

단일 수치 평가량이 동일한 고무공 충격음의 주파수 레벨 변화에 따른 주관적 반응 평가

Subjective Response on the Octave Band Level Change of Rubber Ball Sound with the Same Single-number Quantity

김 우 정* · 조 현 민** · 김 명 준†

Woo-Jung Kim*, Hyun-Min Cho** and Myung-Jun Kim†

(Received September 11, 2020 ; Revised September 24, 2020 ; Accepted September 25, 2020)

Key Words : Floor Impact Noise(바닥충격음), Single-number Quantity(단일 수치 평가량), Auditory Experiment(청감 실험), Subjective Evaluation(주관적 평가), Annoyance(어노이언스)

ABSTRACT

In the evaluation of a single-number quantity for heavy impact source in accordance with KS F 2863-2, an upper value that exceeds the reference curves would be likely to be decided at 63 Hz, particularly for the floating floor structures. In this case, the sum of reductions in impact sound level below the reference curves between 125 Hz to 500 Hz do not affect the calculation of single-number quantity. In this study, the annoyance of various rubber ball sound stimuli with the same single-number quantity was examined. When the sum of reductions in impact sound level below the reference curves between 125 Hz and 500 Hz varied from 3 dB to 27 dB, subjects perceived a reduction of 2 dB to 8 dB in terms of the single-number quantity($L_{i,Fmax,AW}$) and recognized a decrease of annoyance. Therefore, the result shows that the floor impact sound insulation performance of 125 Hz to 500 Hz is significantly related to subjective evaluations.

1. 서 론

공동주택 층간소음 민원 대응을 위한 채실자 주관적 평가의 필요로 바닥충격음 청감실험 연구의 필요성이 제기되어⁽¹⁾, 2010년 이후 국내 청감실험을 통한 바닥충격음 어노이언스 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. 바닥충격음을 포함한 아파트 내 복합소음 및 개별소음에 따른 실내소음환경의 불만족도와 어노이

언스 및 소음 예민도에 대한 관계식을 도출해낸 연구가 이루어졌으며⁽²⁾, 슬라브 조건에 따른 공기전달음 및 바닥충격음에 대한 주관적 평가로 50 Hz 이하의 저주파수의 영향을 평가한 연구도 수행된 바 있다⁽³⁾.

일반적으로 천장구조나 완충재가 적용된 뜬바닥구조 등의 바닥충격음 저감구조에 의한 성능개선은 주로 125 Hz ~ 500 Hz라고 알려져 있으며, 실충격원에 의해 주로 발생하는 주파수 대역 역시 63 Hz 이하를 제외한 주파수 대역이 대부분인 것으로 연구되었다⁽⁴⁻⁶⁾.

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

* Member, Dpt. of Architectural Engineering, University of Seoul, M.S. student

** Member, Dpt. of Architectural Engineering, University of Seoul, Post-doctorate researcher

A part of this paper is present at the KSNVE 2020 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Jong Kwan Ryu

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

저감구조(천장구조 내 흡음재 설치 등)에 의한 중량 충격음 차단성능에 대한 기존 연구에 의하면 고무공 충격원의 경우 125 Hz 주파수 대역 이상에서 충격음 레벨 저감량의 합이 약 5 dB 이상으로 나타났다(7-10). 그러나 해당 주파수 대역의 저감 성능에도 불구하고 현 평가방법(KS F 2863-1, 2)^(11,12)의 역A특성가중 바닥충격음레벨($L_{i,Fmax,AW}$) 지표에 의해 산출한 단일 수치 평가량의 개선량은 이를 충분히 반영하지 못하는 실정이다. 이는 국토교통부고시 제2019-622호⁽¹³⁾의 사전 인정제도로 인한 공동주택의 뜬바닥 구조 적용에 따라 주로 63 Hz 대역의 과도한 충격력에 의해 단일 수치 평가량이 결정되기 때문이라고 판단된다^(14,15).

기존 연구에 의하면 바닥충격음 평가 기준 제안 등의 다양한 목적으로 여러 가지의 단일 수치 평가량 음원을 제시하여 주관적 반응을 평가한 연구가 대다수였다. 각 주파수 대역별 충격음레벨 차이에 대한 청감실험 연구는 Jung(2017)⁽¹⁶⁾이 고무공충격원을 대상으로 다양한 단일 수치 평가량과 주관적 반응의 상관관계를 분석하였고, Shin et al.⁽¹⁷⁾이 11가지의 중량 충격음 주파수 대역별 감소 패턴과 현행 단일 수치 평가량과의 대응 연구를 진행하였다. 최근 Cho et al.⁽¹⁸⁾의 연구에서는 동일한 단일 수치 평가량의 음원을 대상으로 다양한 주파수 대역의 충격음레벨 변화량에 따른 청감실험을 진행하였으며, 각 차이를 재실자가 인지하는 것으로 도출되었다. 그러나 다양한 주파수 대역별 충격음레벨 변화량에 따라 각각의 단일 수치 평가량과 동일한 대응성을 가지는 지에 대한 연구는 아직 미미하다.

이에 이 연구에서는 Cho et al.⁽¹⁸⁾의 후속 연구로, 역A특성가중 바닥충격음레벨($L_{i,Fmax,AW}$) 단일 수치 평가량이 50 dB이고 63 Hz 대역에 의해 단일 수치가 결정되는 바닥충격음 특성 음원을 대상으로, 125 Hz ~ 500 Hz 주파수 대역에서 다양한 변화량을 가지는 실험 음원(28개 case)이 각각의 단일 수치 평가량 음원과 유사한 주관적 반응을 보이는 지에 대해 청감실험을 진행하였다.

2. 실험 개요 및 방법

2.1 실험 음원

(1) 대상 음원 측정 및 선정

대상 음원은 세종시 소재 LH 실증주택실험동

84type(벽식구조)의 거실에서 측정하였다. 측정 세대의 바닥슬래브 두께는 210 mm였으며, 상세 바닥 및 개발 천장 구조는 Fig. 1에 나타내었다.

다채널신호분석기(dB4-4ch.; 01dB)로 측정한 음원 중 표준중량충격력 특성2(이하 고무공)의 중앙점 가진 및 중앙점 수음 음원을 선정하였으며, 그 중 1회 타격 음원을 0.5초 간격(성인 평균 걸음 간격)으로 5회 배치한 원 음원을 실험 조건에 맞게 프로세싱하여 사용하였다⁽¹⁹⁾.

