

동일 바닥구조 설계 조건을 갖는 공동주택에서의 중량충격음 차단성능 변동성 분석

Analysis of Variability in Heavy-weight Floor Impact Sound Insulation in Multi-residential Buildings with Identical Floor Structures

성 요 한* · 김 신 태** · 김 명 준†

Yo-Han Seong*, Sin-Tae Kim** and Myung-Jun Kim†

(Received March 6, 2026 ; Revised April 11, 2026 ; Accepted May 12, 2026)

Key Words : Heavy-weight Floor Impact Sound Insulation(중량충격음 차단성능), Site and Floor-plan Effects(단지 및 평면 유형 영향), Analysis of Variance(분산분석), Construction Deviation(시공편차), Measurement Uncertainty(측정 불확도)

ABSTRACT

In this study, the normality and variability of heavy-weight floor impact sound insulation are examined statistically using field data from 106 dwelling units across eight complexes and 19 floor plans, all with identical floor-assembly designs. Measurements in one-third-octave bands followed KS F ISO 16283-2, and single-number quantities were derived per KS F ISO 717-2. The overall standard deviation was 1.75 dB, with normality tests indicating a Gaussian distribution. When grouped by site and floor plan, the variability decreased and normality improved. Nested analysis of variance identified significant site and floor-plan effects, accounting for 45 % and 13 % of the total variance, respectively. After removing these systematic effects, the residual standard deviation was 1.14 dB, attributed to random construction deviations and measurement uncertainty. Since random deviations occur even when site and floor-plan factors are controlled, securing an adequate design margin that accommodates statistical deviations is crucial for in-situ performance verification. These findings highlight the need for sample surveys based on statistical confidence intervals during performance inspections.

기 호 설 명

$L'_{iA, Fmax}$: A-가중 최대 바닥충격음 레벨
 $\overline{L}_{iA, Fmax}$: 전체 세대 평균 A-가중 최대
 바닥충격음 레벨
 $\Delta L'_{iA, Fmax}$: 전체 평균 대비 상대 A-가중 최대
 바닥충격음 레벨

1. 서 론

공동주택에서의 바닥충격음은 재실자 간 분쟁을 야기하고 주거 만족도를 저하시키는 주요 원인 중 하나이다⁽¹⁾. 특히 저주파수 대역에 에너지가 집중된 중

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

* Member, Technical Quality Team, Woomi Construction, Manager

** Member, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Postdoctoral Researcher

A part of this paper was presented at the KSNVE 2025 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Yong Hee Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

량충격음은 건물 구조체를 통해 진동이 쉽게 전달되는 특성을 가지며, 구조체의 진동 모드, 뜬바닥 구조, 수음실의 공진 특성 등과 결합하여 증폭됨으로써 거주자에게 높은 성가심을 초래한다⁽²⁾. 이에 우리나라에서는 설계 단계에서 바닥구조의 성능을 사전 검증하는 ‘바닥충격음 성능등급 인정제도’를 운영하고 있으며⁽³⁾, 나아가 사용검사 전 실제 차단성능을 의무적으로 확인하는 ‘바닥충격음 성능검사 제도’가 도입되어 현장 품질관리의 중요성이 더욱 부각되고 있다⁽⁴⁾. 그러나 사전에 성능을 인정받은 완충재를 사용하여 뜬바닥 구조를 시공한 경우에도, 현장 중량충격음 차단 성능은 동일한 바닥구조 설계 조건 하에서도 세대 간 편차가 일정 수준 나타나는 사례가 보고되어 왔다⁽⁵⁾.

기존에는 이러한 편차를 주로 시공 숙련도 부족이나 특정 세대의 결함과 같은 이상 원인, 즉 시공 하자의 범주에서 주로 해석해 왔다⁽⁶⁾. 그러나 동일 공법과 자재가 적용된 단지 내에서도 측정값이 단일한 값으로 수렴하지 않고 일정한 산포를 갖는 ‘변동성(variability)’이 관측되며, 이는 바닥구성층의 구조적 차이 외에도 시공 오차, 재료 편차, 실내 음장, 측정 위치, 환경 조건, 측정기기 및 신호처리 절차 등 다수의 요인이 복합적으로 기여하는 것으로 연구되어 왔다⁽⁷⁻¹²⁾. 이처럼 다수의 독립적 요인이 누적되어 나타나는 변동성에는 시공 편차 외에도 다양한 원인으로 발생한 우연 오차의 기여가 무시할 수 없는 수준으로 내재되어 있을 가능성이 있으며⁽¹³⁾, 이를 고려하지 않고 편차를 단순히 하자로 판정하는 것은 현장 평가의 신뢰성을 저해할 수 있다⁽¹⁴⁾.

