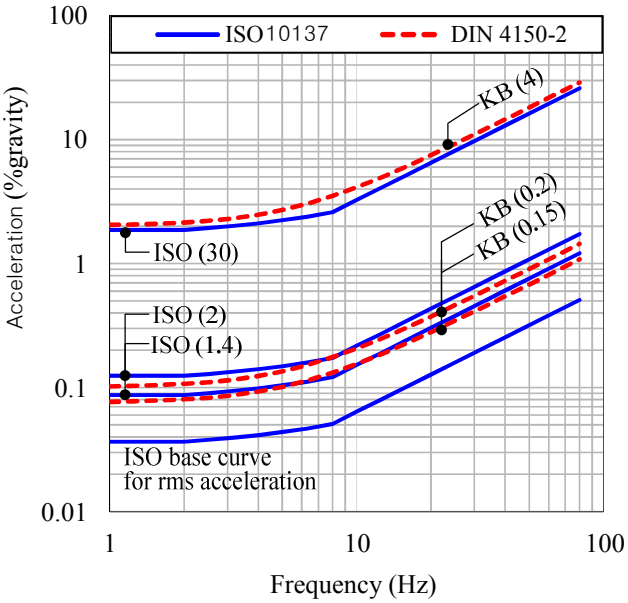
a_p = 최대 가속도 [%gravity]

v_p = 최대 속도 [mm/s]

d_p = 최대 변위[mm]

f = 구조물의 진동수 [Hz]

○ 주거 건물의 낮과 밤에 대한 DIN 4150-2(1986)의 KB 제한값을 진동수와 최대가속도 관계 그래프로 나타내어보면 ISO 10137(2007)의 주거 건물에 대한 낮과 밤의 기준 곡선과 거의 일치 한다 [그림 2.1.1].



[그림 2.1.1] 국제표준 ISO 10137(2007)과 독일 DIN 4150-(1986)의 비교

(3) 캐나다 기준 CSA(1989)

○ 42개 장스팬 바닥의 뒤꿈치 충격 실험 결과와 각각의 시스템에 대해 거주자 또는 연구자에 의해 주관적인 평가로 결정된 만족, 불만족 등급과 기존 연구자들의 인지 수준을 비교하여 주거, 사무실 및 학교 건물에 대한 진동평가 기준을 제시하고 있다.

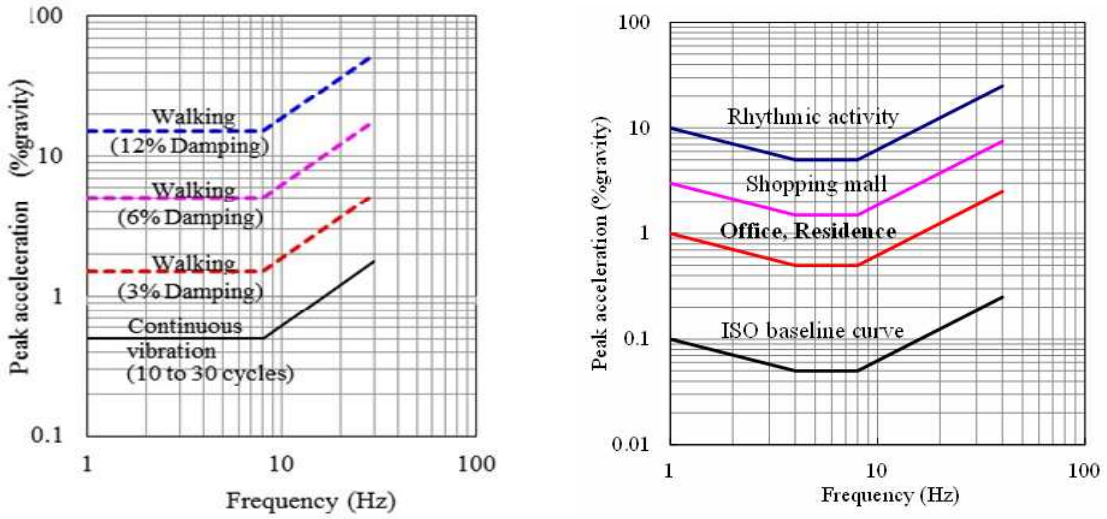
○ 율동이나 규칙적인 뜀에 의한 바닥진동은 연속진동곡선과 비교 평가한다.

○ 보행에 의한 바닥진동을 평가할 경우 뒤꿈치 충격을 사용하여 구한 바닥판의 최대 가속도를 감쇠비에 따라 보행하중 평가 곡선과 비교 평가한다.

○ 적용 대상은 고유진동수 10Hz 이하의 장스팬 바닥이다.

(4) 미국 기준 AISC Design Guide 11(1997)

○ 보행 및 율동 등 사람의 거동으로 발생하는 진동에 대한 사용성 평가 기준으로. ISO 2631(1989)의 기본 곡선에 증폭 계수 5~8을 적용하여 주거 건물에 대한 최대가속도 제한값을 제시하고 있다.



(a) CSA (b) AISC-11

[그림 2.1.2] 바닥 진동 평가 기준(CSA, 1989; Murray et al., 1997)

(5) 일본기준 AIJ

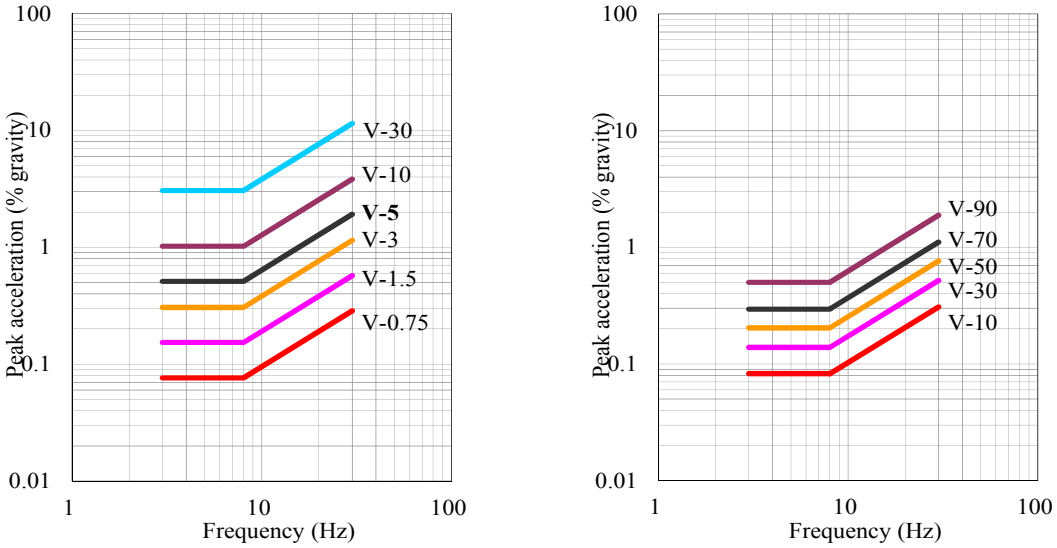
○ 일본건축학회(AIJ)에서는 1991년 기존의 해외 기준과 바닥진동에 대한 연구 결과를 비교 분석하여 주거성능을 평가 지침 마련하여, 진동종류, 건축물의 용도, 사용성 등급에 따라 가속도 수준을 6 단계로 제시하였다.

○ 주거 건물에서 보행 진동은 V-3등급을, 감쇠비 3% 이하 바닥에서 뒤꿈치 충격 진동은 V-5 등급을 만족하도록 제안하고 있다[그림 2.1.3(a)].

○ 2004년 개정된 기준에서는 등급에 따른 가속도 제한기준을 삭제하고 진동을 인지할 확률 10~90%에 대한 진동수와 최대가속도 관계 그래프를 제시하고, 진동 수준은 엔지니어와 건축주의 협의로 결정하도록 하였다.

○ [그림 2.1.3(b)]에서 V-10은 진동을 인지할 확률이 10%인 수준의 진동 수준임을 의미한다.

○ AIJ 기준의 적용 대상은 진동수 범위가 3~30Hz인 주거 및 사무실 건물의 일체화된 바닥구조이다.



(a) AIJ : 1991 (b) AIJ : 2004

[그림 2.1.3] 일본 건축학회 거주성능 평가 기준(AIJ, 1991; AIJ, 2004)

다. 바닥진동 평가 기준의 최대가속도 평가 식

(1) CSA (1989)

○ 뒤꿈치 충격을 삼각형 임펄스로 가정하여 초기 최대 가속도를 식(2.1.3)과 같이 제안하였다.

$$a_p = \frac{9.17(2\pi f_n)I}{M} \qquad (2.1.3)$$

여기서,

a_p = 예측된 최대 가속도 [%gravity]

f_n = 바닥의 고유진동수 [Hz]

I = 가정된 임펄스의 규모 [N · s]

M = 바닥구조의 총질량 [kg]

(2) AISC-11 (1997)

○ 보행을 조화 하중으로 가정하여, 보행하중과 바닥의 공진에 의한 최대 가속도 산정 식을 제안하였다.

○ 9Hz 이하의 바닥의 경우 최대 가속도 제한 기준 적용하고(식 2.1.4),

○ 9Hz 이상의 고유진동수를 갖는 바닥의 경우 최대 가속도 제한과 최소 강성의 제한을 모두 적용한다.

- 최대가속도 제한 (식 2.1.4)
- 1KN의 집중하중에 대한 처짐이 1 mm 이하 (식 2.1.5)

$$a_p = \frac{P_0 \exp(-0.35 f_n)}{\zeta W} \times 100 \leq a_t \qquad (f_n < 9Hz) \qquad (2.1.4)$$

$$\triangle_{st} \leq 1\,mm \qquad (f_n \geq 9\,Hz) \qquad (2.1.5)$$

여기서,

a_p = 추정된 최대 가속도 [%gravity]

a_t = 기준의 가속도 제한값 [%gravity], 주거 건물의 경우 0.5%gravity

f_n = 바닥의 고유진동수 [Hz]

P_0 = 0.29 kN

ζ = 감쇠비

W = 바닥의 유효 중량 [N]

$\triangle_{st}$ = 1kN의 집중하중에 대한 정적 처짐 [mm]

○ 평가식에서 바닥의 고유 진동수는 일방향 철골보-콘크리트 슬래브에 대하여 보 이론을 바탕으로 제안되었다.

○ 그러나 등가보를 이용한 고유진동수 예측은 이방향 콘크리트 슬래브의 경우 강성을 과소평가하는 경향있으며, 내력벽식 이방향 플랫플레이트 시스템 형태가 일반적인 국내 주거용 아파트에 적용하기는 어렵다.

2. 바닥충격음 평가 기준

가. 국내 기준

○ 공동주택에서 층간소음으로 인한 민원이 급증하고 이웃 간 불화가 심각한 사회 문제로 이어짐에 따라 바닥충격음 평가 방법에 대한 KS 규격이 제·개정되고, 공동주택 건설 관련 법령과 규칙이 수차례 개정되었다.

○ 바닥충격음과 관련하여 주택건설기준 등에 관한 규정은 '각 층간의 바닥충격음을 충분히 차단할 수 있는 구조로 하여야 한다'의 바닥구조 규제 기준을 2003년 개정하여 '경량충격음 58dB 이하, 중량충격음 50dB 이하'의 구체적인 성능 기준을 제시하고, 공동주택의 바닥구조는 바닥충격음 차단성능을 확인 받거나 표준바닥구조를 사용하도록 하였다.

- 이에 따라 2004년에 공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준이 제정되고, 표준바닥구조와 경량충격음에 대한 바닥충격음 차단성능 등급기준 및 측정 평가방법을 제시하였다.

- 표준바닥구조는 슬래브와 그 위의 완충재 및 마감재를 포함한 바닥구조로 벽식구조의 경우 슬래브 두께를 180 mm로 제안하였으나, 이후 2005년에 210 mm로 강화되고, 중량충격음에 대한 바닥충격음 차단성능 등급기준도 마련되었다.

- 2014년 개정된 주택건설기준 등에 관한 규정에서는 바닥충격음 차단 성능 기준과 슬래브두께 210 mm의 시방 기준 모두 충족시키도록 바닥충격음 성능에 대한 바닥구조 규제 기준을 더욱 강화하였다.
- 2014년 공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준의 개정에서 바닥충격음 차단 성능 평가를 위한 표준 중량 충격원으로 뱅머신 외에 임팩트볼을 사용한 평가 방식을 도입하였다.
- 임팩트볼은 바닥충격음의 주 발생원인인 아이들 뛰이나 발걸음에 대하여 뱅머신 보다 더 적합한 충격원 특성으로 평가되고 있다.
- 현 평가 기준에서는 임팩트볼 방식을 사용할 경우 단일수치 레벨에 보정값 3 dB을 더하여 뱅머신과 동일한 성능등급 기준을 적용한다.
- 충격원 특성이 반영되지 않은 평가 방법 및 성능등급 기준을 적용함에 따라 사용된 충격원 특성에 따라 바닥충격음 차단성능 등급의 편차가 발생하고 평가 보정값 및 성능등급 기준 등의 보완 필요성이 제기되자 2015년에는 표준 중량 충격원을 뱅머신 방식으로 일원화하였다.

○ 공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준에서는 중량충격음레벨을 KS F 2863-2에 규정된 평가 방법 중 역A특성곡선에 의한 방법으로 평가한 “역A특성 가중바닥충격음레벨”로 규정하고 바닥충격음 차단성능의 등급기준을 4개 등급으로 제시하고 있다.

○ KS F 2863-2(2007)에서는 바닥 충격음 차단 성능을 63~500Hz 범위의 4개 옥타브 밴드 중심주파수 측정 결과를 이용한 단일 수치 평가량으로 평가하고 있는데, 이를 역 A특성 가중 바닥 충격음 레벨(Li, Fmax, AW)이라 한다.

- 바닥충격음의 단일수치평가량인 역 A특성 가중 바닥 충격음 레벨은 기준곡선을 측정값 아래로 오도록 이동시키되 기준곡선 이상이 되는 측정값의 합이 8dB을 넘지 않는 최저 위치에서 최저 기준곡선의 500Hz에 해당하는 레벨로 결정한다.

○ KS F 2863-2(2007)의 역 A특성 기준곡선은 일본 규격 JIS A 1419(2000)의 60dB 등급의 기준선과 일치하고, 기준곡선을 이동시켜 500Hz의 값을 단일수치평가량으로 결정하는 방법은 ISO 717-2(2013)의 경량 바닥충격음 평가 방법과 상응한다.

○ 공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준에서는 바닥충격음 차단성능의 측정 시 표준 충격원 특성 1인 뱅머신을 사용하여 KS F 2810-2(2012)에 규정된 방법을 따르도록 규정하고 있다.

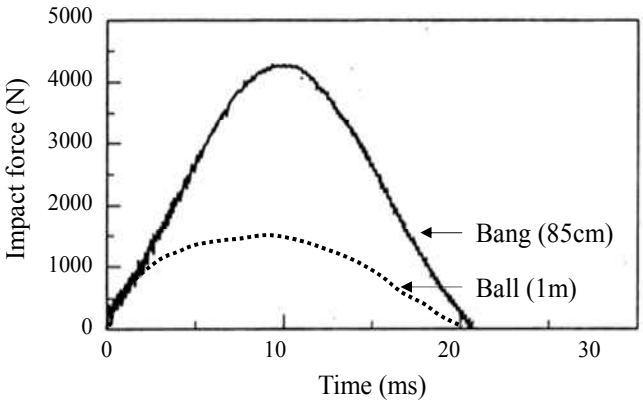
- KS F 2810-2(2012)는 중량 충격원에 의한 바닥 충격음 차단 성능 현장 측정 방법에 대한 국내 규격으로 옥타브밴드 중심 주파수 63~500Hz 범위를 측정 대상으로 한다. 표준 중량 충격원의 규격으로 2개의 충격력 하중함수와 충격 폭로 레벨로 규정하고, 충격원 특성 1인 뱅머신(타이어, bang machine)과 특성 2인 고무공(실리콘계고무공, rubber ball)의 크기와 재질 등의 관리 기준을 제시하고 있다.

- 고무공은 임팩트볼(impact ball)이라고도 하며, 뱅머신의 과도한 충격력이 목구조 주택에서 구조체에 미칠 영향을 피할 목적으로 2000년 일본에서 새로 개발한 SBR(Styrene Butadiene Rubber) 재질의 충격원이 온도 변화에 따른 충격력 차이를 보이자 이를 보완하여 실리콘 고무 재질로 만든 충격원으로 ISO 규격과 국내 규격에 도

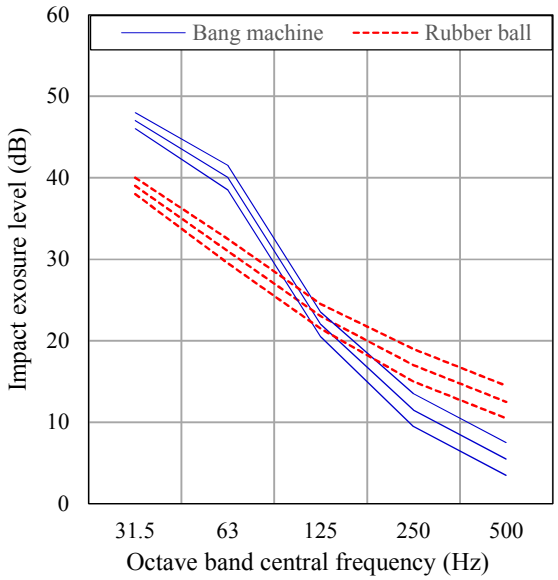
입되었다. 많은 선행 연구에서 임팩트볼의 명칭을 사용해 왔으나, ISO 규격과 맞추어 개정된 KS 규격에서는 고무공(rubber ball)으로 명명하고 있다.

- 각 충격원의 충격력 크기 함수로 충격시간 20±2ms의 단봉형(unimodal) 충격력 파형을 가지며, 뱅머신은 타이어 낙하높이 85cm일 때 약 4200N, 고무공은 1m 높이에서 자유낙하 시 1500N 정도의 최대 충격력을 갖는다 [그림 2.2.1].

- [그림 2.2.2]는 각 충격원의 충격력 에너지 스펙트럼으로, 주파수대역에 따라 충격 폭로 레벨에 허용되는 ±1.0~±2.0dB의 편차 한계를 포함하여 나타내었다. 뱅머신은 주파수 대역에 따라 충격 폭로 레벨이 급격히 변화하여, 63~125Hz에서는 공무공보다 높은 수준을 보이나 250~500Hz에서는 더 낮은 값을 가진다.



[그림 2.2.1] 표준중량충격원 하중함수 (KS F 2810-2, 2012)



[그림 2.2.2] 표준중량충격원 충격력 스펙트럼 (KS F 2810-2, 2012)

나. 국외 기준

(1) 일본규격 JIS A 1419

○ 일본의 건물 차음성능 평가 방법 규정인 JIS A 1419(2000)에서는 옥타브 대역 중심 주파수 63~4,000 Hz를 고려 대상으로 하여 바닥충격음 차음성능을 45~60dB범위에 대하여 5dB 간격의 6개 등급으로 구분하고 있다.

○ JIS A 1419(2000)의 평가 방법에 따르면 동일 주파수 범위에서 측정된 바닥충격음이 모든 주파수 대역에서 어느 등급의 기준선 이하가 될 때, 그 최소 기준선의 명칭이 대상 바닥의 바닥충격음 레벨로 결정된다.

○ 각 주파수 대역의 측정값에서 각각 2dB를 감할 수 있는 허용치를 제시하고 있는데, 2dB 허용치를 KS F 2863-2(2007)의 4개 중심 주파수 대역에 대하여 적용할 경우 기준곡선 이상이 되는 측정값의 합이 8dB이 된다.

○ 일본 기준에서는 차음등급에 의미를 부여하고 있는데, 공동주택의 거실 바닥은 중량충격음에 대하여'차음성능상 바람직 함'의 등급으로 보통 사용 상태에서 사용자로부터 차음성능상의 지장을 주는 불평은 거의 없다고 평가되는 L-50 이상의 차음성능을 요구하고 있다.

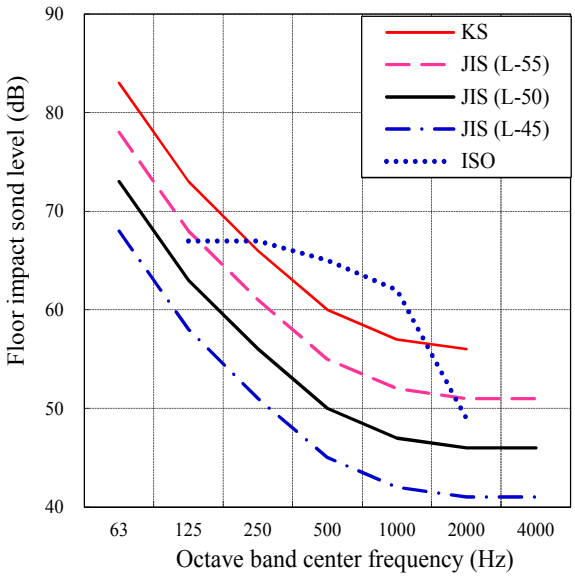
(2) 국제규격 ISO 717-2

○ 국제 표준 규격인 ISO에는 태핑머신을 이용한 경량 바닥 충격음 및 뱅머신과 고무공을 포함한 중량 충격원에 대한 바닥 충격음 측정 방법에 대한 규정은 마련되어 있으나, 평가 방법은 현재 경량 바닥 충격음에 대해서만 ISO 717-2(2013)에 규정되어 있다.

○ 바닥 중량 충격음에 대한 평가 방법 규정은 현재 준비 중으로 아직까지 국내 규격 KS F 2863-2(2007)에 대응하는 국제 규격은 없다.

○ ISO 717-2(2013)의 경량 충격음 평가 방법은 국내 KS 규격에서와 같이 기준 곡선을 1dB씩 수직 평행 이동하여 기준 곡선을 상회하는 측정값이 10dB을 넘지 않도록 최저 위치로 이동시켰을 때 500Hz에 해당하는 기준곡선의 값에서 5dB을 차감한 값을 단일 수치 평가량으로 결정한다.

○ ISO 717-2(2013)의 바닥 충격음에 대한 평가 방법은 기준 곡선의 이동 및 기준 곡선을 상회하는 값의 합을 제한하는 방법이 국내 KS F 2863-2(2007)의 역 A특성 가중 바닥충격음 레벨 산정 방법과 상응하나, 기준 곡선은 국내 규격 및 일본 규격의 중량 충격음 평가 기준 곡선과 다른 형태를 가진다.



[그림 2.2.3] 바닥충격음 평가 기준 곡선

3. 바닥 중량충격음 관련 연구

가. 충격원 특성에 대한 연구

○ 바닥충격음과 관련한 다수의 연구는 주로 완충재에 대한 연구와 충격원 특성에 대하여 다루고 있다.

○ 중량충격음 평가에 있어서 표준 중량충격음원으로 뱅머신과 고무공의 적용에 대한 논의가 있으며, 이에 대하여 여러 연구자들에 의해 수행된 연구는 주로 뱅머신과 임팩트볼 그리고 실충격원의 하중 특성 비교 및 이로 인한 바닥충격음 레벨 분석에 대하여 다루고 있다.

○ Kim et al.(2005)은 실생활 공간에서 발생하는 충격력의 특성과 관련하여 5세부터 11세까지 159명을 대상으로 달리기와 30 cm 및 50 cm 높이에서 뛰어내리기 동작에 대하여 충격력을 측정하고 표준 중량 충격원과 비교 연구하였다.

- 달릴 때의 충격력의 크기는 230~3,000 N으로 600~800 N 범위에 가장 많이 분포하며, 뛰어내릴 때의 경우 그 크기는 1,000~6,000 N으로 2,000~3,000 N 범위에 가장 많이 분포하고 있다.
- 충격력 크기는 체중의 증가에 비례하는 경향을 다소 보이나 동일한 체중인 경우에도 충격력이 2~ 4배 이상 차이를 보이는데, 그 원인이 개인의 달리거나 뛰어내리는 동작의 차이(뒤꿈치와 발끝에 실리는 체중 차이 등)에 있다고 판단하였다.
- 표준 중량 충격원과 실충격원의 충격력 폭로 레벨 비교로 표준 충격원과 실충격원의 폭로 레벨에 차이가 있으며, 뱅머신보다는 임팩트볼이 어린이의 충격력 레벨에 다소 유사한 경향을 나타낸다고 보고하였다.

○ Jeon et al.(2006)의 연구에서는 충격원의 기계적 임피던스의 차이가 구조체에 작용하는 가진력의 차이를 발생시킬 수 있음을 지적하고, 표준 충격원의 실충격원 재현성 평가를 위해 실충격원과 표준 충격원의 기계적 임피던스를 측정·비교 연구하였다.

- 실충격원으로 어린이의 달리기와 의자에서 뛰어내리는 동작을 선정하였으며 실험에 참가한 어린이는 19 ~ 40 kg 체중의 초등학교 1학년 97명이다.
- 실험 결과 최대 충격력은 달릴 때와 의자에서 뛰어내릴 때 각각 2600 N과 5600 N이고, 평균 충격력은 각각 900 N와 1600 N이며, 임피던스 측정 결과 임팩트볼이 비교적 실충격원에 유사하나 임팩트볼의 경우에도 실충격원의 폭로레벨 및 진동수 특성 재현에 한계가 있음을 지적하였다.

○ Park, Kim & Kim(2013)은 성인의 보행과 뜀 어린이의 달리기 및 뜀 등 다양한 실충격원과 표준 충격원의 하중 크기 및 스펙트럼 특성 비교에 더하여 현장 및 잔향실험실에서의 음압레벨 특성을 비교하였다.

- 그 결과, 표준 충격원이 실제 충격원보다 저진동수 대역에서의 성분이 적은 반면 고진동수 대역 성분이 많음을 확인하였다.
- 차음성능 평가 시 표준 충격원에 의한 바닥충격음과 실충격원에 의한 충격음의 유사성이 가장 중요하고 바닥구조 성능 평가에 저진동수 대역의 평가량이 결정적이나, 표준 충격원의 특성이 저진동수 대역에서 실충격원과 차이를 보이고 있어 표준 충격원이 실충격원을 대변하기 어렵다고 평가하였다.
- 또한, 공동주택 현장에서 충격원에 따른 최대소음레벨은 충격원 뿐 아니라 기타 환경차이의 영향을 받을 수 있음을 밝히고 있다. 특히 표준 충격원에 대한 레벨도 대상 현장에 따라 일관적인 순서로 나타나지 않은 것으로 미루어 볼 때 충격원 특성 외에 충격음에 영향 미치는 요인이 있을 것으로 판단된다.

