

임팩트볼(Impact Ball)을 활용한 바닥충격음 측정 및 평가

정정호/공학박사 · 건재환경팀 연구원

1. 서론

바닥충격음과 관련된 분쟁을 합리적으로 해결하기 위해서는 실제 발생 충격음을 평가하는 방법이 가장 합리적이지만, 표준충격력의 설정이나 재현성 등의 문제로 실제 적용은 불가능하다. 따라서 실제 충격원의 특성을 잘 재현하는 충격원을 활용하여 거주자의 청감반응과 상관관계가 높은 평가방법으로 평가하는 것이 필요하다. 이미 알려진 바와 같이 경량충격원은 아이들이 뛰는 소음과는 전혀 다른 특성을 갖고, 중량 충격원으로 사용되고 있는 뱅머신의 경우도 우리나라 상황과 같이 대부분의 철근 콘크리트 벽식 구조에서는 과다한 충격력을 갖고 재현되는 주파수 특성 또한 실제 소음과 차이가 있다. 또한 위의 충격원을 활용한 측정 및 평가는 방법이 간단하고 거주자가 층간소음을 차단성능의 차이를 쉽게 알 수 있도록 하는 방법이어야 한다.

현재 활용되고 있는 표준 충격원들의 충격음 주파수 특성은 실제충격음과 차이[1, 2]가 크며, Watters[3]에 의하면 경량충격원이 발생시키는 경량충격음과 여성의 하이힐 소리의 연계성도 주파수 스펙트럼 상에 커다란 차이가 있는 것으로 밝혀졌다. 또한 Warnock[4~6]은 경량충격원의 유용성을 다시 강조하기는 하였으나, 경량충격원

이 목구조 공동주택에서 일반적으로 발생하는 저주파 충격음은 잘 재현하지 못하는 점을 지적하였다.

일본의 목구조 주택의 바닥충격음을 기존의 중량 충격원으로 측정할 경우 주택구조 자체의 손상이 예상되어 실제 충격원에 근접하게 충격력이 저감된 Impact Ball이 만들어졌다. 일본에서는 바닥충격음 측정 및 평가방법으로 Impact Ball이 제 2의 중량 충격원으로 규정되어 있다. [2, 7, 8] 다양한 구조의 공동주택(RC, 목구조 및 철골구조)에서 실제 충격원(8세 25 kg, 어린이 Jumping)과 경량, 중량 및 Impact Ball 충격음을 비교한 Tachibana[2]의 연구결과 Impact Ball 충격음이 실제 어린이의 충격음과 가장 유사한 특성을 갖는 것으로 나타났다.

한국의 공동주택 바닥구조는 일본과 달리 바닥 온돌 난방 구조가 설치되어 뱅 머신에 의한 충격음은 충격력에서 실제 충격원과 차이가 있으며 충격음 특성이 구조에 따라 다르게 나타나고 있다. 그러나 Impact Ball의 충격력과 주파수 특성은 실제충격원과 매우 유사[2, 8, 10]하므로 국내 공동주택에서도 Impact Ball, 경량 충격원 및 중량 충격원과 실제 충격원의 특성 비교를 통해 표준 충격원으로서의 활용 가능성 여부를 확인할 필요가 있다. 이를 위해 표준 충격원으로서의 Impact Ball



a) JIS Impact Ball

b) ISO Impact Ball

[그림 1] Impact Ball

활용가능성과 거주자의 청감반응에 기초한 Impact Ball 평가 등급을 제안하였다.

2. Impact Ball의 특성

JIS A 1418-2에 새로운 중량충격원으로 규정된 Impact Ball은 2.5±0.2 kg, 지름 185 mm의 중공구 형태로 외벽의 두께는 30 mm로 규정되어 있다. Impact Ball은 1 m높이에서 자유낙하 하여 바닥을 충격하며 이때 충격시간은 20 ms로 되어 있다. <표 1>은 Impact Ball과 현재 표준 중량 충격원으로 사용되고 있는 뱅 머신의 특성을 비교한 것이다. <표 1>의 결과에 의하면 Impact Ball이 뱅 머신에 비하여 사용 및 유지보수가 용이한 것으로 판단된다.

