

## 수음실 내 구조체의 진동량 계측을 통한 바닥충격음레벨 예측

### Prediction of Floor Impact Sound by Measuring the Vibration Acceleration Level on the Interior Structures of Receiving Room in Apartment Buildings

김 명 준<sup>†</sup> · 김 흥 식\* · 김 하 근\*\*

Myung-Jun Kim, Heung-Sik Kim and Ha-Geun Kim

(2002년 5월 1일 접수 : 2003년 1월 7일 심사완료)

**Key Words** : Floor Impact Sound(바닥충격음), Standard Impact Source(표준충격원), Radiation Efficient(음향방사율), Vibration Acceleration Level(진동가속도레벨)

#### ABSTRACT

In an apartment building, the impact sound from upstairs has been regarded as a main source of noise causing discontentment among occupants. To set the optimum design for sound insulation, it is necessary to suggest the useful tools or technique that predict the floor impact sound. The purpose of this study is to investigate the applicability of the theory of sound radiation. We measured the vibration acceleration levels on the interior structures and predicted the sound pressure level of the room by using them. The result show that the predicted value, in general, were in good agreement with the measured values within 5~10 % in error rate.

#### 1. 서 론

바닥충격음은 상부층 바닥에 가하여진 충격진동이 직하실로 전달·방사되는 고체음으로, 바닥 하나를 사이에 두고 이웃과 생활해야 하는 공동주택 거주자로부터 매우 커다란 불만사항으로 지적되어왔다. 그러나 설계단계에서 효율적인 저감공법 및 저감재료를 선정하고 또한 최근 검토 중에 있는 충격음 차단성능에 대한 제도적 기준의 원활한 시행을 위해서는 무엇보다 바닥충격음 예측기법의 정립이 요구되고 있는 실정이다.

그동안 바닥충격음 예측에 적용하기 위해 검토되어진 대표적인 해석방법으로는 모드해석법,<sup>(1)</sup> 임피던스법,<sup>(2)</sup> 통계적에너지해석법<sup>(3)</sup> 등이 있다. 그러나 우

리나라는 온돌이라는 독특한 바닥난방방식을 사용하고 있어 단면적으로 바닥구조는 통상 4~7개의 서로 다른 이질층으로 구성되어 있으며, 충격원의 특성 등에 따라 매우 다양한 영향요인을 가지고 있어 이들 해석기법들은 각기 적용에 많은 어려움을 가지고 있다. 또한 현행 바닥충격음 측정방법은 현장에서의 측정을 원칙으로 하고 있기 때문에, 최종 설계안의 평가를 위해서는 실제 현장에서 시험시공을 통하여 평가하는 경우가 대부분이다. 이 경우 창호설치 등 정상적인 시공공정을 앞당겨야 하기 때문에 많은 경비와 시간과 노력이 요구되어지는 등 측정·평가상 많은 어려움을 가지고 있다.

이에 본 연구에서는 한국산업규격(KS F 2810, 1996)에서 규정하고 있는 표준충격원에 의한 가진시 수음실 각 부위(천장면, 벽면, 바닥면)로 전달된 진동량을 측정·제시하고, 이를 토대로 음향방사이론에 의한 충격음레벨 산정결과를 실측결과와 비교함으로써, 간이적인 예측기법으로서의 적용성에 대해 고찰하였다.

<sup>†</sup> 책임저자, 정회원, 서울시립대학교 건축도시조경학부

E-mail : mjunkim@uos.ac.kr

Tel : (02) 2210-5639, Fax : (02) 2248-0382

\* 정회원, 호남대학교 건축토목공학부

\*\* 정회원, 대한주택공사 주택도시연구원

## 2. 표준충격원에 의한 실내 부위별 진동량

### 2.1 진동 측정개요

#### (1) 측정대상실

표준충격원 가진에 의해 수음실 각 부위로 전달된 진동량을 파악하기 위하여 현장, 실험주택 등 벽식구조 형식으로 이루어진 총 8개실을 대상으로 하여 실험을 실시하였다. 이중 구조 A~구조 D의 4개 구조는 수음실 전 부위(천장면, 4개 벽면, 바닥면)를 대상으로 측정하였으며, 구조 E~구조 H의 나머지 4개 구조는 바닥충격음의 주요 전달경로일 것으로 분석되는 수음실 천장면에 대해서만 측정하였다.

