

# 공동주택에서 완충재를 이용한 바닥충격음 저감 System 연구

## Investigating of a Floor-Impact Isolation System Using Damping Materials in Apartment Buildings

송희수\* · 정영\*\* · 정정호\*\* · 전진용\*\*\*

Hee Soo Song, Young-Jeong, Jeong Ho Jeong and Jin Yong Jeon

**Key Words** : Natural Frequency(공진주파수), Resilient Modulus(동탄성계수), Floor Shock-absorbing Material(바닥충격완충재), Heavy-impact Noise(중량충격음), Apartment with Shear Wall(벽식구조), Loss Factor(손실계수), Hilbert Transforms(힐버트 변환)

### ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate a investigating of a floor-impact isolation system using damping materials in apartment buildings. The stiffness elastic modulus(k) by puls impact forces were calculated loss factor by Hilbert transforms. It is observed that natural frequency was moved floor shock-absorbing materials and the impact force was reduced by floor panel. The slab was constructed by damping materials. As towards a result, the system showed inverse A 45dB by heavy weight-impact noise and inverse A 52dB by light-impact noise. High frequencies impact-noise can be reduced by upgrading natural frequency of vibration and noise in the system

### 1. 서 론

벽식구조로 구성된 공동주택의 바닥충격음 중 중량충격음 저감은 바닥충격음의 숙원과제이다. 2004년 4월에 실시 예정인 건교부의 바닥충격음 법제화를 위한 고시안에서도 중량충격음에 관한 법제화를 내년으로 연기하고, 지속적인 연구를 진행하고 있다.

기존연구에서 제시된 바닥충격음 저감 시스템은 완전 뜬 바닥구조를 제시하고 있다. 뜬바닥구조는 경량충격음을 저감에 효과가 상당히 있는 것으로 연구 보고되고 있으나, 중량충격음에는 그 효과가 미약하여 그 대책으로 바닥 슬래브의 두께 또는 강도를 증가시키는 것과 라멘구조가 주로 제시되어 왔다. 이는 중량충격원이 바닥을 가진할 때 충격원의 저주파 에너지가 많이 발생되어 바닥슬래브 구조만으로는 저주파수 충격원 에너지를 저감할 없으므로 직하층에서 높은 중량충격음이 발생되고 있다.

뜬바닥구조에서 중량충격음이 저감 방안에 어려움을 겪고 있는 것은 충격음의 전달을 저감시키기 위해 사용하고 있는 완충재 선택시, 권장하는 동탄성계수(10~30MN/m<sup>2</sup>)와 손실계수(0.1~0.3) 재료는 중량충격음의 저주파음 레벨을 저감 보다는 오히려 증가시키고 있으며, 이러한 완충재를 사용한 슬래브의 고유진동수도 완충재를 사용하지 않은 슬래브의 고유진동수 보다 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다.<sup>(1)(2)</sup>

따라서 본 연구에서는 중량충격원의 저주파 성분을 저감할 수 있다고 판단되는 높은 동탄성계수의 성능을 보유한 완충재와 경량충격력을 저감할 수 있는 마감재를 선택하여 물질성을 분석한 후, 현장에 적용, KS-2810에 규정된 현장 측정 방법으로 중량충격음 및 진동을 측정 분석하였다. 이를 토대로 층간소음에 저감을 위한 완충재의 선정시 고려하여야 할 영향요소들을 분석, 평가하고자 한다.