○ 상기 연구 결과로 볼 때, 어린이가 달리거나 뛰어내릴 때 충격력의 크기는 몸무게에 비례하나 그 상관성은 낮으며, 동일 체중인 경우에 충격력 크기는 착지자세나 발이 센서에 닿을 때 체중이 실리는 면적 등의 개개인의 습성에 크게 영향을 받는다.

○ 실충격원의 하중의 크기나 지속시간, 스펙트럼 특성이 분명하고 균일하다면, 표준 충격원의 적용 방법을 달리하여 일관적이고 신뢰성 있는 평가수치를 기대할 수도 있겠으나, 거주자의 거동 특히 달리기와 뛰어내림 동작으로 인한 충격력의 최대값은 체중 외에 개개인의 습성에 크게 영향을 받아 그 분포 범위가 매우 넓고 진동수 성분 또한 표준 충격원과 차이를 보이고 있다.

나. 기타 영향 요인에 대한 연구

○ 층간소음 관련하여 층간소음 완충재를 활용한 국부적 기술연구에서 천장 마감 및 내력벽의 위치 등 바닥충격음 영향 평가 요인에 대한 연구가 확장되고 있다.

○ Park and Mun (2014)는 목구조 천장틀과 무달대 천장구조의 바닥충격음 특성을 비교하였다.

- 그 결과 무달대 천장구조의 경우 바닥 슬래브 진동이 천장틀에 전달되는 거슬 차단하여 바닥충격음 증폭현상을 저감시킬 수는 있으나 저주파 소음을 감소시키지는 못한다.

- 한편, 목구조 천장틀은 달대를 통해 바닥 슬래브 진동이 천장틀로 전달되어 100 Hz 이하 주파수 대역에서 바닥충격음을 증폭시킨다고 보고하였다.

○ Lee et al.(2016b)은 기존 공동주택의 슬래브의 인장면 (천장면)에 스틸과 탄소판, 탄소섬유로 보강하여 바닥 충격음 특성 변화를 조사하였다.

- 스틸 보강재는 뱅머신에 의한 중량 충격음의 역A특성 가중 바닥충격음 레벨이 1~2dB 감소하는 효과를 나타내었다.
- 탄소판 보강재의 경우 중량충격음의 역A값이 그대로이거나 증가하는 경우를 보여, 보강에 따른 바닥충격음 저감 효과는 없는 것으로 판단하였다.
- 탄소섬유 보강재의 경우 뱅머신에 의한 중량 충격음의 역A특성 가중 바닥충격음 레벨이 3dB 감소하는 효과를 나타내었다.

○ Mun et al.(2016)은 PVC 바닥 마감재와 바닥 매트의 바닥충격음 저감 효과를 조사하였다.

- 그 결과에 의하면, PVC 바닥 마감재는 경량충격음 저감에 대해 효과적이나 중량충격음 저감에는 효과가 전혀 없다.
- 바닥 매트는 PVC 바닥 마감재와 마찬가지로 경량충격음의 저감에 매우 효과적이나 고무공에 의한 중량충격음의 경우 125Hz 이상의 고주파수 대역에서는 저감효과를 보이고 있으나 63Hz 이하의 대역에서는 다소 증폭시키는 현상을 보이고 있다.

○ Lee et al.(2016a)은 공동주택에서 내력벽의 위치에 따른 중량충격음 특성 변화를 조사하여 동일한 형태의 평면에서도 거실 바닥 면적과 폭, 내력벽에 의한 구속 조건에 따라 중량충격음의 차이가 발생함을 보고하였다.

제3장. 연구 수행 내용 및 성과

1. DB 구축화 작업

가. 기존 데이터 수집

○ 사유지인 공동주택에서 바닥진동 및 바닥충격음의 데이터 수집의 한계성으로 기존 연구 조사 분석 및 관련 분야 전문가 자문을 통하여 조사 · 수집하였다.

○ 수집된 기존 데이터는 건설기준등에 관한 규정의 개정(2014. 5) 이전의 공동주택에 대한 바닥진동 데이터이다.

- 수집 정보는 구조 형식, 규모 및 면적, 재료강도, 슬래브 두께 등 구조체 일반사항과 고유진동수 및 최대가속도 등의 진동 거동 특성이다.

- 공동주택은 일반적으로 RC구조로, 초고층 주상복합의 경우 SRC 구조를 채택하고 있다.

- 기존의 진동실험 DB의 비교 · 분석 결과 구조형식, 거실 크기, 재료, 슬래브 두께를 변수로 추출할 수 있다.

- 주거용 공동주택으로 RC 구조 형태만 고려할 때 재료 강도, 거실 크기, 슬래브 두께의 입력 변수를 추출할 수 있다.

○ 실제 구조물에 대한 DB로 각 변수를 분리하여 영향 요인을 분석하는 데 한계가 있다. 특히 거실 크기, 슬래브 두께는 바닥의 질량과 강성 결정 요소로 비선형 관계 형성하고 있다.

<표 3.1.1> 기존 진동실험 DB의 대상 건물 개요

No.	Structural type	Subject room	Size (m×m)	Concrete compressive strength (MPa)	Slab thickness (mm)
FL1	RC	Living room	4.82×5.42	24	150
FL2			4.82×5.97	21	150
FL3			5.12×5.97	24	165
FL4			5.72×6.57	21	180
FL5			4.82×5.97	21	150
FL6			5.12×6.08	24	150
FL7			4.60×6.15	24	150
FL8			5.20×6.15	24	150
FL9	SRC		5.33×6.63	27	250
FL10			6.31×8.06	27	250
FL11			6.33×7.46	27	250

<표 3.1.2> 기존 진동실험 DB의 진동 특성 결과

No.	Natural Frequency (f_n, Hz)	Peak acceleration (a_p, %gravity)		Damping ratio (%)
		Heel drop	Walking	
FL1	19.82	2.01	1.24	2.4
FL2	18.56	2.79	1.46	2.3
FL3	18.88	2.59	1.17	2.2
FL4	15.63	2.39	1.36	2.4
FL2	18.56	2.50	1.28	2.5
FL5	21.88	2.30	1.28	2.8
FL6	21.50	2.33	1.69	3.3
FL8	17.60	2.44	1.72	3.7
FL9	19.04	0.97	0.44	3.9
FL10	15.63	0.78	0.45	1.9
FL11	17.58	0.97	0.35	3.8

나. 구조물 헬스 모니터링 기법, 상시 미진동 계측 등의 자료 수집

○ 주로 교량 및 초고층 구조물에서 활용하는 단계이며

○ 초고층 구조물의 경우 주로 지진, 태풍에 대비한 구조 안전 및 재난 대비 시스템으로 계획 적용하고 있다.

○ 계측 시스템은 하중 규모 계측, 전역적 거동 계측, 국부 거동 계측의 단계로 계획되며,

○ 국부 거동의 단계에 대한 계측에서 바닥진동 데이터 수집이 가능할 경우 광범위한 자료 수집 활용이 가능할 것으로 기대된다.

다. 신규 데이터 수집을 위한 진동실험

○ 바닥구조에 대한 규제 기준이 강화된 주택건설기준등에 관한 규정 개정(2014. 5) 이후의 공동주택에 대한 DB를 수집하기 위하여 진동실험을 수행하였다.

○ 공동주택에서 거주자의 거동으로 인한 바닥진동은 동 세대에서 진동의 인지로 인한 불쾌함보다 인접 세대로 전달되어 발생한 바닥충격음으로 인한 이웃 간 분쟁 문제가 주요 관점이 되고 있다.

○ 따라서 바닥진동과 이로 인한 바닥충격음 레벨이 함께 고려된 자료의 수집이 필요하다.

- 바닥 진동 사용성 평가 방법 개발을 위한 거주자의 거동으로 발생한 바닥진동 및 이로 인한 바닥충격음이 연계된 데이터 수집을 목적으로 한다.

○ 진동실험 대상 선정

- 바닥충격음은 칸막이벽, 천장, 바닥마감 등의 영향을 복합적으로 받는다.
- 구조설계 단계에서는 슬래브와 내력벽만을 고려하므로 이들 구조부재만을 고려한 바닥진동 및 이로 인한 바닥충격음 DB 수집이 필요하다.
- DB 수집을 위하여 슬래브와 내력벽만 시공된 공정의 공동주택 신축 현장을 대상으로 진동실험 수행하였다.
- 기존 DB의 변수 외 진동의 전달과 바닥충격음 특성 파악을 위해 전용면적, 거실 위치에 따른 평면 유형을 변수로 추가하여 대상 세대 선정하였다.

○ 진동실험 방법

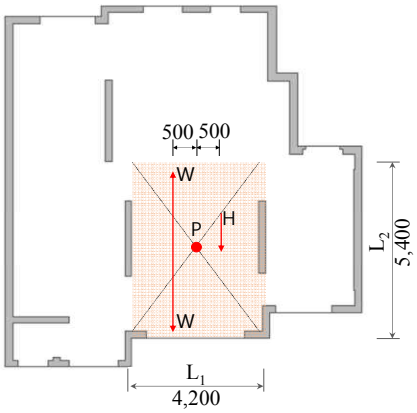
선정된 평면에 대하여 상하 수직으로 이웃한 세대에서

- 상부 세대와 하부 세대의 거실 중앙에 가속도계 설치.
- 하부 세대에서 바닥에서 1.5m, 상부 세대 슬래브 아랫면에서 0.5m 떨어진 지점에 마이크로 폰 설치.
- 임팩트해머, 뒤꿈치충격, 보행을 하중에 대한
  - 상부세대와 하부세대의 거실 중앙 가속도 레벨
  - 하부 세대의 음압레벨

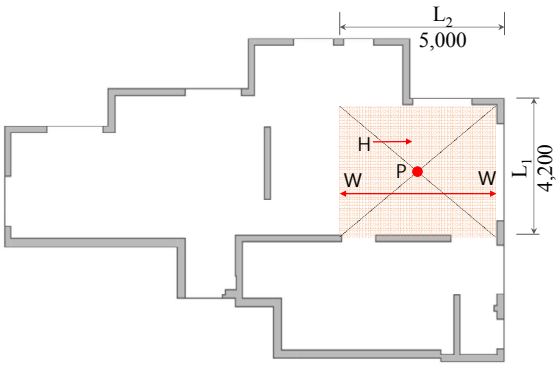
  을 각 하중에 대하여 동시에 측정하였다.
- 뒤꿈치 충격과 보행하중 가력 시 국내 생활양식을 고려하여 신발을 착용하지 않은 상태로 가력 하도록 하였다.
- 뒤꿈치 충격의 경우 뒤꿈치를 5cm 정도 든 다음 무릎을 편 상태에서 체중을 뒤꿈치로 옮기면서 자연스럽게 뒤꿈치를 자유 낙하시켜 바닥에 충격을 주며,
- 보행하중의 경우 보통 보폭으로 2Hz의 일정한 보조로 걸어가는 방법으로 가력 하여 가력 방법에 따른 뒤꿈치 충격과 보행하중 크기 차이를 최소화하도록 하였다.

<표 3.1.3> 바닥진동과 바닥충격음의 연계된 DB 수집 대상 세대 개요

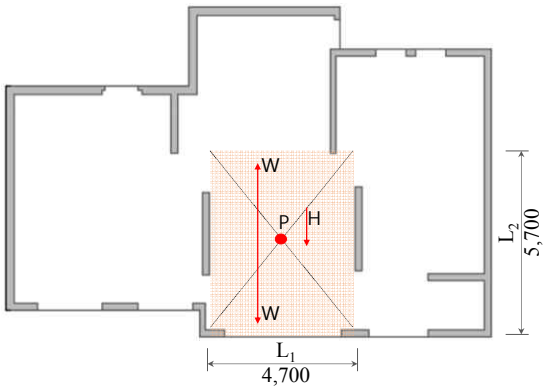
No.	Area for exclusive use (m^2)	Location of livingroom	Livingroom size (m×m)	Slab thickness (mm)
I62L	62	Inside	4.2×5.4	210
E62L		Corner	4.2×5.0	
I84L	84	Inside	4.7×5.7	
E84L		Corner	4.7×5.1	



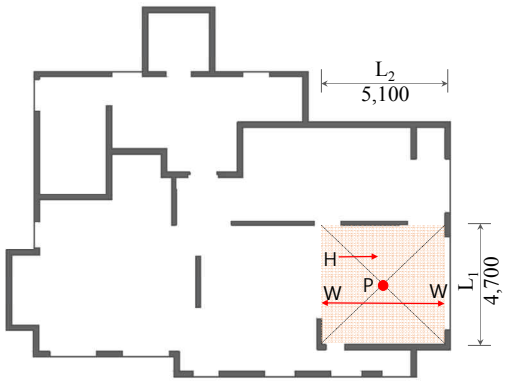
(a) I62L



(b) E62L

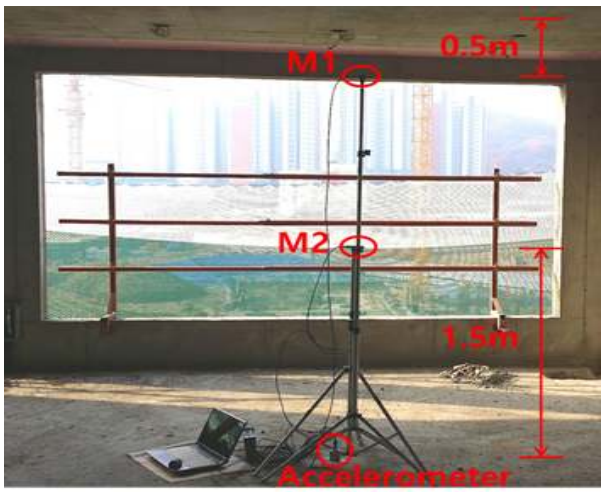


(c) I84L



(d) E84L

[그림 3.1.1] 현장 진동 실험 대상 세대의 평면



[그림 3.1.2] 가속도계 및 마이크로폰 설치 위치(하부세대)



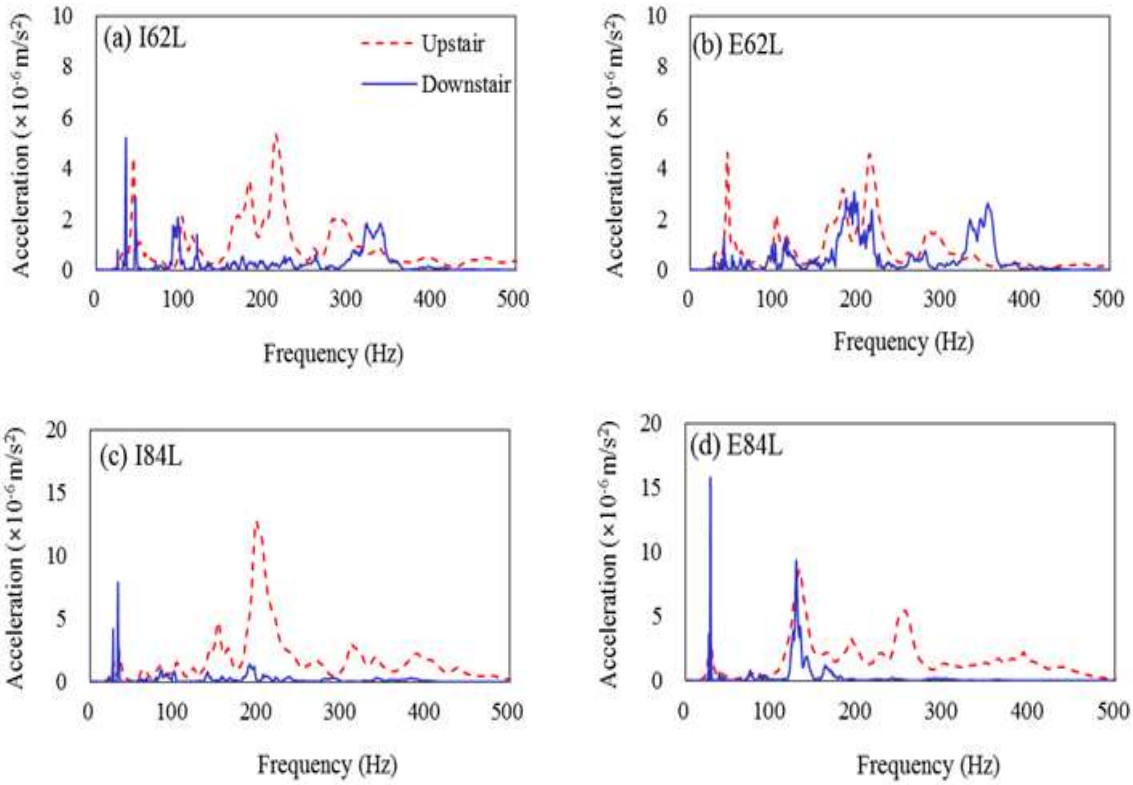
(a) Heel drop (b) Walking

[그림 3.1.3] 뒤꿈치충격 및 보행하중 가력

○ 진동실험 결과

◦ 임팩트 해머에 대한 진동가속도 응답

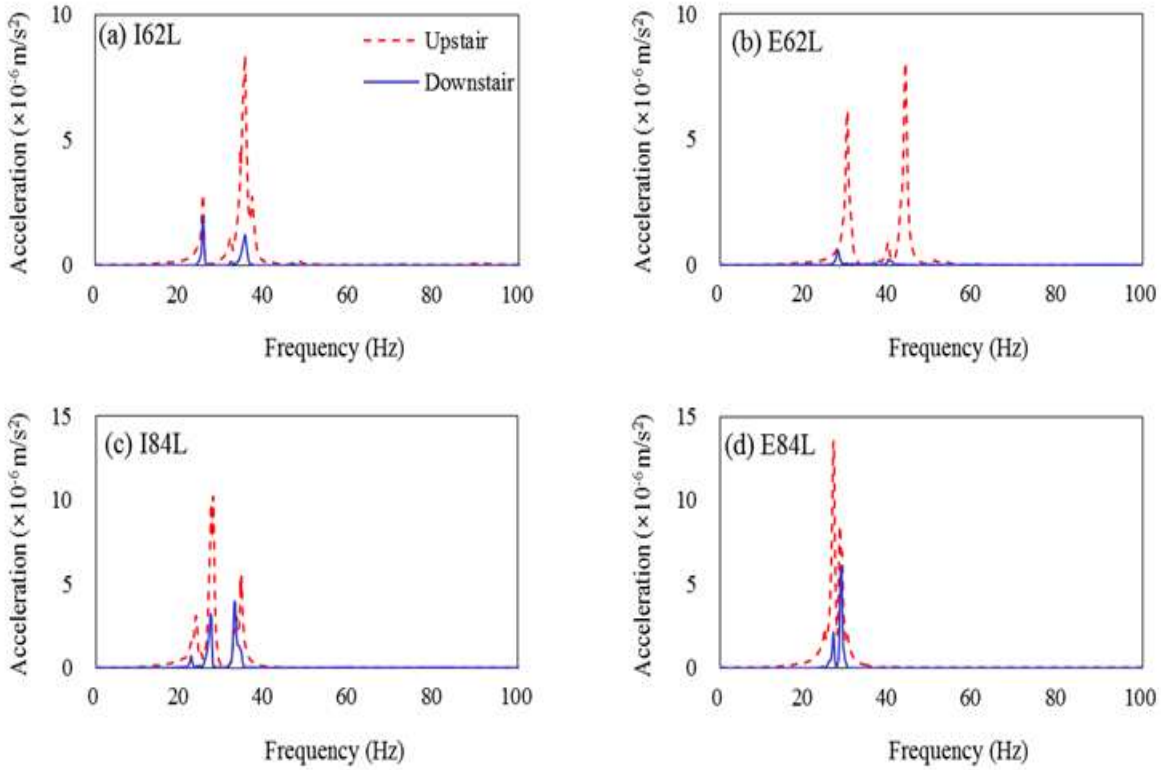
- E62L을 제외하고 세 개 평면의 경우 100 Hz 이하에서 하부세대에서 진동가속도 가진층인 상부세대의 진동가속도 보다 큰 값을 나타낸다.
- 이는 임팩트해머의 직접 충격이 가해지는 상부세대의 슬래브에서는 슬래브 고유진동수 외에 하중의 진동수의 영향이 큰 반면, 하부세대의 경우 바닥진동이 구조체를 따라 전달되면서 건물 구조체의 고유진동수 영역에서 진동에너지가 더 많이 전달되었기 때문으로 판단된다.



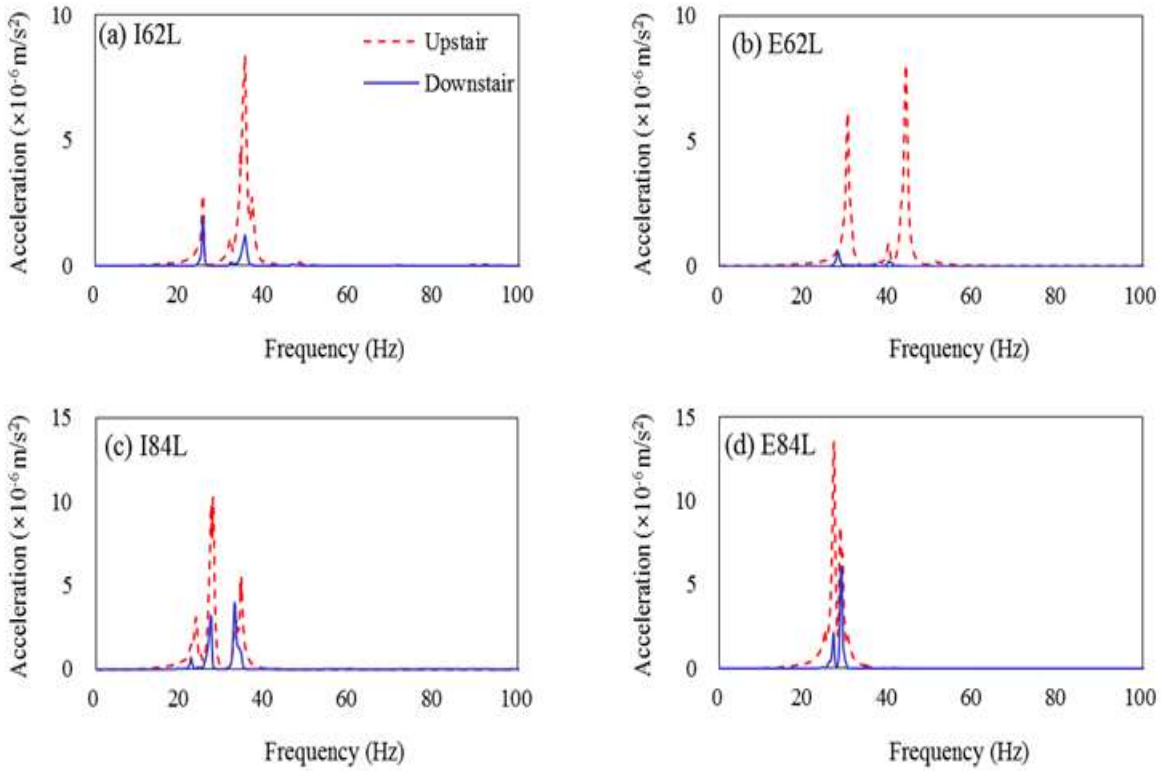
[그림 3.1.4] 임팩트해머에 대한 바닥 진동가속도 응답

◦ 뒤꿈치 충격과 보행에 대한 진동가속도 응답

- 뒤꿈치충격과 보행하중에 대하여 상부와 하부 슬래브 모두 50Hz 이하의 1~3차 모드에서 지배적으로 거동하고 있다.



