

벽식구조 표준시험동에서 중량충격음장에 관한 연구

Investigation of the heavy-weight floor impact sound field in a testing building with bearing wall structure

유승엽†·이신영*·전진용**

Seung Yup Yoo, Sin Young Lee and Jin Yong Jeon

Key Words : Heavy-weight impact sound(중량충격음), Standard testing building(표준시험동), Receiving position(수음위치), Impact sound pressure level distribution(충격음레벨분포), Room mode(실내모드)

ABSTRACT

The heavy-weight floor impact sound field of the receiving room in a testing building with bearing wall structure was investigated using bang machine and impact ball. The sound field was investigated through the impact sound pressure level distribution by the field measurement and computational analysis. Predicted sound field using the computational analysis agree with measurement result in the low frequency band. Result shows that standard deviations of the single number rating value are about 2dB in each impact source. Particularly, impact sound pressure level at 120cm height in 63Hz octave band was 5dB lower than spatial averaging value. It was found that receiving positions in the ministry of construction and transportation notice should be reconsidered.

1. 서론

공동주택에서 발생하는 바닥충격음에 대한 연구는 가진원에 대한 고찰, 전달경로(건축구조)에서의 진동에너지 전파특성, 그리고 수음실에서의 음향특성(수음실의 크기, 마감재료의 음향특성 및 수음점의 위치)등에 대해 이뤄진다. 특히 바닥충격음의 현장측정의 경우, 평면 및 구조형태에 따라 전달경로와 수음실 음장이 달라져 동일 바닥구조라 할지라도 세대별, 측정기관에 따라 측정결과의 차이를 보이고 있다.

바닥충격음과 관련된 측정법은 Table 1.과 같으며 국내에서는 건설교통부의 고시⁽¹⁾를 기준으로 측정기준이 이뤄지고 있다. 고시에서 제안된 측정점은 정진연(2005) 등의 연구를 기반으로 하여 벽체로부터 0.75m 이격한 측정점의 위치가 공간의 평균값을 대표할 수 있는 값으로 적절하다는 분석결과를 통해 제안되었다.^{(2),(3)} 그러나 이와 같은 현재 측정점 제한 방법에 대하여 장방형의 평면 형태에 따른 모드상황의 영향이 명확히 조사되지 않아 실 전체의 대표값을

충분히 재현하고 있는지에 대한 여부에 대한 연구가 부족한 실정이다.

Table 1. 바닥충격음의 현장측정 관련 측정방법 기준

구분	건교부 고시 제2006-435호	JIS A 1418-2	ISO 140-11	ISO 10140-3 (Draft)
충격원 위치	중앙점 포함 4개소이상	중앙점 포함 3~5개소	중앙점 포함 4개소이상	중앙점 포함 4개소이상
	벽면으로부터 0.75m 이격	벽면으로부터 0.5m 이상이격		
수음점 위치	4개소 이상	4개소 이상	4개소 이상	4개소 이상
	바닥면으로부터 1.2m	-	천장으로부터 1m이상	천장으로부터 1m이상
	벽면으로부터 0.75m 이격	벽면으로부터 0.5m 이상이격	벽면으로부터 0.7m 이상이격	벽면으로부터 0.7m 이상이격

본 연구에서는 중량충격음의 음장특성을 조사하기 위해 현재 바닥충격음 저감평가를 위해 활용되고 있는 바닥충격음 평가 시험동, 즉 제한된 경계조건(수음실 및 건축구조)을 가지는 측정환경에서의 바닥충격음장에 대해 현장측정과 시뮬레이션을 실시하였다.