이러한 관점에서 설계 성능과 현장 성능 간 불일치 문제를 해소하고 평가 결과의 대표성과 신뢰성을 확보하기 위해서는, 현장 데이터를 확률변수 모집단으로 해석하는 통계적 접근이 요구된다⁽¹⁵⁾. 중심극한정리(central limit theorem)에 따르면, 다수의 독립적 요인이 누적될 경우 관측치는 정규분포에 근사할 것으로 예상되므로⁽¹⁶⁾, 분포의 정규성 검토는 변동성 해석의 타당성을 점검하는 동시에 신뢰구간 기반 표본 설계의 통계적 정당성을 확보하는 핵심 근거가 된다⁽¹⁷⁾. 또한 단지 및 평면 유형과 같은 요인이 세대 간 편차에 어느 정도 기여하는지를 정량적으로 분리하는 과정이 선행되어야, 집단적 요인 통제 후 남는 독립적인 잔여 변동성(residual variance)을 바탕으로 합리적인 표본 설계 및 고도화된 성능 평가 체계를 구축하

고⁽¹⁸⁾, 시공 편차와 우연 오차의 영향을 분리하여 시공 숙련도를 고도화하는데 기여할 수 있을 것이다.

이 연구는 동일 바닥구성층 설계 조건에서 확보된 현장 실측 데이터를 기반으로, 중량충격음 차단성능의 세대 간 변동성과 분포의 정규성을 통계적으로 검토하고, 단지 및 평면 유형의 영향을 분산분석(ANOVA)을 통해 분리함으로써, 현장 성능 자료를 확률변수 모집단으로 해석할 수 있는 통계적 타당성을 확인하는 것을 목적으로 한다. 이 연구의 결과는 공동주택 바닥충격음 차단성능 평가 체계에서 합리적인 변동성 해석, 표본조사 전략 수립, 그리고 측정 불확도 기준 고도화를 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 나아가 전체 변동성에서 단지 및 평면 유형의 집단적 요인과 독립적인 잔여 변동을 정량적으로 분리하는 이 연구의 접근은, 시공 편차의 실질적 영향을 객관적으로 규명하고 바닥구조 성능 향상 방향을 합리적으로 도출하는 데 기여할 수 있으며, 현행 성능검사 제도의 평가 기준과 절차적 타당성을 뒷받침하는 근거로도 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구 방법

2.1 중량충격음 측정 및 분석 방법

이 연구의 측정 대상은 8개 공동주택 단지로, 19개 평면 유형을 포함하는 총 106세대에서 현장 측정을 수행하였다. 모든 대상 세대의 바닥 단면 구성은 동일 바닥구성층 설계 조건을 만족하도록 선정하였으며, 구체적으로는 철근콘크리트 슬래브 210 mm, 동일 제조사 및 모델이 적용되어 사전 인정받은 KS F 2868에 따라 측정된 단위 면적당 동탄성계수가 평균 15 MN/m^3 수준인 EPS 완충재 30 mm, KS F 4039 표준에 따른 0.5폼 규격의 경량기포콘크리트 40 mm, KS L 5220 표준에 따른 재령 28일 기준 압축강도 21 MPa 수준의 공장제조 건조 모르타르(레미탈)를 현장 배합하여 타설한 마감 모르타르 40 mm, 그리고 강마루 마감재로 Fig. 1과 같이 구성되었다. 각 단지의 천장 구조 역시 경량철골 천장틀 위에 석고보드 및 벽지 마감이 적용된 일체형 구조로 동일하며, 거실 중앙 부에는 동일한 형상의 우물천장이 설치되어 있다.

측정 대상 실의 크기는 길이(창호 포함 외벽면 기준) 3.3 m ~ 4.5 m, 폭 4.4 m ~ 4.9 m, 천장고 2.3 m 범위이다. 모든 세대의 평면은 거실과 주방이 공간적

으로 연결되어 있으며, 현장 측정은 사용승인 전 미입 주 상태에서 수행되어 실내에 가구나 커튼 등 별도의 흡음체가 설치되지 않은 통제된 조건을 유지하였다.

각 단지 및 평면 유형별 세부 제원은 Table 1과 같다. 중량충격음 차단성능 측정은 상부 세대 거실 바닥에서 가진하고 하부 세대 거실에서 수음하는 방식으로 진

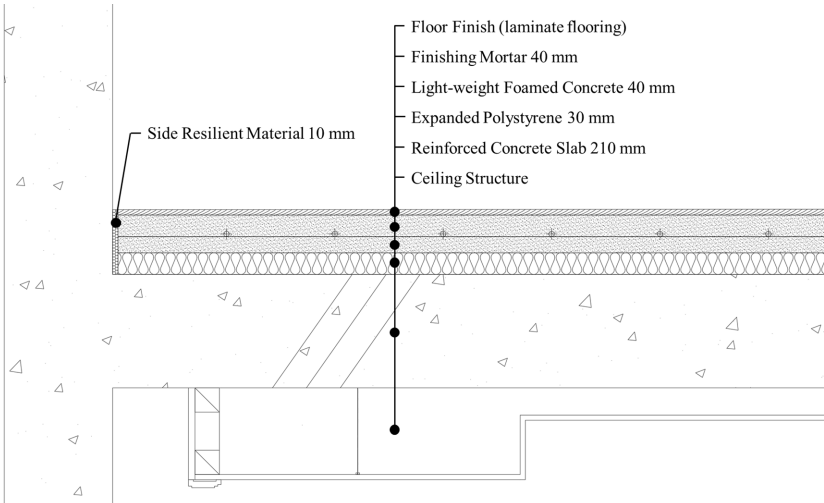


Fig. 1 Cross-sectional configuration of the floor structure applied in this study