현재 Impact Ball은 JIS A 1418-2와 ISO 140-11에 규정되어 있으나 세부 기준이 다소 다르게 되어 있다. JIS에 규정되어 있는 Impact Ball은 2001년 일본에서 대량생산 직전에 개발된 Impact Ball(이하 JIS Impact Ball)이 규격에 반

영되어 있다. JIS Impact Ball의 주재료는 SBR(Styrene Butadiene Rubber)로 온도변화에 따라 충격력의 차이가 발생하는 것으로 알려져 있다[10 ~ 12]. 이러한 JIS Impact Ball의 온도의 존성을 최소화하기 위하여 실리콘 고무를 사용한 새로운 Impact Ball(이하 ISO Impact Ball)이 개발되었다. Impact Ball 구성재료가 변화됨에 따라 유효질량, 크기 및 반발계수 등이 다소 변화되었다. 아래 <표 2>는 JIS 및 ISO Impact Ball의 특성을 비교하여 나타낸 것이다.

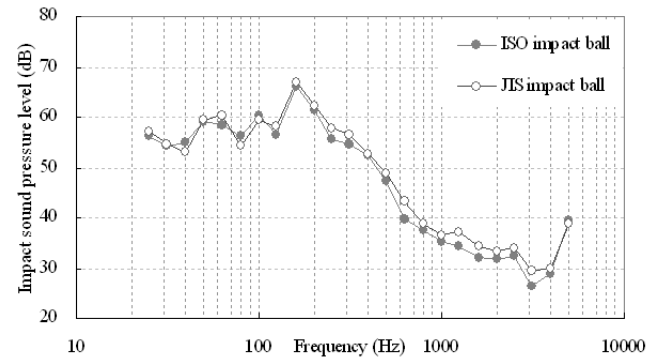
[그림 2]는 JIS 및 ISO Impact Ball의 주파수 특성을 비교한 것으로 슬래브 두께 150 mm, 경량 기포 60 mm, 마감 모르타르 40 mm로 구성된 바닥 충격음 완충재가 적용되지 않은 32 평형 공동주택에서 측정하였다. [그림 2]에서와 같이 ISO Impact Ball의 충격음 JIS Impact Ball 충격음 보다 63 Hz대역을 제외하고는 평균적으로 1 dB 정도 낮은 것으로 나타났다. 또한 중량 충격음 단일 수치 평가량인 역 A 특성 가중 바닥 충격음 레벨 ($L_i, F_{max, AW}$)로 평가할 경우 ISO Impact Ball이 2 dB 낮게 나타났으며, 산술평균값은 0.8 dB, 일본

〈표 1〉 Impact Ball의 특성 비교

	Impact Ball	뱅 머신 (Tire)
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

〈표 2〉 JIS, ISO Impact Ball의 특성 비교

	JIS Impact Ball	ISO Impact Ball
유효질량	2.50±2 kg	2.50±1 kg
반발계수	0.70±1	0.80±1
직경	185 mm	178 mm
형상 및 크기	Hollow/ Thickness 30 mm	Hollow/ Thickness 32 mm
재질	SBR	Silicone rubber



[그림 2] Impact Ball 충격음의 주파수 특성

에서 활용되는 L-지수로 평가할 경우도 1 dB 낮게 나타났다. JIS 및 ISO Impact Ball 충격음의 주파수 특성을 1/3 Oct. 밴드로 평가할 경우 두 충격음의 스펙트럼간 상관계수는 0.995 (p<0.01)로 매우 높게 나타났다.