2. 연구배경

2.1 바닥충격음 시험동

† 한양대학교 일반대학원 건축환경공학과 박사과정
E-mail: syrus81@gmail.com
Tel: (02) 2220-1795, Fax: (02) 2291-1793

* 한양대학교 일반대학원 건축환경공학과 석사과정

** 한양대학교 건축대학 부교수

중량충격음의 평가에 있어 잔향실험실에서의 측정방법은 무한관의 양단 자유 경계조건으로 실제 구조물에서의 경계조건이 현실적으로 구현되지 못하기 때문에 측정결과의 활용에 한계가 있다. 이에 따라 일본에서는 주택품질확보측진법에서 규정하고 있는 설계지침에 따라 실제 경계조건을 구현한 시험동을 건설하여 바닥구조를 평가하고 있으며 한국에서도 건설기술연구원의 시험동을 시작으로 많은 시험동이 건설되어 바닥충격음 평가가 이뤄지고 있다.⁽⁴⁾

최근 일본의 시험동에서는 바닥충격음 측정결과의 재현성(reproducibility)을 높이기 위하여 수음실의 음장을 분석하여 적절한 마이크로폰의 높이 및 위치선정, 확산음장 구현을 위한 확산체 설치 등의 방법을 취하고 있다.

본 실험에서 활용된 한양대학교 바닥충격음 시험동은 실제 주거환경의 일반적인 거실환경을 반영한 바닥면적(25m²)과 높이(2.65m)를 가지고 있고, 발코니와 같은 구조부재요소의 영향도 고려되었다. 또한 같은 층에 슬래브 두께가 같은 3개실을 연속 배치하여 중앙실과 외벽실(2개실)의 현장조건을 반영하였고, 슬래브 두께가 변화함에 따른 하부층 전달기여율 변화요인을 최소화하였다. 본 시험동의 개요는 다음과 같다.⁽⁵⁾

Table 2. 바닥충격음 시험동 개요

구분	내 용
슬래브 두께	150, 180, 210, 240 mm (각 3개실)
바닥면적	4.7m × 5.3m (25m ²) : 30평형대 거실면적
층 고	2.65m
콘크리트	압축강도 210kg/cm ² , 밀도 2300kg/m ³

2.2 뱅머신과 임팩트볼

현재 사용되고 있는 중량충격원의 경우, 저주파의 충격력 특성을 가지고 임펄스에 가까운 충격음을 발생한다. 표준중량충격원인 뱅머신과 임팩트볼은 125Hz 이하에서는 뱅머신의 충격력이, 125Hz 이상에서는 임팩트볼의 충격력이 각각 10dB정도 높은 특징을 가진다.⁽⁶⁾

중량충격음의 경우, 슬래브 단부에서의 임피던스 특성에 의한 충격력 전달에 의해 충격음레벨이 결정되어 중앙점에서 가진할 때 주변부 구속에 대한 영향을 최소화할 수 있게 된다. 본 연구에서는 구조체에 따른 변인을 최소화하기 위해 중앙점 가진시에 따른 가진 조건만을 고려하였다.⁽⁷⁾

2.3 실내모드에 의한 영향

시험동의 경우, 수음실의 용적이 60~70m³ 정도로 크지 않으며 수음실의 형태가 정방형에 가까운 닫힌 공간으로 이뤄져 있다. 또한 대개 흡음을 고려하지 않은 마감상태로 이뤄져 있다. 일반적으로 바닥과 천장면이 평행으로 이뤄져 있는 경우가 대부분이며 방과 같은 공간에서 측정할 경우에는 사면이 평행하게 배치되는 구조로 되어있기 때문에 음압레벨은 음향모드에

의한 영향을 받게 된다.

이때, 실내모드(room mode)는 다음과 같은 현상으로 표현된다. 3차원 공간에서의 고유주파수 및 음압진폭은 실 주변부의 벽이 모두 강체로 이뤄져 있는 경계조건에서는 벽의 수직방향에서의 입자속도가 0이 되므로 거리(l_x, l_y, l_z), 모드(i, j, k), 음속(c)으로 다음과 같은 식(1)과 (2)로 고유주파수(f_{ijk}) 및 진폭(Ψ_{ijk})을 계산할 수 있다.⁽⁸⁾

$$f_{ijk} = \sqrt{\left(\frac{c_i}{2l_x}\right)^2 + \left(\frac{c_j}{2l_y}\right)^2 + \left(\frac{c_k}{2l_z}\right)^2} \dots\dots\dots \text{식 (1)}$$

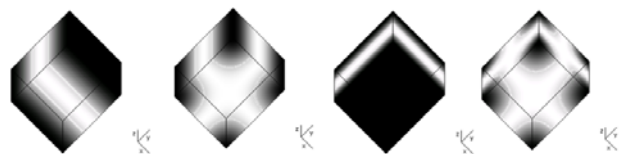
$$\psi_{ijk} = \cos\left(\frac{i\pi x}{l_x}\right)\cos\left(\frac{j\pi y}{l_y}\right)\cos\left(\frac{k\pi z}{l_z}\right) \dots\dots\dots \text{식 (2)}$$

본 연구에서 활용된 바닥충격음 실험동을 대상으로 각 6면의 벽체가 강체로 이뤄져 있고 음의 속도를 340m/s로 가정할 때의 실 고유주파수에 따른 레벨분포는 다음과 같이 계산된다.

