

중량충격원에 따른 콘크리트 바닥판의 차음특성 분석 및 평가에 관한 연구[#]

Analysis and Evaluation of Impact Sound Insulation of Concrete Floor Structures in Response to Characteristics of Heavy-weight Impact Sources

유 승 업*·연 준 오*·전 진 용†

Seung Yup Yoo, Jun Oh Yeon and Jin Yong Jeon

(2009년 7월 23일 접수 ; 2009년 9월 2일 심사완료)

Key Words : Standard Heavy-weight Impact Source(표준중량충격원), Impact Force Characteristic(충격력 특성), Floor Structure(바닥구조), Impact Sound Insulator(충격음 저감재), Insertion Loss(삽입손실)

ABSTRACT

In this study, the impact force levels of bang machine and impact ball were measured, then the heavy-weight impact sounds generated by the bang machine and impact ball were investigated. It was found that the heavy-weight impact sources generated through modal excitation, and the impact force of the impact ball was similar to that of real impact source. The heavy-weight impact sounds were also measured in the real apartments with different slab thickness and floor structures. The results showed that the floor impact sound levels in terms of $L_{ifmax,AW}$, generated by impact ball sounds were reduced by using the resilient isolators. The frequency characteristics of heavy-weight impact sounds at 125 and 250 Hz were consistent with the characteristics of impact force spectrum. However, the difference between the impact sounds and the impact forces were found at 63 and 500 Hz due to the resonance of the floor structure and flanking noise, respectively.

1. 서 론

건축물의 성능개선을 위해 재료, 구조, 환경 등에 대한 통합적인 요구증가를 통한 건축부재의 복합 시스템 설계 및 시공이 늘고 있다. 최근 층간소음 문제가 공동주택의 고층화와 더불어 사회적 이슈가 됨에 따라 국내에서도 이와 관련된 복합바닥구조의

동적 특성에 대한 연구들이 진행되고 있다.

특히, 국내 건설 환경 및 주거 문화적 특성에 의해 중량충격음 해결책이 그동안 기술적으로 문체되고 있어 이를 개선하고자 하는 관련 연구개발이 지속적으로 이루어지고 있다. 현재 대다수의 바닥충격음 저감재에 대한 연구개발은 전산해석적인 방법을 이용한 성능 예측 및 현장 또는 실험실에서 시험시공을 통한 충격음 차단성능 평가를 통해 이루어지고 있다.

2004년 부터 국내에서는 공동주택 바닥충격음에 대한 규제를 시행하고 있으며 이에 대한 대응으로 ‘바닥충격음 차단구조 성능인정’ 제도를 실시하고 있다. 2009년 2월 현재 총 161개의 바닥구조가 인정구조로 등록되어 있으며 그 가운데 중량충격음 1,

† 교신저자; 정회원, 한양대학교 건축공학부
E-mail : jyjeon@hanyang.ac.kr
Tel : (02)2220-1795, Fax : (02)2220-4794

* 정회원, 한양대학교 대학원 건축환경공학과

이 논문은 2009 춘계 소음진동 학술대회에서 우수논문으로 추천되었음.

2등급에 해당하는 바닥구조가 전체의 20%에도 미치지 못하고 있어 중량충격을 제어할 위한 관련 기술개발의 필요성이 증대되고 있다.

표준 중량충격원으로 국내에서는 KS F2810-2의 뱀머신이 일반적으로 사용되고 있다. 한편, 최근 실리콘 고무로 만들어진 구(球) 형태의 임팩트볼이 표준 충격원으로서 일본에서 처음으로 개발되어 JIS 및 ISO에서 표준충격원으로 사용중에 있다. 국내에서도 2008년 음향재료협회 산하 소위원회가 발족되어 임팩트볼을 표준규격(KS)에 표준충격원으로 포함하고자 하는 등 임팩트볼의 표준충격원 활용에 관한 연구가⁽¹⁾ 진행되고 있다.