Table 1은 측정대상실 및 부위별 구조의 개요를 나타낸 것이다. 구조 A는 건물 내 대형공간에 축조한 모델실로서 수음실을 구성하고 있는 모든 부위가 철근콘크리트구조로 이루어져 있다. 구조 B~구조 H는 각종 바닥구조 성능실험을 위해 현장조건과 같이 만든 2층 규모의 철근콘크리트조의 실험주택으로서 바닥슬래브는 모두 두께 135 mm로 이루어져 있다. 대상건물의 각 측정부위는 기본 구조체 이외 별도의 내장재 설치하는 가능한 피하였는데, 이는 내장재를 설치할 경우 내장재의 종류, 부착방법 등에 따라 공진현상 등

으로 기본적인 진동전달양상을 파악하는데 어려움이 있기 때문이다.

#### (2) 측정내용 및 방법

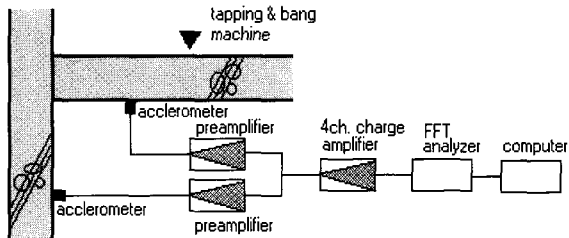
측정은 한국산업규격(KS F 2810)에 의거 표준경량충격원 및 표준중량충격원으로 가진하였다. 이 때 가진점의 위치는 각 측정실 모두 실의 중앙부를 기본으로 하였다. 진동량은 진동가속도계를 이용하여 진동가속도레벨(수직성분)을 측정하였다. 진동가속도레벨의 측정주파수범위는 충격원의 주파수특성을 고려하여 경량충격원은 63 Hz에서부터 최고 8,000 Hz를, 중량충격원은 최저 20 Hz에서 최고 1,600 Hz로 설정하였으나 측정과정에서 주파수 설정조건의 한계로 대상구조에 따라 다소 차이가 있다. 측정점은 천장면의 경우 최소 9개 지점에서 최대 33개 지점까지 면적을 등분할 하여 측정한 후 평균치를 구하였으며, 나머지 벽면이나 바닥면은 최소 3개 지점에서 최대 25개 지점에 대해 측정하였다.

Fig. 1은 측정기기의 구성도를 나타낸 것이다. 표준충격원으로 상부층에서 바닥을 가진함에 따라 발생·전달된 충격진동을 수음실 각 부위에 설치한 진동가속도계를 이용하여 측정 하였다. 5개의 철재해머가 일정하게 초당 10회 타격하게 되는 경량충격원의 경우에는 15초 동안의 평균치(linear average)로 각 측

Table 1 The outlines of building structures [unit : mm]

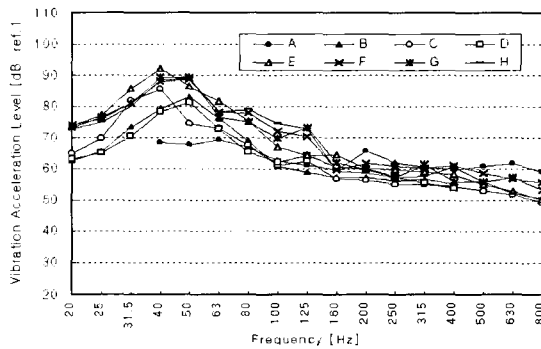
Item	Floor A	Floor B	Floor C	Floor D
Section of impacted floor	-Concrete slab 150	-Concrete slab 135	-Cement mortar 30 -F/A concrete 65 -P.E. Film -Mineral wool 25 -Concrete slab 135	-Cement mortar 30 -F/A concrete 70 -P.E. Film -Polystyrene foam 20 -Concrete slab 135
Structures of walls of receiving room	East W.	Concrete 200	Concrete 150	
	West W.	Concrete 200	Concrete 150	
	South W.	Concrete 200 Door(900 × 2,000)	ALC Brick 200+painting Door (1,100 × 2,000)	
	North W.	Concrete 200	ALC Brick 200+painting Window (600 × 450)	
Section of receiving room's floor	Concrete slab 300	Cement mortar 30 F/A concrete 90 Concrete slab 300		
Floor size	3,900 × 3,000	3,600 × 3,300		
Item	Floor E	Floor F	Floor G	Floor H
Section of impacted floor	-Cement mortar 35 -F/A concrete 60 -P.E. Film -Glass wool(80k) 25 -Concrete slab 135	-Cement mortar 35 -F/A concrete 45 -P.E. film -Polystyrene foam 40 -Concrete slab 135	-Cement mortar 35 -F/A concrete 65 -Polyethylene foam 20 -Concrete slab 135	-Cement mortar 35 -F/A concrete 55 -Polyethylene foam 10 -Polystyrene foam 20 -Concrete slab 135
Floor size	3,600 × 3,300			