Table 3. 바닥충격음 실험실의 고유주파수

Mode	0,1,0	1,0,0	1,1,0	0,0,1	0,2,0	0,1,1	1,0,1	2,0,0	1,2,0	1,1,1
Frequency	33.6	38.1	50.8	66	67.3	74	76.2	76.2	77.3	83.3
Mode	2,1,0	0,2,1	2,0,1	0,3,0	1,2,1	2,2,0	2,1,1	1,3,0	3,0,0	3,1,0
Frequency	83.3	94.2	100.8	100.9	101.6	101.7	106.3	107.8	114.3	119.2

Table 3과 같이 100Hz 이하의 대역에서는 모드중첩에 의해 확산음장이 형성되지 못하고 있음을 확인할 수 있다. 일반적으로 확산음장의 여부는 슈뢰더 주파수(Schroeder frequency)로 평가할 수 있는데 이는 인접한 공진모드들이 다수 겹치게 되는 주파수로 이 주파수 이상의 대역에서는 실내 공진피크에 의한 영향을 받지 않게 된다.⁽⁹⁾ 본 실험동의 경우, 옥타브 밴드 주파수로 500Hz이상에서 확산 음장을 형성하고 있다. Fig 1은 각 고유주파수에서의 실내 음압레벨 분포양상을 보여주고 있는데 각 고유주파수에 따라 검은 색으로 표시되고 있는 부분이 높은 음압레벨을 형성하고 있는 부위이며 흰색으로 표시되는 부분이 상대적으로 낮은 음압레벨을 형성하고 있는 위치를 표시하고 있다. 중량충격음에 있어 고려되는 측정주파수 대역인 63Hz의 경우, f(0,0,1)이 되는 66Hz에서 실 높이의 중간이 되는 부분(1.3m 높이)에서 가장 낮은 레벨을 형성하고 있음을 확인할 수 있다.



(a) f(0,1,0) 33.8 Hz (b) f(1,1,0) 50.8 Hz (c) f(0,0,1) 66.0 Hz (d) f(1,1,1) 83.3 Hz

Fig 1. 각 고유주파수에서의 실내음압레벨 분포

Fig 2.는 시험동 측정결과로 126cm 높이의 수음실 중앙에서 뱀머신에 의한 충격을 주파수 분석결과이다. Fig 2.에서와 같이 실내모드 계산결과와 유사한 부분 공진피크들이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 실내모드의 영향을 최소화한 측정결과를 도출하기 위해서는 이에 대한 음장개선 또는 이를 보정한 측정방법이 요구된다.

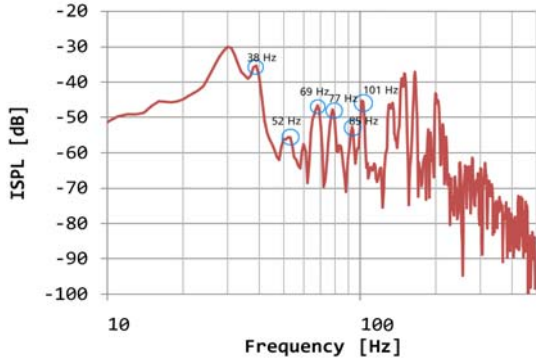


Fig 2. 100 Hz이하에서 실내모드에 의한 공진피크

3. 측정결과 및 분석

3.1 현장측정 방법 및 분석

본 연구에서는 현재 표준바다구조에서 제안하고 있는 슬래브의 두께인 210mm 철근콘크리트 슬래브 구조를 대상으로 측정하였다. 비확산음장을 이루고 있는 한계주파수 대역인 250Hz에 대해 $1/4$ 에 해당하는 38cm 간격으로 측정하였다. 38cm 간격으로 X축으로는 11지점 측정하였으며 Y축으로는 12지점, Z축으로는 50cm부터 240cm까지 6지점을 측정하여 총 792 지점에 대해 측정을 실시하였다. 중량충격 원인 임팩트 볼을 사용하여 슬래브 중앙점을 가진하였을 경우의 음압레벨을 측정하였다.