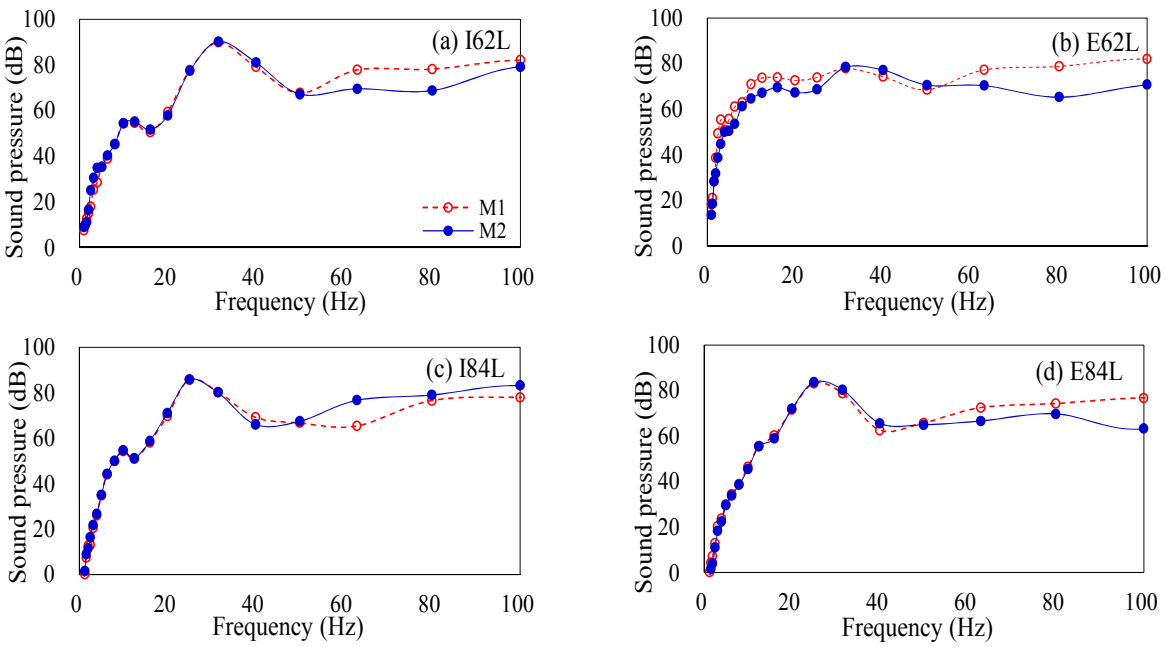
[그림 3.1.5] 뒤꿈치충격에 대한 바닥 진동가속도 응답



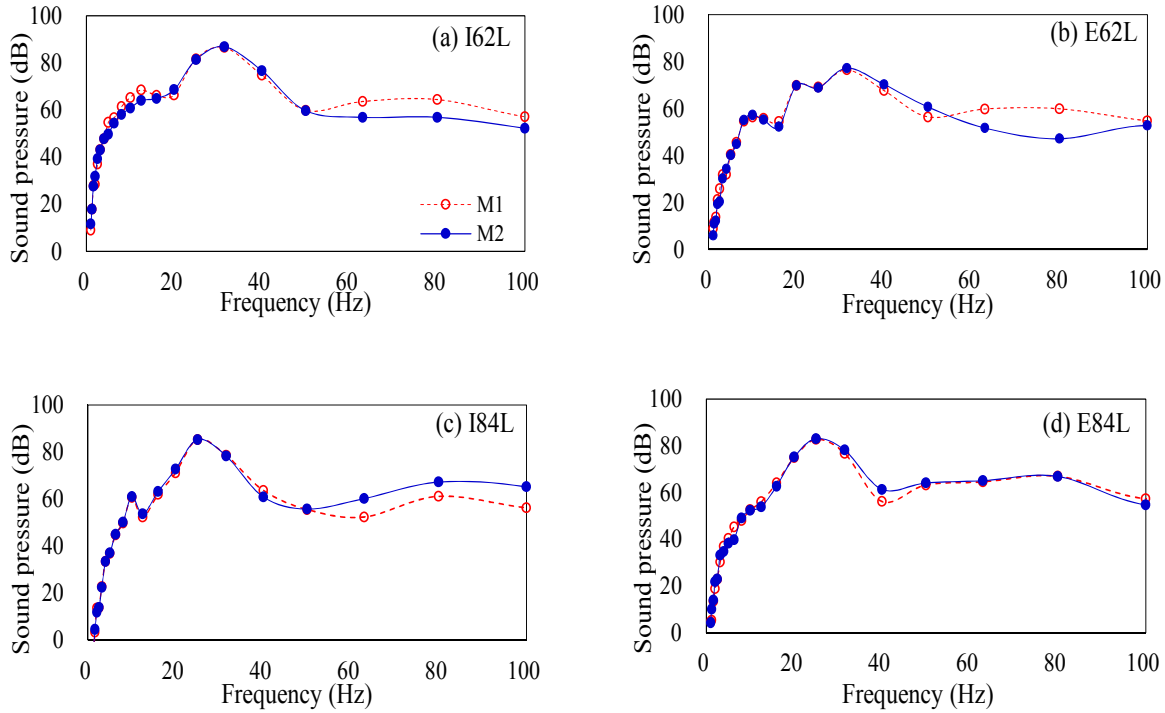
[그림 3.1.6] 보행하중 응답에 대한 바닥 진동가속도 응답

◦ 바닥충격음의 음압 레벨

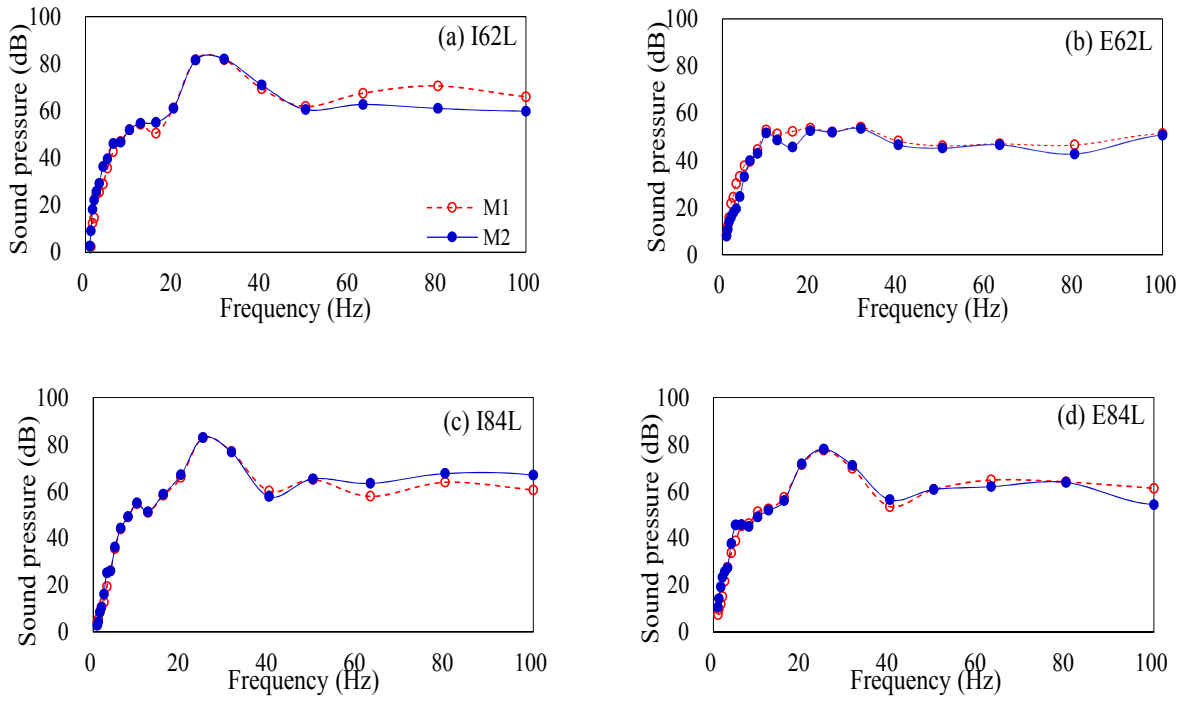
- 마이크로폰으로 기록된 음압 레벨은 1/3 옥타브밴드 분석 적용하였다.
- 음압레벨은 대상 슬래브의 고유진동수 영역인 20~35 Hz에서 피크를 가지며, 50 Hz이하에서는 마이크로폰의 위치에 따른 음압의 차이는 거의 발생하지 않는다.
- 세로축 단위를 무시하고 바닥 진동 가속도 응답과 음압레벨을 겹쳐보면 바닥진동의 가속도응답과 음압레벨의 피크 발생이 동일한 진동수 범위에서 발생하고 있음을 확인할 수 있다 [그림 3.1.10]
- 50 Hz 이상의 진동수 영역에서 평면 유형에 따른 음압레벨의 특이성을 규정하기는 어렵다. 이는 대상 건물이 슬래브와 벽체만 시공된 상태로 마감이나 창호, 문 등이 설치되지 않은 열린 공간인 건설 현장의 특성상 반사음의 영향이 크지 않으며, 발코니와 슬래브의 자재 운반구 또는 배관구 등으로 음의 직접적인 전달이 포함되었기 때문으로 판단된다.
- 본 연구에서 측정한 바닥충격음의 음압레벨은 대상 건물이 룸 모드 및 공간반사 소음 측정에 한계가 있는 건설 현장이므로 실 거주 공간에 대한 층간소음 레벨의 의미를 부여할 수는 없으나 계획 단계 또는 시공 단계에서 구조체에 대한 바닥충격음 특성을 알아보는 데 그 의미가 있다.
- 소음 측정에 한계가 있는 건설 현장이라는 대상 건물의 특성을 고려할 때, 구조부재만 있는 경우 바닥진동으로 인한 바닥충격음은 구조체의 고유진동수 범위에서 발생하여 공기 중으로 전파됨을 확인할 수 있다.



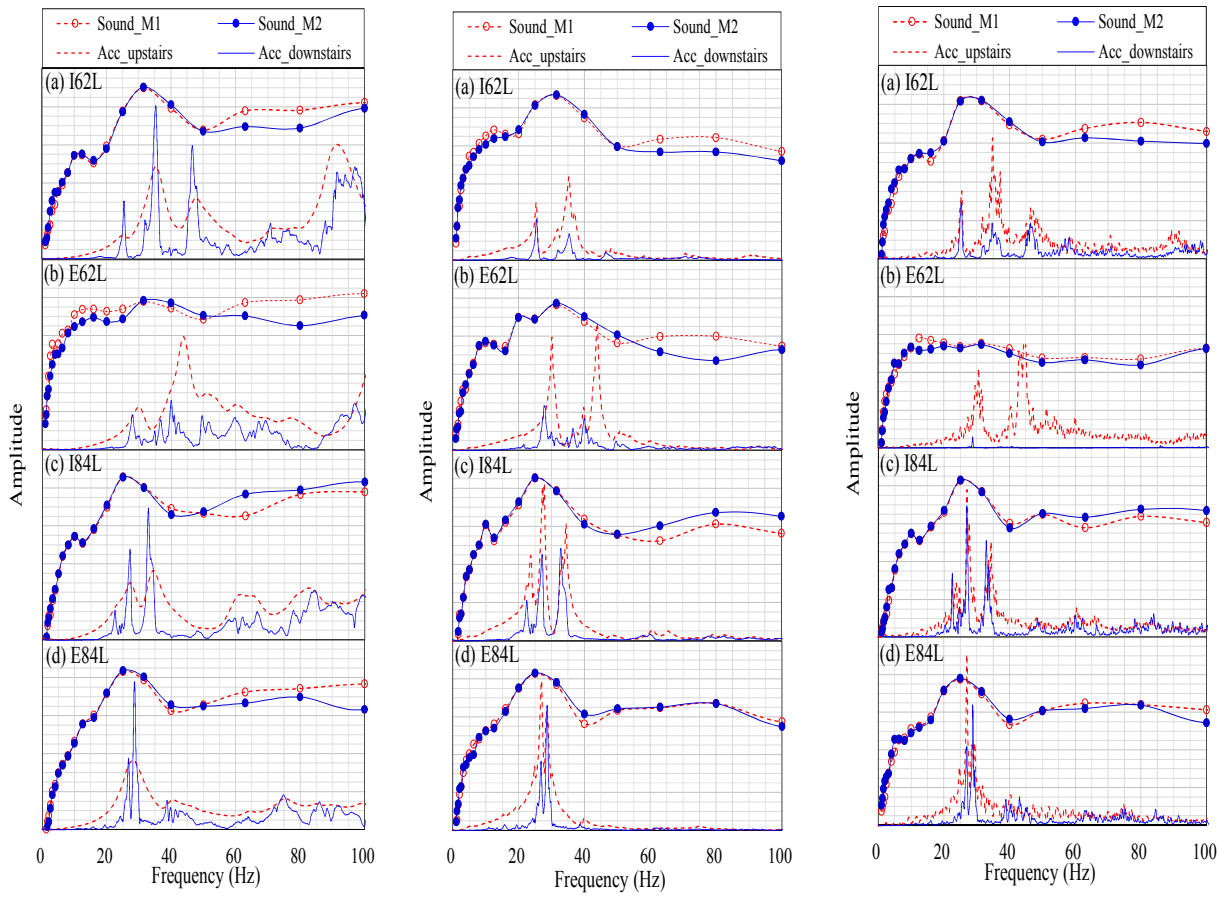
[그림 3.1.7] 하부 세대에 발생한 바닥충격음 음압레벨 (임팩트해머)



[그림 3.1.8] 하부 세대에 발생한 바닥충격음 음압레벨 (뒤꿈치충격)



[그림 3.1.9] 하부 세대에 발생한 바닥충격음 음압레벨 (보행하중)



(a) Impact hemmer (b) Heel drop (b) Walking

[그림 3.1.10] 진동 가속도 응답과 바닥충격음 음압레벨의 비교

<표 3.1.4> 수집한 진동 데이터

Plan type			I62L	E62L	L84L	E84L
Natural frequency (Hz)		1st 2nd	25 35	30 40	23 28	27 29
Peak acceleration (mm/s^2)	Heel drop	1st 2nd	1.20 1.74	2.37 0.90	1.80 3.31	3.15 2.49
	Walking	1st 2nd	1.40 2.50	1.68 0.88	1.14 3.10	3.36 1.71
Floor Impact sound pressure level (Pa) [1/3 octave band central frequency (Hz)]		1st 2nd	68 [12.5] 86.5 [31.5]	70 [20.0] 76.6 [31.5]	50 [16.0] 55.8 [25.0]	35 [10.] 44.4 [25.0]

2. 바닥진동과 바닥충격음 특성 분석

가. 바닥진동 및 바닥충격음 특성 영향 인자 분석

○ 상하 세대 간 진동의 전달

- 진동성능 평가 방법 개발을 위하여 현장 진동 실험 데이터를 이용하여 상부세대에서 하부세대로 진동의 전달 수준을 분석하였다.
- 각 모드에서 상부세대 슬래브에서 하부세대 슬래브로 전달된 진동가속도 크기 비를 <표 3.2.1>과 같다.
- 모드별 상부세대에 대한 하부세대의 바닥진동 가속도 비의 값은 평면 유형이나 규모에 따른 특정한 경향을 보이지는 않는다. 다만, 모드별 가속도비의 산술평균을 세대 간 바닥진동의 전달비율로 볼 때, 전달된 바닥진동 수준은 전달 뒤꿈치 충격의 경우 E62L < I62L < I84L < E84L 순서로, 보행하중의 경우 E62 < I62L < E84L < I84L 순으로 증가한다.
- Lee et al. (2016)은 바닥진동으로 인한 바닥충격음 평가 시 내력벽체의 기여도가 있음을 확인한 바 있다. 본 연구에서는 전용면적 크기와 평면 유형 외에 바닥진동의 세대 간 전달 수준에 영향 미치는 요인으로 진동의 경로가 되는 벽체의 양을 고려하였다.
- 각 대상 세대에 대하여 거실면을 발코니와 평행한 면을 L1, 발코니와 수직한 면을 L2라 하고, 거실 주변 벽체의 양을 다음 4개 값으로 <표 3.2.2>에 정리하였다.

  ① 거실 면적에 대한 벽체길이 총 합의 비

  ② 거실 둘레 길이에 대한 벽체길이 총 합의 비

  ③ L1 방향 벽체 길이 합과 L1의 비

  ④ L2 방향 벽체 길이 합과 L2의 비

- <표 3.1.5>에서 ③ L1 방향 벽체 길이 합과 L1의 비를 제외하고 벽체양은 E62L < I62L < I84L < E84L의 순으로 많고, ③ L1 방향 벽체 길이 합과 L1의 비의 경우 벽체 양이 적은 것부터 나열하면 I84L <E62L < I62L < E84L 와 같다. L2 방향이 주 내력벽 위치임을 감안하면 I84L은 L2 방향으로 벽체가 많이 배치되었다고 할 수 있다.
- 실험 대상 세대에서 거주자의 거동으로 발생한 바닥진동은 전용면적이 크고 벽체량이 많을수록 하부 세대로 전달되는 가속도 수준이 큰 것으로 나타났다.
- 펄스형태인 뒤꿈치 충격과 달리 뒤꿈치 충격이 반복적으로 가해지는 보행하중의 경우 하부 세대로 진동 전달율이 L2 방향 벽체량이 상대적으로 많은 I84L에서 가장 크게 나타나고, I84L과 E84L에서 보행하중에 대한 하부세대로의 진동전달율이 약 1의 값을 보이는 점에서 전용면적 규모와 벽체 양 외에도 벽체의 배치 및 하중의 형태 또한 바닥진동의 세대 간 전달에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

<표 3.2.1> 대상 세대의 고유진동수 및 바닥진동의 전달

Plan type			I62L	E62L	L84L	E84L
Natural frequency (Hz)		1st 2nd 3rd	25 35 46	30 40 45	23 28 34	27 29 -
Ratio of acceleration (downstair / upstair)	Heel drop	1st 2nd 3rd	0.70 0.32 -	0.4 0.75 0.25	0.47 0.55 0.79	0.45 1.02 -
		average	0.51	0.47	0.60	0.74
	Walking	1st 2nd 3rd	0.84 0.3 0.71	0.14 0.04 -	1.18 0.90 1.03	0.46 1.49 -
		average	0.57	0.09	1.04	0.98

<표 3.2.2> 슬래브 크기와 벽체 길이 비

No.	Plan type	I62L	E62L	I84L	E84L
①	gross wall length (m) / slab area (m2)	0.25	0.23	0.27	0.39
②	gross wall length / 2(L1+L2)	0.3	0.26	0.35	0.47
③	total wall length of L1 direction / L1	0.26	0.29	0.23	0.49
④	total wall length of L2 direction / L2	0.85	0.71	1.07	1.36

나. 주거공간의 충격원 분석

○ 바닥충격음 차단성능 평가를 위한 표준 중량 충격원으로 뱅머신 외에 임팩트볼을 사용한 평가 방식을 도입하였으나, 사용된 충격원 특성에 따라 바닥충격음 차단성능 등급의 편차가 발생하고 평가 보정값 및 성능등급 기준 등의 보완 필요성이 제기되자 2015년에는 표준 중량 충격원을 뱅머신 방식으로 일원화하였다.

○ 주거 공간에서 발생하는 바닥충격음의 70% 이상이 위층에서 아이들의 뛰임이나 보행이 원인이다.

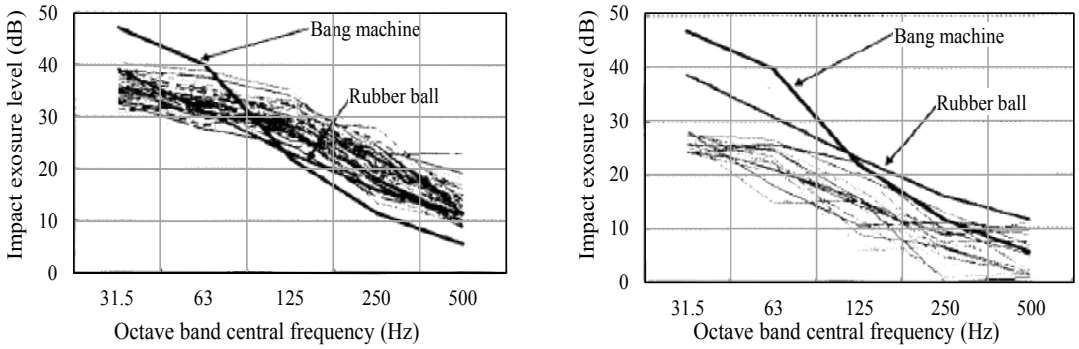
○ 실충격원과 표준 충격원의 특성과 관련하여 여러 연구자들이 충격력의 크기 및 스펙트럼 특성, 음압레벨 특성을 비교 분석한 바 있다.

- 5~11세 아동의 달리기와 뛰어내림에 대한 충격력을 측정한 Kim et al.(2005)연구에 의하면 달릴 때의 충격력의 크기는 230~3,000 N으로 600~800 N 범위에 가장 많이 분포하며, 뛰어내릴 때의 경우 그 크기는 1,000~6,000 N으로 2,000~3,000 N 범위에 가장 많이 분포한다. 실험 참가 아동의 체중은 16~58kg으로 전체 70%가 25~35kg이다.

- 한편, 체중 19~ 40 kg인 초등학교 1학년생을 대상으로 달리기와 뛰어내리기에 대한 충격력을 측정한 Jeon et al.(2006)의 실험에서는 최대 충격력은 달릴 때와 뛰어내릴 때 각각 2600 N과 5600 N이고, 평균 충격력은 각각 900 N와 1600 N이다.

- 이들 연구 결과의 차이는 실험 참가 대상 아동의 연령과 체중 차이의 영향으로, 어린이가 달리거나 뛰어내릴 때 충격력의 크기는 몸무게에 비례하는 경향이 있으나 그 상관성은 매우 낮다. 동일 체중인 경우에도 개인 차이가 크게 나타나고 있는데, 착지 자세나 발이 센서에 닿을 때 체중이 실리는 면적 등이 충격력의 크기에 영향을 크게 미치기 때문이다(Jeon et al.,2006; Kim et al.,2005).

- [그림 3.2.1]은 Kim et al.(2005)의 연구 결과로 아동의 달리기와 뛰어내리기의 충격력과 표준 중량 충격원의 충격력 스펙트럼을 비교한 것이다. 실제 충격원의 주파수 특성은 뱅머신보다 고무공이 더 유사한 경향을 보이고 있으나, 스펙트럼 분포의 기울기 형태에서 고무공도 실충격원과 다소 차이를 보이고 있다.



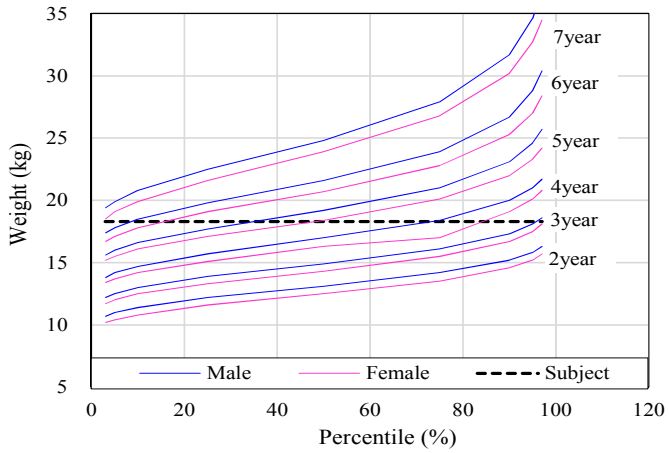
(a) Jump (b) Running

[그림 3.2.1] 실충격원과 표준충격원 충격력 스펙트럼 비교 (Kim et al., 2005)

○ 실충격원의 충격력 크기는 체중 외에 개인 습성 차이에 따라 그 분포 범위가 매우 넓다. 층간소음 문제에 있어서 충격력의 크기 외에도 충격력의 발생 빈도를 고려할 필요가 있다.

○ 특히 미취학 아동의 경우 취학 아동보다 체중은 적으나 집안에서 뛰어내리거나 달리는 행동을 더 많이 행할 가능성이 크다. 유아동의 경우 개인 성향 외에 활동성과 행동 제제의 가능성 등에 연령의 영향을 받는다. 예를 들면, 제자리 뜀은 일반적으로 만 2세 이상 가능한 발달 단계이다.

○ 대한소아과학회의 성장발달표준곡선에 따르면 만2세부터 초등1학년생에 해당하는 만7세까지 아동의 각 연령별 체중은 Fig. 5과 같이 10kg~37kg 범위에 있다. [그림 3.2.2]에서 백분율은 100명 중 몇 번째 순위인지를 의미한다.



[그림 3.2.2] 성장표준곡선

다. 공동주택 mock-up 실험동에 대한 진동실험

○ 바닥충격음은 주로 거주자의 거동으로 발생한 바닥진동이 구조체를 따라 사방으로 전달되고 이웃 세대의 슬래브와 벽면에 인접한 공기를 진동시켜 발생하는 고체전달음이므로, 바닥충격음 레벨은 충격력에 대한 구조체의 진동수와 가속도 크기 등 진동 거동 특성을 영향을 받는다.

○ 강화된 바닥구조 기준인 슬래브 두께 210mm를 충족하는 아파트에서도 층간소음 이웃사이센터에 민원을 접수한 사례가 있음은 구조체 진동 거동 특성을 고려하지 않고 슬래브 두께만을 증가시키는 방법은 충분한 대책이 되지 못함을 나타낸다. 따라서 층간소음에 대한 사용성 문제에서 있어서 충격원의 하중 특성과 이로 인해 발생하는 바닥충격음 레벨 외에 구조체의 진동 거동을 함께 고려할 필요가 있다.

○ 공동주택 건설 현장에서 측정된 음압레벨은 열린 공간이라는 특성으로 실제 거주 공간의 구조체에 대한 바닥충격음 차단 성능 평가에 적합하지 않으므로, 바닥충격음 평가를 위해서는 실 주거 공간과 유사한 환경에서의 데이터 수집이 필요하다.

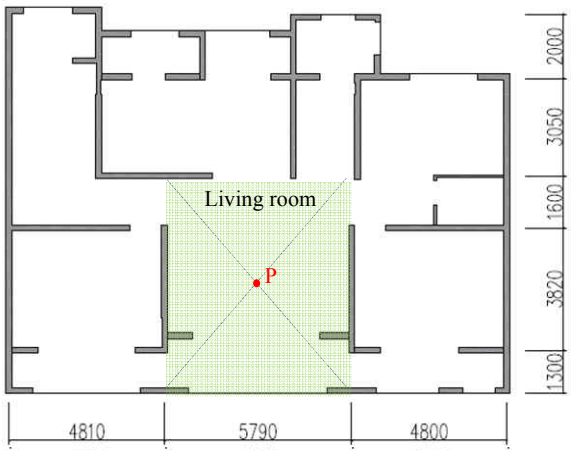
○ 충격원에 따른 바닥진동에 대한 구조 부재의 진동 거동 특성과 바닥진동 특성을 고려한 바닥충격음 음압레벨의 특성을 조사하기 위하여 뱅머신과 임팩트볼, 그리고 만4세 아동의 뛰어내림과 달리기를 각각 표준 중량 충격원과 실충격원으로 사용하여 진동실험을 수행하였다.

○ 실험 참가 아동의 안전을 고려하고, 나아가 바닥충격음 음압레벨 기준 검토를 고려하여 진동실험 대상 건물은 공동주택 mock-up 실험동으로 선정하였다.

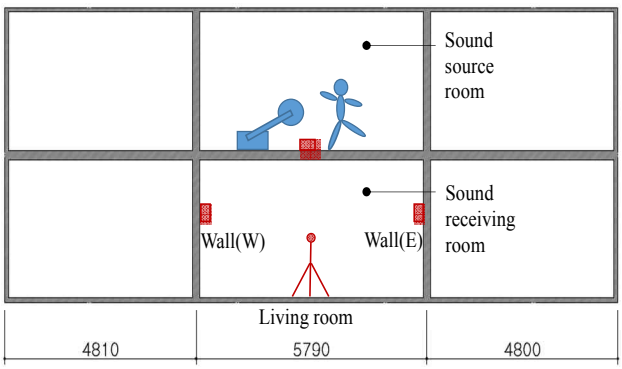
○ 본 연구에서는 완충재 및 마감재의 영향을 배제하고 구조 부재의 진동 거동만을 고려하여 충격원 특성에 따른 바닥진동과 바닥충격음 특성을 조사할 목적으로 위층 거실(음원실)의 바닥 상태는 맨슬래브 조건으로 하고, 아래층 거실(수음실)의 경우 천장은 시공되지 않은 상태이며 벽체는 콘크리트벽 또는 콘크리트벽면에 벽지나 페인트 칠 마감으로 제한하였다.

