

청감실험을 통한 옥타브밴드별 고무공충격음의 최소인지한계와 어노이언스 주관적 반응 분석

Subjective Response Analysis of Just Noticeable Difference and Annoyance due to Octave Band Impact Sound Emitted by a Rubber Ball via an Auditory Perception Experiment

하연수* · 김명준†
Yeon-su Ha* and Myung-Jun Kim†

(Received January 18, 2023 ; Revised March 20, 2023 ; Accepted March 28, 2023)

Key Words : Rubber Ball Impact Sound(고무공 충격음), Octave Band(옥타브밴드), Just Noticeable Difference(최소인지한계), Annoyance(어노이언스), Auditory Perception Experiment(청감실험)

ABSTRACT

In this study, subjective responses to rubber ball impact sounds in each octave band for JND and annoyance were investigated through an auditory perception experiment. Based on previous studies, two representative spectra of rubber ball impact sound were used. The spectrum A and B of rubber ball impact sound were acquired from the floors with 210 mm and 110 mm ~ 180 mm thick concrete slabs, respectively. A rubber ball impact sound was used in an auditory perception experiment with SNQ ($L_{iA, Fmax}$) 47 dB, 51 dB 55 dB with ± 2 dB, ± 4 dB, and ± 6 dB differences. Statistical analysis was performed based on the response results. As a result, both spectrum A and B had exhibited a high rate of change for in annoyance in the octave bands with small JND values. The significant JND bands in spectrum A were 125 Hz and 63 Hz, with JND values of 3.4 dB and 4.2 dB, respectively. The significant JND bands in spectrum B were 500 Hz and 250 Hz, with JND values of 3.6 dB and 3.9 dB, respectively.

1. 서론

공동주택이 주된 주거 형태로 자리 잡게 되면서 세대 간 소음 문제가 지속적으로 발생해왔다. 또한, 지난 3년간의 코로나 확산으로 인해 재실 시간이 늘어나면서 바닥충격음에 대한 이슈는 지속적으로 증가하고 있다. 이를 위해 1996년 바닥충격음 측정 방법 제

정을 필두로 바닥충격음 저감을 위한 여러 가지 법규의 제·개정이 이루어져 왔다. 2003년 4월 「주택건설기준등에관한규정」에서 중량충격음 50 dB, 경량충격음 58 dB로 하는 정량적인 바닥충격음 차단성능 기준이 처음으로 규정되었다. 유예기간을 거쳐 2004년 4월에 경량충격음 성능 기준이 먼저 시행되었으며, 2005년 7월에 중량충격음 성능 기준이 추가로 시행되었고, 1~4등급의 바닥충격음 차단성능 등급기준이

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

* Member, Dept. of Architectural Engineering, University of Seoul, Student

A part of this paper was presented at the KSNVE 2022 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Yong Hee Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

마련되었다.

때문에, 이 시기에는 주관적 반응에 연구가 주로 등급화 구간 설정을 위한 단일수치평가량 dB 차이에 관한 연구가 수행되었다^(1,2). 그러나 관련 연구가 지속되면서 바닥충격음에서 인간의 청감 반응은 단일수치평가량에 국한되지 않고 주파수에도 영향을 받으며, 또한 주파수 간 차이도 인지한다는 것이 연구되었다⁽³⁻⁵⁾.

또한, 2022년 8월에는 「공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 검사기준」에서 바닥충격음 평가 기준이 KS F ISO 717-2⁽⁶⁾로 변경됨에 따라 63 Hz ~ 500 Hz의 옥타브밴드별 측정값의 로그 합으로 산출하도록 개정되었다. 변경 전, 기준 곡선에 의한 평가방법에서는 상회값에 영향을 미치는 특정 대역이 존재했던 것과 달리 개정된 평가 방법을 고려하면 전체 주파수 대역에 대한 고려가 더욱 필요해진 시점으로 사료된다.

주파수에 대한 주관적반응 조사를 위해 이 연구에서는 최소인지한계와 어노이언스라는 개념을 사용하였다. 최소인지한계는 자극의 변화와 사람의 반응 사이의 관계를 정량화하기 위한 심리음향학 방법이다⁽⁷⁾. Jeong⁽⁸⁾은 고무공 측정데이터로 최소인지한계를 조사한 결과, 평가등급을 4 dB 간격으로 설정하는 것이 합리적임을 제시하였다. Lee 등⁽⁹⁾은 저주파수(63 Hz)의 최소인지한계를 13 dB로 제시한 바 있다. 그러나 이 외에도 단일 수치평가량이 아닌 주파수별 평가주파수 범위 전체를 다룬 연구는 현재까지 부족한 실정이다.

최소인지한계 조사를 통해 얻는 “dB 차이에 대한 인지 반응”은 어노이언스의 “신경쓰임”과는 상이할 수 있다. 앞서 언급된 연구 결과의 일부 내용처럼 소음 만족도에 영향을 미치는 주요한 주관적 반응이 어노이언스이며⁽²⁾, 어노이언스의 저감이 바닥충격음 분야의 주된 목적이므로 최소인지한계와 함께 검토하였다.

이에 이 연구에서는 최소인지한계와 어노이언스를 통해 옥타브밴드별 주관적 반응을 조사하였다. 이 연구 결과는 바닥충격음 저감설계의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 실험 및 분석 방법

2.1 실험 음원

(1) 측정 및 녹음

실험에 사용한 충격원은 KS F ISO 16283-2⁽¹⁰⁾에서 규정하는 고무공 충격원을 사용하였다. 장소는 용

인 소재의 실험동에서 진행되었다. Fig. 1(a)와 같이 상부층은 210 mm의 나슬라브, 하부층(수음실)은 무향실로 구성되어있는 공간에서 측정하였다.

