한국소음진동공학회 2003년도 춘계학술대회논문집, pp. 208~213.

고무공 충격원을 이용한 바닥충격음 측정

Measurements of Floor Impact Noise Using a New Impact Ball

정정호** · 전진용* · 류종관**

Jeong-Ho Jeong, Jin-Yong Jeon and Jong-Kwan Ryu

Key Words : Impact Ball, Children's Jumping, Evaluation Classes

ABSTRACT

The purpose of this study is to review the use of a new standard impactor, the impact ball, in evaluating heavy-weight impact noises in reinforced concrete structures. A survey revealed that children running and jumping are the major heavy-weight impact sources in multi-story residential buildings. The noise from the impact ball was measured and psychoacoustically assessed. The relationship between the noise levels and the subjective responses was also investigated. Results showed that the noise from the impact ball is similar to the noise of children running and jumping. It was also found that the noise level of the impact ball is slightly higher than the noise level of a bang machine, although the impact ball has a lower impact force.

1. 서 론

환경분쟁 조정위원회에 제소되는 환경관련 분쟁 중 주거환경에서의 소음, 진동 관련 민원이 전체의 81%로 알려져 있다. 소음, 진동 관련 민원 중에서도 층간소음과 관련된 민원이 55%로 나타나 층간소음과 관련한 환경분쟁이 가장 시급하고 중요한 사안임을 알 수 있다. 이를 위해 환경부와 건교부에서 층간소음 관련 규제기준 및 등급기준을 제정하여 시행하려 하고 있다.

층간소음관련 환경분쟁을 합리적으로 해결하기 위해서는 층간소음 저감 구조의 개발과 함께 층간소음 저감구조의 차음성능을 객관적이고 거주자가 쉽게 이해할 수 있는 평가방법이 제안되어야 할 것이다. 층간소음을 실제 공동주택에서 발생되는 충격음으로 평가하는 방법이 가장 객관적이고 거주자의 이해가 쉽지만 충격원의 재현성 등 제반 사항의 부족으로 실현 불가능한 방법이다. 따라서 실제충격원을 가장 잘 재현할 수 있는 충격원을 선정하고, 선정된 충격원ㄴ에 의한 충격음과 주관적, 사회적 반응이 가장 잘 대응되는 평가방법으로 평가하는 것이 가장 객관적으로 거주자의 바닥충격음 차단성능 이해도 용이할 것이다.

현재 사용하고 있는 표준 바닥충격원(경량 및 중량 충격원)은 실제 발생소음과 물리적인 차이점이 있다.(1) 경량충격원은 과거 Watters(2)의 연구 결과에서 알려진 것처럼 하이힐에 의한 충격소음과 주파수 특성 및 가진주기에서 상이한 점을 나타내고 있으며, 중량충격원은 충격력에서 차이점을 나타내고 있다. 이에 따라, 최근 일본에서는 Tachibana(3)에 의해 제안된 Impact Ball을 새로운 충격원으로 제안하였다. 또한 Warnock(4,5)은 경량충격원을 IIC로 평가하는 구미의 층간소음 평가방법이 충격음의 저주파 특성을 잘 반영하지 못하여 평가방법 등의 개선을 연구하고 있다.

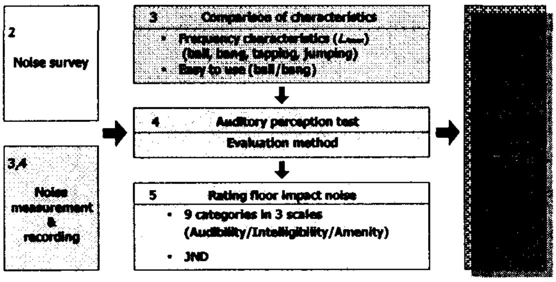


Fig. 1 Research procedure

따라서, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 실제공동주택에서 발생되는 실제충격원의 형태 및 층간소음 발생 연령대를 조사하여, 실제 공동주택에서 설문조사에 의해 선정된 층간소음

* 정회원, 한양대학교 건축공학부
E-mail : jyjeon@hanyang.ac.kr
Tel : (02) 2290-1795, Fax : (02) 2291-1793

** 정회원, 한양대학교 대학원 건축공학과

을 재현하여 세가지 표준충격원(Impact Ball, Bang & Tapping Machine)과 주파수 특성을 비교하였다. Impact Ball의 평가방법 선정을 위해서는 세가지 표준충격원을 대상으로 청감실험을 실시하여 주관적 반응과 상관관계가 높은 평가방법을 선정하였다. 또한 실제 공동주택에서 충격음의 레벨을 변화시키는 방법으로 impact ball 충격음 레벨변화에 따른 주관적 반응을 조사하여 impact ball의 평가등급을 제안하였다. 실험에 사용한 impact ball은 충격원 개발 중에 제작된 것으로 JIS 1418-2에 규정된 형태, 질량 등과 동일한 것이다.