Table 1 Overview of field measurement sites

Type	Units	Floor area	Length	Width	Height	Living room area	Connected area
A1	6	84.9 m ²	4.2 m	4.8 m	2.3 m	20.3 m ²	40.3 m ²
A2	5	74.4 m ²	4.5 m	4.9 m	2.3 m	22.2 m ²	46.7 m ²
A3	4	74.9 m ²	4.2 m	4.8 m	2.3 m	20.3 m ²	43.3 m ²
B1	9	55.8 m ²	3.6 m	4.4 m	2.3 m	15.8 m ²	29.6 m ²
B2	2	55.8 m ²	3.6 m	4.4 m	2.3 m	16.0 m ²	26.8 m ²
B3	3	85.0 m ²	4.5 m	4.9 m	2.3 m	22.0 m ²	49.2 m ²
C1	15	84.9 m ²	4.5 m	4.9 m	2.3 m	22.2 m ²	44.5 m ²
D1	4	85.0 m ²	4.3 m	4.9 m	2.3 m	21.2 m ²	49.5 m ²
D2	4	85.0 m ²	4.5 m	4.9 m	2.3 m	22.0 m ²	47.0 m ²
E1	5	85.0 m ²	4.5 m	4.9 m	2.3 m	22.3 m ²	50.2 m ²
E2	3	85.0 m ²	4.5 m	4.9 m	2.3 m	22.3 m ²	46.3 m ²
F1	5	85.0 m ²	4.5 m	4.9 m	2.3 m	22.2 m ²	49.1 m ²
F2	5	84.8 m ²	4.5 m	4.9 m	2.3 m	22.2 m ²	49.9 m ²
F3	2	84.8 m ²	4.5 m	4.9 m	2.3 m	22.2 m ²	46.1 m ²
G1	10	60.2 m ²	3.3 m	4.3 m	2.3 m	14.2 m ²	24.8 m ²
G2	10	60.3 m ²	3.3 m	4.5 m	2.3 m	14.9 m ²	24.6 m ²
H1	10	84.9 m ²	4.5 m	4.9 m	2.3 m	22.1 m ²	49.5 m ²
H2	2	59.9 m ²	3.8 m	4.4 m	2.3 m	17.0 m ²	35.1 m ²
H3	2	59.9 m ²	3.8 m	4.4 m	2.3 m	17.0 m ²	33.9 m ²

Length refers to the length of the exterior wall with windows
Connected area = living room + kitchen + corridor

행되었다. 측정 가진점과 수음점은 KS F ISO 16283-2의 분포 원칙을 참고하되, 구체적인 지점의 선정은 「공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 검사기준」에 따른 ‘바닥충격음 차단구조 인정업무 세부운영지침’을 준용하였다. 이에 따라 거실 내 중앙 1개 및 가장자리 4개를 포함하여 각각 5개 지점으로 고정 설정하였으며, 가장자리 이격거리 0.75 m 등 상세 배치 규칙을 모든 세대에 동일하게 적용하여 변수를 통제하였다.

가진 시에는 KS F ISO 16283-2에서 규정된 절차에 따라 표준 중량충격원인 고무공 충격원(rubber ball)을 사용하여 각 위치별로 3회 이상 반복 측정을 수행하였다⁽¹⁹⁾. 수음된 신호는 50 Hz ~ 630 Hz 1/3 옥타브밴드 대역에서 정밀급 마이크로폰(1/2-inch, Class 1)과 데이터 수집기를 통해 분석되었으며, 측정 전·후 음향 교정기를 이용해 시스템 감도 이상 유무를 점검하였다. 취득된 데이터는 1/3 옥타브밴드 필터와 fast 시간가중을 적용한 후, KS F ISO 717-2 부속서 D의 평가 절차에 따라 A-가중 보정값을 적용하여 최종적으로 $L'_{iA, Fmax}$ 단일수치평가량으로 산출되었다⁽²⁰⁾.

2.2 통계적 분석 방법

이 연구는 도출된 단일수치평가량 $L'_{iA, Fmax}$ 를 바탕으로 현장 차단성능의 변동성을 통계적으로 분석하였다. 이 연구에서 변동성은 동일한 설계 조건을 갖는 모집단임에도 세대별 평가값이 서로 상이하게 나타나는 정도로 정의하였다. 이를 정량화하기 위해 표본수, 평균, 표준편차와 함께 중앙값 기반 강건 지표인 MAD(median absolute deviation) 및 사분위 범위인 IQR(interquartile range) 등을 산출하고 히스토그램 및 박스플롯으로 시각화하였다. 여기서 강건 지표(MAD, IQR)는 현장 데이터 특성상 존재할 수 있는 극단적인 이상치(특정 세대의 돌발적인 심각한 시공하자 등)에 의한 통계적 왜곡을 최소화하고, 모집단의 보편적인 산포 특성을 보다 안정적으로 파악하기 위해 활용되었다.