### 2. 실험특성

#### 2.1 완충재 특성<sup>(3)</sup>

##### (1)동탄성 계수

\* 한양대학교 건축공학과 석사과정  
E-mail : loveshs@hanmail.net  
Tel: (02) 2290-1795 Fax: (02) 2291-1793

\*\* 한양대학교 건축공학과 박사과정

\*\*\* 한양대학교 건축공학부 부교수

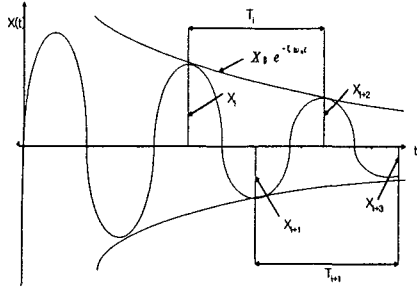


Fig.. 1 감쇠진동 파형도

완충재의 동탄성계수는 재질 내 임의의 위치에 가한 힘의 크기를 시간에 대하여 응력과 변형률 사이의 비례상수이다. 동탄성계수 산출은 펄스가진법에 의해 Fig. 1의 진동 응답 파형을 얻는다. 이 파형에서 자유진동부분의 파형부터 다음의 식을 이용해 완충재의 동탄성계수의 근사값을 구한다.

$$K_d = (2\pi \frac{1}{T_0})^2 \cdot m \quad (1)$$

$$T_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (2)$$

## (2) 손실 계수

손실계수는 계에 1주기 동안 저장할 수 있는 최대변형에 에너지에 대하여 동일한 주기동안 소실되는 에너지 비이다. 손실계수를 구하는 목적은 진동 전달률을 알기 위해서이다. 진동전달률은 뜬바닥층으로부터 하부바닥판으로의 에너지 전달률에 따른 결과값이다. 진동전달률(vibration transmissibility) ( $\zeta$ )과 손실계수(loss factor) ( $\eta$ )의 관계는  $\zeta < 1$ 일 경우 시간(t)에 의한 변형값은 다음과 같이 표현하고, 진동전달률과 손실계수는 다음의 식에 의해 산출한다.

$$\eta = 2\zeta \quad (3)$$

$$x = X_0 e^{-\zeta \omega_n t} \cos(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t + \phi) \quad (4)$$

진동전달률은 힐버트 변화<sup>(3)</sup>를 이용하여 산출할 수 있다. 힐버트 변화(Hilbert transform)은 시간(t)에 따라 변화하는 진폭(X(t))신호의 해석에 주로 사용되는 함수로 포락선(envelope)을 구할 때 이용한다. 힐버트 변화의 정의는 실함수  $x(t)$ 와 변환 쌍  $\tilde{x}(t)$ 으로 다음과 같이 표현한다.

$$\tilde{x} = H[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(u)}{\pi(t-u)} du \quad (5)$$

실함수  $x(t)$ 와  $\tilde{x}(t)$ 에 의해 구성된 복소함수를 해석함수로 하여 다음과 같이 포락선(A(t))을 구한다. 포락선의 산출은 진동전달률을 산출할 수 있는 함수로 다음과 같은 수식을 이용한다.

$$Z(t) = A(t) e^{j\phi(t)} \quad (6)$$

$$A(t) = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} \quad (7)$$

## 2.2 현장특성

### (1) 공간의 고유진동<sup>(3),(5)</sup>

3차원 공간에서의 고유진동수 및 음압진폭은 주벽이 모두 강벽인 경계조건에서 벽의 수직방향-입자속도는 0이 되므로 거리(l), 고유주파수(n), 음속(c)으로 다음과 같은 식으로 계산할 수 있다.

$$f_{ijk} = \sqrt{\left(\frac{ci}{2l_x}\right)^2 + \left(\frac{cj}{2l_y}\right)^2 + \left(\frac{ck}{2l_z}\right)^2} \quad (8)$$

$$\cos\left(\frac{in\pi x}{l_x}\right) \cos\left(\frac{jn\pi y}{l_y}\right) \cos\left(\frac{kn\pi z}{l_z}\right) \quad (9)$$

$f$ 는 3차원 직교좌표와 원점의 거리에 해당한다. 이는 Fig. 2의 입체격자의 각 절점이 고유진동에 대응하고, 고유주파수의 수는 이 격자점의 수를 계산한 수이다.