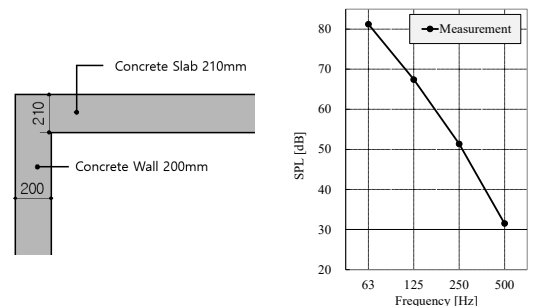
배경소음은 27.1 dB로 외부의 소음의 영향을 비교적 적게 받는 환경이었다. 잔향시간은 0.32초로 입주 전 거실 잔향시간 1.0초, 입주 후 잔향시간 0.5초로 알려진 것보다 짧아 울림이 적은 음원을 얻을 수 있었다⁽¹¹⁾. 음원은 5개소에서 가진하였으며, 마이크는 중앙을 포함한 4지점으로 배치하였다. 마이크 높이는 1 m로 설치하였고 체적은 65.9 m³였다.

수음실에서 측정한 고무공 충격음의 주파수 응답 특성은 Fig. 1(b)와 같으며 52.4 dB로($I_{iA, Fmax}$) 산출되었다. 실험에 사용한 음원은 가운데에서 가진 후 가운데 위치한 마이크에서 녹음된 음원을 사용하였다. 충격음 측정 및 녹음에 사용된 장비는 다음과 같다.

Heavy impact source	: rubber ball (NOK)
Multi channel analyzer	: dB4 (01dB)
Analysis program	: dB FA suite (01dB)
Microphone	: MPA201 (BSWA)

(2) 대표 스펙트럼 선정

이 연구에서 사용한 대표 스펙트럼은 선행연구 조사를 통해 지정하였다. 스펙트럼 선정에 있어 2005년 7월에 발표된 「공동주택 바닥충격음 차단구조 인정 및 관리기준」 행정규칙에서 슬라브 두께 210 mm의 규정을 고려하였다. Shin 등⁽¹²⁾은 해당 행정규칙 이전에 지어진 주택 80개소(슬라브 두께 110 mm ~ 180 mm)와



(a) Cross section of floor structure
(b) Measurements of the impact ball in the receiving room

Fig. 1 Cross section and measurement frequency characteristics

이후에 지어진 주택 60개소(슬라브 두께 210 mm)에서 측정된 고무공 충격음 측정데이터를 K-mean clustering⁽¹³⁾ 방법으로 분류하는 연구를 수행한 바 있다.

이 실험에서는 슬라브 두께 210 mm에서 가장 큰 비율을 차지한 스펙트럼을 “spectrum A”로, 슬라브 두께 110 mm ~ 180 mm에서 가장 큰 비율을 차지한 스펙트럼을 “spectrum B”로 설정하였다.

(3) 음원 크기 선정

실험에서 제시할 음원의 단일수치평가량 중심값 설정을 위하여 다음의 연구를 참고하였다. Kim 등⁽¹⁴⁾은 2010년대 공동주택 (슬라브 210 mm)의 고무공 충격음 성능 평균을 46.7 dB ($L_{i,Fmax, Aw}$)로 확인하였다. Yeon⁽¹⁵⁾은 개정 전 평가지표를 ($L_{i,Fmax, Aw}$) 개정 후 평가지표($L_{iA, Fmax}$)로 환산하면 3 dB ~ 5 dB 증가하는 것으로 분석하였다.

위의 연구로 청감실험을 위한 단일수치평가량의 중앙값을 51 dB($L_{iA, Fmax}$)로 선정하였다. 또한, 2022년 8월 개정된 차단성능 등급이 4 dB인 점을 고려하여, 최소인지한계 범위 내에서의 주파수에 대한 주관적인 반응에 대해 알아보고자 51 dB에서 ±4 dB로 설정하였다.

최종적으로 음원의 크기는 $L_{iA, Fmax}$ 로 47 dB, 51 dB, 55 dB 3단계로 구성하여 크기에 따른 비교 실험을 진행하였다. 대표 스펙트럼 A, B와 음원의 크기 3단계를 정리하여 Fig. 2에 나타냈다.

(4) 음원 편집

음원은 고무공 충격음 측정값에 대해 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz 범위에서 1/1 옥타브밴드로 한정하였다. dB 변화량은 예비 실험을 통해 2 dB 간격으로 설정하였으며, 최종적으로 ±2 dB, ±4 dB, ±6 dB 범위로 수행되었다. 두 개의 대표 스펙트럼과 단일수치평가량 3단계, ±2 dB, ±4 dB, ±6 dB의 dB 변화량을 가지는 음원을 편집하기 위해 다음과 같은 절차로 편집하였다.

먼저, 녹음한 wave 파일을 DAW(protools)에서 clip gain을 통해 크기를 조절하였다. 옥타브 대역별 크기 조절은 waves audio의 G-EQ 플러그인을 사용하였다. 편집한 음원을 헤드폰을 통해 재생하고 재생되는 소리를 더미헤드의 이어마이크로 측정하여 최종적으로 의도한 조절량만큼 변경되었는지 음원 재생의 최종단계에서 확인하였다. 음원 제작 및 편집에 사용된 장비를 아래와 같이 정리하였다.