(2) 실험 대상 음원 Case

고무공충격원을 대상으로 동일한 단일 수치 평가량을 가지는 다양한 저감 조건의 실험 음원(28개 case)과 현 평가방법에 의한 단일 수치 평가량의 음원(6개 case)을 Table 1에 나타내었다.

음원 case는 63 Hz 주파수 대역이 과도한 충격력으로 인해 기준곡선을 8 dB 상회하여 단일 수치 평가량이 결정되는 경우를 가정하여 현행 평가기준인 역A특성가중 바닥충격음레벨 단일 수치 평가량 50 dB를 기준으로 63 Hz 주파수 대역의 충격음레벨은 고정시키고 125 Hz ~ 500 Hz 주파수 대역이 각각 역A특성 기준곡선보다 3 dB, 5 dB, 7 dB, 9 dB 저감된 28개의 실험 음원을 제작하였다. 이 연구에서는 다음과 같이 기준곡선을 8 dB 이상 상회하여 단일 수치 평가량을 결정하는 63 Hz를 결정주파수 대역(main contribution frequency)이라고 하며, 저감된 충격음레벨을 의미하는 변화량(changing value)을 다양하게 설정한 125 Hz ~ 500 Hz를 변화주파수 대역(changing frequency band)이라고 한다⁽²⁰⁾.

따라서 변화주파수 대역이 1개(125 Hz, 250 Hz, 500 Hz), 2개(125+250 Hz, 125+500 Hz, 250+500 Hz), 3개

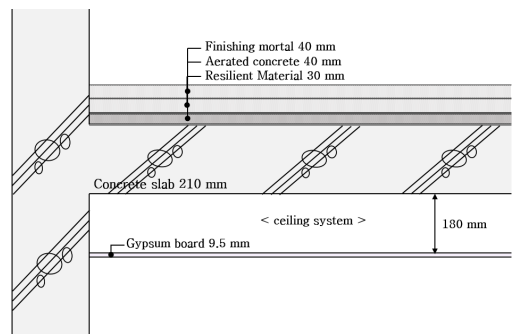


Fig. 1 Cross section of floor and ceiling structure

(125+250+500 Hz)인 case로 분류되며, 결정주파수대역은 모두 63 Hz로 모두 동일하다. 또한 현 평가방법에 의한 단일 수치 평가량 음원(40 dB, 42 dB, 44 dB, 46 dB, 48 dB, 50 dB) 6개 case를 제작하여, 총 34개의 case에 대해 주관적 평가를 진행하였다.

2.2 실험 환경 및 시스템

(1) 실험환경 및 시스템

전반적인 청감실험 시스템 signal flow를 도식화하여 Fig. 2와 같이 나타내었다. 마이크로폰(dB4; 01dB)으로 녹음된 고부공충격원 음원을 주파수분석

소프트웨어(dBFA Suite; 01dB)를 통해 wave file로 추출하였다. 이후 해당 wave file을 DAW(protools HD 10; Avid)내의 이퀄라이저(Waves Audio)로 음원의 주파수 대역별 충격을 레벨을 조정하였으며, Plugin Alliance의 Dear Reality dearVR Pro를 통해 Visual Reality의 핵심 기술 중 하나인 HRTF를 적용하여 음원이 상부층의 위치에서 재생되도록 하였다. 이후 더미헤드(HSU III.2; Head Acoustics)와 correction 과정을 거쳐 청감실험 음원 및 환경을 세팅하였다. 전반적인 청감실험의 진행은 TTS(text-to-speech)로 제작된 안내음성이 음원과 함께 재생되어 외부 진행자의 개입 없이 진행되었다.

청감실험은 Audio Engineering Society (AES) Standard, Society of Automotive Engineers (SAE)의 가이드라인에 따라 설계된 서울시립대학교 제2공학관 내의 청감실험실에서 실시하였으며^(21,22), 실험실 환경을 Table 2에 제시하였다. 청감실험은 Fig. 3와 같이 Headphone Amplifier (HA-6A; FURMAN)와 Headphone (HD650; Sennheiser)으로 동일한 청취 환경에서 최대 4명이 동시에 진행하였다.

(2) 평가방법

피실험자들은 청감실험 시 쌍대비교법(PC), 7점 척도법(SD)으로 각각의 어노이언스 및 라우드니스를 평가하였다⁽²³⁾. 저감 조건 28개 case와 단일 수치 평가량 6개 case를 쌍대비교로 제시한 총 168개의 문항을 랜덤으로 청취한 후, 음원의 어노이언스 및 라우

Table 1 Cases of experimental source

No.	Main contribution frequency [Hz]	Changing frequency [Hz]	Changing value [dB]	Frequency [Hz]			
				63	125	250	500
1	63	50 dB		81	63	56	50
2			3	81	60	56	50
3			5	81	58	56	50
4		125	7	81	56	56	50
5			9	81	54	56	50
6			3	81	63	53	50
7			5	81	63	51	50
8		250	7	81	63	49	50
9			9	81	63	47	50
10			3	81	63	56	47
11		500	5	81	63	56	45
12			7	81	63	56	43
13			9	81	63	56	41
14			3	81	60	53	50
15		125+250	5	81	58	51	50
16			7	81	56	49	50
17			9	81	54	47	50
18		125+500	3	81	60	56	47
19			5	81	58	56	45
20			7	81	56	56	43
21			9	81	54	56	41
22		250+500	3	81	63	53	47
23			5	81	63	51	45
24			7	81	63	49	43
25			9	81	63	47	41
26		125+250+500	3	81	60	53	47
27			5	81	58	51	45
28			7	81	56	49	43
29		9	81	54	47	41	
30		40 dB		70	53	46	40
31		42 dB		72	55	48	42
32		44 dB		74	57	50	44
33		46 dB		76	59	52	46
34		48 dB		78	61	54	48

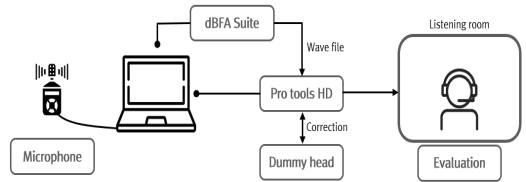


Fig. 2 Signal flow of auditory experiment

Table 2 Environment of auditory experimental laboratory

Volume	63.4 m ³
Background noise	22.6 dB(A)
NRC	0.835
NR	20 dB
Temperature	22 °C ~23 °C
Humidity	50 % ~55 %

드니스를 1부터 7까지 평가하고 두 음원의 크기를 비교하였다. 예를 들어, 1번 문항에서는 실험 음원(125 Hz 주파수 대역, 변화량 5 dB)과 단일 수치 평가량 음원(48 dB)을 제시하여 두 음원의 주관적인 크기를 비교하고 각 음원의 어노이언스를 평가하였다.