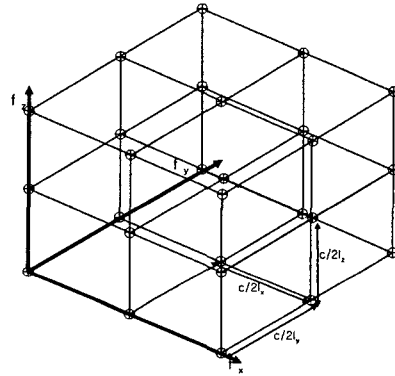


Fig. 2 3차원 공간에서 공간주파수와 공간의 관계

## 3. 실험조건

### 3.1 완충재 실험

완충재를 Fig. 3과 같이 펄스 가진법으로 구성 및 측정하였다. 실험시 완충재의 공진주파수 발생 주파수를 확인하며, ISO 9052-1에서 제안하는 기본 고유주파수의 2~3배정도를 cut-off한 low-pass필터는 400Hz, band-pass필터는 1~6kHz로 완충재 필터를 설정하여 측정하고, 해상도를 높이기 위해 라인수를 증가시켰다. 측정 장비는 다음과 같다.

- Moadl hammer (Modal 2302-10, ENDEVCO)
- Accelerometer (333A12, PCB)
- Dynamic Signal Analyzer (35670A, HP)
- Multi-Channel Filter (3905B, KH Corporation)
- Signal Conditioner (480E06, PCB)

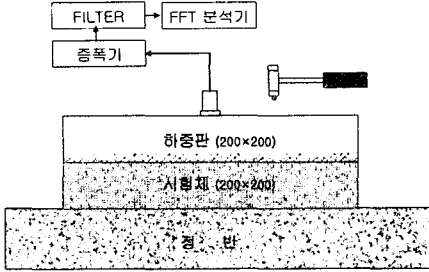


Fig. 3. 펄스가진법을 이용한 완충재 특성 측정

### 3.2 충격음 실험

바닥충격음은 KS-2810의 규격에 따라 Fig. 4와 같이 가진원 및 수음점을 위치하였다. 정확한 임펄스 신호를 취하기 위하여 충격음에 대한 신호를 동기화(triggering)시켜 측정하였다. 일반적인 임펄스는 매우 짧은 시간 내에 많은 데이터가 발생하기 때문에 정확한 데이터 확보에 어려움이 있고, 시간을 둔 측정은 임펄스 신호에 대한 오차가 발생할 우려가 있어 동시 측정을 했다. 각 입력 Channel에 입력되는 중량충격음 신호에 대한 분석 방법으로 FFT(Fast Fourier Transform Filter)분석은 Average Mode = peak, df= 1 (Hz), T= 1(s), CPB(Constant Percent Bandwidth Filter) 분석은 Average Mode = Maximum Hold, Filter Setting은 Bandwidth= 1/3 Octave, Span Centre Frequency = 20Hz ~5kHz이다.

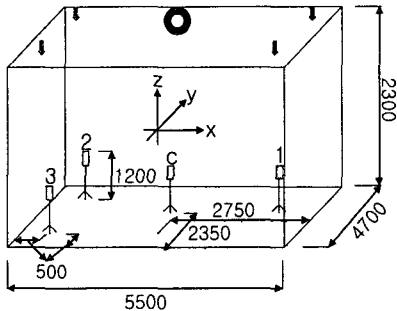


Fig. 4. 충격음 수음 및 가진 위치

Table. 1 바닥구조의 시공개요

구조	바닥구성층	실면적	측정장소
A	슬래브(150mm)+완충재a(15mm)+경량 기포콘크리트(60mm)+마감물탈(50mm)+마감재(10mm)	25.85㎡	D현장 32평형 거실
B	슬래브(150mm)+완충재b(20mm)+경량 기포콘크리트(60mm)+마감물탈(50mm)+마감재(10mm)		