정점에서의 진동가속도레벨을 산출하였으며, 약 3,800 ~ 4,000 N의 간헐적인 충격력으로 가진되는 중량충격원의 경우 3회 이상 측정된 피크치의 평균값으로 산정하였다.

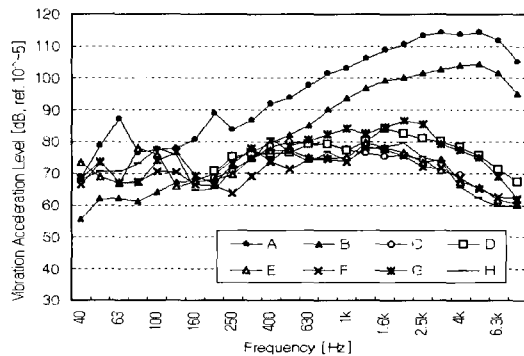


- Bang machine (RION, FI-02)
- Tapping machine (RION, FI-01)
- Accelerometer (RION, PV-94)
- 2ch sound & vibration signal analyzer (RION, SA-74)
- Preamplifier (RION, VP-26A)
- 4ch. charge amplifier (RION, VM-27)
- Calibration exciter (RION, VE-10)

Fig. 1 Measurement system arrangement



(a) Heavy-weight impact source



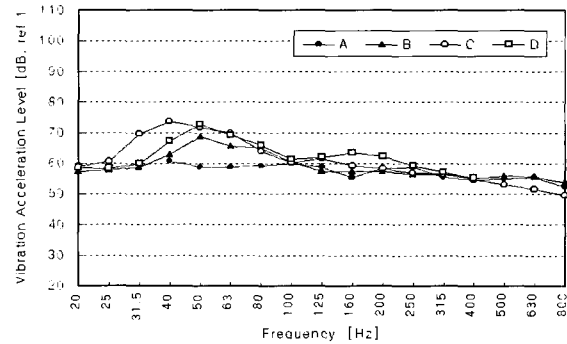
(b) Light-weight impact source

Fig. 2 Measured acceleration level on the ceiling

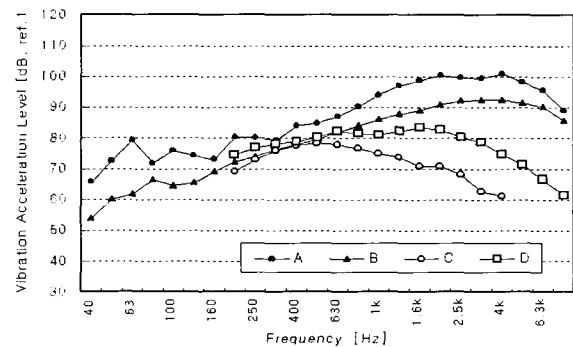
## 2.2 진동량 측정결과

구조별로 수음실 천장면에서 측정된 진동가속도레벨을 나타내면 Fig. 2와 같다. 중량충격원 가진의 경우 대부분의 구조가 40 Hz 및 50 Hz의 주파수대역에서 진동가속도레벨이 80~90 dB 정도로 가장 높게 나타났으며, 이를 정점으로 산형분포의 주파수특성을 보이는 것으로 분석되었다. 경량충격원 가진시에는 대체로 1~5 kHz의 중고주파수대역에서 진동가속도레벨이 피크치를 보이는 것으로 나타났으며, 특히 나슬래브 구조체(구조 A, 구조 B)의 경우 3.15~5 Hz의 고주파수대역에서 진동가속도레벨이 104~115 dB 정도로 가장 높게 나타났다. 수음실 천장면은 충격진동이 가해지는 상부층 바닥의 직하면(直下面)이기 때문에 다른 구조체보다 진동가속도레벨이 가장 높아 수음실 바닥충격음에 가장 지배적인 영향을 미치는 부위인 것으로 판단된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 각각 수음실 벽면과 바닥면에서 측정된 진동가속도레벨의 평균치를 나타낸 것이다.