모든 답변은 실험실에 비치된 노트북이나 타블렛 이용하여 제시된 폼으로 제출하였다. 또한 두 청감실험 모두 음원 및 문항 간 간격을 충분히 두어 앞뒤 음원의 영향을 최소화하도록 했으며, 20분 실험 후 10분 휴식하게 하여 쾌적한 실험 환경을 유지할 수 있도록 했다.

2.3 피실험자

청감실험 이전에 피실험자에 대한 설문조사를 진행하였다. 설문조사는 피실험자의 성별, 연령, 거주형태 등의 기본 사항에 대한 문항(1번~8번)과 층간소음 피해 경험에 대한 문항(9번~11번)으로 이루어졌으며, 이에 대한 결과는 Table 3에 나타내었다.

청감실험은 정상청력을 지닌 남성 20명, 여성 16명으로 총 36명에 대해 진행되었다. 또한 평균 연령은 남성 평균 28.0세, 여성 평균 26.4세로, 전체 평균 연령 27.3세의 피실험자로 구성되었다. 피험자들의 직종 또는 전공은 음향(건축 또는 전기)이 22명으로 약 61%를 차지하였으며, 음악 전공 및 종사자는 4명, 그 외 기타 분류는 10명으로 나타났다. 하루에 이어폰이나 헤드폰을 착용하는 평균 시간은 2시간 이상이 26명으로, 장시간 착용자가 많은 것으로 조사되었다. 거주형태는 단독주택 거주자가 2명, 공동주택 거주자가 33명으로 피실험자의 약 92%가 공동주택에 거주하고 있었으며, 그 외 기타 1명은 기숙사 거주자였다.

현 거주지에 대한 거주만족도 조사 결과, “매우 만족하지 않는다.”와 “별로 만족하지 않는다.”가 3명으

로 대부분 만족 또는 보통으로 답했다. 거주지에 대한 전반적인 소음 환경에 대한 만족도는 “매우 만족하지 않는다.”가 5명, “매우 만족한다.”가 4명으로 거주만족도 결과보다 매우 불만족 인원은 많고 매우 만

Table 3 Results for questionnaire respondents

1. Gender				
Men		Women		
20		16		
2. Average of age				
Men	Women	All		
28.0	26.4	27.3		
3. Type of Occupation				
Acoustics	Music	Etc.		
22	4	10		
4. Average period of wearing earphones, headphones (per day)				
Rarely	Less than 1 hour	1~2 hours	2~3 hours	More than 3 hours
2	6	2	10	16
5. Residential types				
Detached house	Attached house	Etc.		
2	33	1		
6. How long have you lived there?				
Less than 1 year	1~3 years	3~5 years	5~10 years	More than 10 years
9	12	7	0	8
7. How satisfied are you with residence now? (5-points)				
Very bad	Bad	Nothing	Good	Very good
1	2	14	12	7
8. How satisfied are you with residential noise environment? (5-points)				
Very satisfied	Bad	Nothing	Good	Very good
5	0	11	10	4
9. Have you experienced the issue of floor impact noise?				
Yes		No		
24		12		
10. How often does the issue happened?				
Everyday	Once a week	Once a month	Once 2~3 months	Less frequently
3	10	0	5	6
11. What time have you experienced it? (multiple selection)				
7~12 a.m.	12~18 p.m.	18~21 p.m.	21~24 p.m.	0~7 a.m.
4	2	8	13	6



Fig. 3 Appearance of auditory experiment

족 인원은 적은 것으로 파악되었다.

충간소음 피해 경험 관련 문항에서 “충간소음 피해를 경험한 적이 있다.”고 답한 24명에 대해서 피해 빈도와 시간대를 추가로 조사하였다. 피해 빈도는 다양하였으나 “일주일마다”가 24명 중 10명으로 가장 다수였으며, 주로 충간소음을 겪은 시간대는 밤(21 p.m. ~ 24 p.m.)이 가장 많고 그 다음 순서로는 저녁(18 p.m. ~ 21 p.m.), 새벽(0 a.m. ~ 7 a.m.)로 나타났다.

3. 실험 결과

실험 결과의 분석 방법은 다음과 같다. ① 단일 수치 평가량(50 dB)과 63 Hz 주파수 대역의 충격음레벨이 동일할 때, 변화주파수 대역의 변화량에 따른 인지 비율 분석, ② 주파수 대역별 충격음레벨을 변화시킨 실험 음원과 동일한 크기로 인지하는 단일 수치 평가량 및 그 인지 비율 분석, ③ 단일 수치 평가량 및 각각의 단일 수치 평가량과 동일한 크기로 인지하는 실험 음원의 어노이언스를 분석, ④ 주관적 크기 인지에 따른 세 가지 단일 수치 평가지표의 변별력 분석에 대해 진행되었다.

3.1 충격음레벨 변화량에 따른 인지 비율

단일 수치 평가량(50 dB)과 63 Hz 주파수대역의 충격음레벨이 동일한 음원의 변화주파수 대역별 충격음레벨 변화량에 따른 인지 비율을 Fig. 4에 나타내었다. 각 변화주파수 대역별 충격음 레벨 변화량은 3 dB, 5 dB, 7 dB, 9 dB이었으므로, 변화주파수 대역이 1개인 경우는 총 3 dB, 5 dB, 7 dB, 9 dB, 2개인 경우는 총 6 dB, 10 dB, 14 dB, 18 dB, 3개인 경우는 총 9 dB, 15 dB,

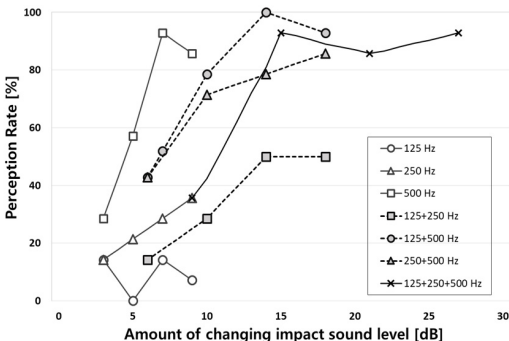


Fig. 4 Perception rate to amount of changing impact sound level (SNQ 50 dB; $L_{i,Fmax,AW}$)

21 dB, 27 dB 변화시킨 음원이다.