○ 실험 대상 세대의 거실은 발코니와 거실 사이 전창이 있는 상태이나, 벽체의 위치 및 슬래브의 진동 거동과 실제 생활환경에서 거주자의 동선, 가구배치 등을 고려하여 거실 공간을 발코니를 포함한 [그림 3.2.3(a)]에 음영으로 표시된 영역으로 고려하였다.

○ [그림 3.2.3(b)]는 실험대상 세대의 단면에 가속도계 및 마이크로폰의 설치와 충격원 가력 등에 대한 실험 구상도를 나타낸 것으로, 발코니 방향을 남쪽으로 두어 거실의 양쪽 벽체를 각각 동(E) 서(W) 방향으로 구분하여 나타내었다.



(a) Plane



(b) Section of subject unit

[그림 3.2.3] 공동주택 mock-up 실험동 단위세대 평면 및 진동실험 구상도

○ 본 실험의 목적은 충격원별 바닥진동으로 인한 슬래브와 벽체의 거동과 이에 대한 바닥충격음 특성을 알아보기 위함이므로 슬래브와 벽체에 가속도계를 부착하고 수음실에 마이크로폰을 설치하여 진동 가속도와 음압레벨을 동시에 측정하였다.

- 가속도계는 음원실 바닥 슬래브 면의 [그림 3.2.3(a)]에 “P”로 표기한 위치와 수음실의 양 벽체에 슬래브 하부면으로 부터 1 m정도 떨어진 지점에 각각 설치하였다.
- 동·서 방향의 양쪽 벽체에 부착한 가속도계는 “P”점을 지나면서 발코니와 평행한 직선을 이루도록 하였으며, 벽지를 제거하고 콘크리트면에 벽체 거동과 일치하도록 부착하였다.
- 마이크로폰은 수음실의 “P”위치에 바닥면에서 1.2 m 높이로 설치하였다. 정밀 측정을 실시하는 것이 바람직하나, 본 연구에서 측정은 바닥충격음 차단 성능의 평가보다 바닥진동과 바닥충격음의 물리적 특성의 관계 파악을 목적으로 하므로 진동가속도와 바닥충격음의 동시 측정을 위하여 ISO 10052(2004)에서 허용하는 간이법에 따라 중앙점 1개소에 마이크로폰을 설치하였다.

○ 표준 충격원으로 사용된 뱅머신과 임팩트볼은 가속도계와 0.5m 정도 떨어진 위치의 음원실 바닥을 가력 하도록 하였다.

○ 본 실험에서는 주거 공간에서 뛰어내리거나 달리는 활동량이 많으나 그 행동을 제제하기가 쉽지 않아 충격원으로서 발생 빈도가 비교적 높을 것으로 예상되는 만 4세 아동의 뛰어내리기와 달리기를 실충격원으로 선정하여 바닥 충격음을 측정하였다.

- 실험 참가 아동은 평소 달리거나 소파 및 의자 등에서 뛰어내리는 활동이 활발한 체중 18.3 kg의 만4세 아동이다.
- [그림 3.2.2]에 실험 참가 아동의 체중 18.3kg을 파선으로 나타내었는데, 이는 만2부터 미취학 아동인 만6~7세 전체 평균 체중과 같고, 만3세의 상위 97%, 만4세의 상위 80%, 만 5세의 42%, 만 6세의 12% 수준에 해당한다.
- 실충격원 가력을 위해 뱅머신과 임팩트볼과 마찬가지로 가속도계와 0.5m 정도 떨어진 위치에서 아동이 의자에서 뛰어내리도록 하고(jump), 달리기의 경우 가속도계에서 0.5m 정도 떨어진 위치를 지나는 동선으로 동서방향 양 벽면 사이를 왕복하여 자유롭게 마음껏 달리도록(running) 하였다.
- [그림 3.2.4]은 아동의 실충격원 가력 모습이다. 충격력 가력 시 실내 생활 모습을 반영하여 아동은 신발을 착용하지 않은 상태였으며, 맨바닥 슬래브에서 발생 가능한 위험으로부터 아동을 보호하기 위하여 점핑 시에는 의자 앞에 임의의 위치에 착지가 가능하도록 충분히 넓은 면적으로 종이를 깔아두었으며, 달리기를 할 때에는 덧양말을 신도록 하였다.

○ 각 충격원마다 30초 동안 연속적으로 가하여 PULSE 3560-B를 사용하여 기록 및 분석하였다. 바닥충격음은 시상수 ‘fast’로 1/3 Octave band 분석을 수행하였으며, 진동가속도의 경우 FFT 분석 시 윈도우 함수‘hanning’을 적용하고, ‘exponential’ 평균 최대값을 산정하였다.



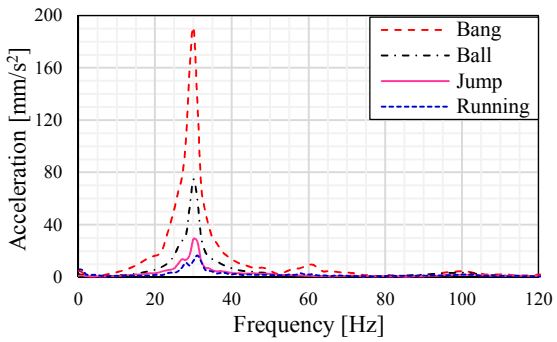
a) Jump　　b) Running

[그림 3.2.4] 아동의 뛰어내림과 달리기

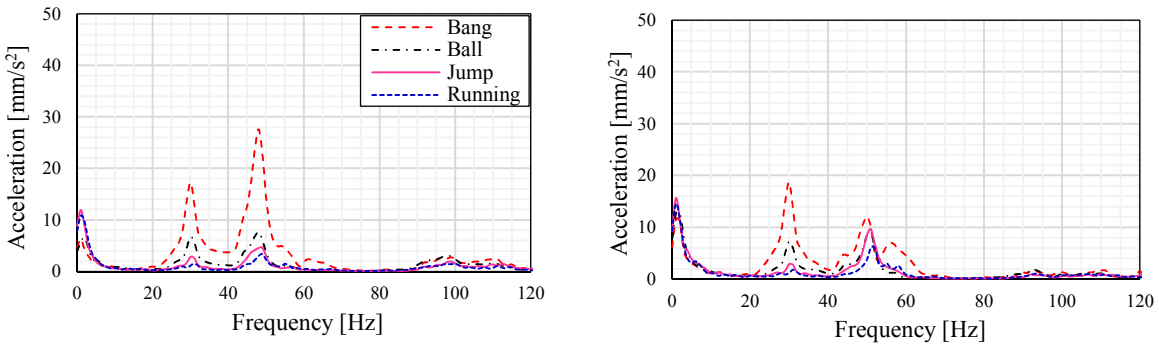
라. 충격원 특성에 따른 바닥진동 및 바닥충격음 특성 분석

○ 슬래브와 벽체의 진동 응답

- [그림 3.2.5]는 각 충격원에 따른 바닥진동에 대한 FFT 분석 결과로 바닥 슬래브의 지배 진동수는 30 Hz이며 2차 및 3차 진동수는 각각 61 Hz와 100 Hz이다.
- 바닥진동에 대하여 슬래브는 1~3차 모드로 거동하고 있으나 임팩트볼과 아이의 뜀의 경우 2차 모드에서는 가속도 응답이 나타나지 않고 있다.
- [그림 3.2.6]은 벽체의 진동 응답으로 슬래브에서 슬래브를 지지하고 있는 음원실 벽체로 전달된 바닥진동을 의미한다. 벽체의 진동 거동은 0~2 Hz에서 첫 번째로 가속도 성분을 가지는 것으로 나타나고 있는데, 그 크기는 1~16 mm/s^{2}이다.
- [그림 3.2.5]의 세로축을 확대하여 보면 슬래브의 진동 응답에서도 0~2 Hz에서 1~6 mm/s^2 크기의 가속도 값을 가지고 있다. 다른 진동수 영역에서의 가속도 응답과 달리 0~2 Hz에서는 실충격원에 대한 가속도 수준이 중량 충격원보다 높고 뱅머신에 대한 가속가 가장 낮은 수준으로, 충격원의 반복 가력을 위해 이어지는 연속 동작과 배경 진동 영향으로 판단된다. 이 진동수 범위는 기준에서 바닥충격음 측정· 및 평가 시 고려하는 진동수 범위에서 크게 벗어나므로 본 연구에서 바닥진동 및 음압레벨 특성 분석 시 대상 진동수 범위를 2 Hz 이상부터 고려하였다.



[그림 3.2.5] 충격원에 따른 바닥 진동 가속도 응답



(a) Wall(E) (b) Wall(W)

[그림 3.2.6] 충격원에 따른 벽체의 진동 가속도 응답

- <표 3.2.3>에 충격원에 따른 슬래브와 벽체의 진동수 및 가속도 응답을 정리하였다. 슬래브와 마찬가지로 벽체도 1~3차 모드로 거동하고 있으며, 1차 진동수는 30 Hz이고 50 Hz와 100 Hz 부근에서 각각 2차와 3차 모드 거동을 하고 있다.
- 1차 모드 진동수에 집중된 슬래브 가속도 응답과 달리 벽체에서는 1~2차 모드에서 의미 있는 가속도 수준을 보이고 있으며, 슬래브와 벽체의 3차 모드에서는 가속도 크기가 표준 충격원의 경우 5 mm/s^2 미만이고, 실충격원의 경우 2 mm/s^2 미만이다.
- 벽체의 진동 가속도는 Wall(W)에서 뱅머신에 대한 가속도 응답을 제외하고는 충격원에 대한 가속도 응답이 1차 모드보다 2차 모드에서 더 높은 수준을 나타내고 있는데, 그 크기는 1차 모드 가속도의 1.1~3.4배이다. 이는 벽체의 지배 진동수는 2차 모드인 48~50 Hz로 1차 모드인 30 Hz는 슬래브에서 전달된 바닥진동의 영향이 반영된 결과로 판단된다.

<표 3.2.3> 충격원에 따른 진동 가속도

Structural member	Frequency [Hz]		Vibration acceleration [mm/s^2]			
			Bang (①)	Ball (②)	Jump (③)	Running (④)
Slab	1st	30	191.0	74.7	29.2	16.5
	2nd	61	9.53	-	-	2.79
	3rd	100	4.42	3.09	1.99	1.79
Wall(E)	1st	30	17.2	6.71	2.81	1.51
	2nd	48	27.6	7.63	4.61	3.35
	3rd	100	2.37	3.03	1.91	1.5
Wall(W)	1st	30	18.7	7.27	2.85	1.81
	2nd	50	12.1	9.42	9.63	6.12
	3rd	94	1.33	1.77	0.94	1.0

○ 바닥진동의 전달

- <표 3.2.4>는 슬래브와 벽체의 진동 모드를 확인하기 위하여 수행한 모달 해석 결과이다.
- 슬래브와 벽체의 진동수가 측정값과 해석값이 2~4Hz 정도 차이를 나타내고 있는데, 이는 공동주택 mock-up 실험동 단위 세대인 대상 건물 특성상 거실 공간을 제외한 내실의 일부가 거주 성능 관련된 재료 등의 실험실로 사용되고 있으나 해석 모델에는 반영되지 않았기 때문으로 판단되며, 이를 고려하면 해석 모델은 대상 건물의 거동을 잘 설명하고 있다.
- 수평방향에 대한 모달 해석에서 Wall(E) 및 Wall(W)만의 거동 모드가 32Hz와 80Hz에서 나타나고 있으나, 지배진동수는 46Hz로 슬래브와 양 벽체를 포함한 대상 세대 전체에 대한 수평방향 거동 모드이다. 슬래브에서 지배모드에서 가속도 응답이 두드러지는 것에 비해 벽체의 경우 30Hz 대역에서 지배진동수 대역의 상당 수준의 가속도 크기를 나타내는 것은 슬래브에서 지배모드의 진동 거동이 전달되어 벽체의 1차 모드 거동에 영향을 미치기 때문임을 알 수 있다.
- <표 3.2.5>는 1차 모드에서 슬래브와 벽체의 가속도 크기 비로 그 값은 0.9~0.11로 실험 대상 건물의 경우 슬래브에서 벽체로 전달된 바닥진동의 가속도 수준이 약 10%내외임을 알 수 있다.

<표 3.2.4> 모달해석 결과

Direction	Structural member	Frequency [Hz]		
		1st	2nd	3rd
Gravity	Slab	28	58	100
Horizontal	Slab	-	46	-
	Wall(E)	32		80
	Wall(W)	32		80

<표 3.2.5> 바닥진동의 전달

Impact source	Acceleration ratio	
	Wall(E) / Slab	Wall(W) / Slab
Bang	0.09	0.10
Ball	0.09	0.10
Jump	0.10	0.10
Run	0.09	0.11

○ 충격원 특성 영향

- <표 3.2.6>은 현재 공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준에서 표준 중량 충격원으로 사용하는 뱅머신에 대한 임팩트볼과 실충격원에 대한 구조체의 바닥진동 가속도 크기를 비교를 보여준다.
- 임팩트볼에 대한 1차 모드의 가속도 수준은 뱅머신의 약 0.4, 아동의 뛰어내림은 0.15 정도이며, 아동의 달리기의 경우 약 0.1 수준이다.
- 임팩트볼의 최대 충격력 1500N은 뱅머신의 최대 충격력 4200N의 0.36배이나 임팩트볼의 낙하 높이의 오차를 고려하여 1650N의 최대 충격력을 가진다고 가정하면 뱅머신 충격력의 0.39배 수준이 된다.
- 임펄스에 대한 구조물 응답은 임펄스 규모에 비례하므로 바닥진동의 측면에서는 뱅머신이나 임팩트볼의 낙하 높이 등을 변화시킴으로서 실충격원의 광범위한 충격력 크기에 대한 진동 가속도 수준을 모사할 수 있을 것으로 기대된다.

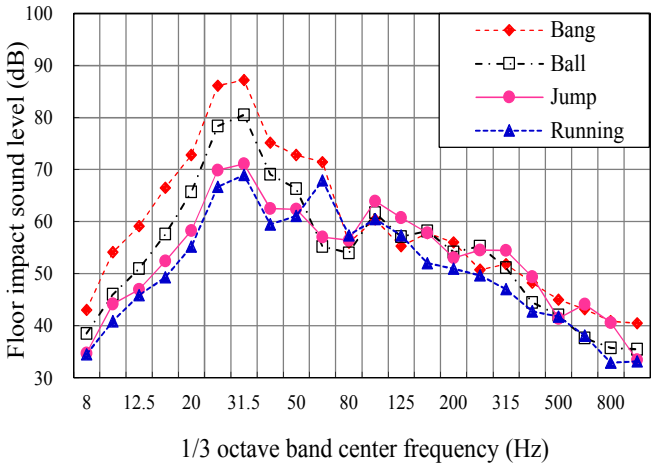
<표 3.2.6> 충격원에 따른 바닥 가속도 크기 비교

Structural member	Frequency [Hz]		Acceleration ratio to bang		
			Ball (②/①)	Jump (③/①)	Running (④/①)
Slab	1st	30	**0.39**	**0.15**	**0.09**
	2nd	61	-	-	0.29
	3rd	100	0.70	0.45	0.40
Wall(E)	1st	30	**0.39**	**0.16**	**0.09**
	2nd	48	0.28	0.17	0.12
	3rd	100	1.28	0.81	0.63
Wall(W)	1st	30	**0.39**	**0.15**	**0.10**
	2nd	50	0.78	0.80	0.51
	3rd	94	1.33	0.71	0.75

○ 바닥충격음 음압레벨 특성

- [그림 3.2.7]은 각 충격원에 대하여 수음실 중앙에 설치된 마이크로폰으로 수집한 음압레벨이다. 표준 중량 충격원에 대한 바닥 충격음 차단 성능 평가 규격인 KS F 2863-2(2007)에 따르면 바닥충격음 음압레벨 평가는 63, 125, 250, 500 Hz의 4개 옥타브 밴드 중심 진동수를 대상으로 한다. 본 연구에서는 바닥진동과 발생 음압레벨의 특성 비교를 위해 8~1,000 Hz의 진동수 범위에 대하여 충격원에 따른 음압레벨을 비교하였다.

- 음압레벨은 바닥진동의 지배 진동수가 포함된 진동수 대역의 중심진동수인 31.5 Hz에서 최대값을 가지고 이후 점점 감쇠하는데, 충격원에 따라 임팩트볼과 아동의 뜀은 50 Hz 대역에서, 뱅머신과 아동의 달리기는 63 Hz 대역에서, 그리고 4개 충격원 모두 100 Hz 대역에서 정점을 가진다. 특히 아동의 달리기의 경우 다른 충격원과 달리 63 Hz 대역에서 31.5 Hz 대역에서의 음압레벨과 거의 비슷한 수준의 음압레벨을 보여준다.
- 한편, Kim et al.(2005)과 Jeon et al.(2006)의 연구에서는 각각 충격력 폭로 레벨 비교와 임피던스 측정 결과으로 뱅머신보다는 임팩트볼이 실충격원에 다소 유사한 경향이 있다 하였다. 그러나 본 연구의 실험 결과 임팩트볼이 아동의 뛰어내림과는 다소 유사한 경향을 보이나 아동의 달리기와는 구분되고 있어, 임팩트볼이 뛰어내림보다 빠른 속도로 충격이 반복되는 달리기의 충격 특성과는 차이를 보임을 알 수 있다.
- Park, Kim & Kim(2013)은 로드셀과 실험실 및 현장 실험을 통하여 표준 중량 충격원이 실제 충격원보다 저진동수 대역에서의 성분은 적고 고진동수 대역 성분이 많으며, 500 Hz 전후 대역에서는 뱅머신이 임팩트볼 보다 큰 음압레벨 특성을 가진다고 보고하였다. [그림 3.2.7]에서 2개의 표준 중량 충격원 비교 시, 300 Hz 이상에서 임팩트볼 보다 뱅머신이 높은 음압레벨을 나타내고 있으며, 특히 500 Hz 대역에서는 뱅머신이 가장 높은 음압레벨을 가지고 있어 Park, Kim & Kim(2013)의 연구 결과에 상응한다.
  - [그림 3.2.7]에서 80~125 Hz대역에서 두 표준 충격원에 대한 음압레벨이 실충격원의 경우보다 낮아 중량 충격원을 사용한 평가에서는 이 진동수 대역에서 실충격원에 대한 음압레벨을 저평가할 수 있음을 확인할 수 있다.
  - 이후 125 Hz 이상의 진동수 대역에서는 아동의 달리기가 가장 낮은 음압레벨 수준을 나타내고 있다.
  - 한편, [그림 3.2.7]에서 아동의 뛰어내림의 경우 중심 진동수 100 Hz와 315 Hz 대역에서는 가장 높은 음압레벨을 가진다. 실충격원은 대상 아동의 체중과 연령에 따라 최대충격력 크기가 광범위하게 분포한다. 따라서 평가 기준에서 고려되는 진동수 대역인 100 Hz와 315 Hz 대역에서 가장 높은 음압레벨 수준을 나타내는 아동의 뛰어내림의 경우 대상 건물과 아동의 체중 및 연령 범위를 넓혀 다양한 데이터 확보 및 통계치 마련이 필요하다.



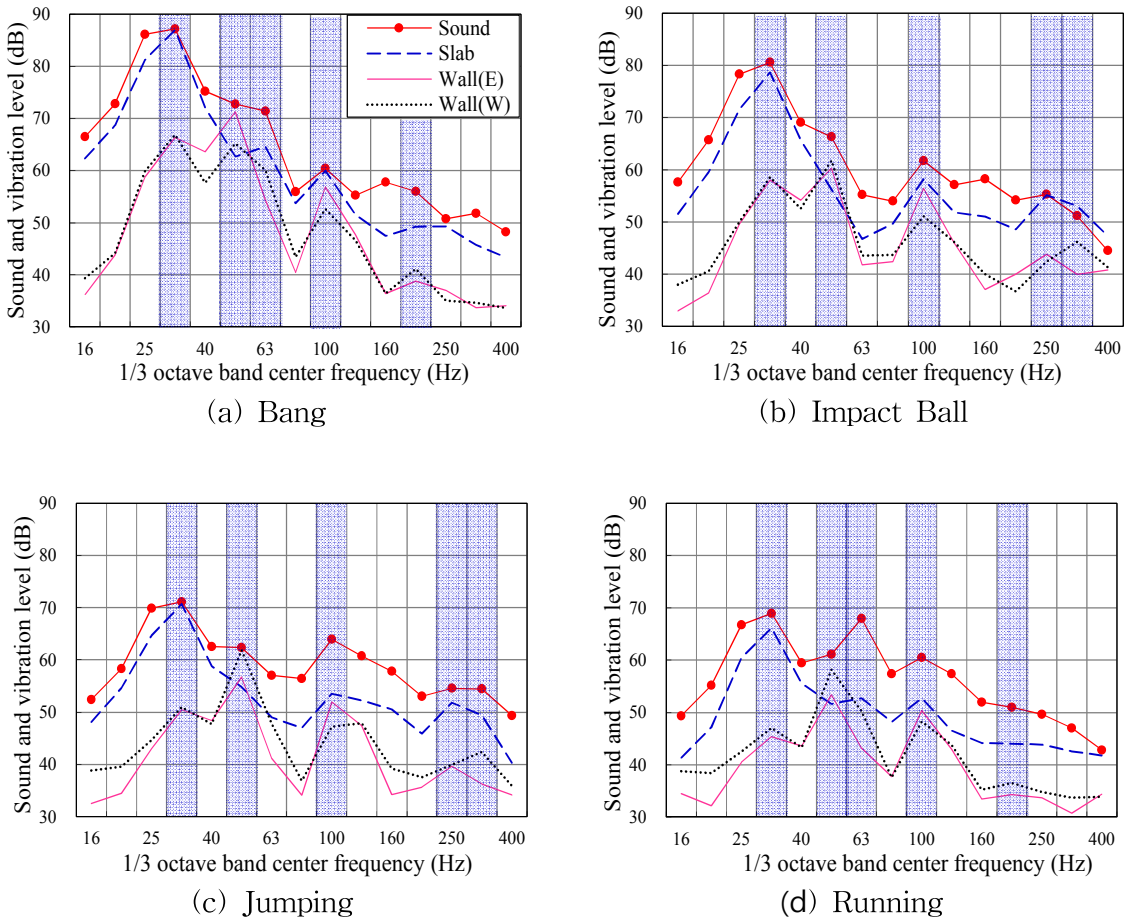
[그림 3.2.7] 충격원에 따른 바닥 충격음 음압 레벨

○ 바닥진동과 바닥충격음 음압레벨 특성 비교

- 바닥진동에 대한 구조 부재의 거동 특성과 음압레벨 특성을 비교·분석하기 위하여 바닥 진동 가속도 응답과 바닥충격음 음압레벨을 1/3 옥타브밴드 대역에 대한 진동레벨로 변환하여 [그림 3.2.8]에 나타내었다.
- 데시벨(dB) 단위는 소음 및 진동의 기준값에 대한 비율의 로그값으로 사람 감각에 대한 상대적 크기를 표현한다. 국내에서는 음압과 진동가속도의 기준값으로 각각 2×10-5 N/m^{2}과 10-5 m/s^{2}을 사용한다.
- [그림 3.2.8]에서 슬래브의 지배 모드 대역의 중심 진동수 31.5Hz에서 최대 음압레벨이 나타남을 확인할 수 있다.
- Bang에 대한 응답비교에서 슬래브의 지배모드 외에 벽체의 지배 진동수인 50 Hz 대역과 슬래브의 2차 모드가 포함된 63 Hz 대역에서 그리고 3차 모드인 100 Hz 대역에서 음압레벨에 변화가 생기는 것을 알 수 있다. 이는 [그림 3.2.8]의 (d) Running, (b) Impact ball 및 (c) Jumping에서도 확인이 되는데, (b) Impact ball과 (c) Jumping에서 63Hz 대역 영향이 나타나지 않음은 임팩트볼과 아동의 뛰어내림에 대한 바닥진동은 슬래브의 2차 모드에서 가속도 성분을 가지지 않는 것과 일치하는 것으로, 바닥진동에 대한 슬래브와 벽체의 진동 거동으로 음압레벨이 발생함을 확인할 수 있다.
- 특히 아동의 달리기에 대한 바닥충격음 음압레벨의 경우 슬래브의 진동수 대역에서 분명한 정점을 나타내어 벽체와 슬래브의 진동 가속도 수준이 비슷한 경우 벽체보다 슬래브의 진동수 대역에서 영향을 받음을 알 수 있다.
- [그림 3.2.5]~[그림 3.2.6]의 협대역 진동수 영역에서 100 Hz이상은 바닥진동에 대한 구조 부재의 영향을 벗어나는 진동수 범위이므로, 100 Hz 이하의 바닥진동 영향으로 발생한 음압레벨에 대한 룸모드의 영향이 반영된 결과라 할 수 있다.
- [그림 3.2.8]에서 옥타브밴드 진동수의 진동레벨로 나타낼 경우 뱅머신과 아동의 달리기의 경우 200Hz 대역에서, 임팩트볼과 아동의 뜀의 경우 250Hz와 315Hz 대역에서

진동레벨과 음압레벨의 정점이 나타나고 있다. 이는 옥타브대역에서는 진동레벨 합으로 나타내어지므로 협대역에서는 구분하기 어려운 고차모드가 영향이 주고 있는 것으로 판단된다.

- [그림 3.2.7]에서 아동의 뛰어내림이 중심진동수 315 Hz에서 4개의 충격력 중에서 가장 높은 음압레벨을 나타내고 음압레벨의 변동이 다른 충격원에 비해 크게 나타나는 것은 이러한 고차모드의 영향으로 판단된다.
- [그림 3.2.8]에서 음영으로 표시된 영역은 구조체의 진동 모드와 음압레벨의 정점이 동시에 발생하는 진동수대역으로 뱅머신과 아동의 달리기, 임팩트볼과 아동의 뛰어내림이 서로 같은 응답형태를 나타내고 있다.
- 한편, Bang에서는 160Hz와 315Hz에서, Ball에서는 160Hz에서 구조체의 진동모드 영향없이 음압레벨에서 정점을 나타내고 있는데, 이는 룸모드의 영향으로 판단된다.
- 협대역 진동수 영역 응답과 옥타브밴드 영역 응답을 동시에 고려할 때, 바닥충격음은 슬래브의 지배 진동수 영역에서 최대 음압레벨을 나타내고 이후 감쇠하며, 슬래브의 2차 모드 및 벽체의 지배 진동수의 영향을 받아 정점을 갖는다. 100Hz 이상의 진동수 영역에서 충격력에 따른 음압레벨은 구조체의 고차모드 영향외에 룸모드의 영향을 같이 받고 있는 것으로 판단된다.