Dummy head	: HSU III.2 (HEAD acoustic)
DAW	: Protools HD10 (AVID)
Headphone amplifier	: HP4 (Presonus)
Headphone	: DT770 Pro (Beyerdynamic)
Analysis program	: dB FA Suite (01dB)

2.2 실험 절차

(1) 문항

다음은 순서대로 최소인지한계와 어노이언스에 대한 문항으로, 다음과 같이 사용하였다.

“첫 번째 음원과 두 번째 음원이 다르다고 느껴지십니까?” 예 / 아니오

“첫 번째 음원과 두 번째 음원 중에서 더 신경쓰이는 소리를 선택하세요.” 첫 번째 / 두 번째

(2) 음원 제시

음원은 Fig. 3과 같이 주파수를 조절하지 않은 기준 음원을 먼저 3초 동안 제시하였고, 0.5초의 공백 이후, 주파수 조절한 비교음원 3초를 한 쌍으로 총 두 번 제시하였다. 1초에 2회 가진하였으며, 성인 보행의

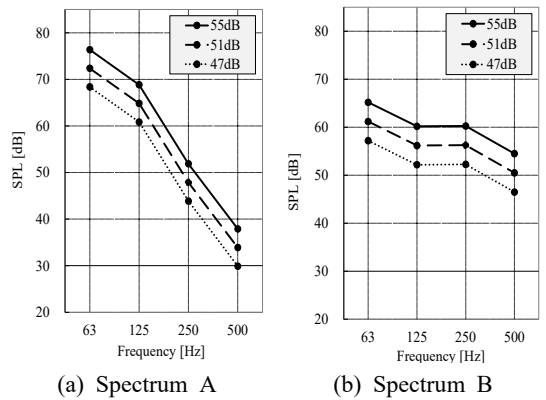


Fig. 2 Representative spectrum

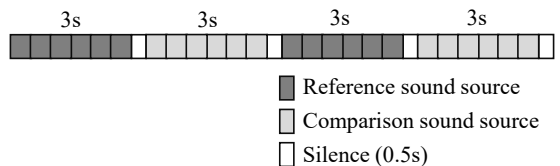


Fig. 3 Source presentation format per question

평균 속도를 고려하여 설정하였다⁽¹⁶⁾.

예를 들면, Fig. 4와 같이 주파수를 조절하지 않은 기준음원과 125 Hz를 6 dB 증가시킨 음원을 비교 음원으로 제시하였다. 다른 dB 변화량도 동일한 방식으로 진행되었다. 또한, 총 168문항으로, 제시 순서에 의한 편향을 최소화하기 위해 무순서로 제시하였다. 실험은 20분 청취 후 5분 휴식, 다시 20분 청취하였으며, 실험 안내를 포함해 총 60분이 소요되었다.

(3) 피험자 및 응답 방법

실험에는 총 83명, 최소연령 8세부터 최고연령 74세 까지 다양한 연령대가 참여하였다. 성비는 남성 29명 (35%), 여성 52명(65%)으로 구성되었다. 실험은 Fig. 5

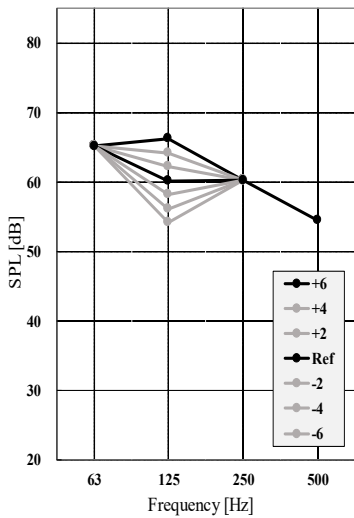


Fig. 4 Comparison stimuli for experiment (125 Hz – 2 dB step size)



Fig. 5 Appearance of auditory experiment

와 같이 헤드폰으로 제시되는 음원을 듣고 온라인 설문지인 구글폼에 응답하도록 하였다.

2.3 실험결과 분산분석 방법

실험에서 얻은 결과를 바탕으로 통계분석을 수행하였다. 분산분석에는 비모수 통계분석 중 Kruskal wallis H Test를 활용하였다⁽¹⁷⁾.

비모수 통계를 사용한 이유는 첫째로, 실험 설계상 응답 결과를 “Yes or No” 또는 “1번, 2번”과 같은 binary data로 얻었으며, 둘째로, Kruskal wallis H Test는 데이터를 순위로 변환하여 데이터 자체의 분포를 가정하지 않고 변환한 순위에 의한 순위 합(rank sum) 방식을 사용한다는 장점이 있기 때문이다.

3. 옥타브밴드별 고무공충격음 청감실험결과

3.1 옥타브밴드별 최소인지한계

최소인지한계 문항에서 ‘첫 번째 음원과 두 번째 음원의 차이가 있다.’라고 응답한 비율(정답률)을 바탕으로 결과를 분석하였다. 이 절에서는 피험자의 응답 결과를 (1) spectrum A, (2) spectrum B로 나누어 1/1 옥타브 대역별로 Probit 회귀분석을 통해 분석하였다^(18,19). 또한, 이 연구에서는 기준음원보다 -2 dB, 4 dB, 6 dB로 감소했을 때를 JND_N(N)으로, 기준음원보다 +2 dB, 4 dB, 6 dB 증가했을 때를 JND_P(P)로 표현하였다.

Table 1에 (a)는 spectrum A를, (b)는 spectrum B의 결과를 나타냈다. Table 2에는 spectrum A와 B의 최소인지한계(정답률 75%)에서의 dB 결과를 정리하였다. 이때, 75%는 정답률 50%와 100%의 중간값으로 이때를 차이 임계값(difference threshold) 최소인지한계로 해석한다⁽²⁰⁾.