변화주파수 대역이 1개일 때, 변화주파수 대역이 125 Hz와 250 Hz이며 3 dB ~ 9 dB 변화한 case에서 모두 40 % 미만의 인지 비율을 보였으나, 변화주파수 대역이 500 Hz인 경우 변화량이 증가함에 따라 7 dB 변화 시 인지 비율이 최대 92 %까지 증가하였다. 변화주파수 대역이 2개 이상일 때, 125+250 Hz가 변화 주파수 대역인 경우를 제외하고 변화량이 10 dB 이상인 모든 case의 인지 비율이 80 % 이상인 것으로 분석되었다. 이와 같이 전체적으로 충격음레벨 변화량이 증가할수록 인지 비율도 증가하였으나, 변화주파수 대역별 인지 비율의 편차가 존재하는 것으로 나타났다.

따라서 단일 수치 평가량(50 dB)과 63 Hz의 충격음 레벨이 동일할 때에도 재실자가 125 Hz ~ 500 Hz 주파수 대역의 저감에 따른 크기의 차이를 인지할 수 있는 것으로 확인되었으며, 주파수 대역별 충격음레벨의 다양한 변화 case와 단일 수치 평가량 간의 인지에 대한 대응 분석이 추가적으로 필요한 것으로 판단된다. 이는 Cho et al.⁽¹⁸⁾의 단일 수치 평가량(54 dB)을 기준으로 충격음 레벨 변화량에 따른 인지 비율을 분석한 결과와 유사하였다. 이 연구에서는 이에 대한 후속 연구로 청감실험을 활용하여 변화주파수 대역별 충격음레벨을 변화시킨 음원(50 dB)과 다양한 크기의 단일 수치 평가량 음원의 크기 비교를 통한 인지 비율과 각각의 어노이언스를 분석하였다.

3.2 단일 수치 평가량과의 크기 비교 결과

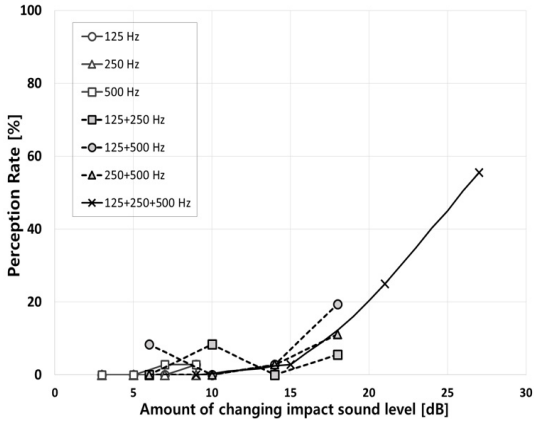
피실험자들은 전체 실험 case 음원(50 dB)과 현행 단일 수치 평가량 음원(40 dB, 42 dB, 44 dB, 46 dB, 48 dB, 50 dB)을 연속으로 듣고 ‘동일하다.’, ‘첫 번째 음원이 더 크다.’, ‘두 번째 음원이 더 크다.’ 세 가지로 크기를 비교하였다. 이 때 인지 비율은 ‘동일하다.’ 또는 ‘단일 수치 평가량 음원이 더 크다.’로 평가한 피험자의 비율을 의미하며, 충격음레벨 변화량에 따라 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5를 통해 전체적으로 변화주파수 대역의 개수 및 충격음레벨의 변화량이 증가함에 따라 더 작은 단일 수치 평가량과의 인지 비율이 높아지는 것을 확인하였다. 또한 상대적으로 비교한 단일 수치 평가량이 클수록 변화량에 따른 인지 비율 결과가 미미한 것은 변화량이 클수록 인지 비율 내의 ‘단일 수치 평가량 음원이 더 크다.’의 비율이 높아지고 ‘동일하다.’의 비

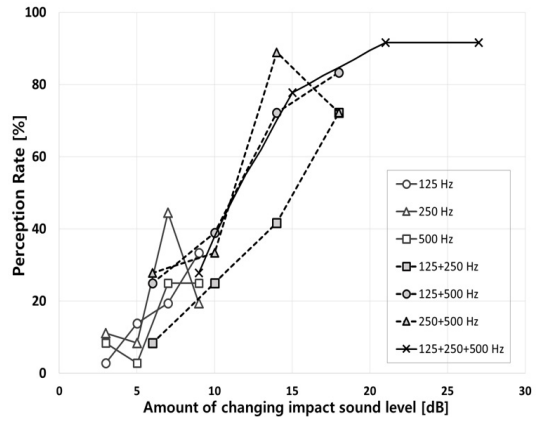
율은 낮아져, 두 비율의 합은 차이가 미미하기 때문
으로 판단된다.

이 연구에서는 인지 비율이 80 % 이상인 단일 수

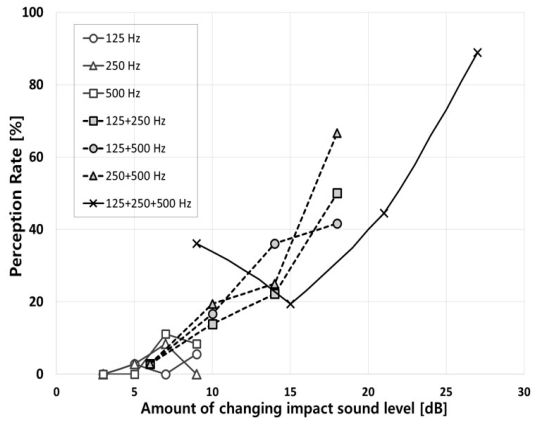
치 평가량을 대다수가 동일한 크기로 인지하는 수치
로 간주하였으며, 하나의 case에서 인지 비율이 80 %
이상인 단일 수치 평가량이 다수일 경우 ‘동일하다.’