이러한 세대 간 변동성은 측정대상 자체의 물리적 차이와 현장 평가 조건이 복합적으로 반영된 결과이므로, 이 연구는 전체 변동성을 단지 및 평면 유형 요인과 독립적인 잔여 변동(residual)의 합으로 해석하는 분석 체계를 수립하였다. 동일 설계 조건이라 하더라도 ‘단지’ 및 ‘평면 유형’은 시공 환경과 공간 체

적 특성의 차이를 통해 평균 수준을 이동(shift)시킬 수 있을 것으로 가정하였다. 따라서 이러한 요인을 통계적으로 식별 및 제거한 뒤 남는 변동성, 즉 잔차를 무작위 산포의 지표로 정의하였다. 이 잔차에는 동일 세대 내 반복 측정이나 기기·환경 조건에 따른 측정 불확도와 함께 모형으로 설명되지 않는 시공 오차 등이 포함되며⁽²¹⁾, 이 연구에서는 이 잔차의 분포 특성을 핵심적으로 다룬다.

또한 세대 간 변동성의 통계적 타당성을 확인하기 위해 분포의 정규성(normality) 검토를 수행하였다. 다수의 독립적 요인(시공, 환경, 측정 불확도 등)이 누적된 변동성은 중심극한정리(central limit theorem)에 의해 정규분포에 근사할 가능성이 높으며, 이는 신뢰구간 기반 표본 설계 및 모수 통계 적용의 정당성을 뒷받침한다. 검정 방법으로는 표본수가 상이하거나 비교적 적은 그룹에서도 검정력이 우수한 Shapiro-Wilk 검정을 적용하였다⁽²²⁾.

마지막으로, 단지 및 평면 유형의 영향을 정량적으로 분리하기 위해 내포 분산분석(nested ANOVA)을 수행하였다⁽²³⁾. 평면 유형은 형태가 동일하더라도 단지별로 세부 구성이 다를 수 있으므로, 단지(site)를 상위 요인으로, 평면 유형(floor-plan)을 단지에 중첩된 하위 요인으로 설정하였다. 통계 모형은 식 (1)과 같이 구성된다.

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_{j(i)} + \epsilon_{ijk} \quad (1)$$

여기서, y_{ijk} 는 단지 i 의 평면 유형 j 에 속한 k 번째 세대에서 측정된 단일수치 평가량 $L'_{iA, Fmax}$ 이며, μ 는 전체 평균, α_i 는 단지 i 의 효과, $\beta_{j(i)}$ 는 단지 i 에 중첩된 평면 유형 j 의 효과, ϵ_{ijk} 는 해당 모형으로 설명되지 않는 미설명 변동, 즉 단지 및 평면 유형 요인이 통제된 후의 순수 잔차를 의미한다. 이 연구는 이 모형을 통해 계통적 기여도를 확인하고 잔차의 표준편차 등 통계적 특성을 도출하고자 하였다.

3. 연구 결과

3.1 데이터 개요 및 전체 세대 변동성

이 연구의 분석 대상 단지는 바닥충격음 사후확인제 시행 이전에 사업이 승인된 현장으로, 법적 기준에 따른 적합성 여부를 직접적으로 판정하는 것은 이 연구의 범위를 벗어난다. 따라서 특정 세대의 절대적

인 성능값을 기준으로 평가하기보다는, 전체 측정값의 상대적 분포와 변동성을 중심으로 분석하였다. 이를 위해 식 (2)와 같이 전체 세대의 평균 단일수치평가량 $\overline{L'}_{iA, Fmax}$ 을 기준으로 각 세대의 평균 대비 편차 $\Delta L'_{iA, Fmax}$ 를 산출하였다.

$$\Delta L'_{iA, Fmax, k} = L'_{iA, Fmax, k} - \overline{L'}_{iA, Fmax} \tag{2}$$

Table 2와 같이 총 106 세대에서 확보한 $\Delta L'_{iA, Fmax}$ 의 전체 표준편차(SD)는 1.75 dB로 산출되었으며, 데이터의 50 %가 약 2.68 dB 폭의 사분위 범위(IQR, -1.38 dB ~ +1.30 dB) 내에 분포하였다. 이 1.75 dB의 전체 산포는 현장에서 발생할 수 있는 모든 요인(설계, 시공, 측정 환경 등)이 통제되지 않고 혼재되어 있을 때 관측된 총 변동성을 의미한다.

이러한 전체 데이터의 분포를 Fig. 2와 같이 히스토

Table 2 Descriptive statistics of normalized SNQs $\Delta L'_{iA, Fmax}$ for all dwellings

Statistics	Value
N (number of cases)	106 Units
Standard deviation, SD	1.75 dB (rel.)
Minimum	-3.9 dB (rel.)
25 % (Q_1)	-1.38 dB (rel.)
Median (Q_2)	0.05 dB (rel.)
75 % (Q_3)	1.30 dB (rel.)
Maximum	3.6 dB (rel.)
Interquartile range, IQR	2.68 dB (rel.)
Median absolute deviation, MAD	1.35 dB (rel.)