측정 및 평가방법은 뱀머신과 임팩트볼을 이용한 주파수별 최대음압레벨 산출방법과 단일수치평가값 $L_{i,Fmax,AW}$ 으로 평가하였다. 본 연구에서는 XY평면(수평분포) 및 YZ평면(수직분포)에 대한 바닥충격음 레벨분포에 대해 조사하였다.

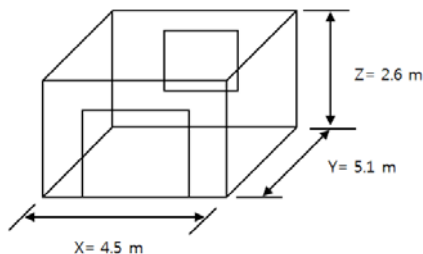


Fig 3. 측정 대상실의 치수 및 개구부 위치

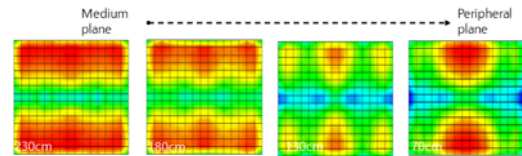
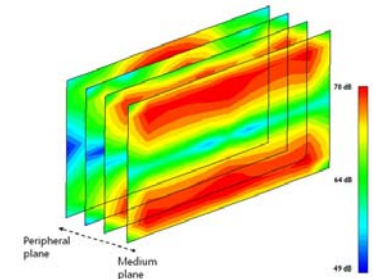
또한 전산해석을 통해 예측된 음장분포와 해석된 결과를 비교하여 실의 음장분포를 조사하였다. 우선 시험동에서의 슬래브 경계조건을 만족하는 FEM 모델의 진동해석결과를

음향진동 상용해석프로그램인 SYSNOISE에 적용하여 경계요소해석(BEM)을 통해 수음실에서의 음압레벨 분포를 분석하였다.⁽¹⁰⁾ 향후 현장측정결과와의 레벨 및 음압분포를 통해 해석모델을 검증하여 다양한 수음실 조건과 가진점에 대한 연구를 진행하고자 한다.

3.2 뱀머신 측정결과

ANSYS에서 중앙점 가진에 따른 바닥슬래브의 진동해석결과를 SYSNOISE에서 수음실을 모델링하고 경계조건을 지정한 뒤, 1~250Hz까지의 수음면에 대해 해석하였다. 뱀머신으로 가진했을 때의 실내음장을 예측하기 위하여 수행한 예측시뮬레이션의 결과는 Fig 4.와 같다. 63Hz의 경우, 실의 중앙면에서 가장 낮은 음압레벨을 보이는 분포를 가졌다. 125Hz 대역에서 또한 실 높이의 중앙부위에서 낮은 레벨분포를 가지고 있다.

(a) 63Hz



(b) 125Hz

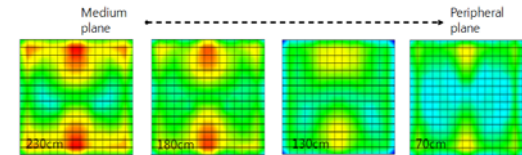
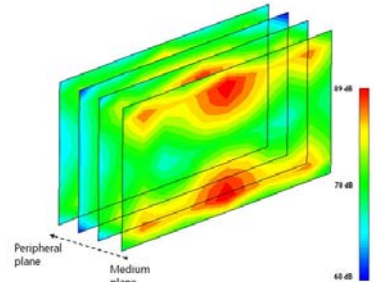