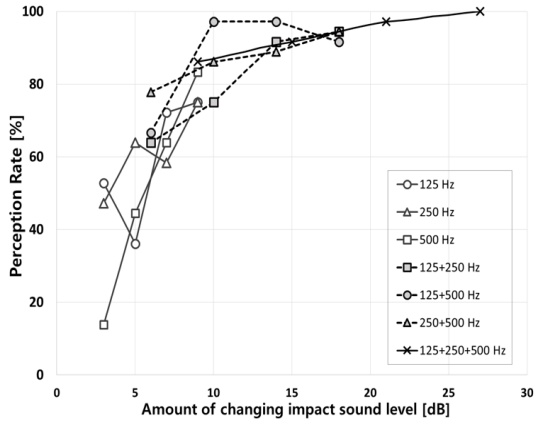
(a) Compared with SNQ 40 dB



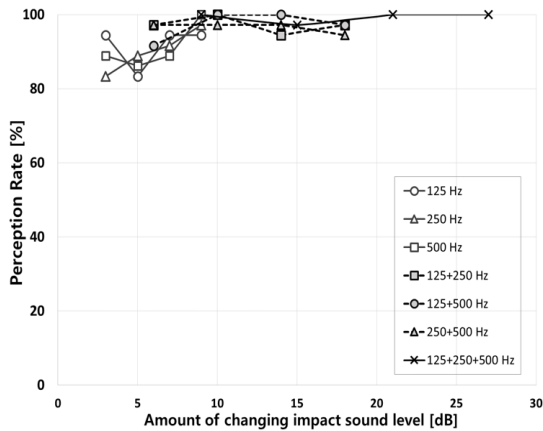
(b) Compared with SNQ 42 dB



(c) Compared with SNQ 44 dB



(d) Compared with SNQ 46 dB



(e) Compared with SNQ 48 dB

Fig. 5 Results of perception rate to amount of changing frequency and changing impact sound level when comparing experimental cases(SNQ 50 dB; $L_{i,Fmax,AW}$) with other SNQ sources

의 비율이 더 높은 것을 기준으로 선정하여 동일하게 인지한 단일 수치 평가량의 크기에 따라 Table 4에 나타내었다. 또한 동일하게 인지한 단일 수치 평가량에 따라 실험 음원 case를 주관적 개선량 그룹(A, B, C, D)으로 분류하였다. 대부분의 피실험자들은 음원의 충격음레벨 변화량이 증가하여 저감된 변화량이 클수록 더 작은 단일 수치 평가량과 동일한 크기로 인지하는 것으로 나타났다.

Table 4 Single-number quantity to experimental cases that the subjects perceived equally over 80 %

Single-number quantity that subjects perceived equally over 80 % [dB]	Changing frequency [Hz]	Changing value [dB]	Group name
42	125+250+500	9	A
44	125+250+500	7	B
46	500	9	C
	125+250	7	
	125+250	9	
	125+500	5	
	125+500	7	
	125+500	9	
	250+500	5	
	250+500	7	
	250+500	9	
	125+250+500	3	
48	125	3	D
	125	5	
	125	7	
	125	9	
	250	3	
	250	5	
	250	7	
	250	9	
	500	3	
	500	5	
	500	7	
	125+250	3	
	125+250	5	
	125+500	3	
250+500	3		

변화주파수 대역이 1개일 때, 변화주파수 대역이 125 Hz, 250 Hz인 경우 3 dB ~ 9 dB 저감 시 80 % 이상의 피실험자가 48 dB와 동일한 크기로 인지했다. 변화주파수 대역이 500 Hz인 경우, 3 dB ~ 7 dB 저감 시 48 dB와 동일한 크기로 인지하였으나 9 dB 저감 시 더 작은 46 dB와 동일한 크기로 인지하였다. 따라서 500 Hz 주파수 대역의 충격음레벨 저감이 재실자의 크기 인지에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

변화주파수 대역이 2개일 때, 변화주파수 대역별 동일한 크기로 인지하는 단일 수치 평가량은 125+250 Hz > 125+500 Hz = 250+500 Hz 순으로 높았다. 변화주파수 대역이 125+250 Hz일 때, 3 dB ~ 5 dB 저감 시 48 dB, 7 dB ~ 9 dB 저감 시 46 dB와 동일한 크기로 인지하는 것으로 확인되었다. 125+500 Hz, 250+500 Hz가 변화주파수 대역일 때는 5 dB ~ 9 dB 저감 시 46 dB와 동일한 크기로 인지하여, 변화주파수 대역이 1개일 때와 유사한 결과로 500 Hz가 변화주파수 대역에 포함되는 경우 충격음레벨 변화량이 같아도 재실자가 크기를 더 작게 인지하는 것으로 분석되었다.

변화주파수 대역이 3개(125+250+500 Hz)일 때, 3 dB ~ 5 dB 저감 시 46 dB, 7 dB 저감 시 44 dB, 9 dB 저감 시 42 dB와 동일한 크기로 평가하여, 단일 수치 평가량 상으로 8 dB까지 더 작게 인지하는 것으로 나타났다.

결과적으로 총 변화량이 3 dB ~ 7 dB인 경우(1개의 변화주파수 대역 3 dB ~ 7 dB 저감 및 2개의 변화주파수 대역 각 3 dB 저감)에는 단일 수치 평가량 상으로 약 2 dB의 크기가 감소하는 것처럼 인지하며, 총 27 dB 저감한 경우(3개의 변화주파수 대역 각 9 dB 저감)에는 최대 약 8 dB까지 크기를 더 작게 인지하는 것으로 분석되었다. 따라서 125 Hz ~ 500 Hz 대역의 바닥충격음 저감성능 개선 시, 재실자가 이를 충분히 인지할 수 있는 것으로 판단된다. 또한 역A특성 가중곡선을 통한 현행 평가방법은 충격성 소음인 바닥충격음에 대해서는 재실자의 주관적 반응과 다소 편차가 존재하는 것으로 사료된다.