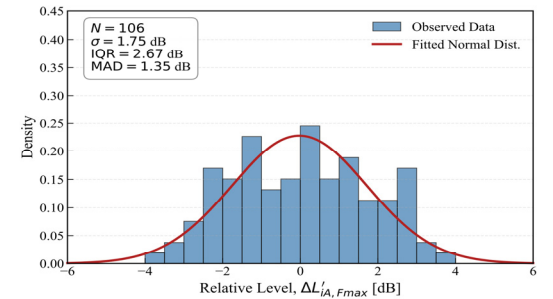


Fig. 2 Histogram of normalized SNQs ($\Delta L'_{iA, Fmax}$) for all 106 dwellings

그램으로 시각화한 결과, 평균값을 중심으로 대체로 좌우가 유사한 종(bell) 모양을 띠고 있어 정규분포에 근사한 특성을 보였다. 실제로 Shapiro-Wilk 정규성 검정 결과에서도 $W=0.9855$, $p=0.1350$ 으로 도출되어 유의수준 0.05에서 정규성 가설을 기각할 수 없었다. 이는 동일 바닥구조 설계 조건에서 관측되는 세대 간 성능 편차가 다수의 독립적인 요인들이 복합적으로 누적되어 형성된 결과라는 가설과, 현장 평가 자료를 확률변수 모집단으로 해석할 수 있는 통계적 타당성을 뒷받침한다.

3.2 단지 및 평면 유형에 따른 변동성

전체 변동성의 크기를 정량적으로 나타내는 표준편차(SD), IQR, MAD 등의 지표가 단지 및 평면 유형 요인에 의해 어떻게 변화하는지 검토하기 위해, 단지 및 평면 유형별 $\Delta L'_{iA, Fmax}$ 의 분포를 분석하였다.

먼저 Table 3, Fig. 3의 단지별 분석 결과, 평균값은

Table 3 Site-wise summary statistics for $\Delta L'_{iA, Fmax}$

Site	N	Mean	SD	IQR	MAD
A	15	-0.51	1.96	2.95	1.40
B	14	-0.66	1.56	2.18	1.40
C	15	1.11	1.22	2.05	0.90
D	8	-0.18	1.12	1.35	0.70
E	8	-0.73	0.67	1.10	0.30
F	12	-0.90	0.97	1.15	0.60
G	20	1.87	1.05	1.55	0.80
H	14	-1.54	1.44	2.38	1.10

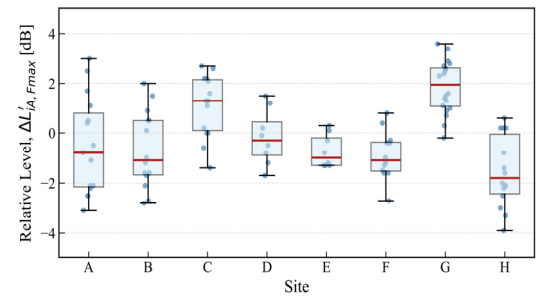


Fig. 3 Boxplots of site-wise $\Delta L'_{iA, Fmax}$ across 8 apartment complexes

-1.54 dB에서 +1.87 dB 범위로 분포하여 단지별 차단 성능의 편향이 존재함을 확인하였다. 특히 산포가 가장 큰 A 단지는 표준편차(SD = 1.96 dB) 뿐만 아니라 극단적 이상치의 영향을 배제한 강건 지표인 IQR (2.95 dB)과 MAD(1.40 dB) 역시 8개 단지 중 가장 높게 나타나, 보편적인 세대 간 성능 변동성이 매우 크게 형성되어 있음을 확인하였다. 반면, 산포가 가장 작은 E 단지는 SD(0.67 dB)와 더불어 IQR(1.10 dB), MAD(0.30 dB) 모두 최소 수준을 기록하여, 해당 단지의 성능 편차가 상대적으로 균일하게 나타나고 있음을 시사한다. 이는 동일한 바닥구조를 적용하더라도 현장별 구조·평면의 차이, 시공 관리 수준이나 환경적 요인 등에 따라 성능의 균일성이 변화할 수 있음을 보여준다.

단지 내 평면 유형별 분석에서도 Table 4, Fig. 4와 같이 평균이 -2.28 dB(H1)에서 +2.16 dB(G2)까지 넓게 분포하였다. 단, 표본수가 2세대~3세대로 제한된 B2, F3 등의 일부 평면은 통계적 신뢰성을 고려하여 해석에서 제외하였다. 각 평면의 통계적 지표(Mean, SD, IQR, MAD)를 세부적으로 살펴보면, 동일한 평면 구조 내에서도 나타나는 고유한 변동 특성이 대비되어 나타나고 있다. 예컨대 평균적으로 양호한 차단성능 (Mean = -0.96 dB)을 보인 A2 유형은 SD(2.35 dB)와 IQR(2.90 dB)이 전체 평면 중 가장 높게 나타나, 동일한 구조임에도 세대 간 시공 품질이나 환경적 편차가 크게 발생했음을 알 수 있다. 반면, 평균적으로 불리한 성능(Mean = +2.16 dB)을 기록한 G2 유형은 오히려 MAD가 0.25 dB로 낮게 도출되었다. 이는 G2 평면의 성능 저하가 개별 세대의 우발적인 시공 하자에 의한 것이라기보다는, 해당 평면 고유의 구조적 특성에 기인한 결과일 가능성이 높음을 시사한다.