(1) Spectrum A 최소인지한계

Table 1(a)에 spectrum A 최소인지한계 응답에 대한 Probit 회귀분석 결과를 나타냈다. 주파수별 최소인지한계 그래프에서 가로축은 dB 변화량 세로축은 차이인지에 대한 정답률을 의미한다.

그래프에서 V 모양이 뾰족할수록 dB 변화에 따른 정답률 비율이 급격히 증가하는 것을 의미한다.

Spectrum A에서는 $L_{iA,Fmax}$ 47 dB, 51 dB, 55 dB 3단계 모두에서 125 Hz 밴드에서 가장 높은 정답률이 확인되었다. 또한, 250 Hz 밴드에서 가장 낮은 정답률을 나타냈다.

(2) Spectrum B의 최소인지한계

Table 1(b)에 spectrum B 최소인지한계 응답에 대한 Probit 회귀분석 결과를 나타냈다. Spectrum B에서는 spectrum A와 달리 단일수치평가량 47 dB, 51 dB, 55 dB 3단계 모두에서 500 Hz 밴드가 가장 높은 응답률이 나타났다. 반대로, 63 Hz 밴드가 가장 낮은 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 spectrum A와 비교해 spectrum B가 고음 성분의 비율이 높고, A weighting을 할 경우, 250 Hz 밴드와 500 Hz 밴드의 값이 63 Hz와 125 Hz 밴드와 비교해 상대적으로 높게 산출되기 때문으로 판단된다.

또한 앞선 Jeong and Lee⁽³⁾의 연구에서 125 Hz 밴드 대역에서 인지율이 높다는 결과와는 다르게 이 실험에서는 스펙트럼 특성이 다를 경우 인지특성이 높은 옥타브 대역이 달라질 수 있음이 확인되었다.

Table 2의 최소인지한계 결과에서 단일수치평가량이 증가하면 절대적인 음압이 증가해 차이를 구별하는 최소인지한계 값이 작아질 것이라 예상했으나, 단

일수치평가량 변화에 따른 최소인지한계의 증감은 확인되지 않았다. 단일수치평가량이 변화하여도 인지율이 높은 옥타브 대역이 유지되는 것이 확인되었다.

아울러, Table 2의 결과에서 JND_N 결과보다는 JNP_P의 값이 작아 소리가 증가할 때의 정답률이 높은 것으로 확인되었다.

3.2 옥타브밴드별 어노이언스

어노이언스 결과는 ‘첫 번째 음원과 두 번째 음원 중에서 더 신경 쓰이는 소리를 선택하세요.’라는 문항에 두 번째 음원(비교 음원)을 선택한 비율로 산정하였다.

결과를 (1) spectrum A, (2) spectrum B로 나누어 1/1 옥타브 대역별로 probit 회귀분석을 통해 나타내었다. 옥타브밴드가 -6 dB부터 +6 dB 범위로 증가하는 동안 어노이언스(비교음원이 신경 쓰인다고 응답한 비율)이 증가하는 것으로 해석할 수 있다. 이때, 가로축 -8 dB, +8 dB는 회귀분석에 의해 추정된 값으

Table 1 JND result of spectrum A, B (analyzed by probit regression curve)

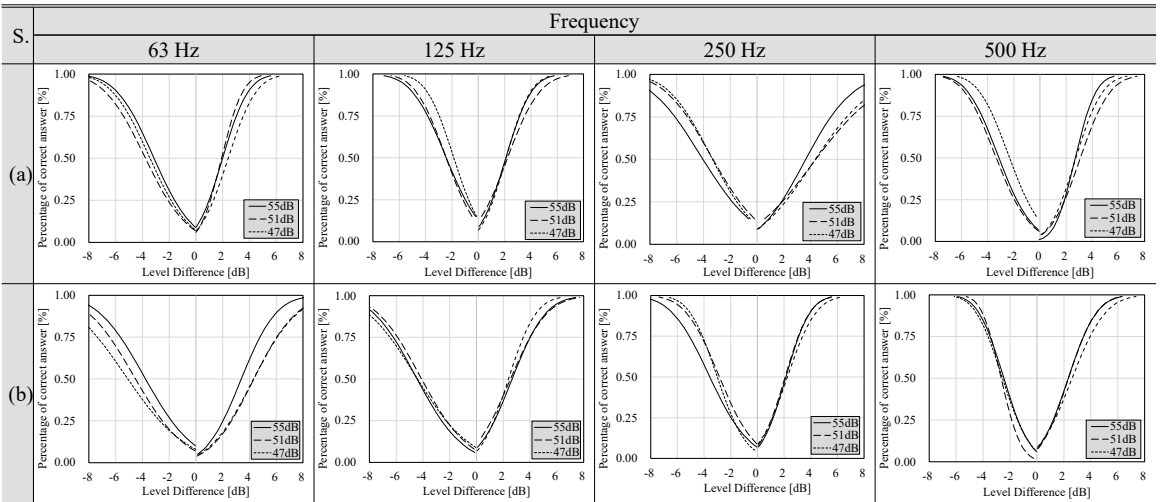


Table 2 JND value of octave band [unit: dB]

$L_{7A, Fmax}$	Spectrum A								Spectrum B							
	63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz		63 Hz		125 Hz		250 Hz		500 Hz	
	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P
55 dB	-4.6	3.0	-3.8	3.1	-6.1	5.5	-4.4	3.5	-5.6	4.8	-6.2	4.0	-5.1	3.1	-3.5	3.5
51 dB	-5.4	2.8	-3.7	3.5	-5.2	7.0	-4.7	4.3	-6.4	6.0	-5.9	4.0	-4.2	3.1	-3.4	3.5
47 dB	-5.0	3.5	-3.0	3.1	-5.1	6.7	-3.6	3.8	-7.4	6.1	-6.5	3.5	-4.1	3.4	-3.6	3.9
Mean	-5.0	3.1	-3.5	3.3	-5.5	6.4	-4.2	3.9	-6.5	5.6	-6.2	3.8	-4.5	3.2	-3.5	3.6

로 실제 실험범위는 -6 dB에서 +6 dB이다.