3.3 단일 수치 평가량 및 충격음레벨 변화량에 따른 어노이언스 분석

전체 실험 case에 대한 평균 어노이언스 결과를 충격음레벨 변화량에 따라 Fig. 6에 나타내었다. 변화주파수 대역의 충격음레벨 변화량이 증가할수록 어노이언스는 감소하였으며, 이 결과는 유의한 상관성(결정

계수 $R^2 = 0.5415$)을 가지는 것으로 사료된다. 또한 각 case별 평균 어노이언스는 3.49 ~ 4.57에 분포하였으며, 충격음레벨의 총 변화량이 동일하면 변화주파수 대역의 개수가 많을수록 어노이언스가 감소하는 것으로 분석되었다.

단일 수치 평가량에 따른 어노이언스 결과와 각 단일 수치 평가량과 동일한 크기로 인지하는 실험 case 그룹의 어노이언스 결과를 비교하여 Fig. 7에 박스플롯으로 나타내었으며, 전체적으로 충격음레벨이 증가할수록 어노이언스가 증가하는 경향을 확인하였다.

단일 수치 평가량 42 dB의 어노이언스와 단일 수치 평가량 42 dB와의 인지 비율이 80% 이상인 실험 case인 group A(125+250+500 Hz 각 9 dB 저감)의 어노이언스를 비교한 결과, 각각 3.26, 3.49로 약 0.23

의 차이를 나타내었다. 단일 수치 평가량 44 dB의 경우 group B(125+250+500 Hz 각 7 dB 저감)와 어노이언스를 비교하였으며, 단일 수치 평가량 44 dB와 group B에 대한 어노이언스 결과는 각각 3.65, 3.69로 차이는 약 0.04인 것으로 확인되었다. 단일 수치 평가량 46 dB와 group C(500 Hz 9 dB 저감, 125+250 Hz 각 7 dB, 9 dB 저감, 125+500 Hz 각 5 dB, 7 dB, 9 dB 저감, 250+500 Hz 각 5 dB, 7 dB, 9 dB 저감, 125+250+500 Hz 각 3 dB, 5 dB 저감) 어노이언스 결과 비교 시, 각각 4.31, 4.22이며 그 차이는 0.09로 분석되었다. 또한 단일 수치 평가량 48 dB 음원에 대한 어노이언스와 group D(125 Hz 3 dB, 5 dB, 7 dB, 9 dB 저감, 250 Hz 3 dB, 5 dB, 7 dB, 9 dB 저감, 500 Hz 3 dB, 5 dB, 7 dB 저감, 125+250 Hz 각 3 dB, 5 dB 저감, 125+500 Hz 각 3 dB 저감, 250+500 Hz 각 3 dB 저감)에 대한 어노이언스 결과는 각각 4.83, 4.42로 나타나 그 차이가 0.41로 가장 큰 것으로 확인되었다.

다양한 단일 수치 평가량 음원과 각 단일 수치 평가량과 동일한 크기로 인지하는 실험 case의 어노이언스 결과의 차이는 0.04 ~ 0.41 사이에 분포하는 것으로 파악되었다. 이는 동일한 단일 수치 평가량(50 dB)에 대해서 변화주파수 대역의 충격음레벨이 저감되면 단일 수치 평가량 상으로 크기 저감을 인지할 뿐만 아니라 그 해당 단일 수치 평가량과 유사한 어노이언스 반응을 보이는 것으로 판단된다. 반면 동일한 크기로 인지하는 단일 수치 평가량에 따른 실험 case의 어노이언스 증가폭은 단일 수치 평가량 음원

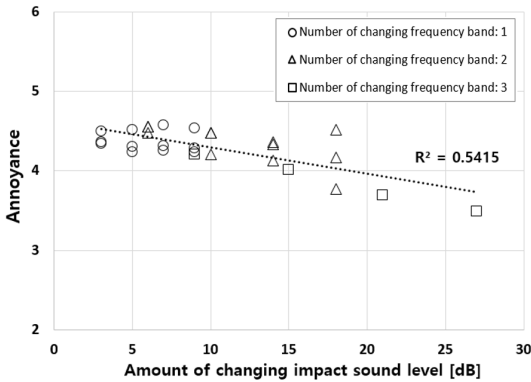


Fig. 6 Results of annoyance to amount of changing impact sound level of experimental cases

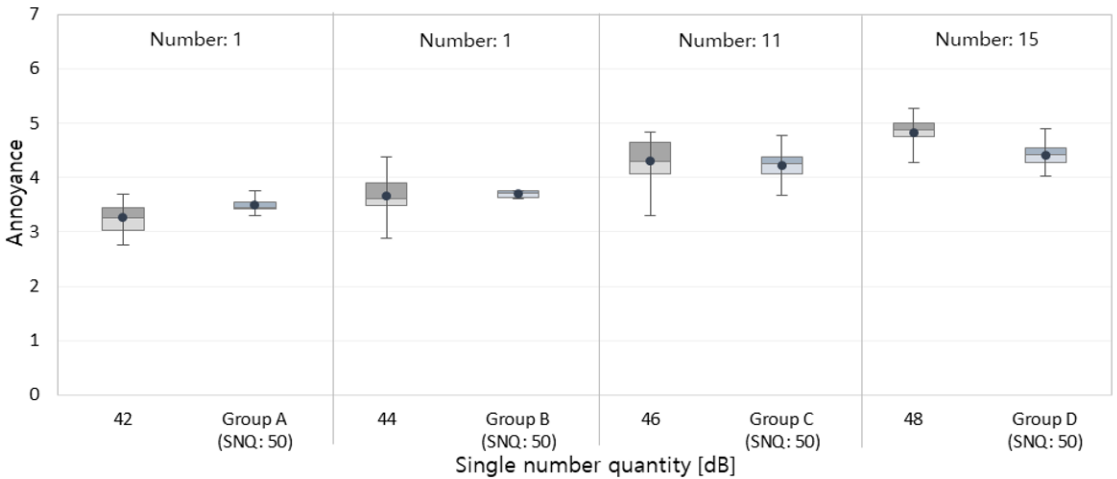


Fig. 7 Results of annoyance of $SNQ(L_{i,Fmax,AW})$ sources and experimental cases that the subjects perceived equally over 80%

에 따른 어노이언스 결과에 비해 상대적으로 미미한 것으로 확인되었다. 따라서 변화주파수 대역별 변화량에 따른 단일 수치 평가량 상의 주관적 크기 인지 정도에 비해, 어노이언스의 차이는 상대적으로 미미한 것으로 판단된다. 이는 재실자의 인지와 어노이언스 간 편차가 존재함을 시사하며, 인지와 어노이언스 간의 상관성에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

3.4 평가지표에 따른 주관적 인지 결과 분석
 전체 실험 case와 같은 크기로 인지한 음원의 크기를 세 가지 평가지표로 정리하여 Table 5에 나타내었다. 해당 평가지표는 각각 역A특성가중 바닥충격음 레벨, 최대A특성 음압레벨, 최대측정주파수산술평균 바닥충격음 레벨이었으며, 역A특성가중 바닥충격음 레벨의 경우 28개의 실험 case는 모두 50 dB로 동일한 단일 수치 평가량 음원이다.