(a) Bang (b) Impact Ball

(c) Jumping (d) Running

[그림 3.2.8] 진동레벨과 음압레벨의 비교

마. 바닥 중량 충격음 평가 방법 고찰

○ 단일수치 평가량 산정

- 공동주택 Mock-up 실험동의 거실에서 측정된 4개 충격원에 대한 바닥충격음의 단일수치 평가량을 각국 규격의 방법에 따라 산정하였다.
- [그림 3.2.9]는 국내 규격 KS F 2863-2(2007)의 규정에 의한 바닥 충격음 레벨 단일수치 평가량 결정 과정을 나타내고 있다.

> 표준 중량 충격원인 뱅머신과 고무공의 단일수치에 의한 바닥충격음 레벨은 각각 50dB과 48dB이고, 실충격원으로 사용한 아동의 뛰어내림과 달리기의 경우 각각 50dB과 46dB로 결정된다.

> 거실의 슬래브에 대한 바닥충격음 단일수치 평가량을 분석해보면, 뱅머신은 63Hz과 250Hz 대역에서, 고무공과 아동의 뛰어내림 및 달리기의 경우 125Hz와 250Hz 대역에서 결정적이며 모두 50dB 이하로 대상 바닥의 슬래브는 공동주택 바닥구조의 바닥충격음 차단성능 기준 제한을 만족한다.

- [그림 3.2.10]은 일본 JIS A 1419-2(2000)에 의한 바닥 충격음 레벨 평가로 아동 달리기에 대한 음압레벨은 50dB이고 나머지는 모두 측정값에서 2dB 감한 점이 L-50과 L-55 사이에 있어 55dB로 결정된다.

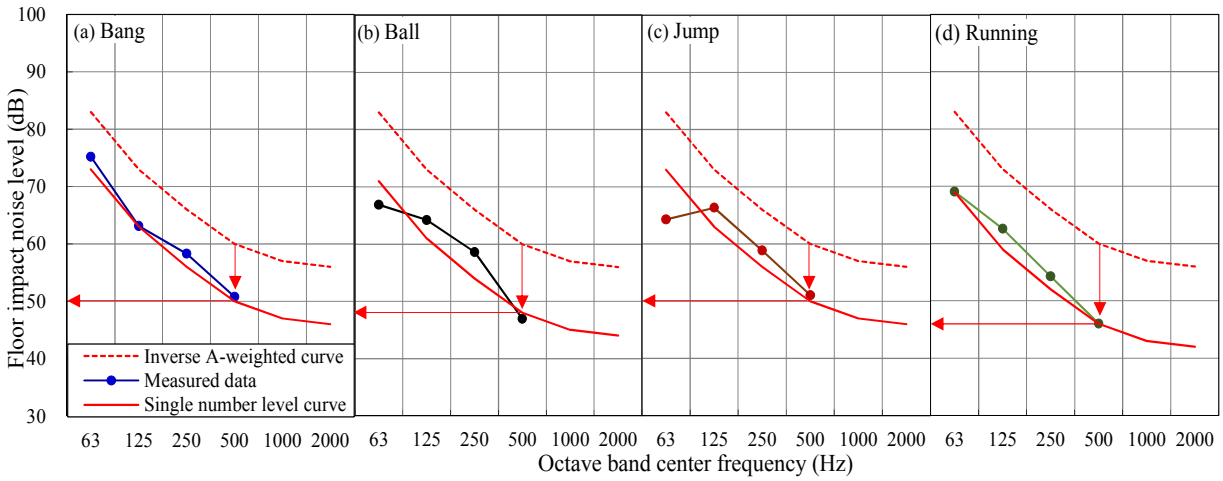
> 거실의 바닥충격음 음압레벨은 뱅머신의 경우 63Hz와 250Hz에서, 고무공은 250Hz에서, 그리고 아동의 뜀과 달리기는 125Hz와 250Hz에서 단일수치 레벨이 결정된다.

> JIS A 1419-2(2000)의 기준으로 평가할 경우 대상 바닥의 슬래브는 거실의 아동 달리기에 대한 바닥충격음만 바닥구조 성능 기준 제한을 만족한다.

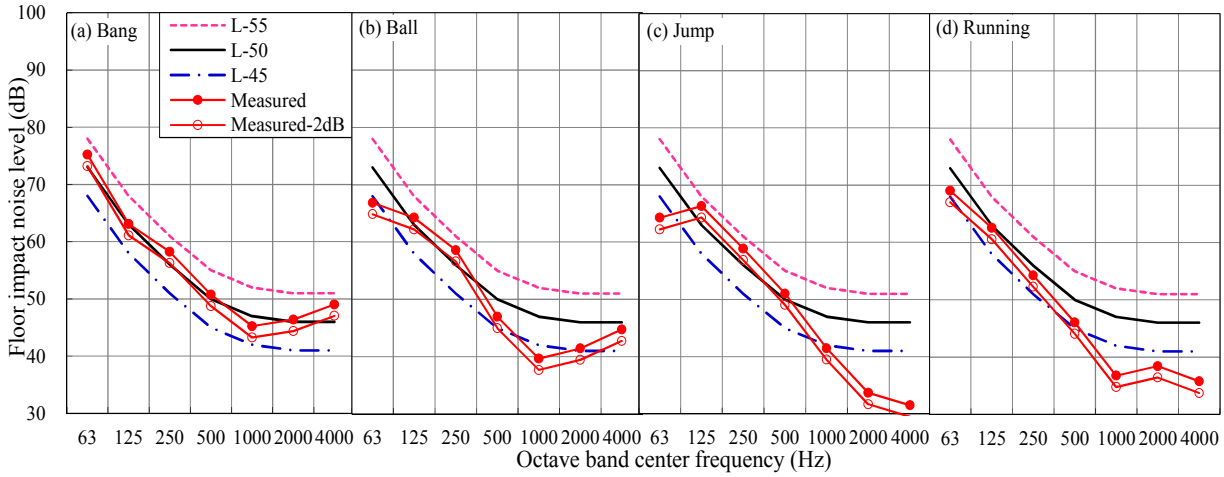
- ISO 717-2(2013)는 경량 충격음에 대한 평가 방법이지만 기준선을 이동시키는 방법이 국내 규격과 상응하고 사람의 청감을 반영한 기준 곡선에 대한 단일 수치 결정이라는 점에 의미를 두어 본 연구의 바닥충격음 측정값에 대한 ISO 717-2(2013)의 단일 수치 평가량을 산정해 보았다.
- 각국 기준에 따라 산정된 단일수치 평가량을 <표 3.2.5>에 정리하였는데, ISO 717-2(2013)의 단일수치 평가량의 경우 기준곡선 이동으로 결정된 레벨을 기록하고 그 레벨에서 5dB 차감한 단일수치 평가량을 괄호 안에 기록하였다.
- 또한 전 주파수 대역에 대한 오버올 레벨 (overall level)을 평탄특성(dB(lin))과 A 특성 가중 값(dB(A))으로 산정하여 비교하였다.

> 음압레벨의 평탄특성 오버올 레벨은 [그림 3.2.8]의 바닥 진동 가속도 수준과 같이 뱅머신>고무공>뛰어내림>달리기 순서의 크기를 갖으나, A 특성 가중된 오버올 레벨과 단일 수치 평가량의 크기는 거실의 경우 뱅머신≥뛰어내림≥고무공≥달리기 순서이고, 침실의 경우 뛰어내림≥뱅머신≥고무공≥달리기 순서를 나타내고 있어 A 특성에 의해 저감된 바닥진동의 지배 주파수 대역의 음압레벨이 고무공의 경우 가장 큰 것을 알 수 있다.

- 충격원 특성을 각 충격원에 대한 단일수치 음압레벨 및 단일수치 평가량 결정에 큰 영향을 미치는 주파수 대역으로 분석할 경우 실충격원은 뱅머신보다 고무공과 더 유사하며, 고무공은 특히 아동의 뛰어내림과 가까운 표준 충격원이라 할 수 있으며, 이는 충격원에 대한 이전 연구자들의 연구와 같다(Jeong and Jeon, 2005; Kim et al., 2005; Park et al., 2013).
- 본 연구에서 측정한 바닥충격음 레벨에 대한 평가는 충격원 뿐만 아니라 적용한 기준 및 평가량에 따라 상이한 결과를 나타내고 있다. 특히 국내 기준의 평가 방법으로는 성능 기준을 만족하나, 오버올 레벨이나 일본 규격의 평가 방법을 사용할 경우 성능 기준을 만족하지 못하는 경우가 더 많아 일본의 JIS A 1419-2(2000)에 의한 단일수치 평가량이 KS F 2863-2(2007)의 평가량보다 더 보수적인 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.
- 또한 바닥충격음에 대한 인지 및 불쾌감 수준을 A특성 가중 오버올 레벨(dB(A))로 나타내고, 현행 기준의 성능기준으로 평가할 경우 아동의 뛰어내림에 대하여 충분히 불쾌감을 나타낼 수 있는 수준이다.
- 단일수치 평가량이 충격원 및 산정 기준에 따라 다른 결과를 나타내고 있음은 현행 평가 기준의 단일수치 평가량 산정 시 충격원에 따라 상이한 음압레벨의 스펙트럼 특성을 제대로 반영하지 못하기 때문으로 판단되며 이에 대한 보완 방안 마련이 필요하다.



[그림 3.2.9] KS F 2863-2에 따른 바닥충격음 단일수치 평가량 산정



[그림 3.2.10] JIS A 1419-2에 따른 바닥충격음 단일수치 평가량 산정

<표 3.2.5> 충격원 특성과 평가 기준에 따른 바닥충격음 음압레벨 평가

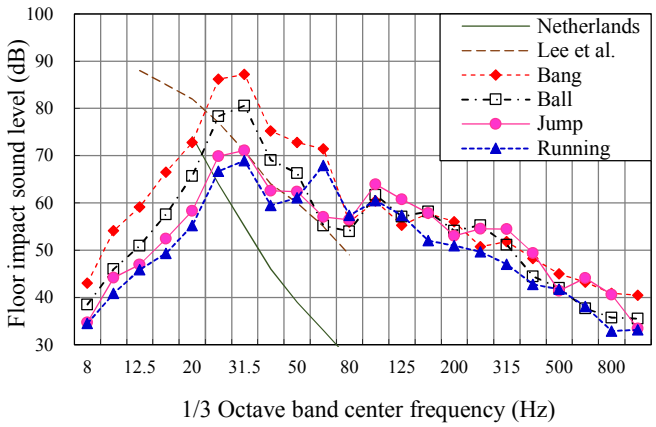
Impact sources	Overall level		Single number quantity		
	Linear dB(lin)	A-weighted dB(A)	KS	JIS	ISO (-5dB)
Bang	90.1	57.2	50	55	57 (52)
Ball	83.1	54.4	48	55	56 (51)
Jump	75.2	54.5	50	55	50 (45)
Running	73.8	51.0	46	50	45 (40)

○ 저주파수 대역의 음압레벨 평가

- 표준 중량 충격원에 대한 바닥 충격음 차단 성능 평가 시 KS F 2863-2(2007)은 63, 125, 250, 500 Hz의 4개 옥타브 밴드 중심 주파수 대역을 고려하고, JIS A 1419(2000)에서는 63~4,000 Hz주파수 범위를 대상으로 7개의 옥타브 밴드 중심 주파수의 음압레벨을 평가한다. 경량 충격음 평가 방법을 규정하는 ISO 717-2(2013)는 기준 곡선의 음압레벨이 125~2,000 Hz 범위의 5개 중심 주파수에 대하여 제시되어 있다.

- 표준 중량 충격원과 실충격원에 대한 대상 바닥의 진동 거동은 각 충격원에 대한 바닥 충격음 음압 레벨은 100Hz 이하에서는 바닥진동의 지배 주파수 대역에서 정점을 가지며, 이때 음압레벨은 바닥의 진동 가속도 크기에 영향을 받는다. 그러나 바닥 진동의 지배 주파수는 60Hz 이하로 바닥 충격음 차단 성능 평가 기준의 주파수 범위를 벗어난다.

- 국내에는 바닥의 지배 주파수를 포함하는 저주파수 대역의 음압레벨에 대한 평가 기준이 마련되어 있지 않으나, 독일, 네덜란드 등 유럽 몇몇 국가에서는 저주파수 소음의 영향을 관리하고 있다. 주로 1/3옥타브밴드 중심주파수 100Hz이하의 주파수 범위를 대상으로 하며 독일과 네덜란드의 저주파 소음 인지 곡선의 음압레벨은 거의 같은 수준을 나타낸다.
- 국내에서도 교통수단에서의 저주파 소음 영향에 대한 연구 필요성이 대두되고 있다. Lee et al.(2011)은 저주파 소음 영향 평가의 중요성을 인지하고 무향실에서의 저주파소음 청감시험을 실시하여 저주파소음 기준안을 피험자의 75%와 100%가 성가심을 느끼는 수준의 2단계로 제시하였다.
- 본 연구에서는 바닥충격음 평가 기준에서 고려하지 못하는 바닥 진동의 지배 주파수 대역의 음압레벨 평가를 위하여 저주파 소음 평가를 시도하였다. 이를 위하여 가청 소음의 여부 결정에 사용되는 네델란드의 저주파소음 인지 곡선과 피험자의 100%가 성가심을 느끼는 수준의 Lee et al.(2011)의 권고기준안 2단계를 각 충격원별 측정 음압레벨과 비교하였다.
- [그림 3.2.11]에서 바닥 진동의 지배주파수 범위에서 네델란드의 저주파수 인지곡선을 상회하고 있어 가청 소음이 발생할 가능성이 크다.
- [그림 3.2.11]에서 측정값이 바닥 진동의 지배 주파수 대역에서 Lee et al.(2011)가 제안한 곡선에 근접하거나 높은 수준을 나타내고 있다. 이는 모든 경우에 바닥 충격음에 대하여 성가시게 느낄 수 있음을 의미한다.
- 이는 <표 3.2.5>에서 A특성 가중 오버올 레벨(dB(A)) 수치가 KS 규격의 단일수치 평가량과 달리 50dB을 초과하여 불쾌감을 느낄 수 있음과 상응한다.



[그림 3.2.11] 저주파수 대역의 음압레벨 평가

3. 진동특성 주요 설계 요소 간 상관관계 도출

가. 진동이론 분석

○ 동적 하중에 대한 구조물 거동은 운동방정식으로부터 결정된다.

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = P(t) \tag{3.3.1}$$

여기서,

U, $\dot{U}$, $\ddot{U}$ = 각각 구조물의 변위, 속도, 가속도 응답

M = 구조물의 질량

C = 감쇠계수

K = 강성

○ 감쇠계수 C는 질량과 강성의 영향을 받으며, 일반적으로 건축구조물은 5%이하의 감쇠비를 가진다.

○ 구조물의 질량 M과 강성 K는 다자유도계의 경우 모드와 형상함수를 고려하여 매트릭스 형태로 구성되며, 단자유도계의 경우 총질량과 변형에 대한 강성으로 결정된다.

나. 바닥진동에 대한 슬래브의 등가단자유도 모델 검토

○ 등가 단자유도 모델의 운동방정식과 등가 질량, 등가 강성은 다음과 같다.

$$m_e \ddot{u} + c_e \dot{u} + k_e u = p(t) \tag{3.3.2}$$

$$m_e = \int_0^l \int_0^l m(x,y)\phi^2(x,y)dxdy \tag{3.3.3}$$

$$k_e = \int_0^l \int_0^l D(\nabla^2\phi)^2 dxdy \tag{3.3.4}$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)} \tag{3.3.5}$$

여기서,

m = 바닥의 단위 면적당 질량

D = 슬래브 휨 강성

E = 재료의 탄성계수

ν = 프아송 비

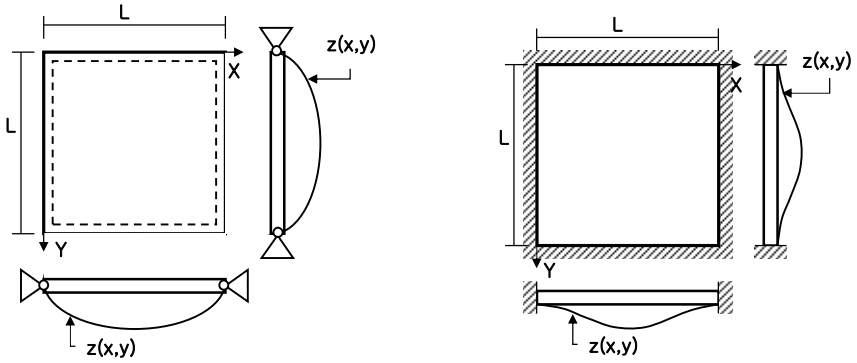
h = 슬래브 두께

$\phi(x,y)$ = 플레이트의 형상함수

○ 플레이트의 형상함수는 경계조건에 따라 결정되며, 사변 단순지지와 사변 고정지지의 경우 다음과 같다.

$$\phi_{sim}(x,y) = \sin\frac{\pi x}{L}\sin\frac{\pi y}{L} \tag{3.3.6}$$

$$\phi_{fix}(x,y) = \frac{1}{4}\left(1-\cos\frac{2\pi x}{L}\right)\left(1-\cos\frac{2\pi y}{L}\right) \tag{3.3.7}$$



(a) 사변 단순지지 (b) 사변 고정지지

[그림 3.3.1] 플레이트 지지 조건에 따른 처짐 형상

○ 아파트 거실은 베란다면이 자유단, 부엌면으로 연속지지를 고려하더라도, 내력벽이 한 면 길이의 일부만 지지된 형태로 정확한 경계조건 반영이 어려움.

○ 등가 단자유도 모델은 고차 진동 모드를 반영하는 경우, 특히 진동의 전달과 바닥충격음 해석의 적용에 한계가 있음.

다. DB와 신경망이론의 매핑

○ AIJ(2004)에서는 바닥진동 평가 시 가진원과 수진체에 대한 데이터에서 다음 항목을 고려하도록 규정하고 있다.

√ 가진원에 대하여
- 가진하중의 크기
- 가진하중의 시간이력특성
- 가진하중의 작용면적 및 형상
- 가진점의 수, 위치

√ 수진체에 대하여
- 수진체의 재하면적 및 형상
- 수진체의 진동특성 (유효질량, 고유진동수, 감쇠특성 등)
- 수진점의 수, 위치

▷ 수집한 DB로부터

- 재료 강도 f_{ck},
- 거실 크기 및 전용면적 ($A = L_1 \times L_2$)
- 슬래브 두께 h
- 벽체 양

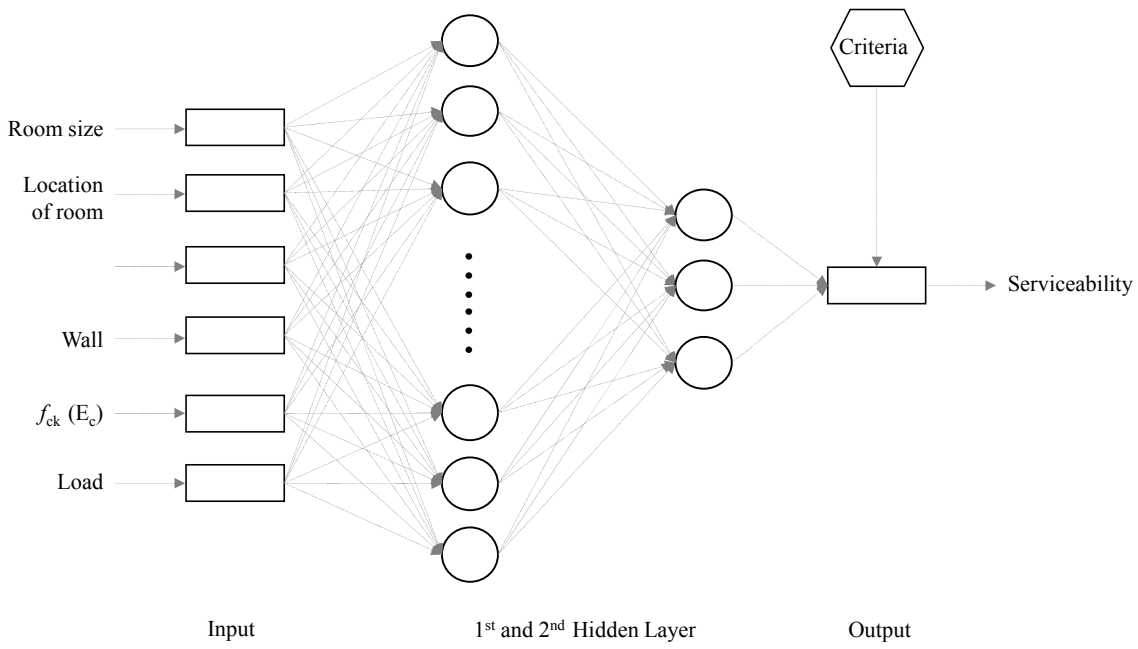
외에 평면 구성상 거실의 위치를 변수로 추출할 수 있다.

▷ 벽체 양 뿐만 아니라 배치 등 거실 슬래브를 지지하는 경계조건을 결정하는 내력벽의 영향에 대한 데이터 보완 필요하다.

▷ 거실 크기, 슬래브 두께, 경계조건의 변수는 운동방정식 결정 요소가 되므로 이들 변수를 단순 분리하여 어려우며, 이들 변수가 각각 입력 변수로 설정될 필요가 있다.

▷ 콘크리트의 탄성계수는 콘크리트 압축 강도에 따라 결정되며, 콘크리트 강도의 특성을 반영한 불확실 변수로 고려할 수 있다.

▷ 실충격력인 뒤꿈치 충격, 보행, 및 뛰어내림과 달리기 등의 충격력 특성은 연령, 성별, 생활습관에 영향을 받으므로 하중스펙트럼 결정이 어려우며, 평가를 위한 불확실 변수 모델로 고려할 수 있다.



[그림 3.3.2] 인공신경망 기반 바닥진동 평가 모델

○ 바닥진동 기준 고찰

- 진동 평가 기준은 진동원과 수진대상에 따라 결정 된다.
- 건물 진동은 건물 외부 도로의 차량, 각종 건설 및 산업 활동이나 건물 내 기계류 및 거주자의 거동 등 다양한 원인으로 발생한다.
- 거주자가 수진 대상인 경우 건물 진동(건물 내에서 사람이 느끼는 진동)은 거주자의 안락함으로 평가되며, 각국 기준의 진동 제한치는 사람의 인지 수준에 대한 연구를 바탕으로 하고 있다.
- 특히 주거 건물에 대하여 사용성의 측면에서 건물 진동을 고려할 경우 거주자는 진동원임과 동시에 수진 대상이 되며
- 따라서 거주자의 거동으로 발생하는 진동은 발생 빈도와 그 제어 방법 때문에 건물 진동의 주요 요인으로 고려되고 있다.
- 건물 내부에서 인체에 영향을 미치는 진동에 대하여 해외 각국 기준에서는 진동수와 가속도 크기로 평가하고 있다.

○ 바닥충격음 기준 고찰

- 현재 바닥충격음 평가 기준에서는 표준충격원에 대한 바닥 충격음 음압레벨을 특정 주파수 대역의 음압레벨을 이용한 단일수치 평가량으로 성능등급을 결정한다.
- 그러나 표준충격원은 실충격원과 충격력 크기 및 충격력 스펙트럼 특성에서 차이를 보이고 있으며, KS 규격의 단일수치 산정 방법은 충격원에 따른 바닥충격음 특성 차이를 반영하지 못하고 있다.
- 또한 60Hz 이하의 바닥진동 지배 진동수 대역에서 정점을 가지는 바닥 충격음 음압레벨은 단일수치 평가량 산정 시 고려가 되지 않고 있다.

라. 다차원 불확실성 변수 분석을 위한 해석적 연구

○ 불확실 변수의 정식화

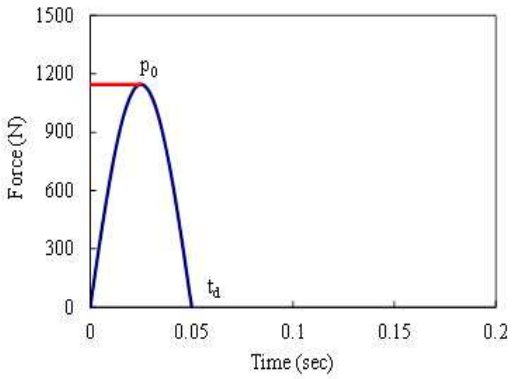
- 콘크리트의 탄성계수의 불확실 변수 모델 (Mirza et al., 1979)
  - 콘크리트 탄성계수는 콘크리트 압축강도 f_{ck}로부터 결정되므로 f_{ck}와 같이 정규분포 모델로 고려할 수 있다..
  - 평균값은 콘크리트의 28일 평균 압축강도로부터 결정되며,
  - 변동계수 (COV)는 0.119이다.

$$E_c = 5015.4\sqrt{f_{cu}} \quad [MPa] \tag{3.3.8}$$

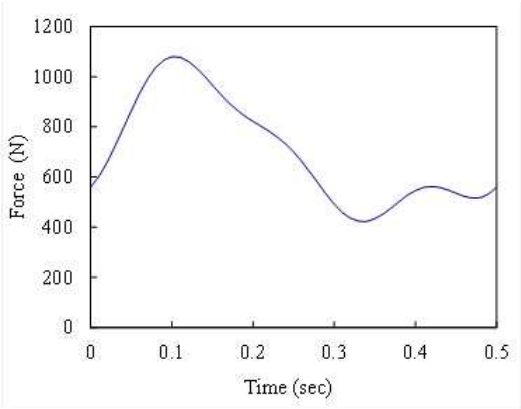
$$f_{cu} = 0.675 f_{ck} + 7.58 \le 1.15 f_{ck} \quad [MPa] \tag{3.3.9}$$

- 뒤꿈치 충격의 불확실 변수 모델
  - 로드쉘을 이용한 뒤꿈치 충격 실험으로 뒤꿈치 충격 하중을 결정한 Lee et al (2005)의 연구에서 뒤꿈치 충격 하중은 지속시간 최대값 P_0, 지속시간 t_d의 반사인 펄스 형태를 가진다.
  - 뒤꿈치 충격의 최대값 P_0는 정규분포를 따르며, 평균값은 1014.4 N, 변동계수(COV)는 0.243 이다.
  - 뒤꿈치 충격의 지속시간 t_d는 로그분포를 따르며, 평균값은 0.0652 sec, 변동계수(COV)는 0.202 이다.