2. 층간소음 설문조사

공동주택에서 발생되는 주 충격형태 및 어린이 연령대를 서울지역 공동주택 거주자 611명을 대상으로 조사하였다. 공동주택에서 발생되는 주 발생형태는 Fig. 2에서와 같이 어린이의 달리는 형태와 뛰는 형태가 주요한 것으로 나타났다. Fig. 3은 충격음을 주로 발생시키는 어린이들의 연령에 대한 조사결과로 6~9세의 어린이 들이 가장 많은 충격음을 발생시키는 것으로 나타났다.

Jeon[6]의 연구결과에서와 같이 어린이들에 의해 발생되는

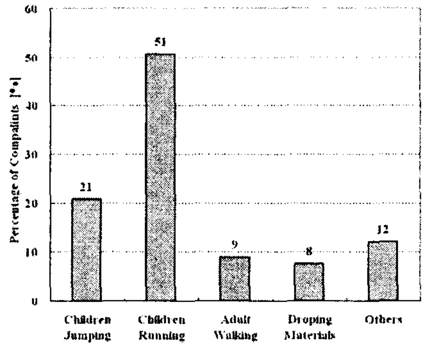


Fig. 2 Main sources of floor impact noise

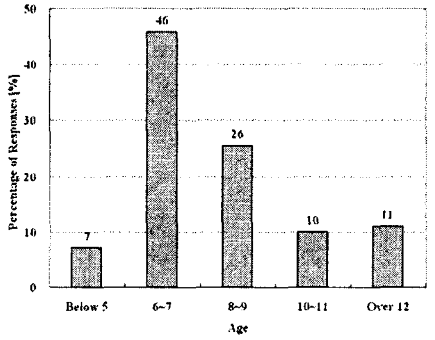


Fig. 3 Children's ages of generating heavy-weight floor impact noise

충격음의 공간감 변화 및 간헐성이 층간소음이 주관적 반응에 영향을 주는 것으로 나타났다.

3. Impact Ball의 특성

Impact ball은 일본 내 목조주택의 바닥충격음 차단성능 평가를 위해 개발된 충격원으로, 중량충격원의 큰 충격력이 목구조의 성능을 저하시킬 수 있어 충경력을 실제 어린이가 충격하는 정도로 감소[7]시켰다. impact ball의 무게는 2.5±0.2kg, 직경은 180㎜ 외피두께는 30㎜이고, 충격시간은 20㎳정도의 특성을 갖으며 1m 높이에서 자유낙하 하여 충격한다.

Table. 1은 impact ball과 중량충격원의 특성을 비교한 것이다. Table. 1에서와 같이 impact ball은 무게, 작동인원, 측정 및 유지보수 등 많은 항목에서 중량충격원보다 유용한 것으로 판단된다. 그러나 측정의 정확도 및 재현성에 있어서 낙하높이와 낙하면이 변화하지 않도록 부수적인 기구의 개발이필요한 실정이다.

Table. 1 Impact ball vs bang machine

	Impact Ball	중량충격원
무게	매우 가볍다	무겁다
측정소요인원	1명	2명
측정 준비	빠르고 쉽다	복잡하다
전기사용	사용 안함	사용
유지보수	필요 없음	수시확인 필요
구조 손상 여부	없음	목구조 손상
정확도 및 재현성	다소 차이	거의 없음

Impact ball을 포함한 3가지 표준충격원과 실제어린이(25 kg)가 발생시키는 충격음의 주파수 특성을·비교하기 위하여 실제 공동주택에서 측정하였다.

