

# 제진재가 삽입된 바닥 구조의 진동특성에 대한 실험연구

## Vibration Characteristics of the Floor Structures Inserted with Damping Materials

정 영† · 전 진 용\*

Young Jeong and Jin Yong Jeon

(2006년 6월 15일 접수 ; 2006년 9월 22일 심사완료)

Key Words : Damping Material(제진재), Heavy-weight Floor Impact(중량충격), Natural Frequency(고유진동수)

### ABSTRACT

Damping materials for reducing heavy-weight floor impact noise in reinforced concrete structures were tested in apartment buildings. The effect of damping materials and an impact isolator were compared with an on-site experiment conducted in a high-rise apartment building. The loss factor of damping material analyzed more than 2 times than rubber to 1.5~2.3, could know that Damping layer has excellent attenuation performance in side of vibration reduction. The results showed that the resonance frequency increased but vibration acceleration level decreased when the damping materials were used. The heavy-weight impact sound levels of the structure decreased substantially at 63Hz, whereas the sound levels of the structure with the impact isolator increased.

### 1. 서 론

공동주택에서 발생되고 있는 바닥충격음은 거주자들의 생활을 침해하는 중요한 요인으로 적극적인 대처가 요구되고 있다. 따라서 실제적인 불만요소인 중량충격원에 대한 바닥충격음 저감 대책으로 건교부에서는 2005년 7월 중량충격음 차단성능에 대한 법적 최저기준을 마련하여 시행하고 있다. 한편, 2006년 1월부터 시행되는 주택성능등급표시제도(주택법 제 21조의 2)는 주택을 분양받거나 하는 수요자에게 입주자 모집 공고시 성능에 대한 정보를 제공해 줌으로써 선호도에 따라 주택을 선택할 수 있는 기회를 부여함과 동시에 표시된 성능수준으로 주택을 건설하게 함으로서 바람직한 주거환경(쾌적성)

의 확보를 목적으로 음환경을 비롯해 5개 분야에 대해 성능표시를 하도록 법제화하고 있다. 특별히 이 제도에서 음환경 성능 항목으로 규정하고 있는 주된 성능표시항목으로 바닥충격음 차단성능(경량충격음, 중량충격음)이 매우 비중 높게 다루어지고 있다.

최근, 건설교통부 “주택 건설기준 등에 관한 규정” 시행령은 기본구조로서 벽식 바닥구조의 바닥 슬라브 두께를 증가시키는 것과, 구조형식을 라멘구조로 활용하는 것을 통해 바닥충격음을 저감하는 방법을 정부차원에서 규제한다는 내용이다.

기본구조로서 바닥충격음 저감 방법은 기존 연구<sup>(1)</sup>에서 제시된 것으로 건축 구조물과 탄성차음재를 1자유도계로 모형화하여 그 특성을 분석함으로써 바닥충격음을 제어 하고자 하는 접근의 방안으로 제시된 결과이다.

또한 슬라브의 두께 증가 방법은 실질적인 바닥충격음 저감효과를 기대할 수 있으나, 고비용(층고에 따른 문제, 건물 자중의 증가에 따른 구조적 문제)

† 책임저자; 정희원, 한양대학교 건축공학과

E-mail : jysarang@hanyang.ac.kr

Tel : (02)2291-1795, Fax : (02)2291-1793

\* 정희원, 한양대학교 건축대학 건축공학부

의 차음방식으로 공동주택 내 바닥구조의 슬라브와 경량기포콘크리트 구조체 사이에 단열재 삽입이 법제화된 현 시점에서 실제적인 저감효과를 얻기에는 많은 문제를 가지고 있는 방안이다.

보 혹은 평판의 감쇠처리를 이용한 소음 진동 저감기술은 이미 기존 연구<sup>(2)</sup>를 통해 제안되었으나, 실용화 기술은 최근에 이르러 현실화되고 있으며 자동차, 가전제품 등의 분야에서 많이 적용되고 있다.

이 연구에서는 공동주택 바닥 구조체에 제진층이 삽입된 바닥구조에 대하여 시공조건에 따른 진동특성을 분석하고, 그동안 연구되었던 단열 바닥구조에 삽입되는 탄성차음재 활용의 개념에서 벗어나 현장 적용을 통한 제진재의 활용성을 검토하고자 한다.