Table 5 Various single-number quantity to experimental cases that the subjects perceived equally over 80%

No.	Main contribution frequency [Hz]	Changing frequency [Hz]	Changing value [dB]	Inverse-A characteristic impact sound pressure level (KS F 2863-2) [$L_{i,Fmax,AW}$]		A-weighted maximum impact sound pressure level (ISO 717-2) [$L_{iA,Fmax}$]		Arithmetic mean level (KS F 2863-2) [$L_{iFavg,Fmax}$]	
				Experimental case	Case that subjects perceived equally over 80%	Experimental case	Case that subjects perceived equally over 80%	Experimental case	Case that subjects perceived equally over 80%
1	63	125	3	50	48	56.3	53.9	62	60
2			5		48	56.2	53.9	61	60
3			7		48	56.1	53.9	59	60
4			9		48	56.1	53.9	57	60
5			3		48	56.3	53.9	62	60
6		250	5		48	56.2	53.9	61	60
7			7		48	56.1	53.9	61	60
8			9		48	56.1	53.9	60	60
9			3		48	56.3	53.9	62	60
10		500	5		48	56.2	53.9	61	60
11			7		48	56.2	53.9	61	60
12			9		46	56.1	51.9	60	58
13			3		48	56.0	53.9	61	60
14		125+250	5		48	55.7	53.9	59	60
15			7		46	55.6	51.9	57	58
16			9		46	55.5	51.9	54	58
17			3		48	56.1	53.9	61	60
18		125+500	5		46	55.8	51.9	59	58
19			7		46	55.7	51.9	57	58
20			9		46	55.6	51.9	54	58
21			3		48	56.0	53.9	61	60
22		250+500	5		46	55.8	51.9	60	58
23			7		46	55.7	51.9	59	58
24			9		46	55.6	51.9	58	58
25			3		46	55.8	51.9	60	58
26		125+250+500	5		46	55.3	51.9	58	58
27			7		44	55.1	49.9	55	56
28			9		42	55.0	47.9	52	54

최대A특성 음압레벨의 경우, 실험 case(55.0 dB ~ 56.3 dB)에 따라 1.8 dB ~ 7.1 dB의 크기가 저감된 것으로 인지하여 앞서 실험 case(50 dB)와 역A특성가중 바닥충격음레벨에 대한 크기 비교 시 2 dB ~ 8 dB의 크기 저감을 인지하는 것으로 분석된 결과와 유사하였다. 반면 최대측정주파수산술평균 바닥충격음 레벨의 경우, 실험 case는 52 dB ~ 62 dB 사이에 분포하였으며 동일한 크기로 인지한 음원은 54 dB ~ 60 dB로 다양한 레벨을 나타내었다. 또한 실험 case(52 dB ~ 62 dB)에 따라 해당 단일 수치 평가량 상으로 최대 2 dB의 크기 저감 및 최대 4 dB의 크기 증가를 인지했다. 결과적으로 역A특성가중 바닥충격음레벨 및 최대A특성 음압레벨의 경우 실험 case에 따라 단일 수치 평가량 상으로 최대 7 dB ~ 8 dB의 주관적 개선이 확인되었으며, 이는 125 Hz ~ 500 Hz 주파수 대역의 저감이 재실자의 주관적 반응과 관련이 있음에도 불구하고 두 단일 수치 평가량 상으로는 충분히 반영되고 있지 않음을 시사한다. 이와 달리 최대측정주파수산술평균 바닥충격음 레벨은 재실자의 주관적 크기 인지와 가장 유사한 변별이 가능한 것으로 나타났으며 해당 결과는 기존 연구와도 유사함을 보였다^(24,25).

4. 결 론

청감실험을 통해 단일 수치 평가량(50 dB)과 결정주파수 대역이 63 Hz로 동일할 때, 125 Hz ~ 500 Hz 대역을 저감한 고무공충격원 음원과 2 dB 간격의 단일 수치 평가량 음원의 주관적 반응을 비교·분석한 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 단일 수치 평가량이 50 dB일 때 125 Hz ~ 500 Hz 주파수 대역의 저감에 따른 크기의 차이를 인지할 수 있는 것으로 확인되었다. 변화주파수 대역이 125 Hz 와 250 Hz인 모든 case에서 40 % 미만의 인지 비율을 보였으며 125+250 Hz가 변화주파수 대역인 경우를 제외한 변화량이 10 dB 이상인 모든 case에서 70 % 이상이 차이를 인지하는 것으로 나타나, 변화주파수 대역에 500 Hz가 포함되는 경우 크기 차이를 더 민감하게 인지하는 것으로 판단된다.

(2) 결정주파수 대역 외 125 Hz ~ 500 Hz의 주파수 대역별 충격음레벨의 변화량이 증가할수록 재실자가 동일한 크기로 인지하는 단일 수치 평가량이 낮아졌으며 특히 500 Hz가 변화주파수 대역에 포함

된 경우 민감하게 나타났다. 변화주파수 대역이 1개 및 2개인 경우 단일 수치 평가량 상으로 최대 4 dB, 3개인 경우 최대 8 dB까지 크기가 감소하는 것처럼 인지했다.

(3) 동일한 단일 수치 평가량 음원(50 dB)의 주파수 대역별 충격음레벨이 저감됨에 따라 동일한 크기로 인지하는 단일 수치 평가량과 유사한 어노이언스 반응을 보이는 것으로 분석되었다.

(4) 세 가지 평가지표(역A특성가중 바닥충격음레벨, 최대A특성 음압레벨, 최대측정주파수산술평균 바닥충격음 레벨)에 따른 주관적 크기 인지 분석 결과, 최대측정주파수산술평균 바닥충격음 레벨이 주관적 크기 인지와 가장 유사한 결과를 나타내었다.