- 보행하중 함수
  - AISC-11(1997)에서 보행하중은 몸무게와 보행 속도를 변수로하는 조화하중 형태로 제시되어 있다.
  - 몸무게 700N의 보행자가 2Hz의 보조로 걸어갈 때 한 걸음의 하중에 대한 시간이력 함수는 [그림 3.3.4]와 결정됨.



[그림 3.3.3] 뒤꿈치 충격 하중 함수



[그림 3.3.4] 보행 하중 함수

- 아동의 뛰어내림 및 달리기
  - 아동의 뛰어내림 및 달리기 충격력에 대한 통계적 모델은 뒤꿈치 충격과 보행하중에 대하여 최대 충격력 크기 변수를 추가하여 적용할 수 있다.

○ 유한요소 해석 모델 구축
- 계획 단계에서 바닥진동 수준을 예측하고, 변수정보가 부족한 진동 및 바닥충격음 음압레벨 데이터의 활용하기 위하여 유한요소 해석 모델 이용할 수 있다.
- 현장 및 실험동의 진동실험에서 단위세대에 대하여 내력벽과 슬래브를 유한요소해석 모델로 구축할 경우, 모달해석 결과 고유진동수 f_n은 측정값과 해석값이 5% 미만 오차율로 구축한 유한요소 모델은 실제 구조물의 동특성을 잘 반영한다.

4. 데이터 기반의 진동성능 및 슬래브 두께 평가

가. DB update

○ 본 연구의 주요 목표는 비선형성이 큰 슬래브 진동 평가 방법이 가진 적용성의 한계를 돌파하기 위한 방법론을 도출하는 것으로, 인공신경망을 활용한 다차원 변수가 고려된 수직진동 평가 방법을 구축하는 것이다. 이를 활용하면 바닥진동 및 바닥충격음에 대한 사용성을 고려한 슬래브 두께를 검토할 수 있다.

○ 이를 위해 본 연구에서는 인공신경망에 대한 검토를 수행하였다. 동시에 구축된 기존 공동주택의 수직진동 DB를 업데이트하여 인공신경망의 초기 학습데이터로 활용하였다.

○ 인공신경망에 적용하기 위한 입력값으로 진동 실험을 통한 공동주택의 수직진동 평가 데이터를 분석하였다.

- 공동주택의 평면 형태에 대한 검토와 이론적 평가 방법들에 대한 검토 결과 슬래브의 수직진동에 영향을 미치는 주요 요소로써 구조형식, 거실의 크기, 재료의 강도 그리고 부재의 두께를 고려해야 하는 것을 확인할 수 있었다.
- 실제 구조물은 이상화되어 있는 슬래브의 지지조건과는 크게 다르기 때문에 슬래브의 크기 등에 대한 편차가 있을 수 있으나 본 연구에서는 슬래브의 주요 지지 조건을 벽체를 통해 결정하였다.

○ <표 3.4.1>에 기존 공동주택에서 실측한 구조물 형태 및 재료의 강도를 정리하였으며, <표 3.4.2>에는 <표 3.4.1>에 정리된 슬래브에 대한 수직진동 실험 실측 결과를 정리하여 나타내었다.

○ 데이터 취득을 위해 수행한 진동 실험은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 진동실험 방법
  - 평면 및 대상 세대 선정 (상하 수직으로 이웃한 두 세대)
  - 상부 세대와 하부 세대의 거실 중앙에 가속도계 설치.
  - 하부 세대 거실 중앙에 마이크로 폰 설치.
  - 충격원(뒤꿈치충격, 보행)에 대하 다음을 동시에 측정.
    √ 상부세대와 하부세대의 바닥 진동 가속도 레벨
    √ 하부 세대의 음압레벨
  - 대상 바닥의 고유진동수, 진동 가속도 크기, 바닥충격음 레벨의 데이터 취득.

○ 진동실험 데이터로 추출한 입력값은 가력 하중 형태에 따라 Heal drop과 Walking으로 분류하였다. 진동실험의 결과는 natural frequency f_n와 peak acceleration a_p으로 요약하여 바닥 진동 평가기준과 비교가 가능할 수 있도록 하였다.

<표 4.4.1.> 기존 진동실험 DB의 대상 건물 개요

No.	Structural type	Subject room	Size (m×m)	Concrete compressive strength (MPa)	Slab thickness (mm)
FL01	RC	Living room	4.82×5.42	24	150
FL02			4.82×5.97	21	150
FL03			5.12×5.97	24	165
FL04			5.72×6.57	21	180
FL05			4.82×5.97	21	150
FL06			5.12×6.08	24	150
FL07			4.60×6.15	24	150
FL08			5.20×6.15	24	150
FL09			4.20×5.40	24	210
FL10			4.20×5.00	24	210
FL11			4.70×5.70	24	210
FL12			4.70×5.10	24	210
FL13	SRC		5.33×6.63	27	250
FL14			6.31×8.06	27	250
FL15			6.33×7.46	27	250

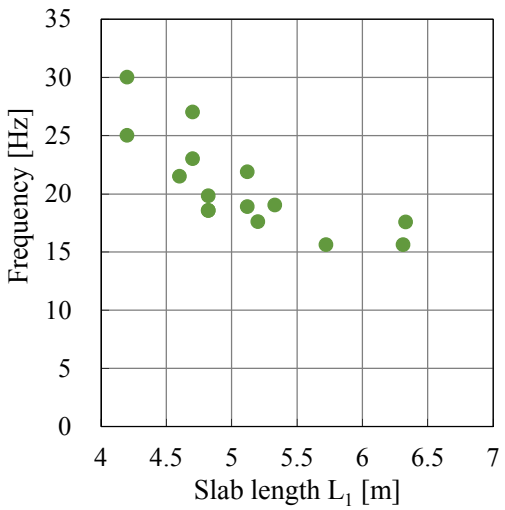
<표 4.4.2> 기존 진동실험 DB의 진동 특성 결과

No.	Natural Frequency (f_n, Hz)	Peak acceleration (a_p, %gravity)	
		Heel drop	Walking
FL1	19.82	2.01	1.24
FL2	18.56	2.79	1.46
FL3	18.88	2.59	1.17
FL4	15.63	2.39	1.36
FL2	18.56	2.50	1.28
FL5	21.88	2.30	1.28
FL6	21.50	2.33	1.69
FL8	17.60	2.44	1.72
FL9	25.00	0.70	2.23
FL10	30.00	0.12	0.34
FL11	23.00	0.22	0.34
FL12	27.00	0.16	0.15
FL13	19.04	0.97	0.44
FL14	15.63	0.78	0.45
FL15	17.58	0.97	0.35

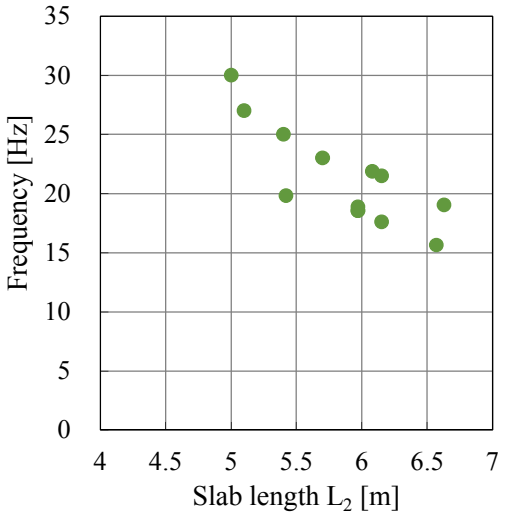
○ 각 변수들이 진동성능에 미치는 영향을 판단하기 위하여 각 변수에 대한 고유진동수와 최대가속도에 대한 관계를 하중 형태에 따라 나누어 [그림 3.4.1]~[그림 3.4.3]에 정리하였다.

○ 검토대상 슬래브는 형태 및 구성 재료가 다르기에 직접적 비교는 어려울 것이나 대략적인 변수의 영향 평가를 위해 1차원적인 검토를 수행하였다.

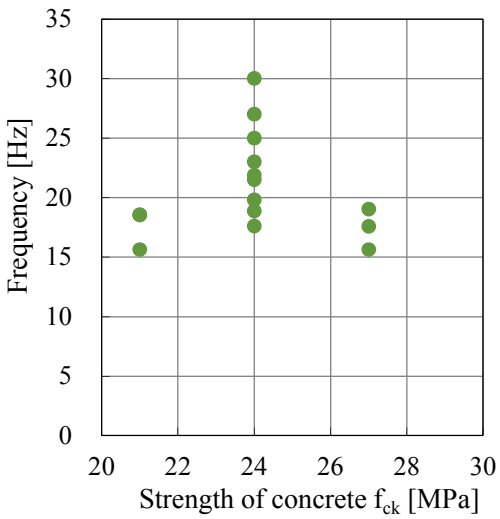
- [그림 3.4.1]~[그림 3.4.3]의 모든 관계를 검토해볼 때 고유진동수에는 슬래브의 길이가 직접적 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.
- 콘크리트의 압축강도와 부재의 두께는 고유진동수에 직접적인 영향을 미치지는 못하는 것으로 나타났다.
- 가속도의 경우 부재의 길이에 직접적인 영향을 받는 것으로 보기 어려운 상황이었으나 오히려 재료의 강도와 부재의 두께에 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 따라서 본 연구에서 수행하고자 하는 다양한 변수를 고려한 슬래브 진동성능 예측기법을 위해서는 구축한 DB의 모든 변수들을 고려해야 하는 것으로 판단된다.



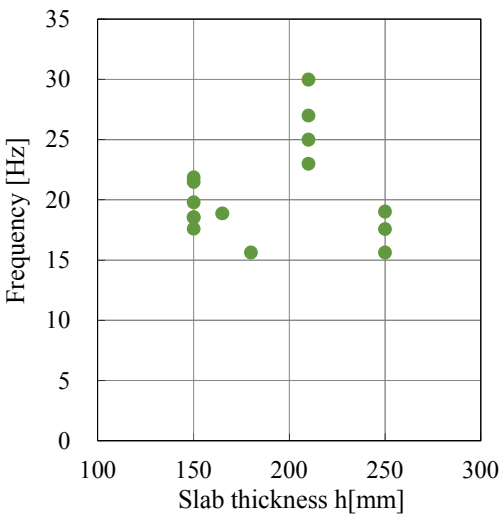
(a) 입력변수 - 슬래브 변 길이 L_1



(b) 입력변수 - 슬래브 변 길이 L_2

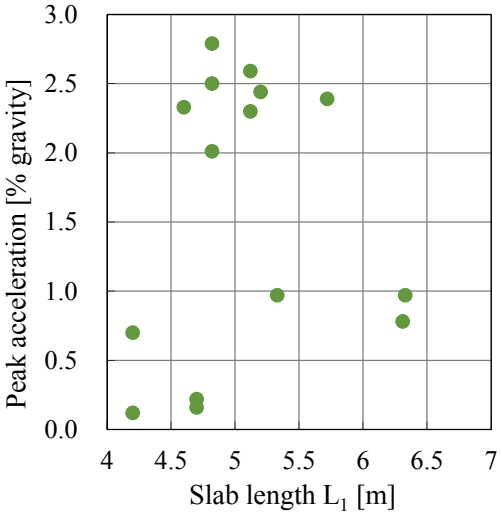


(c) 입력변수 - 콘크리트 강도 f_{ck}

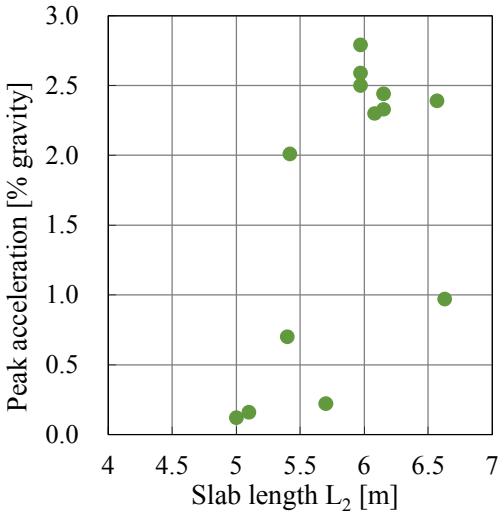


(d) 입력변수 - 슬래브 두께 h

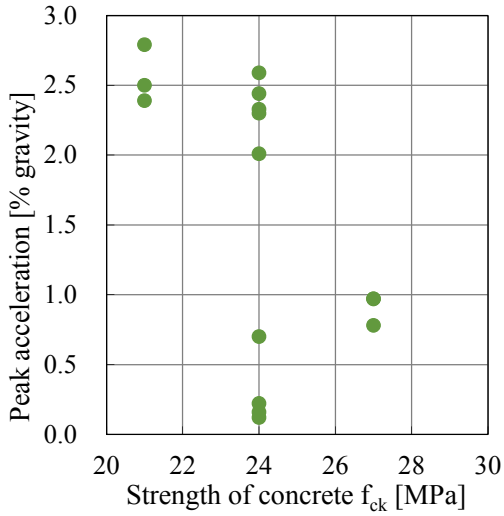
[그림 3.4.1] 주요 변수별 고유진동수 변화



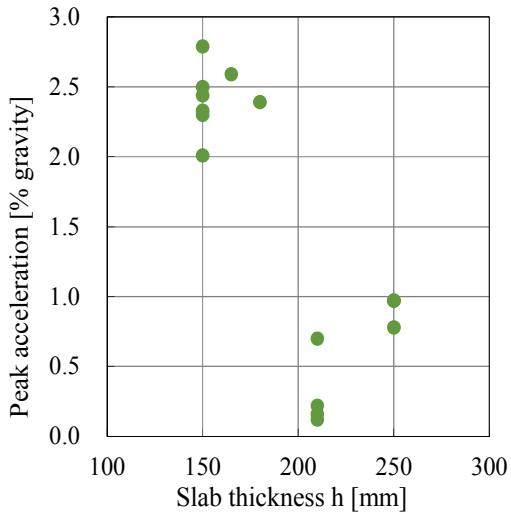
(a) 입력변수 - 슬래브 변 길이 L_1



(b) 입력변수 - 슬래브 변 길이 L_2

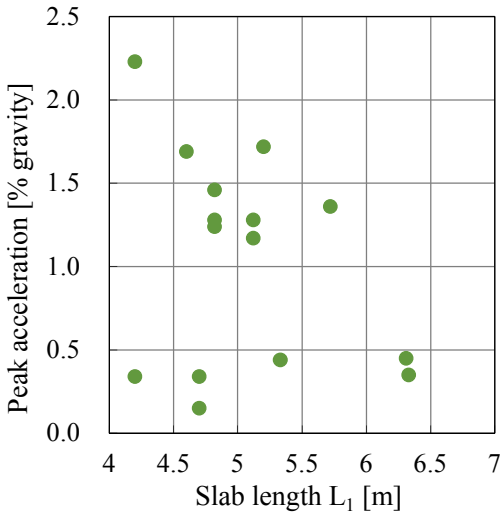


(c) 입력변수 - 콘크리트 강도 f_{ck}

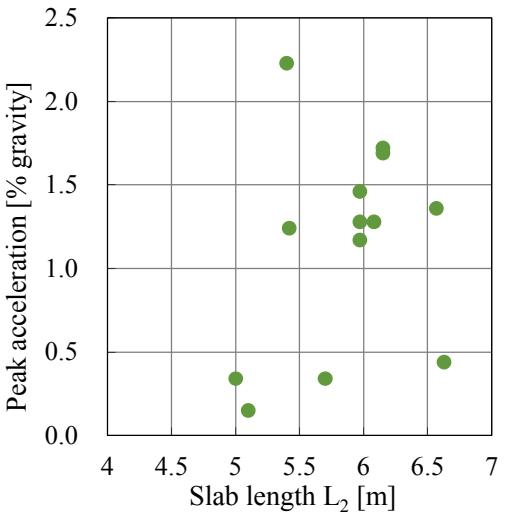


(d) 입력변수 - 슬래브 두께 h

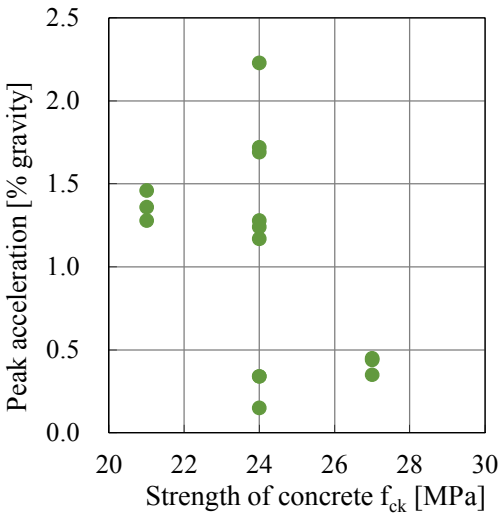
[그림 3.4.2] 주요 변수별 최대 가속도 변화 (뒤꿈치 충격)



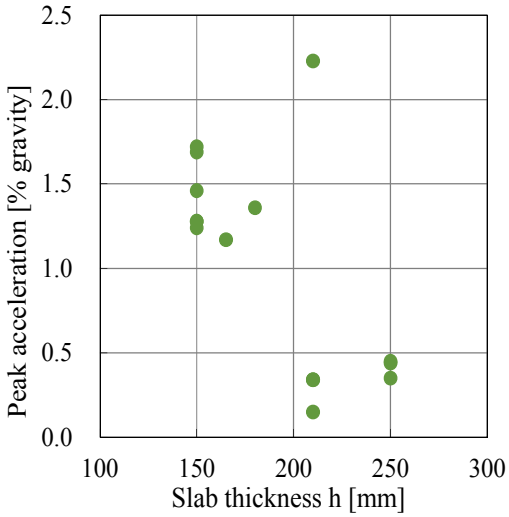
(a) 입력변수 - 슬래브 변 길이 L_1



(b) 입력변수 - 슬래브 변 길이 L_2



(c) 입력변수 - 콘크리트 강도 f_{ck}



(d) 입력변수 - 슬래브 두께 h

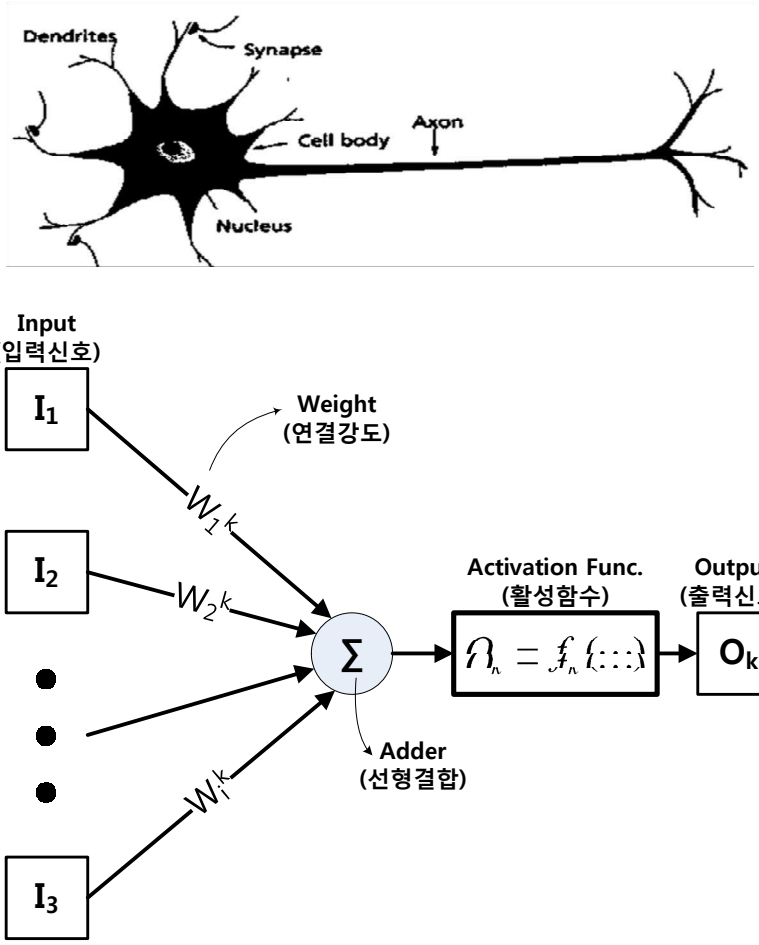
[그림 3.4.3] 주요 변수별 최대 가속도 변화 (보행)

나. 인공신경망의 이론적 배경

○ 인공신경망은 인간의 뉴런을 모방한 데이터 처리 방법을 사용하여, 다양한 변수와 많은 양의 데이터에 대해 병렬 계산을 수행하여 정보를 처리하는 방식이다.

○ 기본적으로 인공신경망은 데이터를 기반으로 한 학습 알고리즘을 통해 대상 학습데이터를 분석하여 경험적으로 스스로 규칙을 생성, 원하는 출력값을 도출할 수 있도록 하는 방식이다.

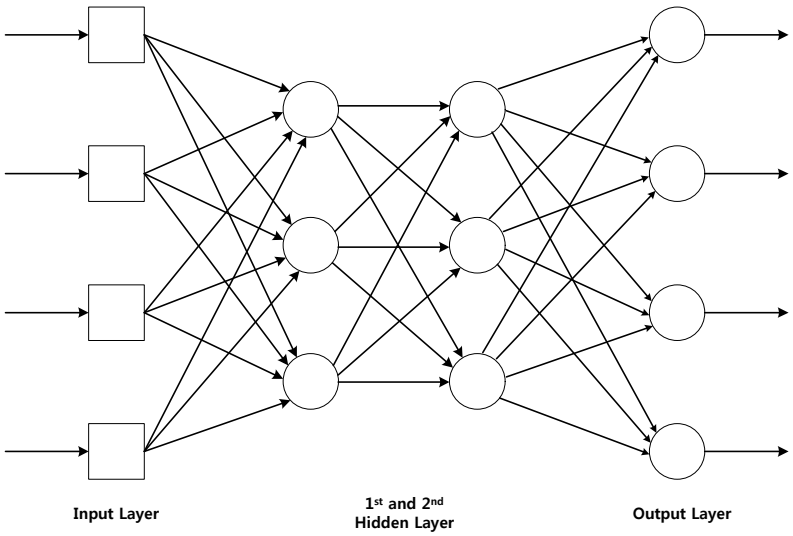
○ 일반적으로 인공신경망의 구조는 생물의 뉴런을 모방하여 만든 것으로 외부입력 신호, 연결강도(weight), 선형결합(adder), 활성함수(activation function), 출력신호로 이루어지게 된다. 생물의 뉴런과 인공신경망의 구조를 [그림 3.4.4]에 비교하여 나타내었다.



[그림 3.4.4] 인공뉴런의 구성

○ [그림 3.4.4]에 인공신경망에 사용되는 단일 뉴런을 나타내었다. 단일 뉴런을 통해 학습이 가능한 단층 퍼셉트론(perceptron)을 구성할 수 있다. 단층 퍼셉트론은 선형분리는 구현할 수 있지만 배타적 논리합(XOR)은 학습이 불가능하였기 때문에 한동안 그 발전이 진행되지 못하였다. 그러나 이를 증명한 Minsky & Papert (1969)의 우려와는 달리 다층 퍼셉트론을 사용할 경우 단층 퍼셉트론의 한계를 극복할 수 있음이 증명되어 이후 지속적으로 발전해오고 있다.

○ 다층신경망은 하나 혹은 그 이상의 은닉층이 있는 피드포워드 신경망(feedforward neral network)이다. 일반적으로 이 시경망은 신호의 공급을 담당하는 입력층(Input Layer)과 계산을 담당하는 하나 이상의 은닉층(Hidden Layer), 계산 뉴런들로 이루어진 출력층(Output Layer) 입력신호는 뉴런에서의 전달과 같이 한 층씩 순방향으로 전파된다. [그림 3.4.5]에 다층신경망의 한 예를 나타내었다. 이 그림에는 두 개의 은닉층이 존재한다. 하나의 은닉층을 사용할 경우 입력 신호의 모든 연속 합수를 표현할 수 있으며, 두 개의 은닉층으로는 불연속 함수도 표현할 수 있다.

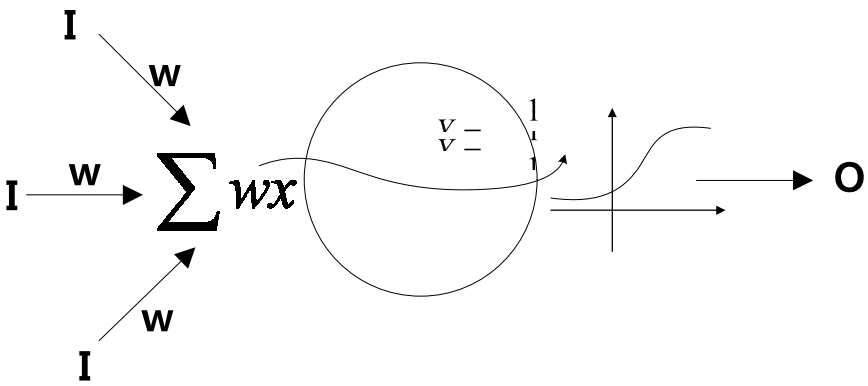


[그림 3.4.5] 두 개의 은닉층이 있는 다층 신경망

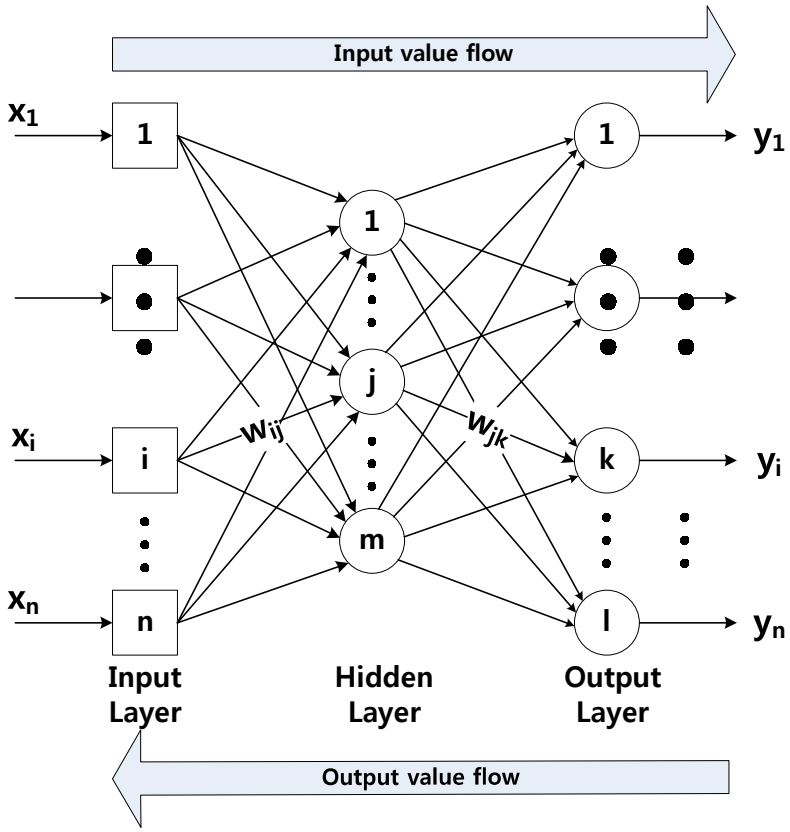
○ 다층신경망에는 100 가지 이상의 서로 다른 학습 알고리즘이 적용될 수 있지만 일반적으로 역전파 방식을 많이 사용한다. 이 방식은 Bryan & Ho (1969)에 의해 제시되었는데 당시의 컴퓨팅 기술로는 많은 계산을 빠르게 해낼 수 없었기 때문에 크게 주목을 받지 못하였다. 그러나 이후 컴퓨팅 기술의 발달에 의해 1980년대 중반부터 빠르게 그 사용 영역을 넓혀갔다.