중량충격원에 대한 충격력 및 임피던스 특성을 조사한 기존 연구결과를 통해 임팩트볼이 실제 충격원과 비교하여 뱀머신에 비해 보다 유사한 것으로 밝혀졌다^(2,3). 종래의 뜬바닥구조는 바닥의 공진 주파수를 저주파수 대역으로 이동시키는 방법으로 설계가 되기 때문에, 63 Hz 이하에서 실제보다 과도한 충격력을 가진 뱀머신으로 저감구조의 차단 성능을 평가할 경우, 과도한 설계를 유발할 수 있다는 문제점을 가지고 있었다⁽⁴⁾. 이러한 문제점들로 인해 국내에서도 임팩트볼 도입이 적극적으로 추진될 것으로 예상되고 있다. 그러나 아직까지 새로운 충격원 도입 시, 기존 뱀머신을 활용한 측정결과들을 활용하는 방법에 대한 연구가 부족한 상황이다.

Murakami와 Tanaka는⁽⁵⁾ 각 충격원별 충격력과 충격음간 차이를 다양한 바닥구조에 대해서 조사하고 이를 단일수치 평가값(L-number)을 통한 충격원별 치환방법을 검토해보았으나 유의하지 않은 것으로 나타났다. 전진용 등⁽⁶⁾은 30여개 현장에서 측정된 DB를 기반으로 삽입손실 개념의 보정항 및 주파수 대역별 음압레벨에 대한 회귀분석 등의 2가지 예측모델을 제시하였다. 상관분석결과, 125 Hz이하의 저주파수에서는 비교적 유의한 결과를 얻을 수 있었으나 고려된 바닥구조가 벽식 RC구조에 한정되어 있으며 다양한 바닥구조의 동특성을 고려하지 못하고 있다는 점에서 한계가 있다. 최근 바닥판의 동특성(impedance 등)과 충격력 특성을 반영한 예측방법들이 Nightingale⁽⁷⁾ 등에 의해 연구되고 있다.

이 연구에서는 서로 다른 중량충격원을 적용했을 때 발생하는 충격음압 레벨과 바닥구조간의 관계를 조사하였다. 우선 표준 중량충격원의 충격력 특성

을 분석하였으며, 또한 충격원 변경에 따른 바닥충격을 평가방법에 대해서 국내 실정을 감안하여 분석하였다.

2. 표준중량충격원의 충격력 특성

2.1 측정시스템

표준충격원의 충격력 특성을 파악하기 위하여 KS에서 제시하고 있는 형태의 충격력 측정 장치를 구성하여 측정·평가하였다. 충격력 측정 장치는 하중 27 kg의 하부 고정판과 상부 가진판 및 판 사이에 등간격으로 설치된 3개의 Force transducer (Type 2302A, PCB)로부터 충격력을 측정하는 형태로 구성되어 있다. 사용된 가진판은 두께 30 mm, 직경 360 mm으로 5.7 kg의 하중을 가지는 판으로 충격원이 판의 중앙부를 가진하였을 때, 가진판에 부착된 센서에 의해 충격력 응답을 취한다. Fig. 1은 충격력 측정장치 및 Calibration을 위한 검증단계를 나타내고 있다. 임팩트해머(Type 5803A, Dytran)로 가진했을 때, 입출력 응답간의 차이로부터 시그널 합성 및 FFT 분석방법(시간, 평균화 방법 및 time weighting)을 결정하였다.

2.2 충격력의 측정

2종의 표준 중량충격원 및 보행에 대한 충격력을 측정하였다. 표준충격원의 충격력 폭로레벨 측정은 뱀머신 85 cm, 임팩트볼 100 cm 높이에서 각각 낙하 하였으며, 실충격원의 폭로레벨은 성인이 빠른 걸음으로 걸었을 때 3회 평균값을 사용하여 하였다. 가진판의 반력을 고려하여 계산시간은 1초로 하였고, FFT시, Rectangular window를 사용하였다.