Fig 4. 전산해석을 통한 수음실의 음압레벨분포

측정 높이별 수평면 음압레벨분포는 Fig 5.와 같다. 각 등고선은 1dB의 간격을 나타낸다. 63Hz, 125Hz의 옥타브 밴드에서의 음압레벨분포를 살펴볼 때, 해석에서 나타났던 음압레벨 분포와 일치하는 경향을 확인할 수 있다. 특히, 역

A 곡선에서 단일수치값의 음압레벨분포가 단일값을 결정짓는 125Hz에서의 음압레벨과 유사한 분포를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 125Hz에서의 레벨분포에서는 양 끝단으로부터 1m씩 이격된 거리에서 가장 낮은 음압레벨분포를 보이고 있으며 단일수치값에서 보여주는 평균레벨분포를 볼 때, 현재측정방법에 따른 120cm에서의 측정점에서 다소 낮은 레벨로 측정될 수 있음을 확인할 수 있었다.

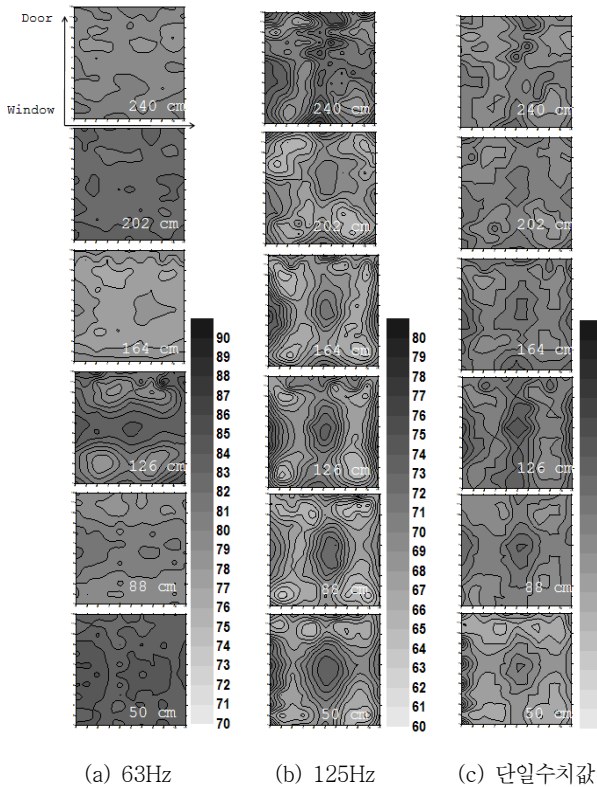


Fig 5. 높이별 수평면의 음압레벨분포

Fig 6.는 수음실에서 X축 중앙에서 높이에 따른 수직면 음압레벨분포를 나타낸다. 32Hz와 같은 저주파의 경우, 가진되는 천장면에서보다 하부에서의 음압레벨이 더 높은 것을 확인할 수 있으며, 63Hz에서는 수직면상의 수음점 전체에서 15dB이상의 레벨차이를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

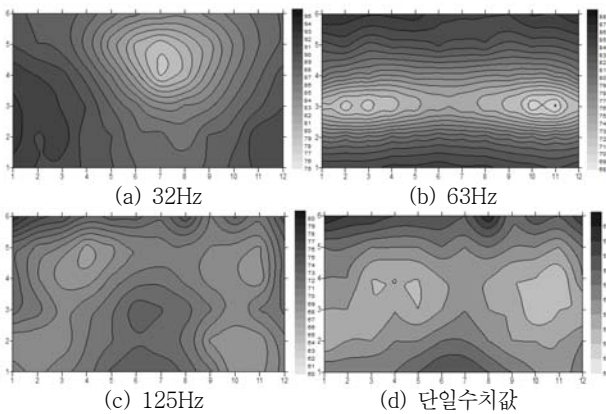


Fig 6. 중앙점에서 실높이에 따른 수직면의 음압레벨분포

3.3 임팩트볼 측정결과

임팩트볼의 경우, 수평면에서의 음압레벨분포는 Fig 7.과 같다. 뱅머신의 측정결과와 유사한 음압레벨분포를 보인다. 그러나 충격력 특성에 따라 125Hz에서 다소 높은 음압레벨을 형성하고 있다. 그리고 120cm 높이의 현재 측정방법에 따르면 단일수치평가값 산출시 다소 낮은 레벨이 측정될 수 있음을 알 수 있다. 뱅머신에서의 측정결과와 마찬가지로 126cm의 높이에서 측정할 때, 63Hz에서 전체 평균레벨에 비해 평균 8dB 낮은 레벨이 측정되는 경향을 나타낸다.