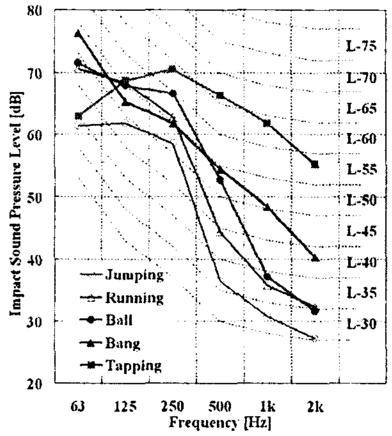


Fig. 4 Frequency characteristics of real impact noises generated by a 25kg child and standard impactors.

Fig. 4에서와 같이 어린이의 jumping, running 충격음과 가장 유사한 주파수 특성을 갖는 충격원은 impact ball인 것을 알 수 있다. 3가지 표준충격원을 L-지수로 평가할 경우 impact ball이 중량충격원보다 더욱 큰 값을 나타내는 것을 알 수 있다. 3가지 표준충격음과 실제 jumping, running 충격음의 주파수 특성간 상관계수를 계산하여 Table. 2에 나타내었다. Table. 2에서와 같이 impact ball은 jumping, running과 각각 0.97, 0.98로 가장 높은 상관계수를 갖는 것으로 계산되었다.

Table. 2 Correlation coefficients between real impact sources and standard sources (p<0.01)

	Impact Ball	Bang	Tapping
Jumping	0.97	0.92	0.71
Running	0.98	095	0.69

이상의 결과에서와 같이 3가지 표준충격원 중 실제충격음(25kg 어린이, jumping, running)과 가장 유사한 특성을 갖는 충격원은 impact ball로 나타났다.

4. 바닥충격음의 주관적 평가

4.1 바닥충격음의 측정 및 분석 (물리적 평가)

Impact ball에 대한 주관적 반응(라우드니스)와 가장 잘 일치하는 평가방법을 제안하기 위하여 청감실험을 실시하였다. 청감평가를 위한 음원의 측정 및 녹음은 Fig. 5와 같은 평면의 입주 직전의 공동주택에서 실시하였다. 충격원으로는 impact ball, 중량, 경량충격원 및 실제 jumping을 대상으로 서로 다른 충격음 차단구조가 설치된 7개 세대와 기본구조의 1개 세대를 대상으로 측정하였다. 측정대상세대는 입주직전 상황으로 마감공사가 완료되었으며 가구 등은 배치되지 않은 상황이었다. 측정개소는 한 세대당 6개소 (방4개소, 거실 및 주방) 씩 각 개소당 5개 지점을 대상으로 총 240 지점에서 실시하였다. 청감실험을 위한 음원의 녹음은 dummy head를 이용하여 측정개소의 중앙지점에서 녹음하였다.

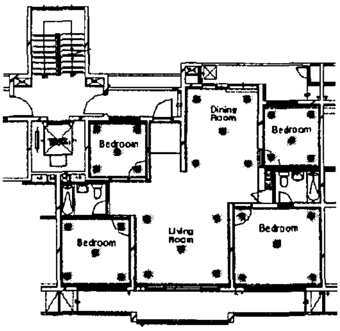


Fig. 5 Floor plan of apartment

바닥충격음 측정을 위해서는 성인(65kg)의 jumping 음원을 선택하였다. 실제 현장에서 어린이를 대상으로 한 현장 측정은 제반사항의 제약으로 실시하지 못하였다. 각 대상세대의 차음구조 적용은 Table. 3과 같이 벽, 천장 및 바닥 차음구조를 조합하여 구성하였다.

Table. 3 Different sound insulating treatments

	A	B	C	D	E	F	G	H
Floor	●		●		●		●	
Ceiling	●	●			●	●		
Wall					●	●	●	●

8개의 세대에서 측정한 4가지 충격원의 주파수 특성을 평균하여 비교한 결과 어린이의 jumping 및 running 소음을 측정한 경우와 마찬가지로 impact ball이 성인의 jumping 충격음과 가장 유사한 것으로 나타났다. 각 차음구조에서의 발생된 jumping 충격음과 표준충격원에 의한 충격음의 주파수 특성(L_{max})에 대한 상관관계를 계산하여 Table. 4에 표시하였다. Table 4에서와 같이 impact ball이 6개의 구조에서 실제충격과의 상관관계가 높게 나타났다.