3. Impact Ball 충격음과 실제 및 표준 충격음과의 비교

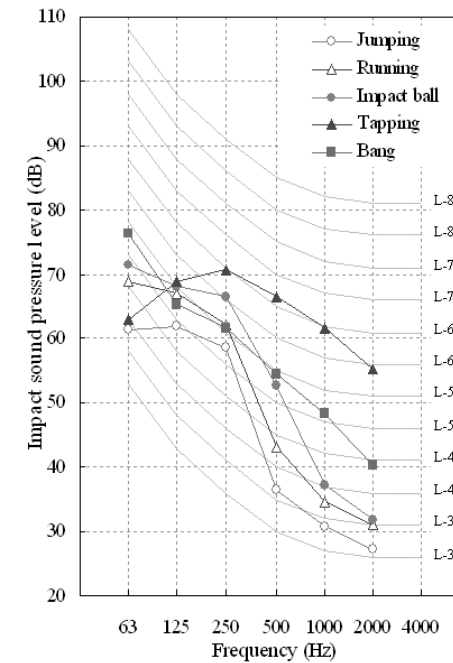
실제 충격음과 표준 충격원에 의한 충격음의 특성을 비교하기 위하여 6 ~ 9세 어린이의 평균 몸

무게와 같은 어린이를 선정하여 실제 거주하고 있는 상태의 공동주택에서 충격음을 측정하였다. 1997년 국가표준체위조사 결과에 의하면 6 ~ 9세 남자 어린이의 평균 몸무게는 26.5 kg, 여자 어린이는 25.6 kg이었으며, 20세 이상의 성인 남녀 평균 몸무게는 각각 66.3 kg, 54.5 kg으로 나타났다. 따라서 26 kg 몸무게의 어린이를 대상으로 Jumping, Running과 경량, 중량 충격음 및 Impact Ball 충격음을 동일한 공동주택에서 측정하여 주파수 특성을 비교하여 [그림 3]에 나타내었다. [그림 3]에서와 같이 Impact Ball의 주파수 특성은 어린이의 Jumping, Running 충격음과

유사한 것으로 나타났다.

뱅 머신으로 가진한 중량 충격음은 63 Hz 대역의 충격음 레벨이 높게 나타나 실제 충격음과는 차이가 있는 것으로 나타났다. 경량 충격음의 경우 250 ~ 4000 Hz 대역 레벨이 매우 높게 나타나 국내 공동주택에서 발생하는 실제 충격원의 특성을 반영하지 못하는 것으로 나타났다. 이상의 결과를 역 A 특성 가중 바닥 충격음 레벨로 평가하였을 경우 Impact Ball 충격음이 중량 충격음보다 2 dB 높게 평가되었다. 이상과 같이 충격원에 따라 충격음의 주파수 특성의 차이가 발생하는 것은 충격원에 따른 충격력 차이와 충격시간의 차이에 의한 것으로 판단된다.

〈표 3〉은 실제 발생 충격음과 표준 충격음의 주



[그림 3] Impact Ball과 실제충격음 비교

〈표 3〉 충격원간 주파수 특성 상관관계 (P<0.01)