### 3.3 진동 실험

중량충격원에 의한 진동 측정은 Fig. 5와 같이 중앙부 가진 및 응답으로 이루어졌다. 충격원이 바닥을 가진하여 진동하는 시점을 기준으로 진동을 측정하기 위해 가진 바닥에 가속도계(accelerometer)를 밑받침으로 압밀하게 부착시켜 흔들림이 없게 하고, 가속도계의 선도 고정하였다. 정확한 임펄스를 측정하기 위해 가진 slab 상부면에 부착한 가속도계를 동기화시켜 측정했다. 기준신호(reference signal)의 인식은 정해진 레벨 이상의 값을 가지는 순간 측정대상물에 대한 가속도 측정이 시작되도록 설정하였다. 진동은 가진원 상부, 하부 및 직하층 상부면을 동시에 측정했다. 현장 바닥충격 및 진동 측정 장비는 다음과 같다.

- Sound intensity (Type 26Ak, G.R.A.S)
- Microphone (Type 4165, B&K)
- Accelerometer (333A12, PCB)
- Bang machine (FI-02, Rion)
- Tapping machine (Type 3207, B&K)
- Multi-analyzer System (Pulse(Type 3560C) Version 8.0, B&K)
- Notebook computer (IBM)
- Calibrator exciter (ACC; Type 4294, B&K MIC; Type 4231, B&K)

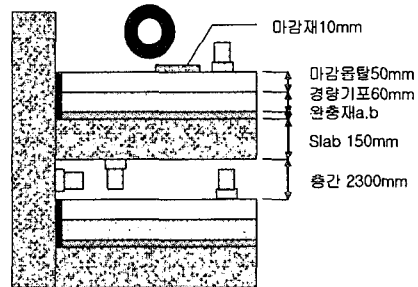


Fig. 5. 진동 측정 위치

## 4 실험 결과

### 4.1 완충재 실험 결과

완충재의 물성을 Fig. 3과 같이 측정하여 Table 2와 같이 산출했다.

Table 2. 완충재의 물성시험 결과

재료구성	두께 (mm)	공진주파수 (Hz)	동탄성계수 (MN/m²)	손실계수	
a	-	15	3851	120900	$5 \times 10^{-5}$
b	EPS	20	78	48.4	0.35

b완충재의 물성은 국내 시판하는 EPS의 기본적인 물성치

인 15~70MN/m<sup>2</sup>와 0.1~0.4에 속하는 재료이다. a완충재는, 독일의 DIN 18164와 일본의 [소음진동핸드북]에서 뜬바닥구조 완충재로 권장하는 값인 동탄성계수 (10~30)MN/m<sup>2</sup>이내, 손실계수 0.1~0.3, 권장치 범위를 벗어난 재료이다. 이와 같은 재료의 선택 이유는 a완충재의 경우 슬래브의 공진주파수를 이동시키기 위한 실험 실험군이고, b완충재는 단열재로 많이 사용하는 재료로 완충재 권장치를 조금 상회 재료로 바닥충격음에 어떠한 현상을 보이는지 알고자 하는 대조군이다.

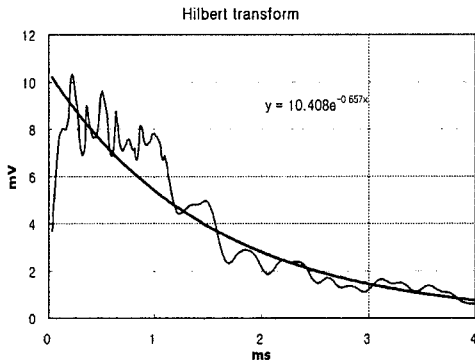


Fig. 6 손실계수 계산을 위한 Hilbert Transform

a완충재 측정결과 동탄성계수는  $T_0$ 에 일정한 값을 나타내고 있으나 손실계수는  $x_1$ 에 따라 차이를 보이는 경향이 나타났다(Fig. 1 참조). 손실계수의 산출은 시간-진폭 파형중 자유진동이 이루어 지는 곳에서 포락선(envelope)함수로 산출한다. 일반적인 재료는 시간에 따른 파형이 불안정한 1주기가 끝난 이후, 주기에 따른 신호의 최대값에서 계산을 하면 손실계수는 근사값을 보이지만, a완충재는 1주기 이후의 주기에 따른 신호의 최대값에 따른 손실계수가 차이를 보이고 있다. 이에 측정된 실험수 식(4)는 식(5), (6), (7)을 matlab으로 Hilbert Transform하여 Fig. 6과 같은 포락선과  $\zeta$ 를 산출하고, 식(3)을 이용해  $\eta$ 를 산출했다.