## 2. 제진재의 점탄성 특성

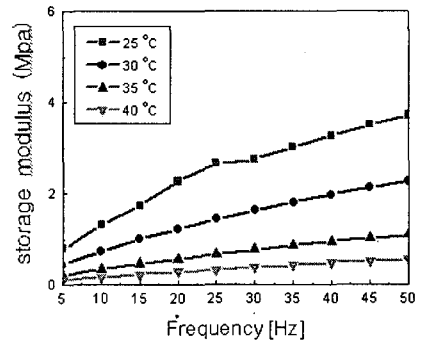
이 연구에서는 자체 연구 개발된 제진재의 물성치 시험을 위하여 점탄성 재료 시험기(DMA 2980)를 이용 온도변화와 주파수에 따른 제진재의 물성 변화를 분석하였다. 점탄성 재료는 일반적으로 온도, 주파수, 정적변형, 동적변형 크기 등에 의해 그 물성치가 변한다<sup>(3)</sup>.

Fig. 1의 (a, b)는 제진 재료의 온도 및 주파수에 따른 저장탄성계수(storage modulus)와 손실계수(loss factor)를 나타낸다. 온도 증가에 따라서 저장탄성계수의 감소와 손실계수의 증가가 나타나며, 주파수의 증가에 따라서 저장탄성계수의 증가와 손실계수의 감소를 보이고 있다.

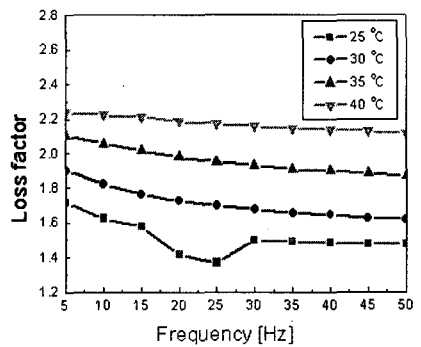
온도의 증가에 따라 제진층이 연화되는 현상으로부터 온도에 따른 거동을 유추해 볼 수 있고, 주파수에 따른 거동도 일반적인 점탄성 재료의 거동과 일치하고 있다.

Table 1 DMA2980 test conditions

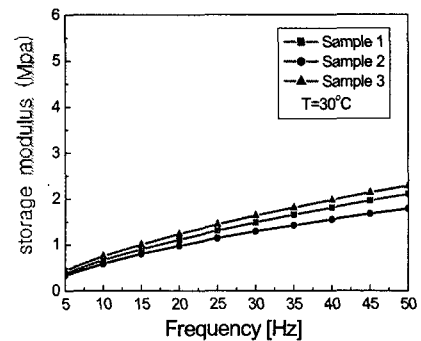
	Testing condition
Temperature	25, 30, 35, 40 °C
Frequency	5 ~ 50 Hz
Maximum load	Dynamic displacement : 15 μm Pre-loading : 0.01 N
Test specimen	Diameter : 20.5 mm, Height : 6~6.9 mm



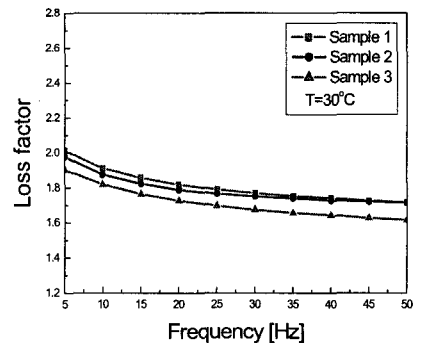
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 1 Properties of damping materials by frequency and temperature

이 연구에서 주요 관심 대상인 제진재의 손실인자(loss factor)는 1.5 ~ 2.3사이로 고무에 비해서도 2 배 이상의 손실계수를 보이며, 이는 진동저감의 측면에서 제진층이 탁월한 감쇠성능이 있음을 알 수 있다.