(a) Heavy-weight impact source



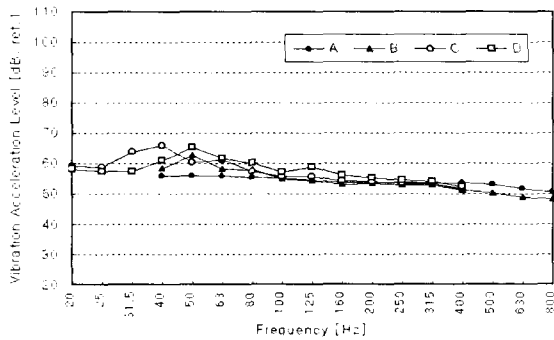
(b) Light-weight impact source

Fig. 3 Measured acceleration level on the walls

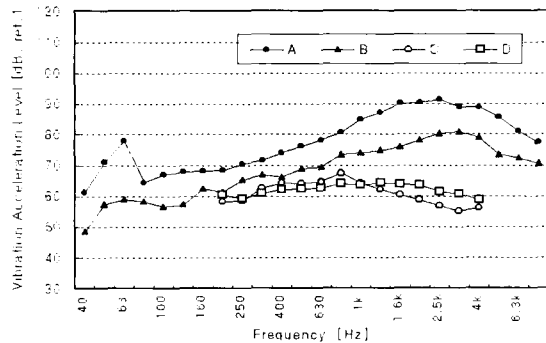
전달경로상 가진슬래브로부터 멀어질수록 진동에너지가 감소되고 있으며, 양층격원 모두 천장면에서의 진동가속도레벨 측정결과와 대체로 유사한 주파수특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

Table 2는 측정 전 주파수영역에 대한 진동가속도 총합레벨(overall)을 부위별로 정리하여 나타낸 것이다. 천장면에서의 진동가속도 총합레벨은 중량 및 경량층격원의 경우 각각 76.9~93.0 dB, 86.0~122.5 dB

로 측정되었다. 또한 구조 A~구조 D를 대상으로 천장면과 벽면 9~33개 지점에서 측정된 진동가속도레벨 분포를 검토한 결과, 측정점별 진동가속도 총합레벨의 최고치와 최저치의 차는 천장면의 경우 중량 및 경량층격원 각각 평균 14.9 dB(표준편차 4.4 dB), 7.5 dB(표준편차 2.0 dB)로 분석되었으며, 벽면의 경우는 중량 및 경량층격원 각각 16.6 dB(표준편차 5.6 dB), 11.4 dB(표준편차 3.5 dB)로 나타났다.



(a) Heavy-weight impact source



(b) Light-weight impact source

Fig. 4 Measured acceleration level on the floor

Table 2 Overall acceleration level [unit: dB, ref.1E-5]

Floors	Heavy-weight source			Light-weight source		
	Ceiling	Walls	Floor	Ceiling	Walls	Floor
Floor A	76.9	69.9	66.0	122.5	109.8	98.6
Floor B	85.7	73.7	67.4	111.2	101.3	87.5
Floor C	87.7	78.7	71.0	87.9	86.1	73.8
Floor D	83.9	77.0	70.6	91.1	92.2	73.8
Floor E	84.4	-	-	88.2	-	-
Floor F	92.9	-	-	86.0	-	-
Floor G	93.0	-	-	93.6	-	-
Floor H	92.8	-	-	88.7	-	-

### 3. 확산진동 음향방사에 의한 충격음레벨 산정

#### 3.1 음향방사율과 실내음압

진동으로부터 고체음의 일종인 바닥충격음을 산정하기 위해서는 먼저 수음실 각 부위별 진동량을 파악하고 최종적으로 음향방사특성을 검토하여야 한다. 음향방사특성을 결정하는 음향방사율( $\sigma$ , radiation efficient)은 일반적으로 시간 및 공간 평균한 진동 실효치로부터 산정이 가능한 확산진동에 의한 음향방사율을 적용하고 있으며, Maidanik,<sup>(1)</sup> Beranek,<sup>(5)</sup> Cremer,<sup>(6)</sup> 安岡<sup>(7)</sup> 등 여러 연구자들의 제안식이 있다.