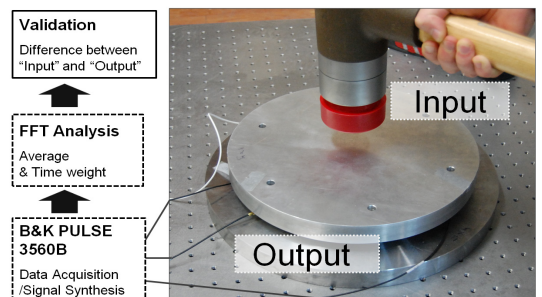


Fig. 1 Validation of the impact force measuring system

Fig. 2 상단에 나타난 바와 같이 72 kg 성인 남성의 보행과 표준 중량충격원에 의해 발생하는 충격력 시간에 따른 스펙트럼은 지속 시간과 피크레벨에

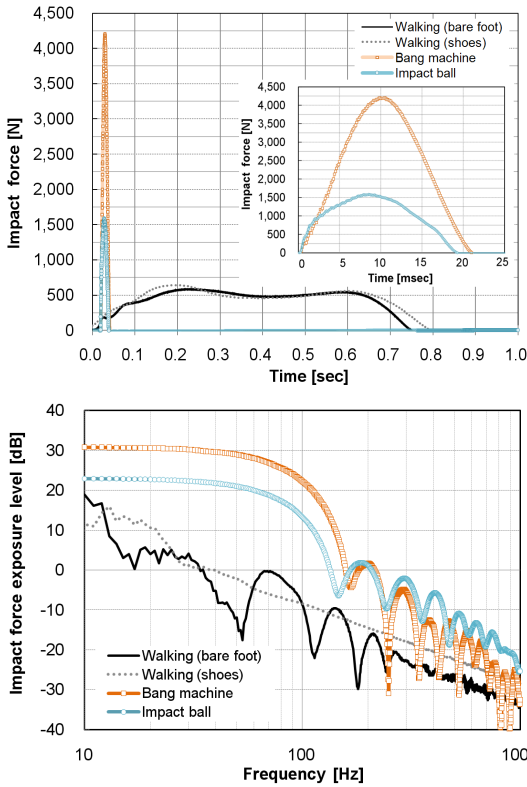


Fig. 2 Force characteristics of various impact sources(upper figure: time domain, lower figure: frequency domain)

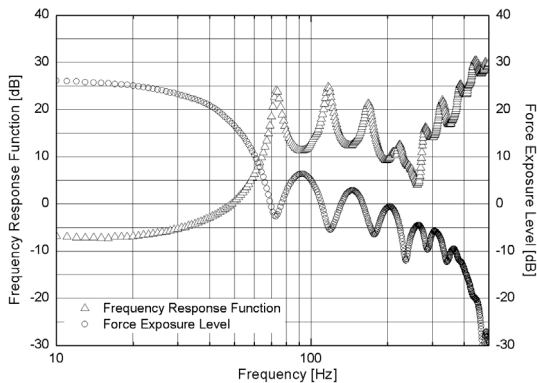


Fig. 3 Spectra comparison between force exposure level & frequency response function of impact ball

있어 차이가 있는 것으로 나타났다. 충격력의 지속시간은 중량 충격원의 경우 20 ms 이내로 보행에 의한 충격은 0.8초이므로 약 40배정도 길게 나타났다.

충격력 피크레벨은 뱀머신이 4.2 kN, 임팩트볼은 약 1.5 kN으로 나타났으나 성인보행의 경우에는 0.6 kN이하로 나타났다. 한편, 충격력 파형은 뱀머신의 경우, 피크치에 대해 대칭형태의 half-sine파형을 보였으나 임팩트볼의 경우, 가진 초기에는 충격력이 급격하게 증가하다 피크 이후에는 비교적 천천히 감소되는 비대칭형을 가지는 것으로 나타났다.