Table 1에 제시된 각 평면의 물리적 제원과 중량충격을 차단성능의 관계를 살펴보면, 상대적으로 가장 우수한 차단성능을 보인 H1 유형(거실 면적 22.1 m²)과 가장 불리한 성능을 보인 G1, G2 유형(거실 면적 14.2 m², 14.9 m²)의 결과에서 보듯 거실의 공간 체적(volume) 등 형태적 특성에 따라 성능 격차가 관찰되었다. 다만, 이러한 공간 체적과 차단성능 간의 관계가 모든 평면에서 일률적으로 성립하는 것은 아닌 것으로 확인되었다. 예컨대 B1 유형은 거실 면적이 15.8 m²로 협소함에도 평균 성능(-0.07 dB)이 양호하였고, 반대로 C1 유형은 거실 면적이 22.2 m²로 넓은

에도 평균 성능(+1.11 dB)이 다소 불리하게 도출되었다. 즉, 평면 유형별 차단성능의 편차는 단순한 공간 체적의 대소뿐만 아니라 해당 평면 고유의 복합적인 물리적 특성이 반영되어 나타난 결과로 추정된다.

나아가 단지 및 평면 유형별(n ≥ 5 기준)로 그룹화하여 정규성을 검토한 결과, E1 유형(p = 0.0180)을 제외한 대부분의 집단에서 정규성 가정을 만족하였다. 즉, 단지 및 평면 유형은 단순한 무작위 변동이 아니라 전체 데이터 분포의 중심을 특정 방향으로 이

Table 4 Floor-plan-wise summary statistics for $\Delta L'_{iA, Fmax}$

Type	N	Mean	SD	IQR	MAD
A1	6	-0.83	1.42	1.28	0.80
A2	5	-0.96	2.35	2.90	1.00
A3	4	0.53	2.28	1.83	1.25
B1	9	-0.07	1.63	2.10	1.00
B2	2	-2.20	0.71	0.50	0.50
B3	3	-1.40	0.35	0.30	0.00
C1	15	1.11	1.22	2.05	0.90
D1	4	0.00	1.15	1.20	0.70
D2	4	-0.35	1.22	1.25	0.80
E1	5	-0.88	0.69	0.50	0.00
E2	3	-0.47	0.67	0.65	0.40
F1	5	-0.56	0.91	0.90	0.90
F2	5	-0.74	0.79	0.90	0.60
F3	2	-2.15	0.78	0.55	0.55
G1	10	1.58	0.96	0.97	0.40
G2	10	2.16	1.11	1.47	0.25
H1	10	-2.28	0.93	1.17	0.65
H2	2	0.40	0.28	0.20	0.20
H3	2	0.20	0.00	0.00	0.00

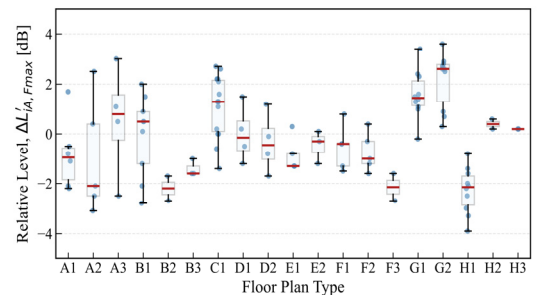


Fig. 4 Boxplots of floor-plan-wise $\Delta L'_{iA, Fmax}$ across 19 floor-plan types

Table 5 Nested ANOVA results for $\Delta L'_{iA, Fmax}$

Source of variation	Site	Plan (site)	Residual	Total
Sum of squares	145.7	40.6	135.6	322.0
% of total SS	45.3	12.6	42.1	100.0
Degree of freedom	7.0	11.0	87.0	105.0
Mean square	20.8	3.7	1.6	-
F-value	5.6	2.4	-	-
p-value	0.006	0.013	-	-

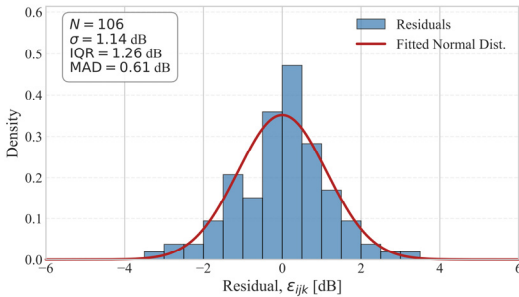


Fig. 5 Histogram of nested-ANOVA residuals with an overlaid normal density curve

동(shift)시키는 주요 요인으로 작용하고 있으며, 각 그룹 내에서는 정규성을 유지하거나 더욱 향상되는 것으로 분석되었다.

3.3 요인 분리 및 잔차의 통계적 특성

앞서 확인된 단지 및 평면 유형의 영향을 정량적으로 분리하기 위해 내포 분산분석(nested ANOVA)을 수행하였다. 이 연구의 데이터 구조는 개별 평면 유형이 특정 단지 내에만 독립적으로 존재하는 내포(nested) 형태 갖고 있다. 따라서 전체 변동성을 단지 간의 차이(site effect), 동일 단지 내에서의 평면 간 차이(floor-plan effect), 그리고 이 두 가지 모형으로 설명되지 않는 순수 잔차(residual)로 분해하여 분석을 수행하였다.