일반적으로 진동하는 구조체로부터의 음향과위( $W$ )는 구조체에서의 진동속도와 음향방사율에 따라서 식 (1)과 같은 관계가 성립한다.

$$W = \sigma \rho c \langle v^2 \rangle S \quad (1)$$

여기서,  $\langle v^2 \rangle$ 은 구조체의 시간공간 2승 진동속도 평균치(실효치의 2승),  $S$ 는 진동하는 구조체의 면적을 나타낸다.

식 (1)을 대수척도로 나타내면 식 (2)와 같다. 식 (2)는 일반적으로 고체음에 의한 실내음압레벨 산정식으로 이용되고 있으며, 본 연구에서는 이를 이용하여 수음실의 바닥충격음레벨을 계산하였다.

$$SPL = VAL + 10 \log \sigma + 10 \log (S/A) - 20 \log f_m + 36 \quad (2)$$

여기서,  $SPL$ 은 실내평균음압레벨(dB),  $VAL$ 은 구조체의 진동가속도레벨(dB, ref.  $1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ),  $A$ 는 실내 총흡음력( $\text{m}^2$ ),  $f_m$ 은 중심주파수(Hz)이다.

식 (2)에 의해 실내음압레벨 산정시 실내 총흡음력( $A$ )은 국제표준화기구(ISO 140-VII)에서 제안하고

있는 기준흡음률  $10 \text{ m}^2$ 을 적용하였다. 또한 음향방사율은 Fig. 5와 같이 安岡이 제안한 바닥판 등의 음향방사율 모델을 적용하였다. 安岡의 모델은 실제 실내에서의 음향방사율로서 벽에 의한 측면구속이나 실 전체 공간으로서의 구속을 고려한 것이다. 이때 코인

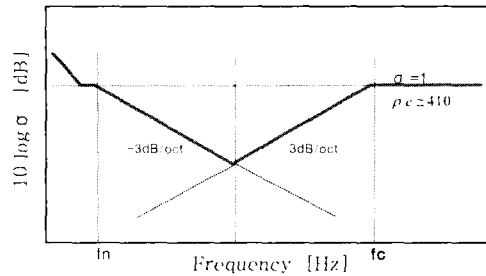


Fig. 5 Radiation efficient model of structures<sup>(17)</sup>

시턴스주파수 ( $f_c$ )는 콘크리트와 ALC블럭의 종파속도를 각각 3,400 m/s, 1,700 m/s로 설정하여 계산하였다.<sup>(8)</sup>

**3.2 바닥충격음레벨 계산치와 실측치의 비교**  
음향방사이론에 의한 바닥충격음레벨의 산정은 Table 1에서와 같이, 바닥충격음의 주요 전달경로일 것으로 예상되는 천장면의 진동만을 고려한 경우(총 8개 구조)와 수음실 전 부위의 진동량을 모두 고려한 경우(총 4개 구조)로 구분하여 계산한 후, 각각의 경우에 대한 계산치를 실제 실측치와 비교하였다.