각 충격원에 대한 주파수 대역별 충격력 폭로레벨 분석결과는 Fig. 2 하단과 같다. 주파수 분석시 샘플링 주파수는 3.2 kHz, 분석 간격은 0.5 Hz로 설정하였다. 40 Hz 이하의 저주파수 대역에서의 충격력이 임팩트볼이 뱀머신에 비해 7 dB 정도 낮은 것으로 나타났다. 실충격원에 해당하는 보행가인의 경우, 표준충격원들과 달리 고주파수 대역으로 올라갈수록 비교적 선형적인 감소패턴을 가지는 것으로 나타났다. 이는 이전 문헌들에서 검토한 6~9세 아이들의 주파수 대역별 충격력 특성^(2,3)과 유사하나 이전 연구 결과에서와 같이⁽⁸⁾ 보행자의 무게에 따라 충격력의 크기가 달라질 수 있는 것으로 나타났다.

주파수 대역별 충격력 폭로레벨 분석결과에서 볼 수 있듯이 표준 중량충격원의 경우 100 Hz 이상의 주파수 대역에서 주기적인 변동을 가지는 모달 가인의 형태를 띠고 있다. Fig. 3은 임팩트볼에 대한 주파수 응답함수(FRF)와 충격력의 비교 그래프를 나타내고 있다. 충격원의 고유진동수는 1차 77 Hz, 2차 110 Hz, 3차 122 Hz 및 4차 173 Hz에서 나타났으며 이는 충격력 폭로레벨 결과와 일치하였다. 이를 통해, 임팩트볼과 같은 중량충격원은 모달 형태로 구조체에 가진되는 것으로 나타났으며, 이러한 충격원의 모달 특성에 따라 바닥판의 응답이 달라질 수 있는 것으로 분석되었다.

3. 충격원에 따른 바닥충격을 특성

3.1 바닥진동 시뮬레이션

충격원 변화에 따른 바닥판의 진동응답을 살펴보고 이에 따른 충격음 전달에 대한 양상을 예측하고자 공동주택 부역을 포함한 거실 면적 40 m²의 바닥 면적을 가지는 맨슬래브의 단순바닥판을 모델링하였

다. 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 모델링 및 해석을 실시하였다. 바닥판은 $2,400 \text{ kg/m}^3$ 의 밀도를 가지는 210 kg/cm^2 의 철근 콘크리트로 모델링하였으며 Shell 요소를 사용하여 바닥판을 모델링 하였다. 내력벽체로 되어 있는 경계부는 clamped로 그 밖의 개구부 경계조건은 free로 가정하였다. 모델링된 거실바닥판 중앙부를 중량충격원으로 가진하였을 때, 바닥판 진동응답을 과도해석(transient analysis)을 수행하여 분석하였다. 총 해석시간은 0.5초로 설정하였으며 충격력은 1 msec 간격으로 입력하였다.

Fig. 4는 임팩트볼과 뱅머신으로 가진시 바닥판 중앙부위의 진동가속도 응답을 주파수 및 시간 스펙트럼으로 나타내고 있다. 뱅머신으로 바닥판을 가진하였을 때의 진동가속도응답이 임팩트볼에 비해 2배 높게 나타났다. 바닥판의 공진주파수는 23 Hz로 나타났으며, 저차모드의 저주파수 대역에서는 임팩트볼로 가진하였을 때 뱅머신에 비해 10 dB 진동가속도

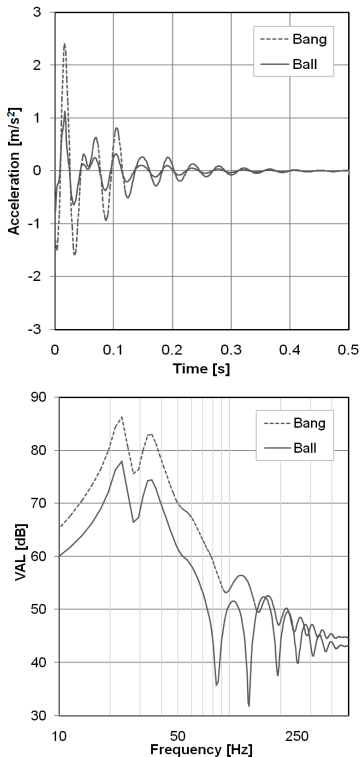


Fig. 4 Time(upper) and frequency(lower) spectra of floor vibration response through transient analysis

레벨이 더 낮게 나타났으나 250 Hz 대역에서는 임팩트볼로 가진했을 때, 바닥판의 진동가속도레벨이 더 커 소음레벨이 더 클 것으로 예상된다.