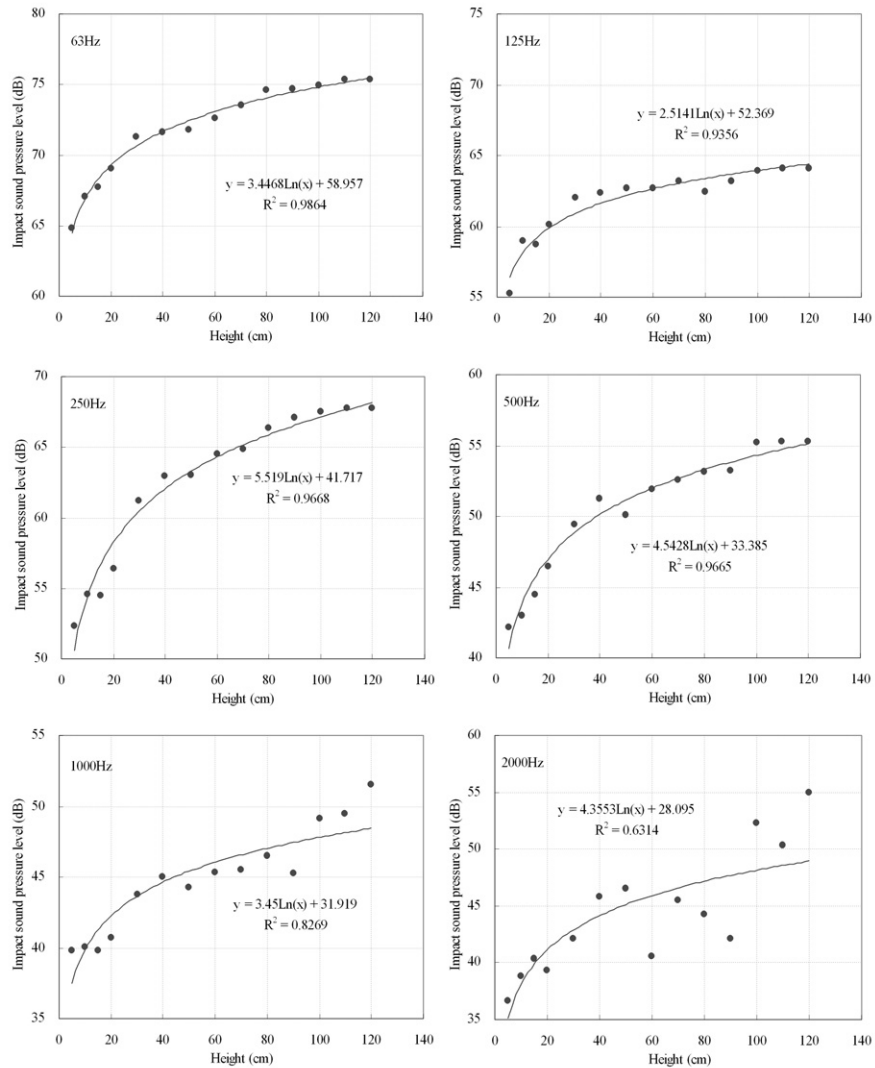
	Impact Ball 충격음	중량 충격음	경량 충격음
Jumping 충격음	0.97	0.92	0.71
Running 충격음	0.98	0.95	0.69

파수 특성 간의 상관관계를 분석하여 나타낸 것이다. 세가지 표준 충격원 중에서 실제 충격음의 주파수 특성과 가장 높은 상관관계를 갖는 충격원은 Impact Ball로 나타났다.

Impact Ball의 자유낙하 높이 변화에 따라 발생하는 충격음의 변화를 135 mm 두께 슬래브의 30 평형대 공동주택 안방에서 조사하여 [그림 4]에 나타내었다. 낙하높이 100 cm를 기준으로 ± 10 cm 이내 범위는 ± 1 dB 이내의 차이로 유의한 차이가 없는 것으로 판단된다. 또한 역 A 특성 가중 바닥 충격음 레벨과 L-지수 평가 결과는 Abe 등[10]에 의해 잔향실에서 측정된 결과와 유사한 것으로 나타났다.

Impact Ball의 자유낙하 높이는 5 cm에서 120 cm (5 cm 간격 ; 5 ~ 20 cm, 10 cm 간격 ; 20 ~ 120 cm)까지 변화시키며 충격음 레벨을 측정하였다. 충격음의 레벨은 자유낙하 높이가 증가에 따라 모든 주파수 대역에서 증가하는 것으로 나타났다. 각 주파수 대역별 충격음 레벨은 $Y = A \ln(h) + B$ 의 형태로 변화되는 것으로 나타났으며, 250 Hz, 500 Hz 대역에서 낙하 높이에 따른 충격음 레벨의 증가가 가장 큰 것으로 나타났다.

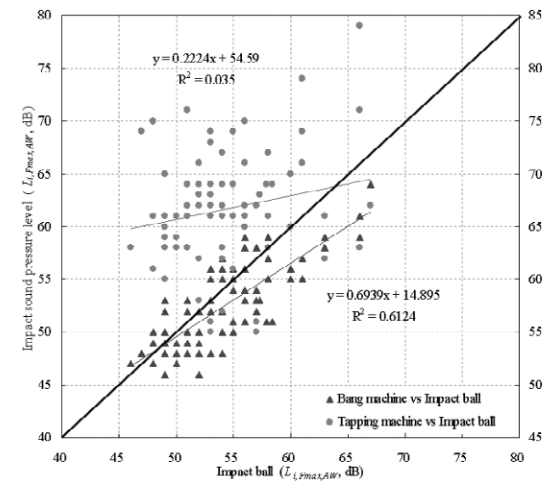
Impact Ball과 경량, 중량 충격음의 단일수치 평가량과의 상관관계를 비교하기 위하여 88개의