(1) 천장면 진동량만을 고려한 경우

Fig. 6과 7은 각각 중량충격원과 경량충격원으로 가진하였을 때 수음실 천장면 각 지점에서 측정된 평

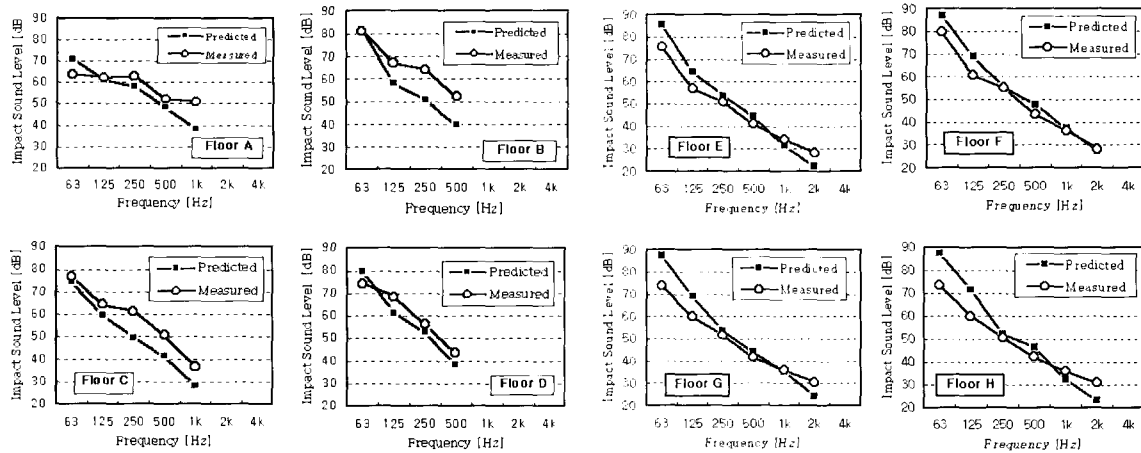


Fig. 6 Predicted and measured sound level by considering acceleration on the ceiling only (heavy-weight impact source)

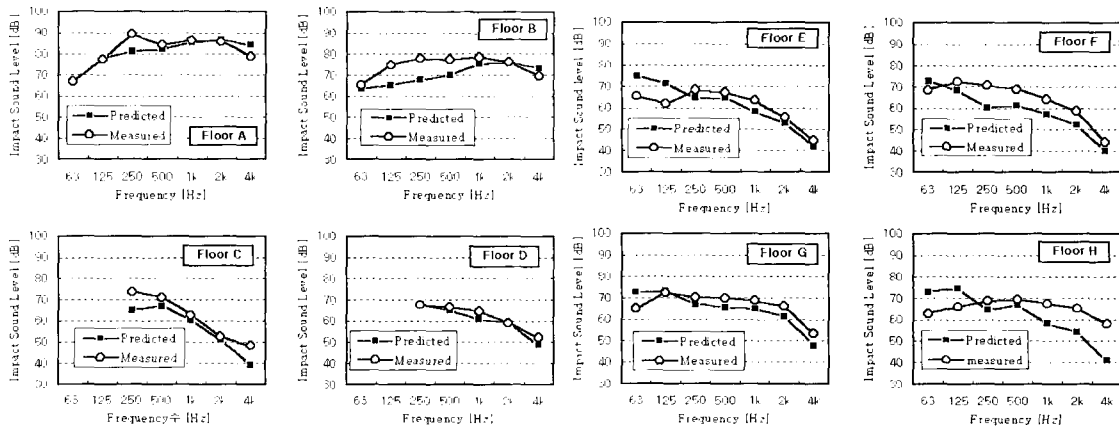


Fig. 7 Predicted and measured sound level by considering acceleration on the ceiling only (light-weight impact source)

균 진동가속도레벨을 토대로 식 (2)에 의해 충격음레벨을 계산한 결과(predicted)와 한국산업규격(KS F 2810, 1996)에 의거하여 측정된 바닥충격음레벨 실측치(measured)를 비교하여 나타낸 것이다. 바닥충격음레벨 계산치는 주파수에 따라서 실측치와 다소 차이가 있는 경우가 있으나, 전반적인 주파수특성은 유사함을 알 수 있다.

중량충격원(Fig. 6)의 경우에는 총 8개 구조를 통틀어 주파수별 실측치와 계산치의 편차는 최소 0.1 dB에서 최대 15.0 dB이며, 평균편차( $n=48$ )는 6.3 dB인 것으로 분석되었다. 또한 경량충격원(Fig. 7)의 경우에는 바닥충격음레벨의 주파수별 실측치와 계산치의 편차는 0.0 dB~17.0 dB이었으며 평균편차( $n=51$ )는 5.1 dB로 분석되었다.