Table. 4 Correlation between real impact noise and standard sources (p<0.01)

Structure	Insulated components	Ball	Bang	Tapping
A	F+C	**0.98**	0.95	0.81
B	C (Ceiling)	**0.96**	0.96	0.39
C	F (Floor)	**0.99**	0.95	0.88
D	P (Plain)	0.96	**0.98**	0.44
E	F+W+C	**0.99**	0.96	0.88
F	W+C	**0.97**	0.90	0.56
G	F+W	**0.99**	0.94	0.87
H	W (Wall)	0.96	**0.97**	0.58
Overall		**0.94**	0.87	0.71

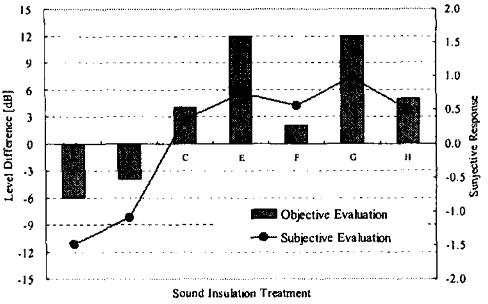


Fig. 6 Objective/subjective evaluation of floor impact noise

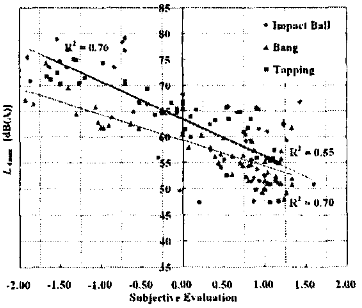
Impact ball 충격음을 효과적으로 저감할 수 있는 구조를 선정하기 위하여 물리적 저감량과 함께 청감실험을 실시하여 주관평가를 실시한 결과 Fig. 6과 같이 E(F+W+C), G(F+W) 구조가 가장 효과적인 것으로 나타났다. 벽체 차음구조는 벽체를 통해 하부층으로 전달되는 impact ball 충격음을 효율적으로 저감하여 물리적, 청감적 개선이 가능한 것으로 나타났다.

4.2 청감실험

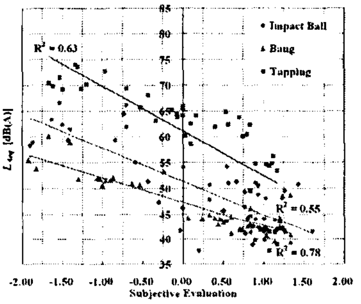
각 충격음별로 주관적 반응과 상관관계가 높은 평가방법을 제안하기 위하여 청감실험을 실시하였다. 충격음에 대한 주관적 반응은 라우드니스 반응을 기준으로 1:1 비교 방법을 적용하였다. 각 충격음의 평가방법으로는 L_{Amax}, L_{Aeq}, L-지수, 역A특성 가중 바닥충격음레벨과 Zwicker의 Loudness를 대상으로 분석하였다.

청감실험은 전용 부스에서 실시하였으며 배경소음은 25dBA 수준이었다. 음원의 제시는 헤드폰(electrostatic type, STAX SRX-3030)을 사용하였다. 기본구조의 방1에서의 각 충격음을 기준으로 47개 비교음원의 라우드니스를 평가하였으며 음원의 제시는 무작위로 제시하였다. 피험자의 주관적 반응은 먼저 제시된 음원이 매우 클 경우 +2, 클 경우 +1, 비슷할 경우 0, 두 번째 제시된 음원이 클 경우 -1, 매우 클 경우 -2로 반응하도록 하였다. 음원의 제시와 피험자의 응답 기록을 위해서는 MEDS를 사용하였다. 피험자는 음원의 라우드니스에만 집중하여 반응하도록 하였으며, 총 60명의 피험자를 대상으로 실시하였다.

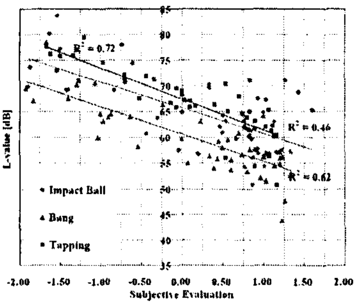
실험결과는 Fig. 6에 각각 나타내었다. 각 충격음을 L_{Amax}로 평가할 경우 Fig. 6 (a)와 같이 주관적 반응과 impact ball 레벨과의 상관성을 나타내는 결정계수(R^2)는 0.55, 중량충격음은 0.70, 경량충격음은 0.76으로 나타났다. Fig. 6 (b)의 경우 L_{Aeq}로 각 충격음을 평가한 것으로 impact ball은 0.55, 중량충격음은 0.78, 경량충격음은 0.63으로 나타났다. 또한 L-지수 평가할 경우 Fig. 6 (c)와 같이 impact ball은 0.46, 중량충격음은 0.62, 경량충격음은 0.72로 나타났다. Fig. 6 (d)와 같이 역A특성 가중 바닥충격음레벨로 평가할 경우 impact ball은 0.62, 중량충격음은 0.66 그리고 경량충격음은 0.73으로 나타났다. Fig. 6 (e)는 Zwicker의 Loudness로 평가한 것으로 impact ball은 0.74, 중량충격음은 0.73 그리고 경량충격음은 0.69로 나타났다.