아울러, 우상향의 그래프의 기울기가 가파를수록 dB 변화량에 따른 어노이언스 증감률이 높은 것을 의미한다. Table 3에 (a)는 spectrum A를, (b)는 spectrum B의 결과를 나타냈다.

(1) Spectrum A 어노이언스

Table 1(a)에 spectrum A 어노이언스 응답에 대한 Probit 회귀분석 결과를 나타냈다. 선행연구에 따라 Probit 회귀분석은 응답률 20%~80% 구간을 직선으로 간주하고 기울기를 산출할 수 있다⁽²¹⁾. 예를 들면, 1 dB 당 어노이언스 변화 비율 %를 %/dB라는 단위로 표현할 수 있다.

Spectrum A에서 어노이언스 증감률의 기울기가 가장 큰 옥타브 대역은 63 Hz 밴드로 확인되었다. Spectrum A의 옥타브밴드별 어노이언스 증감률을 Table 4에 정리하였다. 예를 들어, 63 Hz 밴드의 평균 값인 8.9%의 결과는 63 Hz 밴드가 1 dB 증가 또는 감소하면 어노이언스가 8.9% 증가 또는 감소할 수

있음을 의미한다.

(2) Spectrum B 어노이언스

Table 3(b)의 Probit 회귀분석 결과, spectrum B에서는 spectrum A와 다르게 어노이언스 기울기가 가장 큰 대역이 500 Hz 밴드로 확인되었다. Spectrum A, B의 어노이언스 결과를 비교하였을 때, 이 실험에서는 같은 피험자에게 동일한 ±2 dB, ±4 dB, ±6 dB로 조절된 음원을 제시하였음에도 스펙트럼에 따라서 다른 응답을 보일 수 있는 것으로 확인되었다.

Table 4의 어노이언스 결과를 비교해보면 spectrum A는 63 Hz와 125 Hz가, spectrum B는 250 Hz와 500 Hz가 높은 증감률을 나타내는 것으로 분석되었다. 이러한 어노이언스 결과는 대표 스펙트럼의 자체 저음과 고음 구성 특성에 기인할 가능성이 있을 것으로 사료된다.

아울러, 어노이언스 결과는 옥타브대역별 최소인지 한계 결과와 완벽히 일치하지는 않는 것으로 확인되었다. 이는 옥타브밴드별 차이를 인지하는 것과 그 대역이 ‘신경쓰인다’라는 것은 다른 청감 특성이기

Table 3 Annoyance result of spectrum A, B (analyzed by probit regression curve)

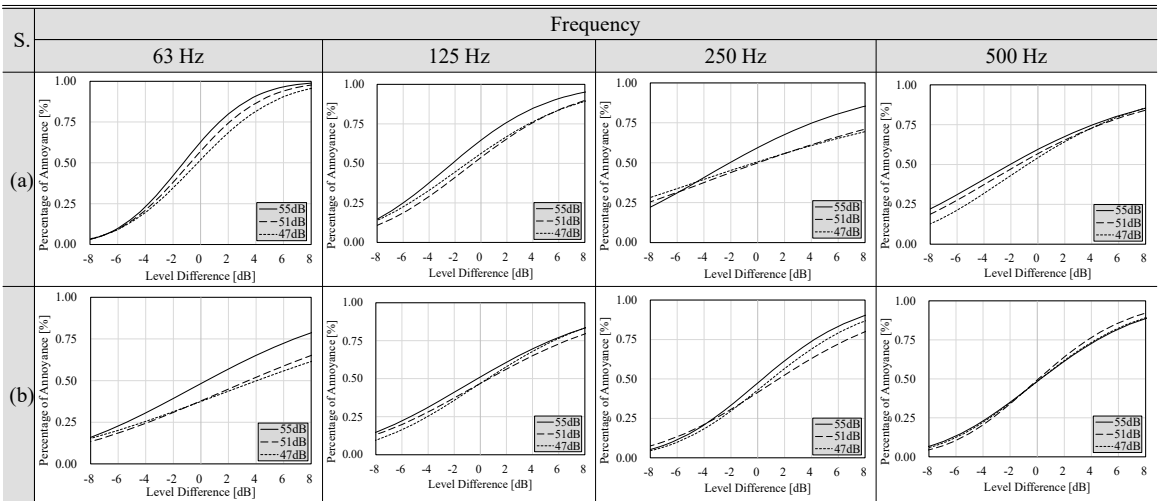


Table 4 Rate of annoyance change per dB (spectrum A, B)

$L_{7A, Fmax}$	Spectrum A				Spectrum B			
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz
55 dB	9.7 %	6.4 %	3.6 %	4.3 %	4.1 %	4.6 %	6.6 %	6.2 %
51 dB	8.9 %	5.8 %	2.7 %	4.4 %	3.2 %	4.4 %	5.1 %	7.1 %
47 dB	8.1 %	5.4 %	2.5 %	5.1 %	2.8 %	5.2 %	6.3 %	6.4 %
Mean	8.9 %	5.9 %	2.9 %	4.6 %	3.4 %	4.7 %	6.0 %	6.5 %

때문으로 판단된다.