#### 4.2 충격음 실험 결과

중량충격음 측정결과 역A는, 마감재가 없는 상태에서 가진할 때, 완충재의 종류에 따라 47dB(a완충재), 51dB(b완충재)이고, 마감재를 설치시 45dB, 50dB이다. 완충재의 성능에 따라 4dB의 저감량 차이를 보이고 있고, 마감재를 설치유무에 따라 2dB(a완충재), 1dB(b완충재)의 저감성능을 보이고 있다. 이는 A구조는 a완충재와 마감재의 성능이 동시에 중량충격음 저감에 효과가 있지만, B구조는 b완충재에 의해 마감재의 저감효과를 낮은 것으로 보인다. Fig. 7에서 주요 저감 주파수는 63Hz, 125Hz이고, 그 효과는 3dB, 2dB이다. 따라서 중량충격음은 완충재와 마감재의 특성에 의해

역A 45dB로 나타났다. 이에 함께, 천장 시스템에 관한 연구가 중량충격음 저감량을 크게 할 수 있을 가능성에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

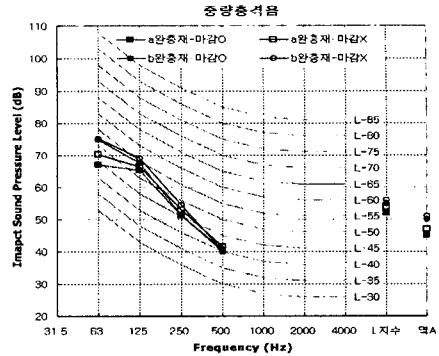


Fig. 7 중량 충격음 측정 및 평가

경량충격음 측정결과 역A는, Fig. 8에서 마감재가 없는 상태에서 가진시, 완충재의 종류에 따라 69dB(a완충재), 59dB(b완충재)이고, 마감재 설치시 52dB이다. 완충재 성능에 따라 10dB의 저감량 차이를 보이고 있고, 마감재를 설치유무에 따라 17dB(a완충재), 7dB(b완충재)의 저감성능을 보이고 있다. 경량충격음은 완충재의 종류에 따라 마감재 미설치시 가진후에는 저감량의 차가 크게 나타나나, 마감재 설치 후 충격음의 단일수치 평가치는 미미한 것으로 나타났다. 마감재의 사용은 경량충격음의 주요 평가요인인 250Hz 이상에서 저감 성능이 크게 나타났다. 따라서 경량충격음 저감 방안은 경량충격원의 충격력 저감을 통해 그 효과를 확인할 수 있었다.

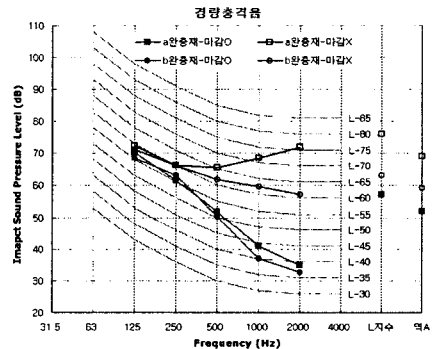


Fig. 8 경량 충격음 측정 및 평가

중량충격음 FFT분석은 충격음의 공진주파수를 찾는 데 유효한 방법이다. Fig. 9는 중량충격음을 CPB분석시 사용한 동일신호로 FFT분석 결과이다. 분석결과, 공진주파수는 마감재의 설치 여부에 관계없이 a완충재는 34Hz, b완충재는 25Hz이다. 마감재 유무에 따라 공진주파수 레벨 저감량은 4dB(a완충재), 1dB(b완충재)이다. a완충재의 마감재 설치 유무에 따라 150Hz~350Hz의 음압레벨이 다른 주파수에 비해