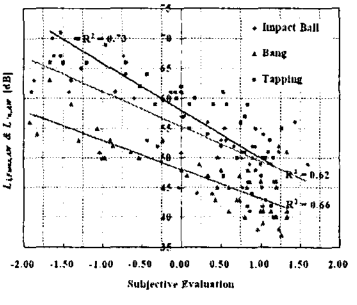
(a) L_{Amax}



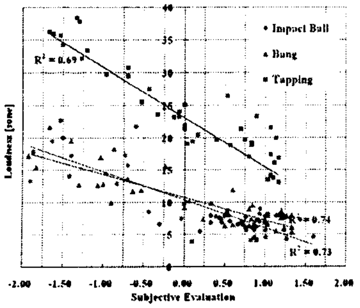
(b) L_{Aeq}



(c) L-지수



(d) 역A



(e) Loudness

Fig. 6 Correlation between subjective responses and physical measurements

이상의 실험결과와 같이 impact ball은 Zwicker의 Loudness로 평가하는 것이 가장 좋은 것으로 나타났으며, 역A특성 가중 바닥충격음레벨도 유용한 방법으로 나타났다. 중량충격음의 경우 Loudness와 L_{Aeq}, 경량충격음의 경우는 역A특성 가중 규준화 바닥충격음레벨과 L_{Amax}로 평가하는 방법이 주관적 반응과 관계가 높은 것으로 나타났다.

5. 현장청감실험에 의한 Impact ball 평가등급설정

5.1 현장청감실험

Impact ball을 사용한 층간소음 평가를 위한 등급설정을 위해 실제 공동주택의 거실에서 98명의 피험자를 대상으로 청감실험을 실시하였다. 청감실험의 반응기준은 일본건축학회의 세가지 바닥충격음 평가척도[8]를 활용하였다. Table 5에서와 같이 바닥충격음원을 주관적 시끄러움의 크기, 생활감과의 대응 및 사회적 반응의 측면에서 평가한 것으로, 3가지 측면은 거주자의 층간소음에 대한 어노이언스 측면을 나타내는 것으로 판단된다. 주관적 반응의 기준은 3개 그룹(1-3, 4-6, 7-9)으로 나누어 청감실험을 용이하게 하였다.

또한 각 평가기준의 내용을 고려하여 대상소음이 크게 거슬리게 되는 상한치는 7, 대상소음이 거슬리기 시작하는 시점인 하한치는 4로 설정하였다. 청감실험을 위한 현장에서 음원 레벨 변화는 impact ball을 다양한 높이에서 낙하하는 방법으로 조절하였다. 이때 피험자는 하부층의 거실에서 발생되는 충격음을 듣고 세가지 기준에 대하여 평가하였다.

청감실험 결과에 대하여 주관적 반응과 역A특성 가중 바닥충격음레벨의 분포와 회귀분석을 실하였다.

청감실험결과 주관적 반응과 impact ball의 관계는 Fig. 7과 같이 선형적으로 변화하는 것으로 나타났다. 각각의 주관적 반응에 대응되는 impact ball의 역A특성 가중 바닥충격음 레벨은 Fig. 7의 회귀식을 기준으로 계산하였다. Table. 5와 같이 주관적 상하한치를 의미하는 평가척도 7과 4의 값은 평가척도 1~3의 해당 척도의 음압레벨을 평균하여 나타낸 것으로 impact ball 충격음의 하한치는 거슬리기 시작하는 시점에 해당되는 4 point 값인 54, 상한치는 69로 각각 설정되었다.