Fig. 1의 (c, d)는 동일한 형상을 가지는 3개의 시험편에 대하여 일정온도(30℃)에 대해 주파수에 따른 실험을 수행한 결과이다. 저장탄성계수와 손실 인자의 표준편차(standard déviation)가 각각 0.22 Mpa, 0.07이었으며, 이로부터 실험으로 추출된 제진재 물성치의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

### 3. Square Plate 실험

#### 3.1 콘크리트 슬라브와 바닥 몰타르 물성치 추출

이 실험에서는 현재 실제 공동주택 바닥구조물과 동일한 두께로 제작한 시험체를 대상으로 현재 제안 되어 사용되고 있는 이론식 검증이 적합하지 않으므로 얇은 평판이론 적용이 가능한 축소 평판 시험체를 제작하여 각 재료별 물리적 특성을 측정하였다.

시험체의 크기는 1000×1000 mm와 500×500 mm로 구분하여 시험하였으며, 시험체의 두께는 10 mm (압축강도 210 kg/cm<sup>2</sup>, 탄성계수 225,400 kgf/cm<sup>2</sup>, 밀도 2400 kg/m<sup>3</sup>, 푸아송비 0.167)로 제작하였다. Table 3은 제작된 시험체와 시험체를 통한 물성치 측정에 대한 것으로 5회 impact 테스트

Table 2 Loss factor of materials

Materials	Loss factor
Damping materials	1.40 ~ 2.20
Aluminum	$2 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-3}$
Concrete	0.02 ~ 0.06
Rubber	0.1 ~ 1
Steel	0.002 ~ 0.01
Wood	0.005 ~ 0.01

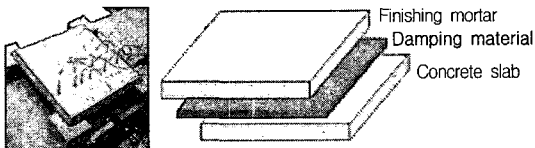


Fig. 2 Measurements of vibration using accelerometers for free-free square plate

통해 고유진동수의 측정과 탄성계수 사이의 관계식을 이용 계산하였다.

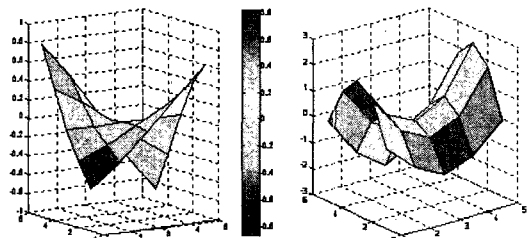
#### 3.2 제진층이 삽입된 구조층의 접착에 따른 특성

Fig. 4는 제진재를 삽입하지 않은 축소 평판시험체의 주파수 응답특성을 분석한 결과이며, Fig. 5는 제진층이 삽입된 축소 평판시험체에서 제진층이 상하부면 바닥 몰타르 및 바닥콘크리트 슬라브와의 접착 여부에 따라 나타나는 진동 특성을 검토하여 제진층 삽입구조의 특성에 대한 영향을 분석한 결과이다.

Square plate 실험을 위한 시험체 제작방법은 콘크리트 슬라브 제작 후 제진재 접착하게 되는 부분에 수지를 이용하여 슬라브와 몰타르를 일체화한 실험(접착실험)과 슬라브 위에 제진재를 올려놓은 후

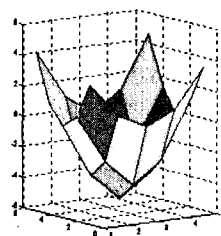
Table 3 Properties of square plates

Materials		E (Gpa)
Mortar	500×500 mm	11.2 ~ 12.4
	1000×1000 mm	15.5 ~ 17.2
Slab	500×500 mm	40.9 ~ 41.3
	1000×1000 mm	34.5 ~ 35.4



1st mode

2nd mode



3rd mode

Fig. 3 Mode shape

Table 4 Details of floor systems in the apartment building

Type	Floor Area (m <sup>2</sup> )		Floor system composition
	Living room	Bedroom	
A	26	18	Concrete(150 mm) + resilient isolator(20 mm) + lightweight concrete(40 mm) + finishing mortar(50 mm)
B	26	13	Concrete(150 mm) + damping material(15 mm) + lightweight concrete(45 mm) + finishing mortar(50 mm)
C	28	14	Concrete(150 mm) + damping material(3 mm) + honeycomb structure(12 mm) + lightweight concrete(45 mm) + finishing mortar(50 mm)
D	39	14	Concrete(150 mm) + lightweight concrete(45 mm) + damping material(3 mm) + honeycomb structure(12 mm) + finishing mortar(50 mm)