3.2 바닥충격을 현장측정

(1) 측정 개요

공동주택 바닥충격을 규제화에 따라 층간소음 저감을 위해 완충재를 사용한 표준바닥구조를 도입하였으나 사실상 20 mm 전·후의 완충재를 사용한 뜬바닥구조의 경우, 바닥판의 공진주파수가 낮아짐으로써 인해 뱅머신을 사용한 중량충격을 저감에 불리한 것으로 알려져 있다⁴⁾. 임팩트볼과 뱅머신에 따른 충격음 레벨차이를 통해 완충재를 사용한 표준바닥구조 도입에 따른 차음효과 및 임팩트볼 도입에 따른 효과를 살펴보았다. 마감공사 직전이나 완료된 신축 공동주택 47세대 154개소에서 측정된 DB를 바탕으로 분석하였다. 현장 측정은 KS F2810-2의 방법을 따랐으며 측정점 위치 및 개소 수는 국토해양부 고시에 준하였다.

측정 세대는 모두 벽체와 슬래브가 일체된 벽식구조로서 콘크리트 슬래브 두께는 각 150 mm, 165 mm 및 180 mm의 세 개 구조를 대상으로 하였다. 바닥구조는 그 상부에는 기포콘크리트와 모르타르로 이뤄진 온돌마감층으로 구성되었다. 한편, 완충재가 시공된 세대에서는 20 mm 두께로 콘크리트 슬래브와 온돌마감층 사이에 층간차음 완충재가 설치되었다.

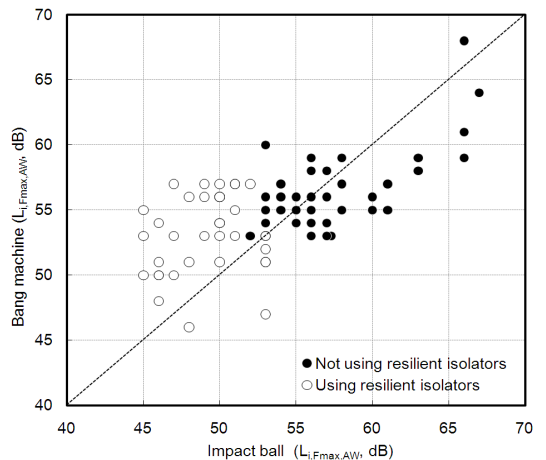


Fig. 5 Single number ratings($L_{1,Fmax,AW}$) of floor impact sound level of two heavyweight impact sources from field measurements

Fig. 5는 완충재 삽입 유무에 따른 뱅머신과 임팩트볼 충격음 단일수치 평가값($L_{i,Fmax,AW}$)의 분포를 정리하였다. 완충재가 삽입되지 않은 구조에서는 뱅머신과 임팩트볼로 가진하였을 때, 90% 이상이 55 dB를 상회하는 것으로 나타났으나 완충재 삽입에 의해 중량충격음 레벨이 전반적으로 낮아졌다. 완충재를 삽입하지 않은 바닥구조의 경우에는 임팩트볼에 대한 충격음 레벨이 전반적으로 뱅머신에 비해 높은 것으로 나타났으나 완충재 삽입 후에는 뱅머신에 비해 임팩트볼에 대한 충격음 레벨이 낮아졌다.