Table. 5 Impact sound level ($L_{i,Fmax,AW}$) vs subjective magnitude

Group		시끄러운 정도	생활감과의 대응	사회적 반응	$L_{i,Fmax,AW}$
Not annoying	1	거의 들리지 않는다	위층의 분위기를 못 느낀다.	옆집을 의식하는 일도 아주 가끔 있지만 쾌적한 생활가능	40
	2	겨우 들리자만, 멀리서 들리는 느낌	분위기는 느끼나 신경 안 쓰임	가끔 옆집을 의식하는 일도 있지만 쾌적한 생활가능	44
	3	들리지만 의시하는 경우는 거의 없다	위층의 생활이 다소 의식됨	특히 신경 쓰지 않아도 쾌적한 생활가능	49
Annoying	4	작게 들린다	위층의 생활상황이 의식된다.	서로 신경 쓰면 지장없는 생활가능	54
	5	들린다	위층의 생활행위를 어느 정도 알 수 있다.	서로 참고 생활규칙을 지킨다	59
	6	잘 들린다	위층의 생활행위를 알 수 있다	편리성 등으로 대체할 수 있는 한도	64
Very annoying	7	발생음이 꽤 신경 쓰인다	위층의 생활행위를 잘 알 수 있다	집합주택으로써 생활하는 것을 참을 수 없다.	69
	8	시끄럽다	대체로 낙하음은 확실히 들린다	아무래도 독립된 가정생활을 영위할 수 없다.	74
	9	꽤 시끄럽다	낙하음이 매우 확실하게 들린다	단독주택이라 해도 너무 나쁘다	79

Fig. 7은 세가지 평가척도에 대응되는 각각의 충격음 레벨을 평균하여 나타낸 그림이다. Fig. 7에서와 같이 실제충격원(adult's jumping)은 impact ball과 주관적 반응에 대응된 레벨의 차가 중량충격음에 비해 더 작은 것으로 나타났으며, 중량충격음과는 10~15dB의 레벨 차이가 나타났으나, impact ball의 경우는 2~4dB로 중량충격음 보다 작은 차이를 나타냈다. 이는 impact ball의 바닥충격음 측정값으로 실제충격음 발생 레벨을 예상할 경우 중량충격원에 비하여 더욱 정확한 값을 나타낸다는 것을 의미한다. 또한 레벨 변화에 따른 주관적 반응과 역A특성 가중 바닥충격음레벨과의 상관성은 impact ball이 중량충격원에 비해 다소 높은 것으로 나타났다.

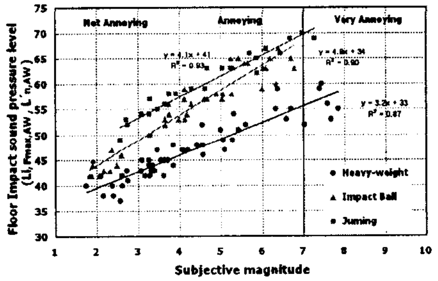


Fig. 7 Relation between floor impact noise and subjective magnitude

5.2 Impact ball 충격음의 JND

Impact ball 충격음의 등급설정에 필요한 등급간격 제안을 위해 청감한계(JND)에 대한 청감실험을 실시하였다. 청

감실험을 1:1 비교 방법을 적용하였으며, 정상청감의 20대 후반 대학원생 10명을 대상으로 실시하였다. 비교음원은 1dB 간격으로 증가시켰으며, 기준음원보다 2~5dB 큰 음원을 비교음원으로 제시하였다. 청감실험은 실험용 부스에서 헤드폰으로 음원을 제시하여 실시하였다. 음원의 구성은 비교음원과 기준음원을 각각 0.8초씩 1초의 간격을 넣어 구성하여 무작위로 제시되었다.

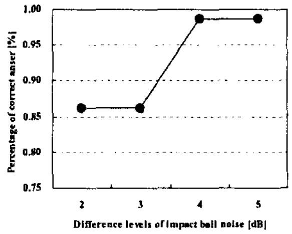


Fig. 8 Perceived difference of floor impact noise level

Fig. 8에서와 같이 2dB 차이에 대하여 86%의 응답자가 옳게 반응하였다.

5.3 Impact ball의 평가등급

Table 6에서와 같이 impact ball 충격음의 평가등급은 3개 등급으로 설정하였다. 각 등급간의 레벨 간격은 JND 실험을 바탕으로 실제 적용 및 대부분의 거주자가 레벨 차이를 구분할 수 있는 3dB로 설정하였다.