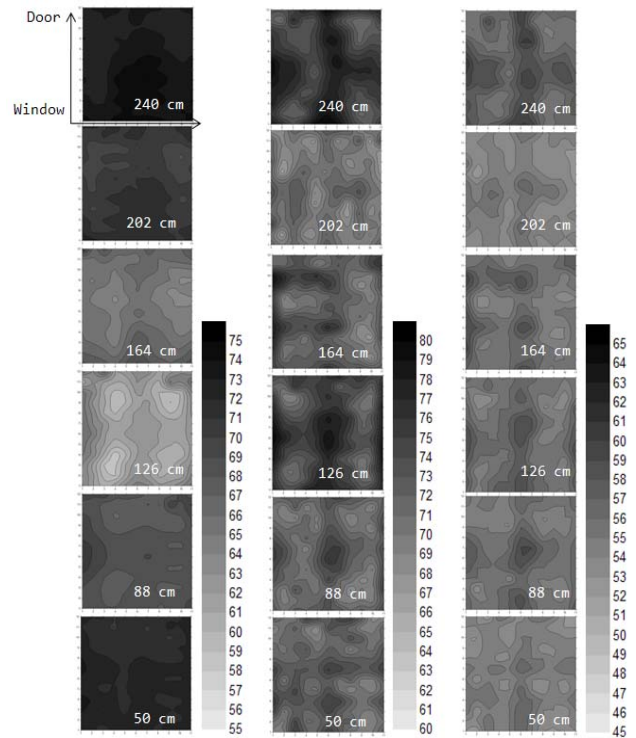


Fig 7. 높이별 수평면의 음압레벨분포

4. 결과 및 토의

실험결과를 통해 수음실의 저주파 음압레벨분포는 바닥판의 고유진동수 뿐 만 아니라 실내모드에 의해 큰 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 특히 시험동과 같은 측정조건에서는 공간에 따른 음압레벨의 편차가 크며 주파수대역에 따라서도 그 차이가 다르게 나타남을 확인할 수 있었다.

Table 4.는 792개 지점에서 측정한 전체 측정점에 대한 결과이다. 63Hz에서 뱅머신과 임팩트볼 모두 4.0dB 이상의 표준편차를 보여 공간내에서의 편차가 가장 큰 주파수대역을 확인할 수 있다. 한편, 공간내에서 단일수치값의 최대최소차 및 표준편차는 임팩트볼이 다소 낮은 경향을 보이고 있다.

Table 4. 792개 측정점에 대한 음압레벨분포
(BM:뱅머신, IB:임팩트볼, 단위: dB)

		32Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	단일값
최대	BM	93.8	86.6	77.8	67.8	64.1	61
	IB	85.5	75.1	80.3	69.6	60.2	61
최소	BM	78.3	68.0	63.0	55.4	45.1	49
	IB	69.9	58.3	66.2	58.0	52.1	52
최대-최소	BM	15.2	18.6	14.8	12.4	19.0	12
	IB	15.6	16.8	14.1	11.6	8.1	9
평균	BM	88.3	80.2	69.2	60.1	50.1	54
	IB	81.3	70.2	73.8	64.0	55.7	56
표준편차	BM	3.1	4.4	2.5	1.9	2.7	2.2
	IB	3.1	4.0	2.7	2.2	1.2	1.6

본 실험을 통해서 현재 고시에서 제안되고 있는 측정높이 120cm에서의 결과가 룸모드의 영향으로 실내에서의 대표값으로 활용됨에 있어 문제가 될 수 있음을 확인할 수 있었다. 일반적으로 120cm의 높이는 사람이 의자에 앉았을 때의 귀 높이로서 가정하여 건축환경 소음 및 음향에서 많이 사용되고 있다. 그러나 현재의 바닥충격음 시험동의 수음실과 같은 음장조건에서는 실을 대표하는 측정점으로 한계가 있다. 특히 높이 126cm에서는 63과 125Hz대역에서의 뱅머신과 임팩트볼 각각 1.7, 2.4와 1.8, 2.4의 표준편차를 가져 다른 주파수대역에서 보다 가장 큰 편차를 가짐을 확인할 수 있었다. 따라서 현재와 같은 고정식 마이크로폰을 사용하였을 경우, 음장에 따라 실을 대표할 수 있는 수음점 높이를 설정하는 측정방법이 제안되어야 한다.