10dB 정도 차이를 보이고 있다. a완충재와 b완충재의 비율은 공진주파수인 경우 36% 증가 되는 현상을 보이고 있고, 충격음 레벨은 19% 저감, 단일치수로 평가할 경우 10% 저감성능을 보이고 있다. 마감재 사용은 슬래브의 공진주파수를 이동시키기 어렵지만, 충격력 저감을 통해 충격음 레벨 저감에는 도움이 되는 것으로 볼 수 있으나, 그 효과는 완충재의 특성에 따라 레벨 저감량이 다르게 나타남을 보이고 있다. 따라서 a완충재의 물성치 특성은 중량충격음의 공진주파수를 이동시켜 단일치수 평가시 중량충격음 저감에 주요한 요인으로 작용했고, 마감재의 사용이 a완충재의 특성과 부합하여 중량충격음 저감에 효과를 보고 있는 것으로 볼 수 있다.

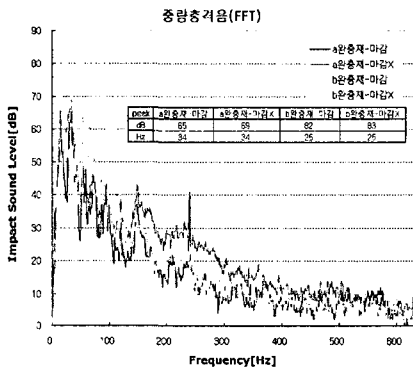


Fig. 9 중량충격음 FFT분석

### 4.3 충격원 및 Rood Mode의 영향

Fig. 10은 Fig. 4의 수음위치별 중량충격음 측정값으로, 마이크 위치에 따라 공진주파수가 다른 경향을 보이고 있다. 위치별로 c는 15Hz, 1은 53Hz, 2,3은 34Hz이고, 대표값인 ave는 34Hz이다. Table 3은 식(8)을 이용해 3차원 공간에서 정재파를 예측 및 실측한 값을 1, 2, 3차 모드(mode)중 저주파부터 정리했다. 실측값과 예측값을 비교해 본 결과 2, 3 수음위치(Fig. 4 참조)가 예측값과 일치하는 34Hz로 나타났다. 2, 3 수음점의 공진주파수 음압레벨이 c, 1의 음압레벨보다 높아, 단일평가를 위한 에너지 평균의 로그(log) 특성상 2, 3수음점의 공진주파수 영향이 주요하게 나타났다. 또, 중량충격음 측정시 마이크와 벽의 거리에 따른 수음점의 위치가 공간의 중량충격음 대표값 산출시 영향요인이 되고 있는 것으로 보인다. c 점의 공진주파수가 15Hz에서 나타난 요인은 중량충격원의 주파수별 충격에너지 분포율이 31.5Hz 이하 영역에서 전체 충격에너지의 80%가 집중되어 있어서 음압 측정시 15Hz근처의 레벨이 높게 나타난 것으로 보인다. 따라서 벽방사음으로 인한 수음점과 벽의 거리가 정재파로 인해 공진주파수에 영향을 주고 있고, 충격원의 특성에 의해서도 충격음 평가에 영향을 받는 것으로 사료된다.