3.3 실험 결과분석

(1) 최소인지한계와 어노이언스 분산분석

Spectrum A와 B 각각의 JND_N, JND_P, annoyance에 대해 분산분석을 실시한 결과, 단일수치별 결과보다 옥타브밴드별 결과에서 명확한 차이를 나타냈다.

이는 dB 단위가 log scale을 사용하기 때문에 아래 식 (1)과 같이 감각량 S 가 자극량 I 에 로그에 비례하는 Weber-Fechner의 법칙이 반영된 것으로 사료된다⁽²²⁾. 단일수치평가량별 결과는 유의하지 않았으므로 최소인지한계 결과를 단일수치평가량별로는 평균 처리하였다.

$$S = k \log I + c \tag{1}$$

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2}{n}} \tag{2}$$

또한, 최소인지한계의 실용적인 활용을 위하여 JND_N과 JND_P의 -, + 부호 제거 방법으로 식 (2)와 같이 RMS(root mean square) 계산을 활용하였다. 옥타브밴드별 JND_N을 x_1 에 JND_P를 x_2 에 대입하

여 단일값인 x_{rms} 를 연산하였다.

그 결과를 Table 5에 나타냈다. Spectrum A, B의 결과를 정답률 4개의 구간으로 나누어 표현하였으며, 75% 정답률이 포함된 행이 최소인지한계 결과이다.

예를 들면, spectrum A의 63 Hz의 1.5 dB은 1.5 dB 이하일 경우, 0%~25%의 거주자들이 차이를 인지할 수 있다는 것을 의미한다. Spectrum A의 63 Hz의 4.2 dB은 4.2 dB 초과할 경우, 75%~100%의 거주자들이 차이를 인지할 수 있다는 것을 의미하며, 곧 최소인지한계를 의미한다.

(2) 최소인지한계와 어노이언스 증감률 비교

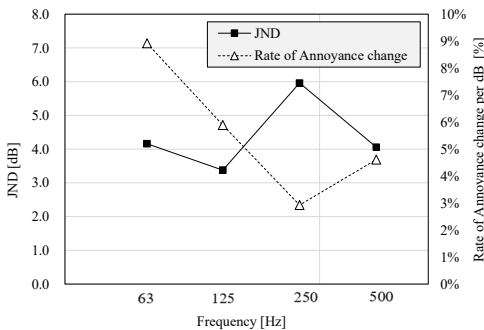
RMS로 산출한 최소인지한계와 어노이언스 증감률 (%/dB) 결과를 63 Hz~500 Hz 4개 옥타브대역에 대해 비교하였다.

Fig. 6 (a), (b)에 주파수에 따른 최소인지한계와 어노이언스 비교 결과를 나타냈다. 최소인지한계 값은 식 (2)의 RMS 계산을 통해서 구한 대푯값이다. 어노이언스 값은 앞선 Table 4에서 구한 어노이언스 증감률의 평균값이다.

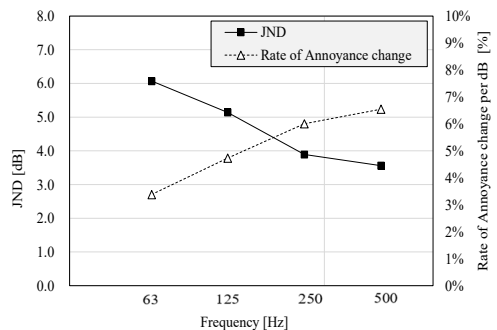
결과분석을 위해 (b) spectrum B의 결과를 먼저 검

Table 5 Decibel results by octave band according to the correct answer rate range

Correct %	Spectrum A				Spectrum B			
	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz
0% ~ 25%	$0 \leq L \leq 1.5$	$0 \leq L \leq 1.0$	$0 \leq L \leq 1.8$	$0 \leq L \leq 1.7$	$0 \leq L \leq 2.4$	$0 \leq L \leq 1.9$	$0 \leq L \leq 1.5$	$0 \leq L \leq 1.4$
25% ~ 50%	$1.5 < L \leq 2.9$	$1.0 < L \leq 2.2$	$1.8 < L \leq 3.9$	$1.7 < L \leq 2.9$	$2.4 < L \leq 4.2$	$1.9 < L \leq 3.5$	$1.5 < L \leq 2.7$	$1.4 < L \leq 2.5$
50% ~ 75%	$2.9 < L \leq 4.2$	$2.2 < L \leq 3.4$	$3.9 < L \leq 6.0$	$2.9 < L \leq 4.1$	$4.2 < L \leq 6.1$	$3.5 < L \leq 5.1$	$2.7 < L \leq 3.9$	$2.5 < L \leq 3.6$
75% ~ 100%	$L > 4.2$	$L > 3.4$	$L > 6.0$	$L > 4.1$	$L > 6.1$	$L > 5.1$	$L > 3.9$	$L > 3.6$



(a) Spectrum A



(b) Spectrum B

Fig. 6 Comparison of JND and annoyance

Table 6 Variation of SNQ($L_{iA, Fmax}$) with respect to level difference for octave band

Spec.A		Level difference						Spec.B		Level difference							
Spec.A	Level difference	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6	Spec.B	Level difference	-6	-4	-2	0	+2	+4	+6
Freq.									Freq.								
63 Hz		45.8	46.0	46.4	47.0	47.8	48.8	50.0	63 Hz		46.9	46.9	46.9	47.0	47.0	47.1	47.3
125 Hz		44.4	45.1	45.9	47.0	48.3	49.8	51.4	125 Hz		46.7	46.8	46.8	47.0	47.2	47.5	47.9
250 Hz		46.8	46.8	46.9	47.0	47.2	47.4	47.8	250 Hz		45.1	45.6	46.2	47.0	48.0	49.3	50.8
500 Hz		47.0	47.0	47.0	47.0	47.0	47.1	47.1	500 Hz		45.3	45.7	46.2	47.0	47.9	49.7	50.6

또하면 최소인지한계가 작은 대역일수록 어노이언스의 증감률이 증가하는 것으로 나타났다.