Table 5의 분석 결과와 같이, 단지 효과($p = 0.0058$)와 단지 내 평면 유형 효과($p = 0.0130$) 모두 통계적으로 유의하게 나타났다. 제곱합(sum of squares) 분해를 통해 전체 변동성을 구성하는 비율을 살펴본 결과, 단지 효과가 약 45.3 %, 단지 내 평면 유형 효과

가 약 12.6 %를 차지하였다. 이는 현장에서 관측되는 1.75 dB라는 전체 변동성 중 절반 이상(약 58 %)이 시공 환경(단지)과 공간 구조(평면)라는 계통적 요인에 의해 결정됨을 의미한다.

이러한 단지 및 평면 유형의 요인을 통계 모형에서 완전히 제거한 후, Fig. 5와 같이 두 요인으로 설명되지 않는 미설명 성분인 잔차 ϵ_{ijk} 를 산출하였다. 도출된 잔차의 표준편차는 1.14 dB로 나타났다. 또한 IQR(사분위 범위)은 1.26 dB, MAD(중앙값 절대 편차)는 0.61 dB로 각각 산출되었다. 이 수치는 단지와 평면이라는 환경적·구조적 변수를 동일하게 통제하더라도, 세대 고유의 미세한 자재 편차, 작업 오차 및 측정 불확도(환경 변동, 기기 오차 등)에 의해 여전히 발생하는 무작위 산포의 크기를 의미하는 것으로 판단된다.

이 잔차 분포에 대해 정규성 검정을 수행한 결과 $W = 0.9892$, $p = 0.2936$ 으로 도출되어, 단지 및 평면 유형의 요인을 걸어낸 이후 원자료보다 정규성에 더욱 근접하는 경향을 보였다.

4. 결 론

이 연구에서는 동일 바닥구성층 설계 조건을 적용한 공동주택 8개 단지, 19개 평면 유형, 총 106 세대를 대상으로 현장 중량충격음 차단성능 단일수치평가량($L'_{iA, Fmax}$)의 세대 간 변동성을 통계적으로 분석하였으며, 주요 결과와 시사점은 다음과 같다.

(1) 전체 106 세대에서 확보된 측정값의 전체 변동성은 정규분포에 근사하는 양상을 보였다. 이는 동일 설계 조건의 현장 평가 결과가 특정 세대의 시공 편차에 의해서만 결정되는 것이 아니라, 설계, 시공, 환경 등 다수의 독립적인 요인들이 복합적으로 누적되어 형성된 확률변수 모집단으로서의 특성을 지님을 의미한다.

(2) 내포 분산분석(nested ANOVA) 결과, 전체 변동성의 약 58 %는 단지(약 45 %) 및 단지 내 평면 유형(약 13 %)에 의한 영향으로 분석되었다. 현장의 전반적인 시공 및 환경 여건이 성능 변동성의 거시적인 기준선을 결정하며, 동일 단지 내에서도 평면 고유의 구조적 특성에 따라 추가적인 성능 편차가 가중되는 특성이 확인되었다.

(3) 단지와 평면 유형에 의한 요인을 통계적으로 통제한 후에도 약 1.14 dB 수준의 무작위 변동성(잔

차의 표준편차)이 잔존하였다. 이 잔차 분포는 원자료에 비해 정규성에 더욱 근접하였으며, 세대 고유의 미세한 자재·시공 편차와 측정 과정에서의 불확도(배경소음, 기기 오차, 수음점 위치 등)가 결합된 순수 무작위 산포를 대변하는 것으로 추정된다.

결론적으로, 현장 중량충격음 평가 시에는 동일한 바닥구조를 적용하고 단지 및 평면 유형의 요인을 통제하더라도 약 1.14 dB 수준의 무작위 편차가 수반될 수 있을 것으로 판단된다. 이는 향후 사후확인제 등 현장 품질관리 전략을 수립함에 있어, 단순히 법적 최소 기준선 충족에 만족하기보다는 이러한 통계적 산포를 안전하게 흡수할 수 있는 적정 수준의 설계 여유를 선제적으로 확보해야 함을 시사하며, 통계적 신뢰도에 기반한 합리적인 표본조사 체계가 제도적으로 뒷받침되어야 할 근거로 볼 수 있다.

이 연구는 내포 분산분석을 통해 변동성의 구조를 규명하였으나, 도출된 결과가 분석 대상이 된 특정 8개 단지, 19개 평면, 총 106 세대라는 제한된 표본 데이터 내에서 확인된 현상이라는 점에서 전체 공동주택으로의 과도한 일반화에는 유의할 필요가 있다. 또한, 1.14 dB의 잔차 내에 혼재되어 있는 ‘순수 시공 오차’와 ‘측정 불확도’를 독립적으로 정량화하지는 못하였다는 한계를 지닌다. 따라서 향후 연구에서는 대상 표본의 범위를 지속적으로 확대함과 동시에, 동일 세대에 대한 반복성 평가와 배경 환경 요인의 엄격한 통제를 결합하여 물리적 시공 변동성과 측정 불확도를 명확히 분리·추정하는 고도화된 평가 연구가 필요하다⁽²⁴⁾.

후 기

이 논문은 2025년도 서울시립대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음. 초록의 영문 번역과 데이터 시각화용 Python 코드 작성에는 생성형 AI 도구 (Google Gemini)가 활용되었으며, 모든 결과물은 저자가 검토하였고 그 내용에 대한 책임은 저자에게 있음.