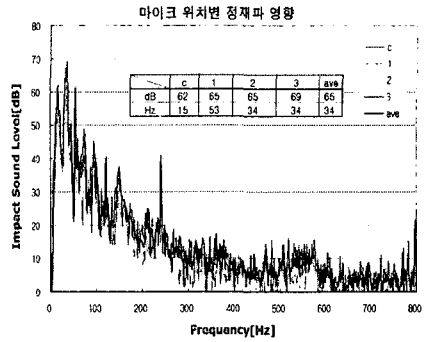


Fig. 10 마이크 위치별 정재파 영향

Table 3 3차원 공간의 정재파 1차모드 예측 및 실측값

Hz	$c_{(i,j,k)}$	$1_{(i,j,k)}$	$2_{(i,j,k)}$	$3_{(i,j,k)}$
예측	171 <sub>(1,0,0)</sub>	34 <sub>(1,0,0)</sub>	34 <sub>(1,0,0)</sub>	34 <sub>(1,0,0)</sub>
	181 <sub>(1,0,1)</sub>	68 <sub>(2,0,0)</sub>	40 <sub>(0,1,0)</sub>	40 <sub>(0,1,0)</sub>
	341 <sub>(2,2,0)</sub>	72 <sub>(0,1,0)</sub>	53 <sub>(1,1,0)</sub>	53 <sub>(1,1,0)</sub>
	363 <sub>(2,0,1)</sub>	80 <sub>(1,1,0)</sub>	68 <sub>(2,0,0)</sub>	68 <sub>(2,0,0)</sub>
	512 <sub>(3,1,1)</sub>	99 <sub>(2,1,0)</sub>	79 <sub>(2,1,0)</sub>	79 <sub>(2,1,0)</sub>
	544 <sub>(3,1,2)</sub>	102 <sub>(3,0,0)</sub>	81 <sub>(0,2,0)</sub>	81 <sub>(0,2,0)</sub>
실측	15	53	34	34

### 4.4 진동 실험 결과

Fig. 11은 Fig. 5의 가속도계 위치에 따라 진동 측정 결과이다. 공진주파수는 a완충재는 천장, 벽 30Hz, 바닥 28Hz, b완충재는 천장, 벽, 바닥 25Hz이다. 완충재별 공진주파수 증가는 a완충재는 b완충재에 비해 공진주파수는 20% 증가되고, 진동레벨은 각 부위별로 10~30% 증가되었다. 이는 진동과 소음의 공진주파수는 유사한 응답 형태를 나타내는 것으로 보인다. 따라서 진동과 소음은 유사한 주파수에서 응답형태가 약간의 차이를 보이지만 그 경향은 비슷한 것으로 판단할 수 있다.

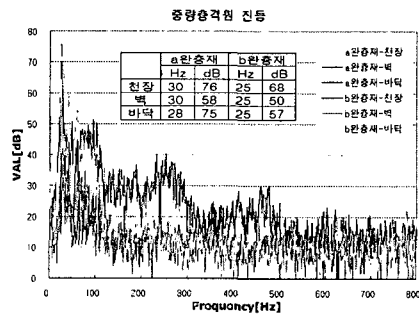


Fig. 11 중량충격원의 진동 측정 결과

Fig. 12는 Fig. 5의 측정위치 중 Slab 상·하부면에서 측

정한 결과이다. 동일 슬래브의 진동 공진주파수는 상·하부면이 완충재의 종류에 관계없이 동일한 주파수에서 발생했고, 진동레벨만이 하부면에서 측정된 값이 낮게 나타났다. 상부면과 하부면의 진동레벨 차이는 10dB미만으로 나타났다. 상·부면의 진동은 90Hz이하에서는 공진주파수의 진동레벨 차이와 비슷한 경향을 보이고 있으나 90dB이상에서는 그 차가 10dB이상의 경향성이 나타났다. 이러한 현상이 발생하는 이유는, 뜬바닥구조에서 슬래브는 굽힘파가 인접한 매질과 상호간섭을 일으키며 에너지의 진행방향에 수직으로 구조물 요소를 변형시키면서 전달하기 때문에 저주파의 파장은 길어서 그 경향성이 비슷한 것으로 보이나 고주파에서는 파장이 짧기 때문에 경향성이 다르게 나타나는 것으로 보인다. 따라서 슬래브, 완충재, 난방층의 상호특성에 따라 공진주파수의 발생은 결정되는 것으로 사료된다. 이는 공기에 따라 슬래브의 천장부 진동공진주파수 확인이 어려울 때 가진원의 슬래브 상부면에서 진동 측정으로 공진주파수를 확인할 수 있는 간편 측정법이 가능함을 확인할 수 있고, 이에 대한 추가연구가 필요할 것으로 사료된다.