○ 다층신경망의 학습은 퍼셉트론과 유사하게 진행된다. 입력 패턴의 훈련 집합을 신경망에 제시하면, 신경망은 그 출력 패턴을 계산하고 목표값(target value)과의 오차를 계산하고 이 오차를 계산하기 위해 가중치를 조절하게 된다. 이 때 조절되는 가중치들은 히든 레이어 내에 지속적으로 저장되고 업데이트된다.

○ 일반적으로 역전파 신경망은 세 개 또는 네 개의 층이 있는 다층 신경망으로 구성된다. 각 층들 사이의 뉴런들은 완전히 연결되어 있는 상태이다. 하나의 뉴런에서 진행되는 계산 과정은 [그림 3.4.6]과 같이 간략하게 나타낼 수 있다.



[그림 3.4.6] 은닉층 내에서의 계산 과정



[그림 3.4.7] 역전파 신경망

○ 역전파인공신경망을 위한 학습 법칙의 도출은 [그림 3.4.7]과 같은 세 개의 층이 있는 신경망으로부터 가능하다. [그림 3.4.7]에서 i, j, k는 각각 입력층, 은닉층, 출력층의 뉴런을 의미하며 n, m, l은 각 층에서의 뉴런의 개수를 의미한다. 입력값 x_n는 왼쪽에서 오른쪽으로, 오차 e_l 는 오른쪽에서 왼쪽으로 전달된다. w_{ij}는 입력층 뉴런 i와 은닉층 뉴런 j 사이의 연결 강도에 대한 가중치를 의미하며, w_{jk}는 은닉층과 출력층 사이의 가중치를 의미한다.

다. 인공신경망의 적용

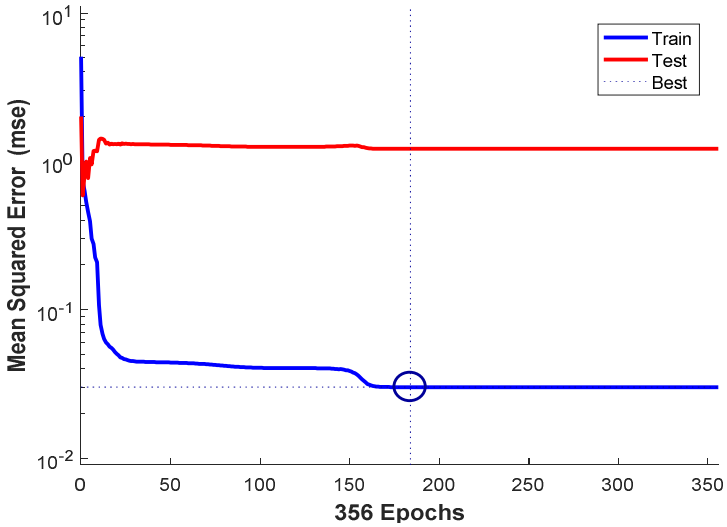
○ 본 연구에서는 전 절에서 언급한 역전파 신경망을 구축하여 슬래브 진동성능 평가를 수행하도록 하였다.

○ 본 연구에서 수행한 진동 실험 결과는 고유진동수와 최대 가속도로 도출되었으며, 일반적인 슬래브의 진동평가기준은 고유진동수와 최대 가속도를 통해 그 성능을 평가하게 되므로, 두 개의 아웃풋에 대한 인공신경망을 구축하였다.

○ 전 절에서 검토한 변수들로 구축한 data set은 총 30개로, 학습에 사용된 data set은 총 80%로 24개 였으며, 시험과 검정에는 총 6개의 data set이 사용되었다.

○ Hidden layer의 수는 10개로 결정하였다.

○ 학습 결과 총 356번의 이터레이션을 통해 신경망이 구축되었다. 학습 상황에 따른 Mean Squared Error를 [그림 3.4.8]에 나타내었다.



[그림 3.4.8] 학습에 따른 Mean squared error

○ 인공신경망이론을 이용한 진동성능 평가 방법의 검토를 위하여 슬래브 실험체에 대한 진동실험을 수행하고, 재료 강도와 구조 형태 변수 입력에 대한 고유진동수 및 최대가속도 출력을 검토하였다.



(a) Solid slab



(b) Aged slab

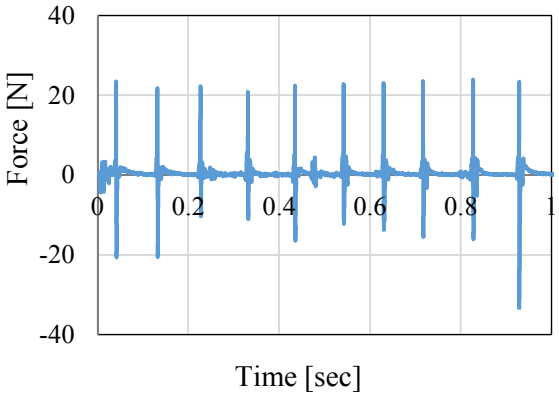


(c) Impact loading

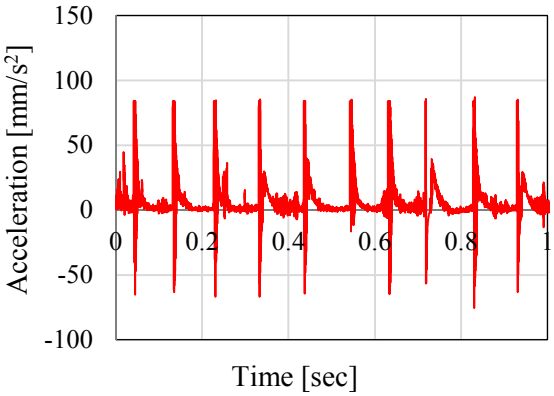


(d) Column slab connection

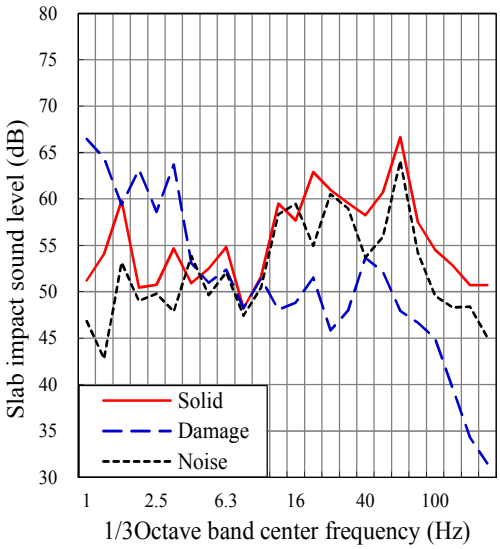
[그림 3.4.9] 슬래브 진동 실험



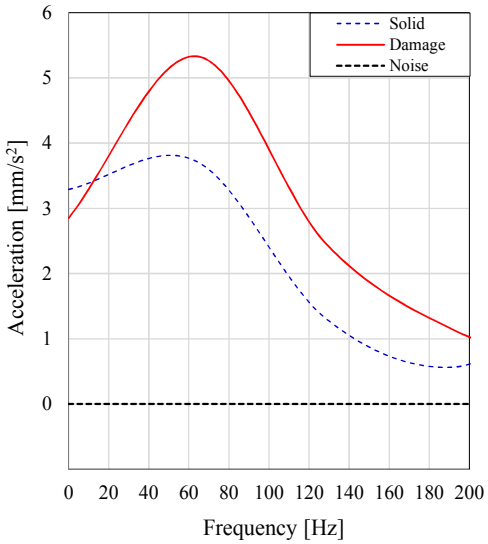
(a) Impact hammer force



(b) Acceleration response



(c) Sound pressure form slab vibration test



(d) Acceleration spectrum from slab vibration

[그림 3.4.10] 슬래브 진동 실험 결과

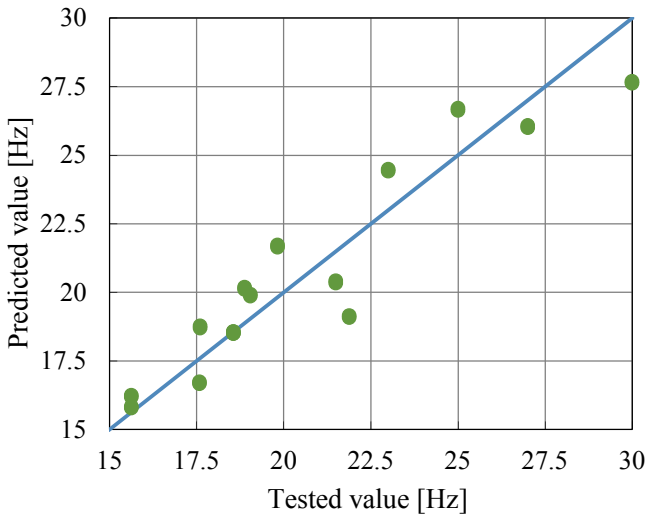
○ 구축된 인공신경망을 활용하여 주어진 상황에 대해 고유진동수와 최대가속도를 재검토한 결과를 [그림 3.4.11]과 [그림 3.4.12]에 나타내었다.

○ 이상의 과정을 역으로 목표 바닥진동 성능을 입력하여 이를 충족시키는 슬래브 두께가 출력됨을 확인하였다.

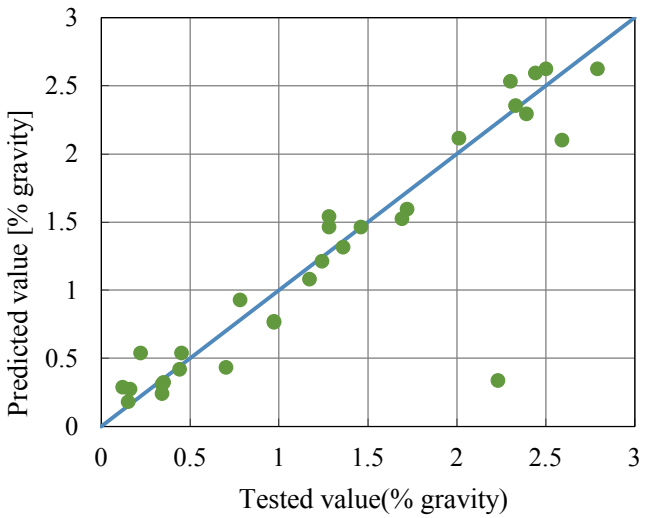
○ [그림 3.4.13]은 구축한 진동실험 data의 평균값인 고유진동수 20Hz를 목표 성능으로 설정하였을 때 출력된 콘크리트 압축강도 $f_{ck}=24\mathrm{MPa}$에 대한 슬래브 두께이다.

○ 고유진동수 목표 성능 20Hz에 대한 슬래브 최소 두께 출력 결과를 <표 3.4.3>에 콘크리트강도, 슬래브 양 변의 크기에 대하여 정리하였다.

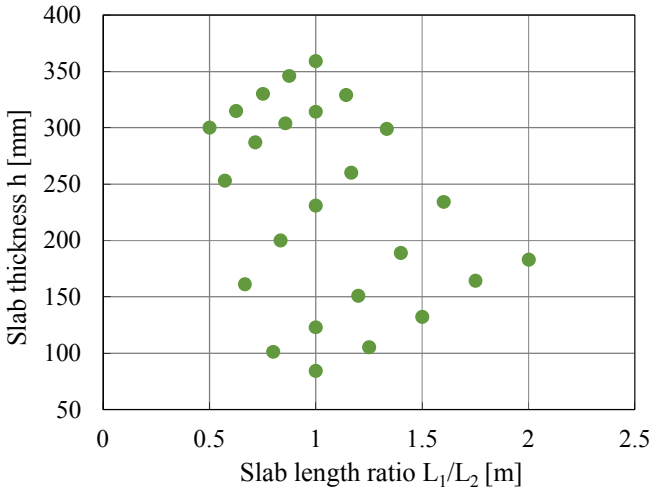
○ 이상의 슬래브 두께 출력 결과는 고유진동수만을 성능 목표로 입력한 것으로, 논란이 되고 있는 중량 충격음 평가 뿐 아니라 진동에 대한 평가 기준을 재정립하고 데이터 및 변수 보완이 마련될 때, 합리적인 슬래브 두께 출력이 가능할 것으로 기대된다.



[그림 3.4.11] 인공신경망을 사용한 고유진동수 추정



[그림 3.4.12] 인공신경망을 사용한 최대가속도 추정



[그림 3.4.13] 목표성능 $f_n = 20\,\mathrm{Hz}$에 대하여 출력된 슬래브 두께 h ($f_{ck} = 24MPa$)

<표 4.4.3> 슬래브 양 변의 크기 및 콘크리트 압축강도에 따른 슬래브 두께 출력

f_{ck} [MPa]	L_2 [m]	목표 진동수 성능 20Hz에 대한 슬래브 두께 [mm]				
		$L_1[m]$				
		4	5	6	7	8
18	4	133	149	186	225	242
	5	136	156	187	218	233
	6	145	171	193	213	241
	7	188	213	232	258	293
	8	262	300	321	332	340
20	4	125	136	160	191	213
	5	120	131	154	192	225
	6	131	151	183	221	267
	7	187	230	268	299	327
	8	284	329	351	355	353
22	4	110	123	144	170	186
	5	109	122	142	175	217
	6	139	162	191	234	293
	7	215	258	291	317	340
	8	293	324	349	361	361
24	4	84	105	132	164	183
	5	101	123	151	189	234
	6	161	200	231	260	299
	7	253	287	304	314	329
	8	300	315	330	346	359
26	4	63	88	124	166	198
	5	101	138	177	223	269
	6	192	241	269	283	301
	7	272	297	310	314	316
	8	300	310	320	327	339
28	4	61	86	132	186	228
	5	120	173	216	253	288
	6	220	263	285	292	301
	7	273	293	305	311	313
	8	292	302	311	318	323

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

세부 연구 목표 (연구계획서의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
• DB 구축 작업	10	100	• 기존 진동실험 DB 11개 수집 • 신규 진동실험 DB 4개 구축
• Data 기반의 진동특성 주요 설계요소 간 상관관계 도출	10	100	• 진동이론 분석 및 등가모델 검토 • 국내외 진동평가 기준 고찰
• DB와 신경망 이론의 맵핑	10	100	• 진동실험 DB 및 진동 이론을 바탕으로 입력 변수 추출
• 다차원 불확실성 변수 분석을 위한 해석적 연구	10	100	• 불확실 변수의 통계적 모델 적용 • 바닥진동 해석을 위한 유한요소 모델 구축 • 재료 시험을 위한 실험체 제작, 한 달 이내 실험 완료 계획
• Big DB 처리 방법에 대한 실험적 검증	10	100	• 현행 설계기준과 개발된 기준과의 비교 검증을 위한 바닥진동 성능 평가 실험 • 불확실성 변수 수준별 진동특성 산정 방법 구축 • Back Analysis를 통한 변수별 상관관계 도출
• 데이터기반의 진동성능 평가 방법 제시	30	100	• 데이터기반의 진동성능 평가방법 제시 • 데이터베이스 수정 및 보완 • 신경망이론을 도입한 학습 결과를 통해 설계 변수의 특성 확정 • 기존 설계안과의 비교 검토을 통한 최적화 • 새로운 설계안의 도출
• 데이터 기반의 진동 성능평가 방법을 도입한 효율적인 바닥두께 제안	20	100	• 입력 변수가 다양한 데이터 기반의 진동 성능평가 방법을 도입한 효율적인 바닥두께 방법 제시
합계	100	100%	

○ 연구계획서 및 연차실적계획서를 중심으로 당 연구의 정성적, 정량적 목표 달성도를 기술하였다.

○ 당 연구과제는 2**개의 핵심 연구 성과**로 구성되어 있으며, 각 연구 성과의 달성도는 **논문 및 특허로 검증 평가**되도록 계획되었다.

○ 핵심성과 1 : 다차원 변수가 고려된 수직진동 평가 방법 개발

<table>
<tr><td>정의</td><td colspan="5">현행 수직진동성능 평가기준의 경우 다차원적 변수(사용재료별, 구조형식별 등)가 적용된 평가 방법이 존재하지 않는다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 데이터 기반형 다차원 변수가 고려된 수직 진동 평가방법을 개발한다.</td></tr>
<tr><td>목적</td><td colspan="5">현행 수직진동평가 방법은 국내외 적으로 명확하게 정의 지정된 가이드라인이 없다. 이는 평가방법 및 적용기준에 따라 수직진동에 대한 평가 성능이 달라지는 원인이다. 또한 현행 평가방법이 일부 국한된 실험데이터에 의존해서 만들어졌기 때문이다. 본 연구를 통해 얻고자 하는 성과는 범용성 및 정확성이 확보된 평가기술을 얻는 것이다.</td></tr>
<tr><td>성능목표</td><td colspan="5">(기존기술 수준)
거주자의 거동으로 발생한 바닥진동에 대한 구체적인 평가 방법이 마련되어 있지 않으며, 바닥진동 제한치도 기준마다 상이하여 결과의 편차가 크며, 예측값과 실측값의 오차율이 크다.
(개발기술 수준)
본 연구를 통해 예측방법론을 새롭게 제시할 것이며, 예측값과 실측값의 오차범위를 10% 이내로 향상시킬 것임.</td></tr>
<tr><td>성과달성
책임자
(소속기관)</td><td colspan="5">이민정 (한양대학교 산학협력단)</td></tr>
<tr><td>소요기간</td><td colspan="5">’15.06 ~’17.06 (2년0개월, 1~2년차)</td></tr>
<tr><td>성과달성
확인방법</td><td colspan="5">논문 제출을 통한 관련연구자들의 평가 및 연구데이터</td></tr>
<tr><td rowspan="6">성과달성에
따른 정량적
성과
[목표]</td><td>특허 출원/등록</td><td>1건</td><td rowspan="6">성과달성에
따른 정량적
성과
[달성]</td><td>특허 출원/등록</td><td>1건</td></tr>
<tr><td>논문</td><td>[학술지:2건]</td><td>논문</td><td>[학술지:3건]</td></tr>
<tr><td>저작</td><td>0건</td><td>저작</td><td></td></tr>
<tr><td>S/W</td><td>0건</td><td>S/W</td><td></td></tr>
<tr><td>신기술</td><td>0건</td><td>신기술</td><td></td></tr>
<tr><td>기타</td><td>0건</td><td>기타</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td colspan="5">(논문 성과 명)
• 거주자의 거동으로 발생하는 바닥진동의 층간 전달 및 바닥충격음의 음압레벨 특성 평가, 한국소음진동공학회 논문집, 27(1)
• 표준 중량 충격원과 실충격원에 대한 공동주택의 바닥진동 및 바닥충격음 음압레벨 특성, 대한건축학회 논문집, 33(6)
• 바닥 진동 거동 및 충격원 특성을 고려한 바닥 중량 충격음 평가방법 고찰, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 21(4)
(특허 출원)
• 층간소음을 저감하기 위한 건축물의 구조 부재 제안 시스템 및 방법</td></tr>
</table>

○ 핵심성과 2 : 개발된 진동 평가 방법을 활용한 슬래브두께 제시

<table>
<tr><td>정의</td><td colspan="5">당 연구과제에서 제시된 수직 진동 평가방법의 효율적 적용을 위해서는 사용재료별, 구조형식별 다양한 변수조건을 적용했을 경우 효율적인 슬래브 두께를 제시할 수 있는 방법론이 도출되어야 한다. 이는 기존 가이드라인에서 제시되고 있는 수식형태가 아닌 인공학습을 통한 누적된 DB를 바탕으로 사용자 입력변수에 맞는 최적의 슬래브 두께를 산정하는 방식이다.</td></tr>
<tr><td>목적</td><td colspan="5">현행 설계기준에서 제시하고 있는 수식형태의 진동평가 방법은 제한된 변수조건으로 인해 예측값과 실측값간의 오차율이 크며 변동성이 매우 높다. 이를 해결하기 위한 방법은 다차원 변수가 고려된 합리적인 예측방법이 필요하며, 당 연구과제에서 다차원 입력변수를 해결할 수 있는 수직진동평가 방법을 통해 최적의 슬래브두께를 산정하고자 하는데 목적이 있다.</td></tr>
<tr><td>성능목표</td><td colspan="5">(기존기술 수준)
현행 설계기준에서는 설계단계에서 슬래브의 수직 진동특성을 구조성능 기반의 사용성 검토로 이루어진다. 이는 진동특성이 반영된 설계방법이 아니며, 다양한 조건하에서 발생하는 수직진동특성을 반영하기 어렵다.
(개발기술 수준)
개발된 평가방법을 사용할 경우 다양한 환경상태를 설계자 스스로 반영할 수 있으며, 이는 단순 수식형태의 진동 평가 방법에 비해 보다 정확한 평가방법이 될 것이다.</td></tr>
<tr><td>성과달성
책임자
(소속기관)</td><td colspan="5">이민정 (한양대학교 산학협력단)</td></tr>
<tr><td>소요기간</td><td colspan="5">’16.06 ~’17.06 (1년0개월, 2년차)</td></tr>
<tr><td>성과달성
확인방법</td><td colspan="5">논문 제출을 통한 관련연구자들의 평가 및 연구데이터</td></tr>
<tr><td rowspan="6">성과달성에
따른 정량적
성과
[목표]</td><td>특허 출원/등록</td><td></td><td rowspan="6">성과달성에
따른 정량적
성과
[달성]</td><td>특허 출원/등록</td><td></td></tr>
<tr><td>논문</td><td>[학술지:1건]</td><td>논문</td><td>[학술지:0건]</td></tr>
<tr><td>저작</td><td>0건</td><td>저작</td><td></td></tr>
<tr><td>S/W</td><td>0건</td><td>S/W</td><td></td></tr>
<tr><td>신기술</td><td>0건</td><td>신기술</td><td></td></tr>
<tr><td>기타</td><td>0건</td><td>기타</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td colspan="5">(논문 성과)
※정량적 성과목표는 핵심성과 1에서 달성하였으며, 평가 방법 및 슬래브 두께 검토 관련 논문 진행 예정임.</td></tr>
</table>

○ 당 연구과제의 정량적 연구성과 목표 및 달성도는 다음과 같다.

구분			목표 (건수)	달성 (건수)	달성도 (%)	비고
국외 논문 게재	SCI					
	비SCI					
	계					
국내 논문 게재	SCI					
	비SCI		3	3	100	
	계					
특허 출원	국내		1	1	100	
	국외					
	계					
특허 등록	국내					
	국외					
	계					
인력 양성	석사					
	박사					
	계					
기술 이전	계약 건수					
	계약액					
	징수액					
국제 표준화	기고서 제출					
	기고서 채택					
	표준안 채택					
국내 표준화	기고서 제출					
	기고서 채택					
	표준안 채택					
등록·기탁 대상 성과물	보고서 원문					
	연구시설·장비					
	기술요약정보					
	생명자원	생명정보				
		생물자원				
		신품종				
	소프트웨어					
	화학물					
기타	시제품					
	성과 홍보					
	일자리 창출					

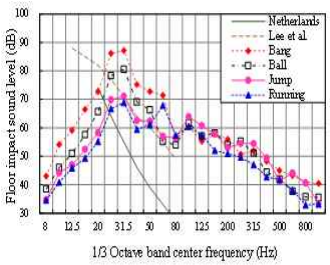
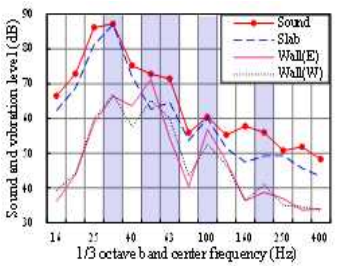
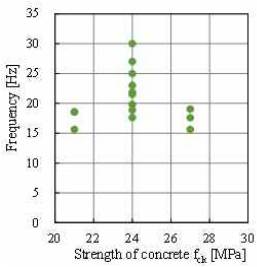
2. 관련 분야 기여도

가. 연구 성과의 국내외 차별성 및 우수성

○ 핵심성과 1 : 다차원 변수가 고려된 수직진동 평가 방법 개발

- 성과 정의 : 다차원 변수가 고려된 수직진동 평가 방법 개발에 관한 연구
- 성과 목표 : 현행 수직진동성능 평가기준의 경우 다차원적 변수(사용재료별, 구조형식별 등)가 적용된 평가 방법이 존재하지 않는다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 데이터 기반형 다차원 변수가 고려된 수직 진동 평가방법을 개발한다.