한편, 단일수치평가값의 레벨분포가 현실적으로 측정점을 설정하는데 있어 가장 중요한 요인으로 작용하게 되는데, 임팩트볼의 경우, 뱅머신보다 125, 250Hz에서의 음압이 다소 높음에 따라 결과적으로 단일 수치평가량($L_{i,Fmax,AW}$)이 2dB 높게 나타나고 있다. 본 측정결과, 역 A 곡선에서 최종적인 단일 수치평가값을 결정하는 주파수대역에서의 음압레벨분포와 단일수치값은 2가지 중량충격원 모두 공간분포가 유사한 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구를 통해서 바닥충격음 저감구조의 평가를 위해 많이 사용되고 있는 바닥충격음 수음실의 음장을 검토하였으며, 이를 통해 현재 고시된 측정법이 가지고 있는 측정점에 대한 문제를 확인할 수 있었다.

새로운 표준 중량충격원으로서 임팩트볼의 도입이 새로 개정될 ISO를 시작으로 본격적으로 제안되고 있다. 그러나, 경량충격원과 달리 중량충격음의 경우, 실내모드의 영향이 크기 때문에 이로 인한 영향을 최소화하기 위한 측정방법에

대한 요구가 필수적이다. 따라서 새로운 충격원에 따른 중량충격음의 측정방법에 대해 구체화될 필요가 있다. 본 연구에서는 현재 건설교통부 고시에서 제안하고 있는 120cm의 수음높이와 벽면 이격거리 75cm에 대한 조건이 실제 실내평균 음압레벨을 대표하지 못하는 사실을 확인하였다. 향후 이러한 문제점을 해결하기 위하여 실 공간의 기하학적인 정보에 의해 측정점을 선택하는 것과 실내모드에 따른 공진 주파수에 대한 보상방법, 그리고 구조체의 경계조건에 의해 충격에너지 전달에 영향을 미치게 되는 가진점에 대한 총체적인 연구가 진행되어야 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 “표준화 기술개발사업” (과제번호 : 10023489)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) 건설교통부고시 제2006-435호, 2006, “공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준”.
- (2) 정진연 등, 2005, “바닥충격음 측정 시 수음점 위치의 영향에 관한 연구”, 춘계학술발표대회논문집, 한국소음진동공학회, pp.283~286.
- (3) 오양기 등, 2006, “마이크로폰 위치에 따른 중량 바닥충격음레벨의 편차”, 한국음향학회지, 25권 5호, pp. 49~55.
- (4) 김경우 등, 2004, “바닥충격음 실험동 개요 및 성능평가”, 대한건축학회 춘계학술대회 논문집, 제24권 제1호, pp.629~632.
- (5) 유승엽 등, 2005, “표준 실험동에서 바닥충격음의 전파”, 추계학술발표대회논문집, 한국소음진동공학회, CD-Rom
- (6) J. Y. Jeon, J. K. Ryu, J. H. Jeong and H. Tachibana, 2006, "Reviews of the impact ball in evaluating floor impact sound", Acta Acustica 92(5), pp. 777~786.
- (7) K. Inoue, 2000, "Amendment of measurement of floor impact sound insulation performance and proposal of new heavy impact source", The Journal of the Acoustical Society of Japan 56(4), pp. 279~285.
- (8) 김양한, 2005, 음향학 강의, 청문각.
- (9) C. Hopkins and P. Tuner, 2005, "Field measurement of airborne sound insulation between rooms with non-diffuse sound field at low frequencies", applied acoustics, pp. 1339-1382.
- (10) LMS International N.V., 2003, SYSNOISE Revision 5.6 User's Manual, Leuven.