[그림 4] Impact Ball의 자유낙하 높이에 따른 레벨 변화

서로 다른 평형과 슬래브 구성이 등의 조건이 다른 공동주택에서 측정된 결과를 [그림 5]에 나타내었다. Impact Ball 충격음이 중량 충격음과의 상관관계는 높지만 경량 충격음 평가량과의 R²값은 0.04로 매우 낮게 나타났는데, 이는 경량 충격

음은 공동주택 바닥 마감재 변화에 따라 경량 충격음 평가량이 변화되기 때문으로 판단된다. Impact Ball과 중량충격음 평가량의 상관관계수(R²)는 0.61로 나타났다.



[그림 5] Impact Ball과 경량, 중량충격음 비교

4. Impact Ball 충격음의 주관적 평가

Impact Ball 충격음에 대한 거주자의 주관적 반응과 가장 상관관계가 높은 평가방법을 조사하기 위하여 각 충격음의 산술평균, L_{Amax}, L-지수, 역 A 특성 가장 바닥 충격음 레벨 및 Zwicker의 Loudness를 조사하였다. 거주자의 충격음에 대한 반응을 조사하기 위한 방법으로는 [그림 6]과 같이 배경소음이 낮고 자유음장조건을 만족하는 청감 실험실에서 1:1 비교법을 적용하여 기본 구조에 대한 차음구조의 라우드니스 차이를 평가하도록 하였다.

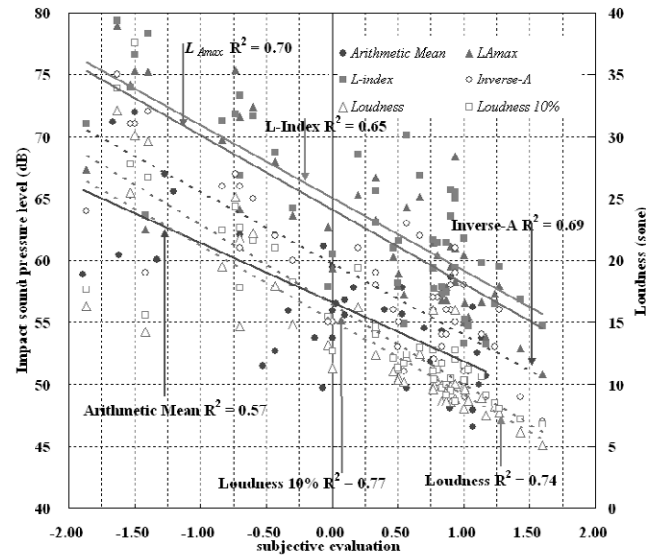
청감평가는 배경소음인 25 dB(A) 이하인 청감 실험실에서 헤드폰으로 피험자에서 음원을 제시하였다. 청감실험에 사용한 기본음원은 바닥 충격음 저감 구조가 시공되지 않은 기본구조에서 녹음된 음원을 활용하였으며, 다양한 바닥 충격음 저감



[그림 6] 청감 실험실

구조가 적용된 구조에서 녹음한 47개 음원을 비교 음원으로 하여 평가하였다. 각각의 1:1 비교음원은 무작위로 제시하였으며, 5점 척도를 활용하여 평가하였다. 청감실험 전에 피험자는 음원의 크기감각(라우드니스)에만 집중하도록 하였으며, 제시되는 음원을 모두 듣고 반응하도록 하였다. 청감실험은 30 명의 피험자를 대상으로 실시하였다.