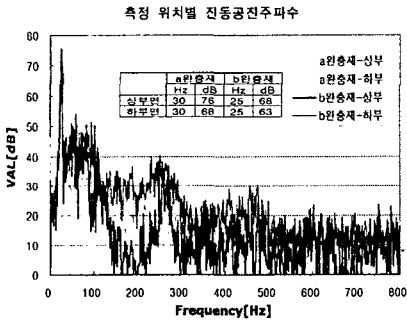


Fig. 13 Slab 상·하부면 진동 공진주파수

#### 4.5 상관성 분석

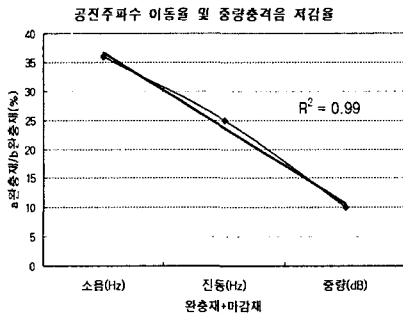


Fig. 13 공진주파수 이동율과 중량충격을 저감율의 상관성 분석

b완충재를 설치한 slab와 a완충재를 설치한 slab간의 소음과 진동의 공진주파수 이동율과 중량충격음의 저감율

을 분석 결과는 Fig. 13과 같다. 소음의 공진주파수는 36%, 진동의 공진주파수는 25%의 완충재간의 이동율을 보이고 있고 이러한 결과가 중량충격음 저감율이 10%의 결과로 나타나고 있다. 이에 대한 상관성 분석에서  $R^2$  값이 0.99의 높은 상관성을 보이고 있다. 따라서 소음과 진동의 공진주파수 이동은 중량충격음 저감에 중요한 변수요인임을 확인할 수 있다. 추후 이 실험에 대한 재현성 연구는 필요한 것으로 사료된다.

#### 5. 결론

본 연구를 통하여 공동주택 바닥충격음 저감을 위한 완충재와 바닥마감재의 물성치 변화에 따른 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

바닥충격음 저감은 완충재와 마감재의 물성적 특성에 의해 가능함을 확인했고, 중량충격음은 공진주파수 이동으로 단일평가수치가 저감됨으로, 진동의 공진주파수 이동과 중량충격음의 공진주파수 이동이 상관성이 있었다.

중량충격음의 공진주파수는 측벽 방사음의 정재파와 중량충격원의 에너지 특성에 의해 결정되는 것으로 분석되었다.

진동의 공진주파수는 슬래브의 시공조건에 관계없이 슬래브 상·하부면에서 동일한 진동 공진주파수가 발생하였다. 추후 본 연구에 대한 심도 깊은 연구가 필요하다고 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 환경부 “차세대 핵심환경기술개발사업”(과제번호: 03-1-11-2-002)의 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) 서상호 등, 2003, 중량바닥충격에 의한 소음 및 진동 특성, 추계학술발표회 논문집, 한국소음진동공학회, pp 919~922-1
- (2) J. Y. Jeon, J. H. Jeong, M. Vorlaender and R. Thaden. 2004, “Evaluation of Floor Impact Sound Insulation in Reinforced Concrete Building.” Acta Acustica Vol.90 pp.313~318.
- (3) Leo L. Beranek and István L. Vér, 1992, Noise and Vibration Control Engineering Principles and Applications, Canada
- (4) Julius s. Bendat and Allan G. Piersol, 2000, “Random Data Analysis and Measurement Procedures, Canada
- (5) Cyril M. Harris, 1998, HandBook of Acoustical Measurements and noise control, America