이는 옥타브 대역별로 dB 차이에 대한 인지율이 높은 대역일수록 dB당 어노이언스 증감률도 증가하는 것을 의미한다. Spectrum B에서는 이에 해당 옥타브대역이 500 Hz와 250 Hz로 확인되었다.

Fig. 6의 (a) spectrum A의 결과는 63 Hz 밴드를 제외한 나머지 3개의 밴드에서 최소인지한계가 작아질수록 어노이언스의 증감률이 증가하는 것으로 나타났다. Spectrum A에서는 최소인지한계가 작으면서도 어노이언스가 큰 대역이 125 Hz와 63 Hz 밴드로 확인되었다.

3.4 주파수 밴드별 dB 변화량에 따른 단일 수치변화량 분석

Table 6과 같이 spectrum A, B를 구분하여 주파수 밴드별로 dB 변화량에 따른 단일수치평가량($L_{iA, Fmax}$) 변화를 나타내었다. 청감실험 3단계 크기 중 바닥충격음 차단성능 등급기준 4급에 포함되는 수치인 47 dB를 기준으로 작성하였다.

예를 들어, spectrum A에서 옥타브밴드별 dB 변화량이 0일 때를 47 dB로 보고, 500 Hz 밴드에서는 -6에서 +6까지 변화 하는 동안 0.1 dB의 단일수치평가량 차이가 발생하며, 125 Hz 밴드에서는 같은 dB 변화량 동안 7 dB의 단일수치평가량 변화가 발생한다.

반면, spectrum B의 63 Hz 밴드에서는 같은 변화량 동안 0.4 dB의 단일수치평가량 차이가 발생하며, 250 Hz 밴드에서는 같은 dB 변화량 동안 5.7 dB의 단일수치평가량 변화가 발생한다. Spectrum의 특성에 따라 주파수 밴드별 단일수치평가량 기여율이 상이할 수 있다는 것을 시사하는 부분이다.

4. 토 의

선행연구에서 주파수에 대한 주관적 반응 연구가

다소 이루어졌지만 주로 하나의 스펙트럼을 이용하여 실험이 수행되었다. 기존의 주파수 관련 연구로 주파수의 고음, 저음의 비율이 다른 스펙트럼에서도 같은 결과를 적용할 수 있을지 밝혀지지 않았다.

이 연구에서는 선행연구 조사를 통해 얻은 대표 스펙트럼 두 가지를 활용하여 옥타브밴드에 따른 주관적 반응을 분석하였다. 그 결과, 스펙트럼의 특성에 따라 최소인지한계와 어노이언스의 응답이 다르게 나타날 수 있음을 확인하였다.

청감실험 결과 Table 6의 결과처럼 옥타브밴드를 증감했을 때 스펙트럼별로 단일수치 변화에 유리한 대역의 차이가 있음이 나타났다. 이러한 결과를 통해 평가 주파수 대역 전체가 로그함수로 작용하는 평가 방법에서 보다 높은 경제성을 확보하는 설계 방향 수립에 사용되기를 기대한다.

한편, 이 실험에서는 최소인지한계 실험에서 쌍대 비교를 통해 응답을 얻었으나 최소인지한계에는 다양한 방법론이 있다. 향후 수행될 실험에서는 심리음향학을 고려한 한계법, 조정법, transformed up-down 방법 등을 이용하여 이와 같은 실험에 보다 다양한 방법을 적용할 필요성이 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 청감실험을 통해 두 개의 스펙트럼을 대상으로 최소인지한계와 어노이언스를 조사하여 옥타브밴드별 고무공 충격음의 주관적 반응을 조사하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 두 제시 음원의 차이를 인지한 최소인지한계 실험 결과, spectrum A는 125 Hz 3.4 dB, 500 Hz 4.1 dB, 63 Hz 4.2 dB로 나타났으며, spectrum B는 500 Hz 3.6 dB, 250 Hz 3.9 dB, 125 Hz 5.1 dB로 평가되었다. 최소인지한계는 옥타브 대역 별로 각기 다른 값을 가

지며, 스펙트럼 특성이 다를 경우 동일한 dB 변화량에도 다른 응답 특성을 가질 수 있는 것으로 분석되었다.

(2) 충격음 레벨 1 dB 변화에 따른 어노이언스 변화량은 spectrum A는 63 Hz 8.9%/dB, 125 Hz 5.9%/dB로 나타났으며, spectrum B는 500 Hz 6.5%/dB, 250 Hz 6.0%로 평가되었다. 최소인지한계와 마찬가지로 어노이언스 응답도 스펙트럼 특성에 영향을 받는 것으로 사료된다.