(2) 바닥충격음 특성분석

Table 1과 Fig. 6은 슬래브 두께 및 완충재 유무에 따른 63~500 Hz 주파수 대역별 뱅머신과 임팩트볼간 충격음 레벨차이의 평균값을 나타낸다. 레벨차가 양수를 가지는 것은 뱅머신 충격음 레벨이, 음수는 임팩트볼 충격음 레벨이 각각 더 높음을 의미한다.

완충재가 삽입되지 않은 바닥구조들은 63 Hz에서 거슬의 경우 최대 8.4 dB, 침실에서는 최대 6.8 dB 뱅머신의 충격음이 높은 것으로 나타났다. 그러나 125~500 Hz 대역에서는 임팩트볼의 충격음이 평균 3.8 dB 높았다. 완충재가 삽입된 구조들에서는 63 Hz에서 최대 10.1 dB 뱅머신의 충격음이 높게 나타났으며 125, 250 Hz 대역에서는 대부분 임팩트볼의 충격음 레벨이 뱅머신에 비해 높은 것으로

나타났다. 그리고 완충재 비삽입 구조와 달리 500 Hz에서 뱅머신의 충격음이 높은 것으로 나타났다.

뱅머신과 임팩트볼의 충격력은 일반적으로 125 Hz를 기준으로 저주파수 대역에서는 뱅머신이 높고, 고주파수 대역에서는 임팩트볼이 높다. 완충재 비삽입 구조의 경우에는 이러한 충격원간 충격력 특성을 잘 반영되고 있으나, 삽입구조의 경우에는 500 Hz에서 그 특성을 달리하는 것으로 나타났다. 삽입 구조

Table 1 Level difference in octave band frequencies (ΔL : level difference between bang machine and impact ball)

Con'c slab thickness [mm]	Isolator thickness [mm]	ΔL [dB]				Number of samples	
		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz		
150	0	7.5	-2.1	-5.6	-3.6	11(LR)	
		6.8	-1.4	-4.7	-5.2	46(BR)	
6.7		-1.8	-6.1	-4.1	5(LR)		
5.5		-0.7	-4.8	-5.7	9(BR)		
180	0	8.4	-1.2	-5.3	-3.7	8(LR)	
		4.9	-2.6	-5.3	-5.2	47(BR)	
150	20	9.4	-1.1	1.8	9.6	3(LR)	
		9.8	-0.4	-2.6	4.9	8(BR)	
10.1		-0.9	-3.7	7.4	1(LR)		
10.0		-1.1	-3.0	2.2	2(BR)		
180		20	9.4	1.0	-0.1	5.9	5(LR)
			9.9	0.9	-2.1	-0.1	9(BR)