63 Hz가 주로 결정주파수 대역이 되는 현행 역A특성 가중바닥충격음레벨 단일 수치 평가방법은 이러한 주관적 반응을 충분히 반영하여 개선될 필요가 있다. 아울러 향후 재실자의 주관적인 크기 인지와 어노이언스 간의 상관성에 대한 추가적인 연구와 좀 더 신뢰성 높은 결과를 위한 바닥충격음 청감실험의 방법론적인 연구가 추가로 필요할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20CTAP-C152256-02).

References

- (1) Ryu, J. K. and Jeon, J. Y., 2011, Influence of Noise Sensitivity on Annoyance of Indoor and Outdoor Noises in Residential Buildings, *Applied Acoustics*, Vol. 72, No. 6, pp. 336~340.
- (2) Jeon, J. Y., Ryu, J. K. and Lee, P. J., 2010, A Quantification Model of Overall Dissatisfaction with Indoor Noise Environment in Residential Buildings, *Applied Acoustics*, Vol. 71, No. 10, pp. 914~921.
- (3) Rindel, J. H., 2003, On the Influence of Low Frequencies on the Annoyance of Noise from Neighbours, *Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference*, pp. 1500~1503.
- (4) Park, H. K., Kim, K. M. and Kim, S.-W., 2013, Verification of Effectiveness of the Standard Floor Impact

Source by Comparing with Living Impact Sources, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 12, pp. 1117~1126.

(5) Kim, K. W., Choi, G.-S., Jeong, Y.-S. and Yang, K.-S., 2005, Impact Power Characteristics as Behavior of Real Impact Source(Child), Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 542~549.

(6) Lee, P. J., Jeong, J.-H., Park, J.-H. and Jeon, J.-Y., 2006, Comparison of Standard Floor Impact Sources with a Human Impact Source, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 16, No. 8, pp. 789~796.

(7) Ryu, J. K., Song, H. and Kim, Y., 2008, Effect of the Suspended Ceiling with Low-frequency Resonant Panel Absorber on Heavyweight Floor Impact Sound in the Building, Building and Environment, Vol. 139, pp. 1~7.

(8) Cho, C.-G. Baik, Y.-K. and Shin I.-S., 2002, An Experimental Study of Improvement of Ceiling Structure for Reducing Floor Impact Sound in Existing Apartment Buildings, Journal of The Korean Living Environmental System, Vol. 9, No. 1, pp. 38~44.

(9) Kim, S. T., Cho, H.-M. and Kim, M.-J., 2019, Study on Improvement of Floor Impact Sound Insulation Performance in Repairing Floor Layers of Aged Apartment, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 2, pp. 206~215.

(10) Chung, H. W., Gi, N. G., Song, M. J. and Kim, S. W., 2002, A Study on the Reduction Characteristics of Floor Impact Sound Insulation Due to the Ceiling Frame Structures in Apartment Houses, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 8, pp. 573~580.

(11) Korean Agency for Technology and Standards, 2017, Rating of Floor Impact Sound Insulation for Impact Source in Buildings and of Buildings Elements - Part 1: Floor Impact Insulation against Standard Light Impact Source, KS F 2863-1.

(12) Korean Agency for Technology and Standards, 2017, Rating of Floor Impact Sound Insulation for Impact Source in Buildings and of Buildings Elements - Part 2: Floor Impact Insulation against Standard Heavy Impact Source, KS F 2863-2.

(13) Ministry of Land and Transportation, 2019,

Threshold and Management Standard of the Floor Impact Sound Insulation for Multi-family Housing, No. 2019-622.

(14) 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.

(15) Yun, C. Y., Yeon, J.-O. and Kim, M.-J., 2014, Comparison of Impact Sound Insulation Performances of Apartment Floors Against Heavy-weight Impact Sources via Field Measurement Data, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 24, No. 8, pp. 651~658.

(16) Jung, J. H., 2017, Comparison between Subjective Evaluation Results of Frequency Component Varied Rubber Impact Sound and Single Numerical Quantities, Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, Vol. 11, No. 6, pp. 517~526.

(17) Shin, H., Kim, S.-W. and Jang, G.-S., 2009, Subjective Assessment of Simulated Heavy Floor Impact Sounds for Alternative Rating Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 282~287.

(18) Cho, H. M., Kim, S.-T. and Kim, M.-J., 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.

(19) Lee, J. I., Bae, J., Lee, C. H., Paeng, D. G., Lee, D., Chun, J. and Lee, N., 2011, Footstep Classification of the Person Movement Using Seismic Sensor, Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 596~602.

(20) Cho, H. M., 2020, Evaluation of Floor Impact Sound Insulation Performance and Subjective Response of Occupants by Ceiling Structures of Aged Buildings, Master's Thesis, University of Seoul, Seoul, Korea.

(21) David, L. C. and Floyd, E. T., 1996, AES Recommended Practice for Professional Audio - Subjective Evaluation of Loudspeakers(AES20-1996), AESSC WG-07 Working Group on Listening Tests, Audio Engineering Society Standard.

(22) Otto, N., Amman, S., Eaton, C. and Lake, S, 1999, Guidelines for Jury Evaluations of Automotive Sounds, SAE Transactions, Vol. 108, pp. 3015-3034.

(23) International Organization for Standardization, 2003, Acoustics-assessment of Noise Annoyance by Means of Social and Socio-acoustic Surveys, ISO/TS 15666.

(24) Jeong, J. H., 2015, Evaluation Method of Rubber Ball Impact Sound, Proceedings of EuroNoise 2015, pp. 1901~1905.

(25) Ryu, J. K., Sato, H. and Kurakata, K., 2011, Relation between Annoyance and Single-number Quantities for Rating Heavy-weight Floor Impact Sound Insulation in Wooden Houses, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 129, pp. 3047~3055.



Woo-Jung Kim 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.



Hyun-Min Cho received the B.S., M.S. and Ph.D. in Dept. of architectural engineering at University of Seoul, Seoul, Korea in 2013, 2015, and 2020, respectively. He is currently a postdoctoral researcher in the Dept. of Architectural Engineering at University of Seoul. His research interests are in the area of floor impact noise and sound insulation in buildings.



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.