(3) 청감실험 결과를 토대로 최소인지한계와 어노이언스 증감률을 비교한 결과, 전반적으로 최소인지한계가 작은 대역일수록 어노이언스 증감률이 높게 나타나는 경향을 확인하였으며, 이러한 대역은 이 실험에서 spectrum A는 63 Hz와 125 Hz, spectrum B는 250 Hz와 500 Hz인 것으로 분석되었다.

2022년부터 바다충격음 평가방법이 변경되면서 옥타브대역별 에너지 레벨의 주관적반응에 대한 검토가 요구되고 있으며, 보다 세부적으로 실험방법을 확대하여 추가적인 연구가 이루어질 필요가 있다. 그러나 이 연구 결과는 설계 우선순위 수립과 주관적반응 결과에 기반한 저감방안 설계 시 자료로 활용이 기대된다.

References

(1) Song, M.-J., Gi, N.-G., Jang, G.-S. and Kim, S.-W., 2004, A Study on the Sound Classification System for Floor Impact Sound Insulation Performance of Apartment Houses, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 20, No. 10, pp. 295~302.

(2) Ryu, J. K. and Jeon, J. Y., 2005, Classification of Noise Insulation Performance in Apartment Buildings through Noise Survey and Auditory Experiment, *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 666~669.

(3) Jeong, J.-H. and Lee, S.-C., 2017, A Study on the Subjective Loudness Responses on Octave-band Level Varied Floor Impact Sound, *Journal of KIAEBS*, Vol. 11, No. 2, pp. 107~112.

(4) Cho, H.-M., Kim, S.-T. and Kim, M.-J., 2020, Changes in Subjective Perceptions of Heavyweight Impact Sound Levels with the Same Single-number Quantity of Floor Impact Sound Insulation, *Transactions*

of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 30, No. 4, pp. 348~356.

(5) Kim, W.-J., Cho, H.-M. and Kim, M.-J., 2020, Subjective Response on the Octave Band Level Change of Rubber Ball Sound with the Same Single-number Quantity, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 30, No. 5, pp. 506~517.

(6) ISO, 2022, *Acoustics — Rating of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements — Part 2: Impact Sound Insulation*, KS F ISO 717-2:2022.

(7) Gelfand, S. A., 2017, *Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics*, 6th Edition, CRC Press, New York.

(8) Jeong, J.-H., 2021, Just Noticeable Difference of Rubber Ball Impact Sound, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 31, No. 3, pp. 308~318.

(9) Lee, S., Kim, J., Song, H., Ryu, J. and Kim, K., 2019, Just Noticeable Difference of SPL in Low-frequency Range for Airborne Sounds in Residential Space, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 29, No. 6, pp. 696~704.

(10) ISO, 2022, *Acoustics — Field Measurement of Sound Insulation in Buildings and of Building Elements — Part 2: Impact Sound Insulation*, KS F ISO 16283-2:2022.

(11) Lee, B.-K. and Kim, M.-J., 2005, Field Measurement of the Reverberation Time in Occupied and Unoccupied Apartment Houses, *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 654~657.

(12) Shin, H.-K., Park, S.-H., Kim, M.-J. and Kim, K.-W., 2022, A Study on Subjective Response to Heavy-weight Impact Sound through Representative Spectrum Analysis: A Case Study in South Korea, *Applied Acoustics*, Vol. 188, 108562.

(13) Ahmad, A. and Dey, L., 2007, A k-mean Clustering Algorithm for Mixed Numeric and Categorical Data, *Data & Knowledge Engineering*, Vol. 63, No. 2, pp. 503~527.

(14) Kim, Y.-H., Kim, M.-J. and Song, G.-G., 2022, Current Conditions of Floor Impact Noise Reduction Performances of the Existing Apartment Buildings to be Remodelled with Design Criteria, *Proceedings of the Spring Annual Conference of AIK*, Vol. 42, No. 1,

pp. 359~362.

(15) Yeon, J. O., 2022, A Study on the Amendments to the Housing Act on the Floor Impact Sound of Apartment Houses in Korea, *Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems*, Vol. 16, No. 4, pp. 22~27.

(16) Yoon, N.-M., Yoon, H.-J., Park, J.-S., Jeong H.-S. and Kim, G., 2010, The Comparative Study on Age-associated Gait Analysis in Normal Korean, *Journal of Korean Physical Therapy*, Vol. 22, No. 2, pp. 15~23.

(17) Kruskal, W. H. and Wallis, W. A., 1952, Use of Ranks in One-criterion Variance Analysis, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 47, No. 260, pp. 583~621.

(18) Finney, D. J., 1971, *Probit Analysis*, 3rd Edition, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

(19) Rindel, J. H., Løvstad, A. and Klæboe, R., 2017, Dose-response Curves for Satisfactory Sound Insulation between Dwellings, *Proceedings of 12th ICBEN Congress on Noise as a Public Health Problem*.

(20) Gelfand, S. A., 2017, *Hearing: An Introduction to Psychological and Physiological Acoustics*, 6th Edition, CRC Press, New York.

(21) Rindel, J. H., 1998, *Acoustic Quality and Sound*

Insulation between Dwellings, Building Acoustics, Vol. 5, No. 4, pp. 291~301.

(22) Portugal, R. D. and Svaite, B. F., 2011, Weberfechner Law and the Optimality of the Logarithmic Scale, *Minds and Machines*, Vol. 21, No. 1, pp. 73~81.



Yeon-su Ha obtained her B.A. at Dept of Audio Production, Dong-ah Institute of Media and Arts, Korea. She is currently a M.S. candidate at University of Seoul. Her research interests are in the areas of architectural acoustics and psycho-acoustics.



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