*LR: living room, BR: bedroom

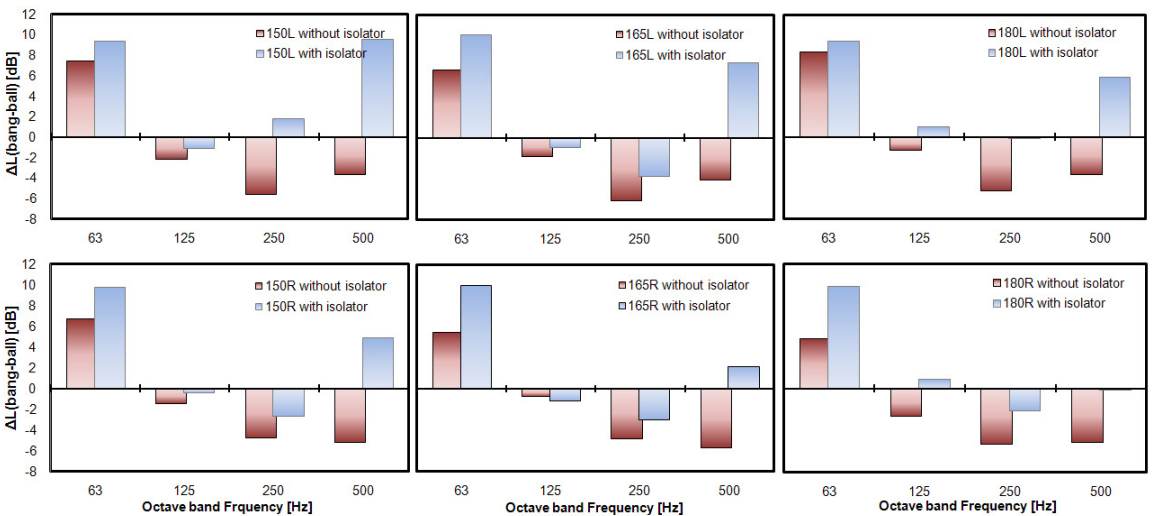


Fig. 6 Level difference between Bang machine and Impact ball in octave band frequencies according to slab thickness and use of isolator

500 Hz에서 거실에서의 차이가 침실에 비해 5.2 dB 더 높은 것으로 나타났다. 이는 현장측정의 경우에는 완충재 삽입으로 인해 고주파수 대역에서의 차단 성능은 증가하여 측정레벨에 대한 우회전달음의 영향이 증가했기 때문으로 사료된다.

또한, 63 Hz에서 충격원간 차이가 완충재가 삽입된 바닥구조에서 평균 3 dB 높은 것으로 나타났다. 이는 완충재 삽입에 의한 바닥판의 공진효과로 인해 저주파수 대역에서 충격력이 큰 충격원에 대해 증폭되는 효과가 커져 충격을 레벨차가 증가한 것으로 해석된다.

위의 측정결과를 바탕으로 주파수 대역별 충격음 레벨 차이는 충격력 레벨차와 유사한 것으로 나타났으나 바닥구조 및 측정환경에 의해 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 충격원 간 차이를 통해 바닥구조 개발에 있어 각 충격원 별 현장 바닥충격음 평가방안에 대해서 고찰하였다.

Fig. 7은 5가지 종류의 완충재가 삽입된 세대에 대해 21개소에서 측정한 주파수 대역별 중량충격음 레벨을 나타내고 있다. 실선은 실제 측정된 충격원별 바닥충격음 레벨을 나타내고 있으며 2개의 점선은 각각 충격원별 최대, 최소 역A곡선을 나타내고 있다.

단일수치값을 결정하는 주파수는 뱅머신이 63, 125 Hz, 임팩트볼이 125, 250 Hz으로 나타났다. 뱅머신의 경우, 단일수치값을 결정하는 데 있어 가장 영향을 미치는 63 Hz에서의 구조별 편차가 15.6 dB로 나타나 13 dB의 단일수치값 차이를 발생하게 되었다. 그러나 63 Hz에서 측정현장의 평면형태나 구조형식에 따라 바닥공진 또는 롬모드에 의해 영향을 받게 되므로 바닥구조의 차단성능 외적인 요소에 의

해 간섭을 받을 수 있다. 임팩트볼의 경우, 결정 주파수는 대부분 125 Hz으로 단일수치값의 변화폭은 뱅머신에 비해 5 dB 낮은 것으로 나타났다. 따라서 임팩트볼을 활용한 바닥충격음 현장측정을 통해 바닥구조의 차단성능 평가에 대해 보다 변별력 있는 측정결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

4. 토의 및 결론

이 연구에서는 표준 중량충격원과 실제 충격원을 측정하였고 뱅머신과 임팩트볼 간의 충격력 특성차이를 분석하였다. 충격원간 충격력 특성차이를 바탕으로 전산해석 및 현장측정결과를 통해 바닥충격음 영향을 검토하여 충격원간 레벨차이 및 평가방법상의 차이를 검토해보았다. 분석결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 중량충격원 가진특성, 즉 충격력 및 충격원의 모달특성에 따라 100 Hz대역의 충격음 레벨이 뱅머신과 임팩트볼 간 역전될 수 있다. 따라서 충격원의 가진특성을 고려하여 바닥구조의 차음성능이 평가되어야 한다.