References

(1) Jeong, J. H. and Lee, S. C., 2018, A Study on the Annoyance and Disturbance of Floor Impact Noise According to Noise Sensitivity Based on Questionnaire

Survey, Journal of the Acoustical Society of Korea, Vol. 37, No. 6, pp. 428~436.

(2) Jeon, J. Y., Hong, J. Y., Kim, S. M. and Lee, P. J., 2015, Classification of Heavy-weight Floor Impact Sounds in Multi-dwelling Houses using an Equal-appearing Interval Scale, Building and Environment, Vol. 94, pp. 821~828.

(3) Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2020, Recognition and Management Standards for Floor Impact Sound Insulation Structures in Apartment Buildings, MOLIT, MOLIT Notice No. 2020-212, Sejong, Korea.

(4) Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT), 2023, Recognition and Inspection Standards for Floor Impact Sound Insulation Structures in Apartment Buildings, MOLIT, MOLIT Notice No. 2023-494, Sejong, Korea.

(5) Kim, S. T., Seong, Y. and Kim, M. J., 2026, Analysis of Variations in Heavy-weight Impact Sound Insulation Based on Field Measurement Data of Apartment Buildings, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 36, No. 2, pp. 135~144.

(6) Kim, J. M., Ho, J. N., Kang, D. R. and Ahn, Y. H., 2025, Creating a Systematic Quality Management Checklist to Mitigate Floor Noise in Residential Construction, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 41, No. 1, pp. 313~324.

(7) Lee, S. B. and Kim, M. J., 2025, Improving Heavy-weight Floor Impact Sound FEA Predictions in Box-frame Concrete Apartments: Slab Damping and Elastic Modulus, Applied Acoustics, Vol. 239, 110863.

(8) Jeon, J. Y., Yoo, S., Jeong, J. H. and Jeong, Y., 2006, The Effect of the Design Elements of Reinforced Concrete Slab on Heavy-weight Floor Impact Noise, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 22, No. 10, pp. 329~336.

(9) Yoo, S. Y., Kim, Y. H., Sim, M. H. and Jeon, J. Y., 2008, Measurement Uncertainty in Heavy-weight Floor Impact Sounds, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 826~829.

(10) Lee, W. H., 2020, Analysis of the Influence Factors on the Floor Impact Sound of Apartments through Field Experiments, Doctoral Dissertation,

Chungbuk National University, Cheongju, Korea.

(11) Seong, Y. H., Kim, S. T. and Kim, M. J., 2025, Effects of the Frequency Filter Type of Measurement Equipment on Evaluation of Floor Impact Sound Insulation, *Applied Acoustics*, Vol. 235, 110647.

(12) Yang, H. S. and Kim, T. M., 2020, Parametric Study on Floor Impact Sound with Design Factors of Layers Composing a Floating Floor in Multi-residential Buildings, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 119~128.

(13) Barlow, R. E. and Irony, T. Z., 1992, Foundations of Statistical Quality Control, In *Current Issues in Statistical Inference: Essays in Honor of D. Basu*, Institute of Mathematical Statistics, Vol. 17, pp. 99~112.

(14) Montgomery, D. C., 2012, Introduction to Statistical Quality Control, 7th Edition, John Wiley & Sons, Hoboken, pp. 379~399.

(15) Jaynes, E. T., 2003, Probability Theory: The Logic of Science, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1901~1910.

(16) Kwak, S. G. and Kim, J. H., 2017, Central Limit Theorem: The Cornerstone of Modern Statistics, *Korean Journal of Anesthesiology*, Vol. 70, No. 2, pp. 144~156.

(17) Horálek, V., 2013, Analysis of Basic Probability Distributions, Their Properties and Use in Determining Type B Evaluation of Measurement Uncertainties, *Measurement*, Vol. 46, No. 1, pp. 16~23.

(18) Bartlett, J. W. and Frost, C., 2008, Reliability, Repeatability and Reproducibility: Analysis of Measurement Errors in Continuous Variables, *Ultrasound in Obstetrics & Gynecology*, Vol. 31, No. 4, pp. 466~475.

(19) International Organization for Standardization, 2015, *Acoustics - Field Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements - Part 2: Impact Sound Insulation*, ISO 16283-2, Geneva, Switzerland.

(20) International Organization for Standardization, 2020, *Acoustics - Rating of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements - Part 2: Impact Sound Insulation*, ISO 717-2, Geneva, Switzerland.

(21) Korea Research Institute of Standards and Science, 2010, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Korea Research Institute of Standards and Science, KRISS-SP-2010-105, Daejeon, Korea.

(22) Shapiro, S. S. and Wilk, M. B., 1965, An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples), *Biometrika*, Vol. 52, No. 3~4, pp. 591~611.

(23) Doncaster, C. P. and Davey, A., 2007, Analysis of Variance and Covariance: How to Choose and Construct Models for the Life Sciences, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, pp. 67-71.

(24) Seong, Y. H., 2026, A Study on the Variability and the Influence of Uncertainty of Heavy-weight Floor Impact Sound Insulation in Multi-residential Buildings Designed with Identical Floor Structures, Doctoral Dissertation, University of Seoul, Seoul, Korea.