상한치의 의미는 소음에 대해서 최대한 참을 수 있는 한계치를 의미하지만, 하한치는 일반적으로 허용한계치로 인식되며 소음에 의해 거슬리기 시작하는 시점으로 인식된다. 따라서 impact ball 충격음의 역A특성 가중 바닥충격음레벨이 하한치인 54보다 높으면 Class 3(최저등급)으로 분류되어야 하고, 3dB 간격으로 기준을 강화하여 Class 2는 53이하 Class 1은 50 이하로 설정될 수 있다.

Table 6. Classes of impact ball noise

	Class 1	Class 2	Class 3
L-value	L-54	L-57	L≥58
$L_{i,Fmax,AW}$	L_{AH}-50	L_{AH}-53	L_{AH}≥54

6. 결 론

공동주택에서 실제 어린이의 jumping, running, impact ball, 중량충격음 및 경량충격음의 주파수 특성을 비교한 결과 impact ball이 실제충격음과 가장 유사한 충격원으로 나타났다.

주관적 반응과 각 충격음의 평가방법에 따른 값들과의 상관관계 분석결과 중량충격음은 L_{Aeq}와 Zwicker의 Loudness, 경량충격음은 L_{Amax}와 역A특성 가중 규준화 바닥충격음레벨이 상관관계가 높게 나타났으며, impact ball은 Loudness와 역A특성 바닥충격음레벨이 높게 나타났다. Tachibana[9]의 연구결과와 같이 Zwicker의 Loudness는 저음이 주요한 소음에 유용한 평가방법으로 impact ball(R^2=0.74)과 중량충격음(R^2=0.73) 모두 좋은 상관관계를 나타냈다. 따라서 Zwicker의 Loudness가 바닥충격음 평가에 가장 좋은 평가방법이고, 역A특성 가중 바닥충격음레벨 유효한 평가방법으로 사료된다.

주관적 라우드니스 평가에 사용된 세가지 충격음원 가운데 impact ball이 가장 넓은 범위를 나타냈으며, 주관적 평가의 범위도 가장 넓게 나타나 각종 층간소음 저감 구조의 저감성능 평가에 .적합한 충격원으로 판단된다.

Impact ball noise 평가를 위해 실제 공동주택에서 청감실험을 실시하여 바닥충격음 평가등급을 제안하였다. 평가등급은 세가지 scale의 4 point (하한치)를 최저 등급으로 설정하였으며, impact ball 충격음의 최소가청한계 (JND)를 고려하여 3dB로 등급간격으로 총 3개 등급을 설정하였다. 설정된 등급 중 Class 1은 L_{AH}-50, Class 2는 L_{AH}-53 그리고 Class 3은 L_{AH}≥54로 설정되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2002-000-00089-0)지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

(1) 전진용, 정정호, 2002. "공동주택에서 표준충격음원과 실제발생충격음원과의 대응에 관한 연구", 대한건축학회 논문집 18권 1호, pp.187~194.

(2) Watters, B.G., 1965, "Impact-Noise Characteristics of Female Hard-Heeled Foot Traffic", J.Acoust. Soc. Am, 37, pp.619-630.

(3) Tachibana, H. Tanaka, H. Yasuoka, M. and Kimura, S., 1998, "Development of new heavy and soft impact source for the assessment of floor impact sound insulation of buildings", Internoise 98.

(4) A.C.C. Warnock, 1992, "Low frequency impact sound transmission through floor systems," Inter-noise 92.

(5) A.C.C. Warnock, 2000, "Low frequency impact sound transmission through floor systems," Inter-noise 2000.

(6) Jeon, J. Y, 2001, "Subjective Evaluation of Floor Impact Noise Based on the Model of ACF/IACF", Journal of Sound and Vibration, 241(1), pp.147-155.

(7) M.Yasuoka, S.Makamori, R.Tomita, K.Kise, K.Inoue, and H. Tachibana, 2000, "Development of new heavy impact source. Part1:Point of Development and Technique of Experiments," *Proc. Architectural Institute of Japan*. pp.229-233.

(8) 日本建築學會, 1999, 建築物の遮音性能基準と設計指針 第二版, 技報堂出版, pp.28-33.

(9) H. Tachibana, H. Yano, and Y. Sonoda, 1990. "Subjective Assessment of Indoor Noises Basic Experiments with Artificial Sound," Applied Acoustics, 31, pp.173-184.