- 성과의 기술적 가치

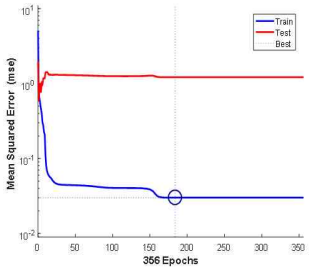
주요 성과	다차원 변수가 고려된 수직진동 평가 방법 개발에 관한 연구 •기존 공동주택 바닥진동 DB 11개와 바닥충격음 DB 4개를 수집하고, 바닥진동과 바닥충격음이 연계된 DB 구축을 위하여 현장 및 실험실 진동 실험을 수행하여 5개의 DB를 추가 구축하였다. •진동이론과 바닥진동 및 바닥충격음 평가 기준을 고찰하고, 구축된 DB를 분석하여 바닥진동과 바닥충격음 특성을 분석하고, 현행 기준에서 고려하지 않는 지배진동수 대역인 저주파수 대역을 고려할 필요가 있음을 확인하였다. •진동 기준 및 DB를 분석하여 바닥진동 및 바닥충격음 영향 요소를 파악하고 입력 변수를 추출하여 신경망 이론 맵핑으로 다차원 변수를 고려한 수직진동 평가 및 슬래브 두께 검토 방법을 마련하였다.
	  
기술적 가치	•바닥진동과 바닥충격음이 연계된 DB는 내력벽 영향 분석 보완하여 전용면적 및 평면 유형이 유사한 세대의 계획 단계에서 바닥진동 및 바닥충격음 예측 자료로 활용할 수 있다. •관련 기술을 모두 포괄할 수 있는 방대한 기술 DB(향후 Big Data 활용)와 이를 능동적으로 분석 해결 할 수 있는 지능화 기술(다층인공신경망)을 접목시킨 평가방법론은 현행 기준의 문제점 및 보완점을 실시간으로 비교 검증할 수 있는 기술적 기대성과를 기대할 수 있다. •또한, 건설 산업 전반에 있어서 새로운 재료 및 공법개발 시 설계방법론 개발에 큰 도움이 될 것이다.

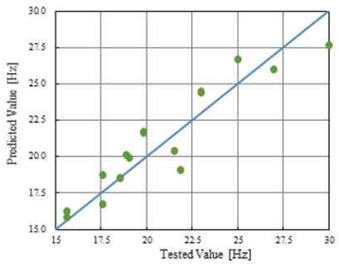
○ 핵심성과 2 : 개발된 진동 평가 방법을 활용한 슬래브두께 제시

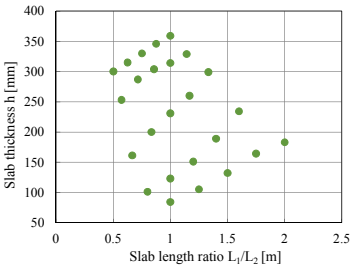
- 성과 정의 : 다차원 변수가 고려된 수직진동 평가 방법을 활용한 슬래브두께 제시방법 개발
- 성과 목표 : 현행 설계기준에서 제시하고 있는 수식형태의 진동평가 방법은 제한된 변수조건으로 인해 예측값과 실측값간의 오차율이 크며 변동성이 매우 높다. 이를 해결하기 위한 방법은 다차원 변수가 고려된 합리적인 예측방법이 필요하며, 당 연구과제에서 다차원 입력변수를 해결할 수 있는 수직진동평가 방법을 통해 최적의 슬래브두께를 산정하고자 하는데 목적이 있다.

- 성과의 기술적 가치

주요 성과	다차원 변수가 고려된 수직진동 평가 방법을 활용한 슬래브두께 제시방법 개발
	●신경망 이론에 맵핑된 입력 변수에 대한 고유진동수와 최대 가속도와 기대 성능에 대한 슬래브 두께 기대치를 결정하였다. ●진동성능 및 슬래브 두께 결정 방법을 검토하기 위하여 재료 강도와 슬래브 형태 및 규모를 변수로 하는 슬래브 실험체에 대한 진동 실험을 수행하고, 그 적용 범위를 확대하고자 하였다.







기술적 가치	●공동주택의 강화된 기준인 슬래브 두께 210 mm를 적용한 경우에도 바닥충격음 문제가 발생하고 있다. 본 연구의 진동 평가 및 슬래브 검토 방법은 닥진동과 바닥충격음 차단 성능을 고려하여 슬래브 두께를 합리적으로 결정할 수 있어 현행 기준의 문제점 및 보완점을 실시간으로 비교 검증할 수 있는 기술적 기대성과를 기대할 수 있다. ● 또한, 건설 산업 전반에 있어서 새로운 재료 및 공법개발 시 활용될 수 있으며, 전용면적과 평면 유형에 따른 바닥진동 및 바닥충격음 DB가 누적될 경우 바닥진동 및 바닥충격음 차단을 위한 합리적인 바닥구조 개발에 기여하고, 나아가 주거 쾌적성을 향상시키는 데 큰 도움이 될 것이다.

나. 연구개발 성과의 기술적 효과 분석

○ 당 연구과제는 바닥진동과 바닥충격음이 연계된 DB는 내력벽 영향 분석 보완하여 전용면적 및 평면 유형이 유사한 세대의 계획 단계에서 바닥진동 및 바닥충격음 예측 자료로 활용할 수 있다.

○ 다변수 실험으로 보완 · 검증된 진동평가 방법은 진동평가 기준의 척도가 될 수 있다.

○ 마지막으로 아파트의 주거 쾌적성 향상을 기대할 수 있으며,

○ 전용면적과 평면 유형에 따른 바닥진동 및 바닥충격음 DB가 누적될 경우, 바닥진동 및 바닥충격음 차단을 위한 합리적인 바닥구조 개발에 기여할 것이다.

다. 연구개발 성과의 경제적 효과분석 (시장창출, 고용창출 등)

○ 기술적 측면

- 관련 기술을 모두 포괄할 수 있는 방대한 기술 DB(향후 Big Data 활용)와 이를 능동적으로 분석 해결 할 수 있는 지능화 기술(다층인공신경망)을 접목시킨 평가방법론은 현행 기준의 문제점 및 보완점을 실시간으로 비교 검증할 수 있는 기술적 기대성과를 기대할 수 있다.
- 또한, 건설 산업 전반에 있어서 새로운 재료 및 공법개발 시 설계방법론 개발에 큰 도움이 될 것이다.

○ 경제적 · 사회적 측면

- 국내 층간소음 문제는 사회적 문제화되고 있으며, 수직 진동에 의해 유발되는 층간소음의 경우 진동원(거주자의 거동으로 인한 진동전달음 등)을 제거할 수 없기 때문에 설계단계에서 고려되어야 함에도 불구하고 그 방법론이 명확하지 않다.
- 이에 본 연구에서 개발 및 제시하고자 하는 수직 진동 영향 평가 방법 및 효율적인 슬래브두께 산정방법은 국내 대다수를 차지하고 있는 주거형태인 아파트의 주거 쾌적성 향상에 기여하여 사회 · 경제 전반에 영향을 미칠 것으로 기대된다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

○ 과학적 연구개발 성과

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일
1	거주자의 거동으로 발생하는 바닥진동의 층간 전달 및 바닥충격음의 음압레벨 특성 평가	한국소음진동공학회 논문집	이민정	제27권 제1호	대한민국	한국소음진동공학회	비SCI	2017.02.20
2	표준 중량 충격원과 실충격원에 대한 공동주택의 바닥진동 및 바닥충격음 음압레벨 특성	대한건축학회 논문집	이민정	제33권 제6호	대한민국	대한건축학회	비SCI	2017.06.30
3	바닥 진동 거동 및 충격원 특성을 고려한 바닥 중량 충격음 평가방법 고찰	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	이민정	제21권 제4호	대한민국	한국구조물진단유지관리공학회	비SCI	2017.07.01

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	대한건축학회 추계학술 발표대회	이민정	2015.10.29	서울 더케이호텔	대한민국
2	대한건축학회 춘계학술 발표대회	이민정	2016.04.30	서울 숭실대학교	대한민국
3	대한건축학회 추계학술 발표대회	이민정	2016.10.04	벡스코	대한민국
4	대한건축학회 춘계학술 발표대회	이민정	2017.04.28	해비치호텔&리조트 제주	대한민국

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록				기여율	활용여부
			출원인	출원일	출원번호	등록번호*	등록인	등록일	등록번호	등록번호*		
1	층간소음을 저감하기 위한 건축물의 구조부재 제안 시스템 및 방법	대한민국	한양대산학협력단	2017.05.08.	10-2017-0057334						100	X

○ 최근 구조물의 성능 기반 설계가 주요 설계 개념으로 대두되고 있으며 대형 및 비정형 구조물의 수요가 증대됨에 따라, 고성능 재료의 개발 및 사용 범위가 확장되고 있다. 이러한 건설기술의 발전은 설계기준의 변화를 동반하여야 하며, 이는 현행 설계기준의 체계를 바꿔야 함을 의미한다.

○ 이처럼 실시간 변화되는 건설기술에 능동적으로 대응하기 위해서는 Open source를 기반으로 설계기준이 변화되어야 한다. 특히 그간 진행되어온 설계기준 개정작업으로 누적된 실험 해석 Data를 충분히 활용할 경우 설계기준의 능동적 변화가 가능할 것으로 판단된다.

○ 이에 따라 본 연구의 결과는 다음과 같이 활용할 수 있을 것이다.

- 본 연구과제는 제한적 데이터(제한적 실험결과 및 해석결과 등)를 기반으로 정립된 기존 기준식의 문제점을 무한한 데이터를 기반으로 제약 없는 평가방법을 개발하고자 하는 연구임.
- 이러한 연구방법론은 현재 주목을 받고 있는 Big Data관련 연구에 일환이며, 이러한 연구 토대는 관련 연구 분야의 무한한 발전가능성을 제공할 것임.
- Data의 간단한 입력 방법으로 원하는 결과를 도출할 수 있는 평가방법으로서 진동평가 기준의 척도가 될 수 있음
- 평가방법의 유연도가 높아(Open source 기반) 관련 분야 및 유사분야 연구에 파급력이 높아 향후 활용도가 우수한 연구 성과가 될 것이다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

○ DIN 4150-1 (2001)

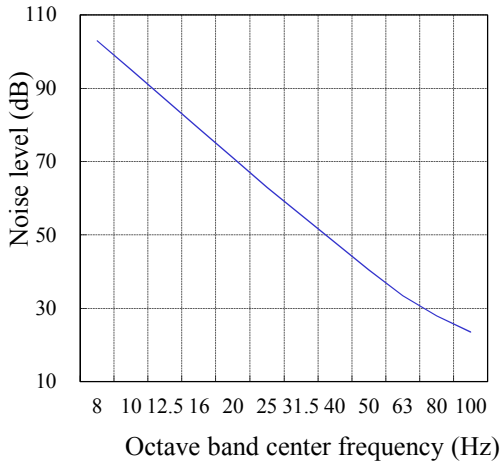
- Structural vibration - Predicting vibration parameters
- 발파, 공사장에서 발생한 진동, 교통, 기계실 등에서 발생하는 진동 등 대상
- 각 진동에 따라 인접한 곳에서 발생하여 전달된 진동 및 진동 평가량 예측 방법 제시
  - 지표면 진동 평가
  - 조화 진동의 저진동수 대역에서 건물로 전달되는 진동은 단자유도 모델의 전달함수를 이용하여 근사적으로 설명.
- DIN 4150-2에서 활용.

○ DIN 4150-2 : 1999

- Structural vibration - Human exposure to vibration in buildings
- 건설 작업으로 발생하는 진동 등과 같이 건물 내에서 인체에 영향 주는 진동 평가 규정하고 있음.
- 대상 진동 진동수 범위는 1 Hz ~ 80 Hz.
- 진동 평가에 고려해야하는 진동 변수
  - 진동 규모
  - 진동수
  - 폭로 시간
  - 폭로 시간대 (주간, 야간) 및 빈도, 진동 유형
- 진동 평가에 고려해야하는 수진자(인체) 요인
  - 개인의 정신적 신체적 건강 상태
  - 진동 폭로 때의 개인의 활동 (움직임) 유형
  - 진동에 대한 적응도
  - 진동원과의 관계
  - 생활 조건과 관련된 기대치
- 발파, 공사장에서 발생한 진동, 교통, 기계 등에서 발생하는 진동 등에 대하여 최대치와 평가치를 각각 진동속도와 지속시간을 변수로 산정되는 KB_{Fmax}, KBFTr값으로 산정하여 평가.

○ DIN 45680 : 1997

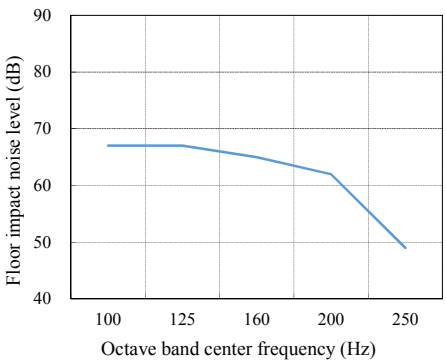
- Measurement and evaluation of low-frequency environmental noise
- 1/3옥타브밴드 중심주파수 10 Hz ~80 Hz의 저주파수 대역의 건물 내에서 공기전달음과 구조전달음에 대한 평가 기준 제시.



[저주파 소음의 청감 한계 (DIN 45680 : 1997)]

○ ISO 717-2 : 2013

- Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements- part 2 : Impact sound insulation
- 태핑머신을 이용한 경량 바닥 충격음 평가 방법에 대한 규정.
- 기준 곡선을 1dB씩 수직 평행 이동하여 기준 곡선을 상회하는 측정값이 10dB을 넘지 않도록 최저 위치로 이동시켰을 때 500Hz에 해당하는 기준곡선의 값에서 5dB을 차감한 값을 단일 수치 평가량으로 결정.



[바닥충격음 레벨 평가 기준 곡선 (ISO 717-2 : 2013)]

○ ISO 4866 : 2010

- Mechanical vibration and shock - Vibration of fixed structures - Guidelines for the measurement of vibration and evaluation of their effects on structure vibration
- 구조물 진동의 측정 방법 규정.
- 대상 진동수 범위 0.1 Hz ~ 500 Hz
- 측정 시스템
  - Transducers
  - Signal-conditioning equipment
  - Data recording system
- 진동원에 대한 구조물 응답 범위 (ISO 48966 : 2010)

Vibration source	Frequency range[a] Hz	Amplitude range μm	Particle velocity range mm/s	Particle acceleration range m/s²	Time characteristic
Traffic road, rail, ground-borne	1 to 100	1 to 200	0,2 to 50	0,02 to 1	C[b]/T[c]
Blasting vibration ground-borne	1 to 300	100 to 2 500	0,2 to 100	0,02 to 50	T
Air over pressure	1 to 40	1 to 30	0,2 to 3	0,02 to 0,5	T
Pile driving ground-borne	1 to 100	10 to 50	0,2 to 100	0,02 to 2	T
Machinery outside ground-borne	1 to 100	10 to 1 000	0,2 to 100	0,02 to 1	C/T
Machinery inside	1 to 300	1 to 100	0,2 to 30	0,02 to 1	C/T
Human activities inside	0,1 to 30	5 to 500	0,2 to 20	0,02 to 0,2	T
Earthquakes	0,1 to 30	10 to 10^5	0,2 to 400	0,02 to 20	T
Wind	0,1 to 10	10 to 10^5	—	—	T
Acoustic (inside)	5 to 500	—	—	—	C/T

NOTE 1 The ranges quoted are extreme, but they still indicate the values which may be experienced and which may have to be measured (see also Note 2). Extreme ranges of displacement amplitudes and frequencies have not been used to derive particle velocities and accelerations. Values lower than 0,2 mm/s can also be considered. For building security and human annoyance, these values may be insignificant, but for sensitive equipments they are significant.

NOTE 2 Vibration values within the given ranges may cause concern. There are no standards which cover all varieties of structures, conditions and durations of exposure, but many national codes associate the threshold of visible (or otherwise noticeable) effects with peak particle velocities at the foundation of a structure of more than a few millimetres per second. A significant damage is linked to peak particle velocities of several hundred millimetres per second. Vibration levels below the threshold of human perception may be of concern in delicate and industrial processes.

[a] Ranges quoted refer to the response of structures and structural elements to a particular type of excitation and are indicative only.

[b] Continuous.

[c] Transient.

○ ISO 10052 : 2004

- Acoustics - Field measurements of ariborne and impact sound insulation and of service equipment sound - Survey method
- 다음 사항에 대한 현장 측정 방법 규정
  - 내실 사이 공기전달음 차단 성능
  - 바닥충격음 차단 성능
  - 건물면의(facade) 공기전달음 차단 성능
  - 내실의 설비소음 음압레벨
- 바닥충격음 차단 성능 측정 시 진동원으로 standard tapping machine 사용.
- 마이크로폰 설치 조건
  - 각 마이크로폰과 내실 경계 사이 최소 거리 0.5 m
  - 각 마이크로폰 사이 음원 사이 최소 거리 1.0 m
- 태핑머신에 의한 바닥충격음은 간이 측정기로 수음실 중앙에서 측정
- 측정 주파수 범위
  - 옥타브밴드 중심 주파수 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1,000 Hz, 2,000 Hz에 대해 측정

제7장. 연구개발성과의 보안등급

○ 해당사항 없음

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

○ 해당사항 없음

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

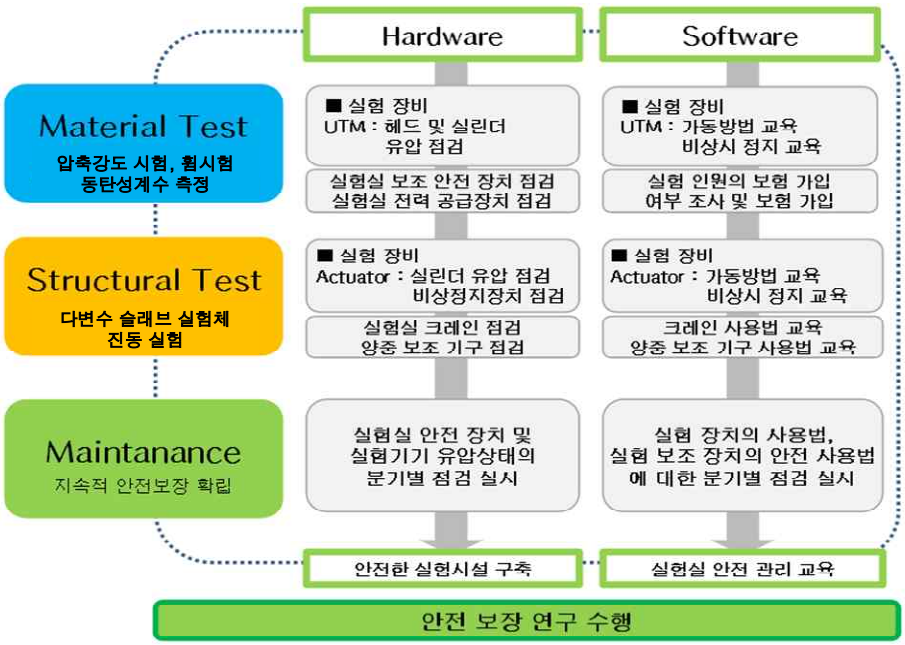
제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 연구실 안전조치 이행

보험명	보상내용	보험가입기간	대상	주관부서
연구활동 종사자 상해보험	연구활동중 발생되는 사고에 대하여 보상 - 사망시 최대 1억원 - 상해시 최대 1천만원 - 후유장해발생시 장애등급별로 약관보상	매년1년단위로 갱신계약함 (구매입찰방식)	학부생, 대학원생	관재팀
			연구원	산학협력단 연구진흥팀

○ 본 연구의 수행과정에 있어서 주요 목표인 다차원 입력변수가 고려된 수직진동평가방법의 개발은 적절한 실험 과정을 통해 검증되어야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구의 수행기간 동안 다음과 같은 실험 수행중의 안전조치를 이행하였다.

○ 안전조치 이행 계획은 크게 하드웨어적 안전조치 이행 계획과, 소프트웨어적 안전조치 이행 계획으로 나누어진다. 하드웨어적 안전조치는 실험실 내부의 기자재의 지속적인 관리이며 소프트웨어적 안전조치는 참여연구원의 안전 교육에 그 목적이 있다. 체계적인 안전조치를 위해 본 연구에서 수행한 안전조치 이행 내용을 아래 그림에 나타내었다. 이에 기반한 각 모듈에 대한 점검표를 연구실과 실험실에 비치하여, 정기적인 관리가 가능하도록 하였으며, 실험 수행 시에도 점검을 할 수 있도록 하였다.



[실험실 안전조치 이행]

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분(논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부(단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항(SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	거주자의 거동으로 발생하는 바닥진동의 층간 전달 및 바닥충격음의 음압레벨 특성 평가	한양대	주저자/교신저자	한국소음진동공학회 논문집		2017.02.20	단독 사사	
2	논문	표준 중량 충격원과 실충격원에 대한 공동주택의 바닥진동 및 바닥충격음 음압레벨 특성	한양대	주저자/교신저자	대한건축학회 논문집		2017.06.30	단독 사사	
3	논문	바닥 진동 거동 및 충격원 특성을 고려한 바닥 중량 충격음 평가방법 고찰	한양대	주저자/교신저자	한국구조물진단유지관리공학회 논문집		2017.07.01	단독 사사	
4	특허 출원	층간소음을 저감하기 위한 건축물의 구조 부재 제안 시스템 및 방법	한양대	발명인	대한민국		2017.05.08.(출원일)	단독 사사	

제11장. 기타 사항

○ 해당사항 없음

제12장. 참고 문헌

1. AIJ (1991), Guidelines for the Evaluation of Habitability to Building Vibration, AIJ, Japan.
2. AIJ (2004), Guidelines for the Evaluation of Habitability to Building Vibration, AIJ, Japan.
3. Bryson, A.E. and Ho, Y.C. (1969). Applied Optimal Control: optimization, estimation, and control , Blaisdell Pub. Co., New York.
4. CSA (1989), Canadian Standard CAN3-S16.1-M89: Steel Structures for Buildings-Limits States Design: Appendix G, Guide for Floor Vibration, CSA, Ontario.
5. DIN 4150-1 (2001), Structural Vibration - Part 1: Predicting vibration parameters, DIN-Normen, Germany.
6. DIN 4150-2 (1999), Structural Vibration - Part 2: Human exposure to vibration in buildings, DIN-Normen, Germany.
7. ISO 4866 (2010), Mechanical vibration and shock - Vibration of fixed structures - Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures, ISO, Switzerland.
8. ISO 717-2 (2013), Acoustics-Rating Of Sound Insulation In Buildings And Of Building Elements - Part 2: Impact Sound Insulation, ISO, Switzerland.
9. ISO 2631-2 (1989), Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration-Part2: Continuous and Shock-Induced Vibration in Buildings (1 Hz to 80 Hz), ISO, Switzerland.
10. ISO 2631-2 (2003), Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration-Part2: Continuous and Shock-Induced Vibration in Buildings (1 Hz to 80 Hz), ISO, Switzerland.
11. ISO 10052 (2004), Acoustics-Field measurements of airborne and impact sound insulation and of service equipment sound - Survey method, ISO, Switzerland
12. ISO 10137 (2007), Bases for design of structures - serviceability of buildings and walkways against vibrations, ISO, Switzerland.
13. Jeon, J., Lee, P., Jeong, J. and Park, J. (2006), Comparison of Standard Floor Impact Sources with a Human Impact Source, Transactions of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering, 16(8), 789-796.
14. JIS A 1419-2(2000), Acoustics-Rating Of Sound Insulation In Buildings And Of Building Elements - Floor Impact Sound Insulation, Japanese Standard Association, Japan.
15. Kim, K., Choi, G., Jeong, Y. and Yang, K. (2005), Impact Power Characteristics as Behavior of Real Impact Source(Child), Transactions of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering, 15(5), 542-549.

16. KS F 2810-2 (2012). Field measurements of floor impact sound insulation of buildings-Part 2 : Method using standard heavy impact sources, Korean Agency for Technology and Standards , Korea.

17. KS F 2863-2 (2007), Rating of floor impact sound insulation for impact source in buildings and of building elements-Part 2 : Floor impact sound insulation against standard heavy impact source, Korean Agency for Technology and Standards, Korea.

18. Lee, B. K., Koo, B. S. and Bae, S. H. (2016b), A Characteristics of Floor Impact Noise Reduction using Slab Reinforcement of the Existing Apartment, Proceedings of the KSNVE Annual Conference, Vol. 2016, No. 04, pp. 556~561.

19. Lee, S. B., Chun, Y. S., Lee, B. S. and Yang, H. S. (2016a), The Characteristics of Heavy Weight Floor Impact Sound according to Changing Position of Bearing Wall in Apartments, Proceedings of the KSNVE Annual Conference, Vol. 2016, No. 04, pp. 549~553.

20. Lee, J., Lee, W., Choi, K., Gu, J., Jung, S., & Han, J. (2011). Management of Low-Frequency Noise, Proceeding of Academic Conference of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering, KSNVE, 806-807.

21. Lee, M. J., Nam, S. W. and Han, S. W. (2005), Probability Based Determination of Slab Thickness Satisfying Floor Vibration Criteria, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 17, No. 5, pp. 685~692.

22. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Floor Impact Noise Insulation Admission and Management Criteria for Apartment House, 2016.

23. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Regulation on Housing Construction Standards, 2017.

24. Minsky, M.; S. Papert (1969). Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry. MIT Press. ISBN 0-262-63022-2.

25. Mirza, S. A., Hatzinikolas, M. and MacGregor, J. G. (1979), Statistical Descriptions of the Strength of Concrete, Journal of the Structural Division, ASCE, V. 105, No. ST6, pp. 1021~1037.

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

27. Murray, T., Allen, D. E. and Ungar, E. E.(1997), Floor Vibrations Due to Human Activities, Steel Design Guide series 11, AISC, Chicago, IL.

28. Park, H. G. and Mun, D. H. (2017), Characteristics of Floor Impact Noise Insulation for No Hanger Ceiling Structure in Apartment Building, Proceedings of the KSNVE Annual Conference, Vol. 2014, No. 10, pp. 208~213.

29. Park, H., Kim, K. and Kim, S. (2013). Verification of Effectiveness of the Standard Floor Impact Source by Comparing with Living Impact Sources, Transactions of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering, 23(12), 1117-1126.

30. Szilard, R. (1974), Theory and Analysis of Plate : Classical, Numerical and Engineering Method, Prince-Hall, pp.408~409.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발 성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.