[그림 7]은 주관적 반응과 6가지 바닥 충격음 평가량 사이의 상관관계(R²)를 나타낸 것으로 주관적 반응과 L_{Amax} 평가량과는 0.70, 산술평균과는 0.57, L-지수와 피험자의 반응과는 0.65, 역 A 특성 가장 바닥 충격음 레벨(L_{i, Fmax, AW})는 0.69, Zwicker의 Loudness와 Loudness 상위 10%의 R² 값은 0.74, 0.77로 분석되었다. 이는 저주파 대역이 주요한 소음원을 대상으로 주관적 평가를 실시한 Tachibana의 연구결과[13]와 유사한 것으로 나타났다. Impact Ball의 충격음 평가척도 중에서 Zwicker의 Loudness가 주관적 소리의 크기 반응(라우드니스)과 가장 상관관계가 높은 것으로 나타났으나, 실제범용적인 평가 척도로 활용



[그림 7] Impact Ball과 충격음 청감 실험결과



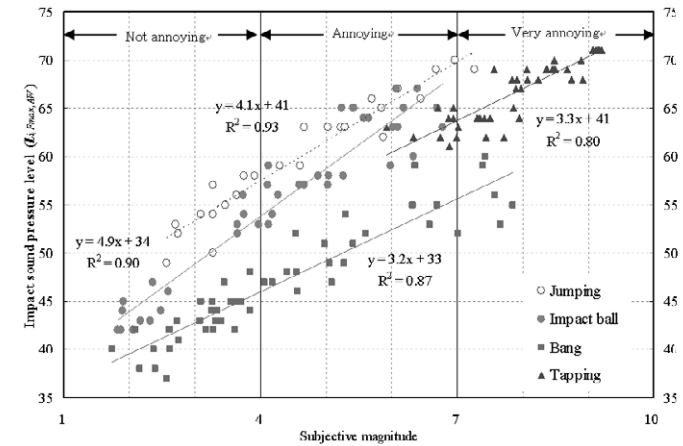
[그림 8] 공동주택에서의 청감 실험

하기에는 측정기기 및 계산상의 제한이 있어 일반적인 측정 장비를 활용하여 측정 가능한 L_{Amax} , $L_i, F_{max, AW}$ 로 평가하는 방법이 합리적인 것으로 판단된다.

이상의 평가방법에 대한 결과를 바탕으로 Impact Ball 충격음의 평가 등급을 제안하기 위

한 청감 실험을 실제 공동주택에서 실시하였다. 공동주택 현장 청감실험은 공동주택에서 거주자들이 실제 발생하는 충격음에 대해 느끼는 거슬림(어노이언스)을 기준으로 Impact Ball의 평가 등급을 제안하기 위하여 실시하였다. 공동주택 청감실험은 98명의 피험자를 대상으로 마감공사가 완료된 34평형 공동주택(슬래브 135 mm + 경량기포 콘크리트 70 mm + 마감 모르타르 40 mm)에서 실시하였다. 청감실험에 사용된 설문은 2001년 일본 건축학회에서 제안된 바닥충격음 평가 기준을 국내 조건에 맞게 수정하여 활용하였다. 실제 현장 실험에서 Impact Ball의 충격음 레벨 변화는 Impact Ball의 자유낙하 높이를 변화하여 제어하였으며, 피험자는 [그림 8]에서와 같이 하부 세대의 거실에서 발생하는 충격음을 듣고 평가하였다. 청감실험에 의한 Impact Ball 충격음의 평가등급으로 주관적 반응의 하한치는 [그림 9]에서와 같이 4점 척도에 해당할 경우 54 dB(역 A 특성 가중 바닥 충격음 레벨)로 나타났다.

Impact Ball 충격음의 적절한 평가 등급 간격 설정을 위하여 Impact Ball 충격음의 레벨 변화에 대한 인지 한계(JND, Just Noticable Difference) 실험을 실시하였다. 인지한계 실험은 20대 후반 정상 청감자 10명을 대상으로 1:1 비교 방법을 적용하였다. Impact Ball 충격음의 최소 가청 한계는 충격음 레벨 차이가 3 dB 정도일 경우 100%의 피험자가 충격음 레벨 차이를 인지하였으나, 주관적 반응과 스케일 간격을 고려할 경



[그림 9] 공동주택 청감 실험 결과

우 Impact Ball 충격음의 평가 등급 간 차이는 5 dB 정도가 적절한 것으로 판단된다. Rindel[14]의 연구결과에서도 바닥 충격음 평가 등급 간격을 5 dB로 제안한 바 있다. 따라서 [그림 9]에서와 같이 Impact Ball 충격음의 최소 만족 한계 54 dB ($L_i, F_{max, AW}$)를 기준으로 5 dB 간격으로 등급을 설정하였다.