(2) 온돌구조와 완충재로 이뤄진 국내 표준바닥구조의 경우, 뱅머신을 사용하여 바닥구조를 평가하였을 때 실제에 비해 과도한 저주파수 대역에서의 충격력과 바닥판 공진특성에 의해 63 Hz 대역에서 높은 음압레벨을 나타내어 단일수치값 결정에 지배적인 영향을 끼치게 된다. 한편, 500 Hz의 경우 우회전달음이나 배경소음에 의해 변동폭이 커 음압레벨의 측정 신뢰성이 낮다.

(3) 임팩트볼을 이용한 바닥충격음 평가시, 125와 250 Hz에서 바닥충격음 단일수치값이 결정되어 표준바닥구조 도입에 따른 저감효과 평가에 효과적인 것으로 나타났으며 비교적 변별력 있는 성능평가가 가능한 것으로 나타났다.

향후, 실제 충격원과 충격특성이 가장 유사하여 국제적인 표준충격원으로 규정될 것으로 예상되는 임팩트볼에 대응하는 바닥구조 개발이 필요하며 이에 따라 125, 250 Hz 주파수 대역에서 효과적으로 충격음을 저감할 수 있는 바닥구조 설계가 필요하다. 또한, 현재 개발된 바닥구조에 대한 성능평가 결과를 활용하기 위해 주파수 대역별 삽입손실(insertion loss)을 활용한 평가방법 개발 및 주관적

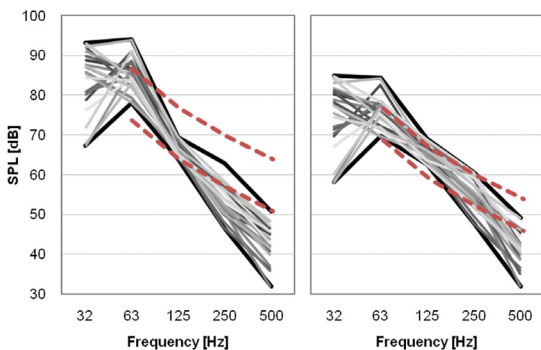


Fig. 7 Floor impact sound level of 5 types of floating floors(left: bang machine, right: impact ball)

반응에 영향을 미치는 주요 주파수대역 및 관련 물리적 변수 등과 같은 심리음향학적 측면에서의 저감 시스템에 대한 연구개발이 필요하다.

후 기

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2008-0061657).

참 고 문 헌

(1) Jeon, J. Y., 2008, "Report of the Standardized Technology Development Project(No. 10023489)," Ministry of Commerce, Industry and Energy, Korea.

(2) Jeon, J. Y., Ryu, J. K., Jeong, J. H. and Tachibana, H., 2006, "Review of the Impact Ball in Evaluating Floor Impact Sound," Acta Acustica United with Acustica, Vol. 92, No. 5, pp. 777~786.

(3) Jeon, J. Y., Lee, P. J., Jeong, J. H. and Park, J. H., 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.

(4) Seo, S. H., Song, S. H. and Jeon, J. Y., 2004,

"Noise and Vibration Characteristics of Concrete Floor Structures Using Resilient Materials Driven by Standard Heavy Impact Source," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 14, No. 8, pp. 661~667.

(5) Murakami, T. and Tanaka, M., 2004, "Study on the Measurement Method and the Measurement Result of Floor Impact Sound Level Using the Standardized Rubber Ball," GBRC, Vol. 116, pp. 25~33.

(6) Jeon, J. Y., Lee, P. J. and Sato, S., 2009, "Use of the Standard Rubber Ball as an Impact Source with Heavyweight Concrete Floors," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 126, No. 1, pp. 67~178.

(7) Zeitler, B. and Nightingale, T., 2008, "Impedance of Standard Impact Sources and Their Effect on Impact Sound Pressure Level of Floors," Journal of Acoustical Society of America, Vol. 123, No. 5, p. 3358.

(8) Kim, K. W., Choi, H. J., Choi, G. S., Kang, J. S. and Yang, K. S., 2005, "Impact Power Characteristics of Walking for Adults," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 789~796.