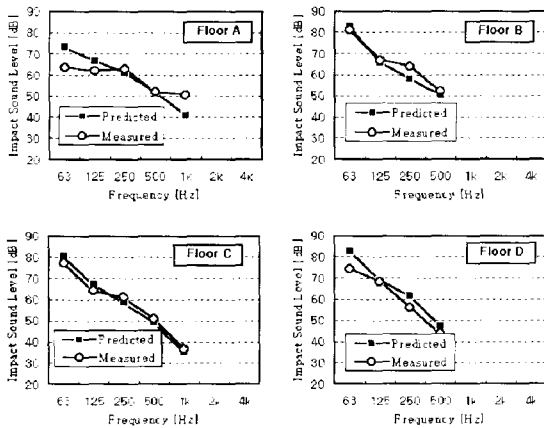


Fig. 8 Predicted and measured sound level by considering acceleration on the all structures(heavy-weight impact source)

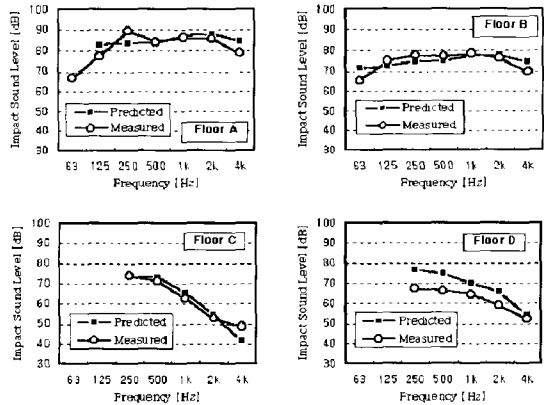


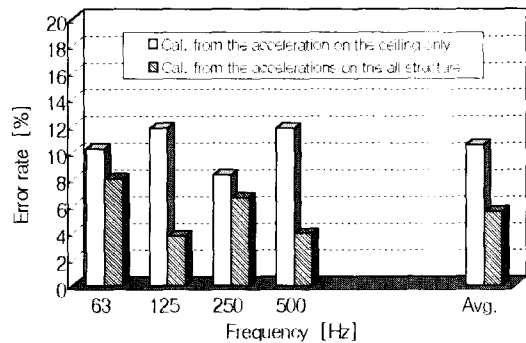
Fig. 9 Predicted and measured sound level by considering acceleration on the all structures(light-weight impact source)

(2) 실내 전 부위 진동량을 모두 고려한 경우

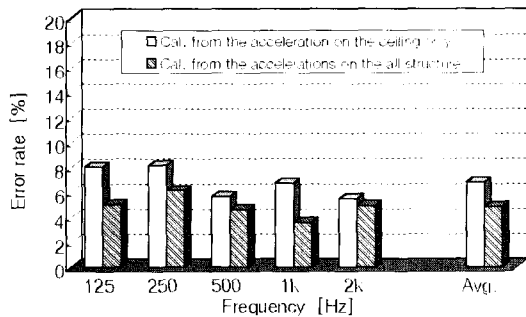
Fig. 8과 Fig. 9는 각각 중량충격원과 경량충격원으로 가진하였을 때 수음실 전 부위(천장면, 4개 벽면, 바닥면)에서 측정된 평균 진동가속도레벨을 토대로 식 (2)에 의해 충격음레벨을 계산결과를 바닥충격음레벨 실측결과와 비교하여 나타낸 것이다.

총 4개 구조에 대한 주파수별 실측치와 계산치의 평균편차는 중량충격원의 경우는 3.7 dB(0.1 dB~9.8 dB,  $n=18$ )이었으며, 경량충격원의 경우는 3.8 dB(0.3 dB~9.3 dB,  $n=23$ )인 것으로 평가되었다. 따라서 천장면만의 진동량을 토대로 평가한 결과에 비해 실측치와 계산치의 평균편차가 중량충격원과 경량충격원에 대해 각각 2.6 dB, 1.3 dB 줄어드는 것으로 분석되었다.

수음실 천장면 진동만을 고려하여 산정한 충격음레벨 계산치와 전 부위의 진동을 모두 고려한 계산치를 토대로 실측치와의 오차율(error rate)을 검토한 결과는 Fig. 10과 같다. 오차율은 식 (3)과 같이 실측치에 대한 계산치의 편차의 비를 백분율로 산정한 것이다.