5. 결론

현재 KS 및 JIS에 규정된 세가지 표준충격원을 대상으로 공동주택에서의 충격음 특성을 실제 발생 충격음과 비교한 결과 Impact Ball이 가장 유사한 충격음을 발생시키는 것으로 밝혀졌다. 특히 Impact Ball 충격음은 물리적 특성이나 피험자의 주관적 반응에 있어 기존의 중량 충격원 보다 실제 Jumping 충격음을 잘 재현하였다. 성인의 Jumping 충격음은 Impact Ball 및 중량충격음

보다 다소 높게 나타났으나, 어린이가 발생시키는 충격음은 약 5 dB 정도 낮게 나타났다. Impact Ball 충격음에 대한 청감 실험 결과 L_{Amax} , $L_i, F_{max, AW}$ 로 평가하는 방법이 주관적 반응과 상관관계가 높아 합리적인 것으로 판단된다. 또한 평가 등급으로는 최소 기준을 54 dB ($L_i, F_{max, AW}$)를 기준으로 5 dB 간격으로 설정하는 것이 합리적인 것으로 나타났다. FILK

[참고문헌]

1. W. Shi, C. Johansson and U. Sundback, "An investigation of the characteristics of impact sound sources for impact insulation measurement," Applied Acoustics, 51, 85-108, 1997.
2. H. Tachibana, H. Tanaka, M. Yasuoka, and S. Kimura, "Development of new heavy and soft impact source for the assessment of floor impact sound of building," Proceedings of Inter-noise 98, 1998.
3. B. G. Watters, "Impact-noise characteristics of female hard-heeled Foot traffic," J. Acoust. Soc. Am., 37, 619-630, 1965.
4. A. Warnock, "Low frequency impact sound transmission through floor

- systems,” Proceedings of Inter-noise 92. 1992.
5. A. Warnock, “Low-frequency impact sound rating of floor systems,” Proceedings of Noise-Control Engineering Journal 2000, 2611, 2000.
 6. A. Warnock, “Prospects or a test method for rating floor- toppings for use on joist floors,” Proceedings of J. Acoust. Soc. Am., 112, pp.2227. 2002.
 7. M. Yasuoka, S. Makamori, R. Tomita, K. Kise, K. Inoue, and H. Tachibana, “Development of new heavy impact source. Part1: Point of development and technique of experiments,” Proceedings of Architectural Institute of Japan, pp.229-230. 2000.
 8. H. Tachibana, H. Tanaka, “Development of a heavy and soft source for the assessment of floor impact sound insulation,” Proceedings of J. Acoust. Soc. Am., 100(4), pp.2768. 1996.
 9. A. Preis, M. Ishibashi and H. Tachibana, “Psychoacoustics studies on assessment of floor impact sounds,” J. Acoust. Soc. Jpn., (E) 21(2), pp.69-77, 2000.
 10. K. Abe, K. Inoue and M. Yasuoka, “Dependence on temperature of impact force characteristics in standard heavy impact sources. Part: 1 Equipment and techniques of experiments,” Proceedings of Architectural Institute of Japan, pp.141-142, 1999.
 11. M. Yasuoka, K. Inoue and K. Abe, “Dependence on temperature of impact force characteristics in standard heavy impact sources. Part: 2 Study on experimental results,” Proceedings of Architectural Institute of Japan, pp. 143-144, 1999.
 12. K. Inoue, K. Abe and M. Yasuoka, “Dependence on temperature of impact force characteristics in standard heavy impact sources. Part: 3 Study on floor impact sound,” Proceedings of Architectural Institute of Japan, pp. 145-146, 1999.
 13. H. Tacibana, H. Yano and Y. Sonoda, “Subjective assessment of indoor noises- basic experiments with artificial sounds,” Applied Acoustics, Vol.31. pp.173-184, 1990.
 14. J. H. Rindel, “Acoustic quality and sound insulation between dwellings,” Journal of Building Acoustics 5. pp.291-301, 1999.