(a) Heavy-weight impact source



(b) Light-weight impact source

Fig. 10 Error rate between predicted and measured impact sound level

$$\text{오차율} = \frac{|\text{실측치} - \text{계산치}|}{\text{실측치}} \times 100 [\%] \quad (3)$$

중량충격원의 경우 천장면의 진동으로부터 산정한 바닥충격음레벨 계산치는 4개 옥타브밴드 주파수대역(63 Hz~500 Hz)에 대해 실측치와 8.3~11.8%(평균 10.5%)의 오차율을 보이고 있으나, 전 부위 진동으로부터 산출할 경우는 오차율이 3.7~8.0%(평균 5.6%)로 나타나 평균 오차율이 약 5% 정도 줄어드는 것으로 평가되었다. 마찬가지로 경량충격원의 경우에도 천장면의 진동만으로 산정하는 경우 5개 옥타브밴드 주파수대역(125 Hz~2 kHz)에 대해 계산치는 실측치와 평균 6.8%의 오차율을 보이고 있으나, 전 부위 진동으로부터 산출한 경우는 오차율이 평균 4.8%로 줄어드는 것으로 평가되었다.

#### 4. 결 론

한국산업규격(KS A 2810)에서 규정하고 있는 표준충격원에 의한 가진시 수음실 각 부위(천장면, 벽면, 바닥면)로 전달된 진동량을 측정·제시하고, 이를 토대로 확산진동에 의한 음향방사이론에 근거하여 바닥충격음레벨을 산정한 후 실측결과와 비교함으로써 간이적인 예측기법으로서의 적용성에 대해 고찰하였다.

바닥충격음의 주(主) 전달경로이자 음향방사원인 수음실 천장면에서 계측한 진동량만으로 충격음레벨을 산정한 결과와 수음실 전 부위에서 계측한 진동으로부터 충격음레벨을 산정한 결과는 각각 실측치와 평균 약 7~10%, 5~6%의 오차범위를 가지고 예측되는 것으로 평가되었다. 또한 수음실의 바닥충격음은 천장면 뿐 아니라 4개 벽면을 통해 전달되는 에너지도 전체 바닥충격음 결정에 상당히 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

특히 본 연구는 현장시험시공을 통한 충격음 성능 평가시 상호설치 등 현장공정상 시기적으로 측정조건을 갖추기 어려워 많은 시간과 노력이 요구되어 지거나, 주변의 압소음이 매우 커서 현실적으로 충격음레벨의 측정이 불가능한 조건인 경우 진동계측을 통해 바닥충격음을 예측·평가하는데 유용하게 활용할 수 있

을 것으로 판단된다.

아울러 보다 정도 높은 바닥충격음레벨 예측을 위해서는 향후 진동 계측점의 위치 및 개수 선정에 대한 다양한 검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 折笠輝雄·久保田喜八郎, 1987.8, “重量床衝撃音發生器による床衝撃音の實驗的解析方法に關する研究”, 日本建築學會計劃系論文報告集, 第378号.
- (2) 木村 羽·井上勝夫·中澤眞司, 1990.1, “インピンダンス法による床衝撃音レベル豫測法檢證のための實驗的研究”, 日本建築學會計劃系論文報告集, 第407号, pp. 1~9.
- (3) Kim, M. J., Kim, H. S. and Sohn, J. Y., 2001, “Prediction and Evaluation of Impact Sound Transmission in Apartment Building Structures by Statistical Energy Analysis”, Applied Acoustics, Vol. 62, pp. 601~616.
- (4) Maidanik, G., 1962, “Response of Ribbed Panels to Reverberant Acoustic Field”, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 34, pp. 809~826.
- (5) Beranek, L. L., 1971, Noise and Vibration Control, McGRAW-HILL.
- (6) Cremer, L., 1973, Structure Borne Sound, Springer Verlag.
- (7) 安岡正人, 1982, 騒音振動對策ハンドブック, 技報堂.
- (8) Heckl, M. A., 1992, Short Course on Structure-borne Sound, Center for Acoustics and Vibration PENNSTATE, pp. 430~431.
- (9) 산업자원부 기술표준원, 2001, “건축물 음환경 분야 표준화 연구 II”.
- (10) 대한주택공사, 2001, “공동주택 바닥충격음 차단성능 기준설정 연구”.
- (11) 정환욱, 기노갑, 송민정, 김선우, 2002, “공동주택의 천장틀구조 변화에 따른 바닥충격음 차음 특성 연구”, 한국소음진동공학회논문집, 제12권, 제8호, pp. 573~580.