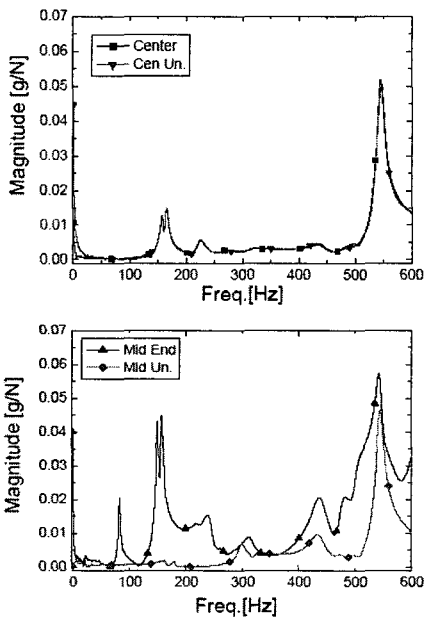
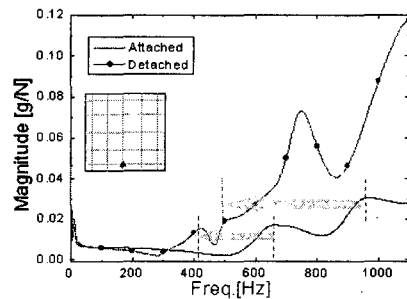


Fig. 4 Measurements of vibration using accelerometers of square plate not inserted with damping layer

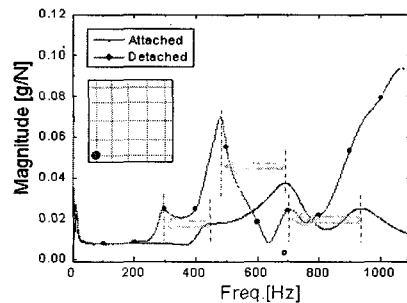
기 제작된 몰타르를 상부에 올려 2차 비접착실험을 진행하였다.

실험결과, 제진층이 분리된 시험체는 제진층의 전단변형이 적어 접착된 평판 시험체의 제진층 결과와 비교하여 손실계수가 낮게 나타났으며, 제진층의 구속이 적으므로 시험체의 자유로운 진동으로 인해 낮은 고유진동수를 나타내었다.

이 실험의 결과를 통해 제진층이 구속되었을 경우, 전단방향으로의 변형에너지를 흡수하는 효과가 있음을 알 수 있었으면 현장시험 시공시 구조체와의 일체성 및 강성의 증가 효과를 증대시키기 위한 방법의 검토가 필요한 것으로 분석되었다.



(a) Adhesion (mid end)



(b) Separation (corner)

Fig. 5 Measurements of vibration using accelerometers by adhesion of Damping layer

#### 4. 현장시험시공

벽식구조로 시공 중인 현장 내 4세대(Case-A, B, C, D)의 거실 4개실과 침실 4개실을 대상으로 표준 중량충격원에 의해 수음실 각 부위로 전달된 진동 및 소음간 상관관계를 분석하고, 충격음 저감 재로서 완충재 및 제진재의 특성을 파악하기 위해 현장시험을 실시하였다.

Type A~D를 시험 시공한 현장 구조는 20층 규모의 대단지 아파트 내 위치한 30~44평의 계단식 아파트내 위치한 30~44평의 계단식 아파트로 바닥

구조는 바닥슬라브 150 mm, 기포콘크리트 60 mm 그리고 마감몰타르 50 mm로 구성되어 있으며, 이 연구를 위해 기포콘크리트 층 하부에 완충재와 제진재를 삽입(경량기포 하부형식)한 기포층 하부구조와 마감몰타르 하부에 삽입한(온돌마루 하부형식) 구조로 구분하여 중량충격음의 소음·진동 특성을 분석하였다.

특별히 제진층을 시공시 상부층인 경량기포콘크리트(C구조), 마감몰타르(D구조)과의 일체성 및 강성의 증가에 대한 효과를 증대시키기 위한 시공방법으로 오픈 셀로 이루어진 하니컴 구조의 폴리프로필렌을 시공하여 분석하였다.(부록 Fig. 1 참조)

4.1 진동측정 및 분석방법

이 연구의 시험시공 세대의 마루 바닥재나 석고보드 등 마감재를 부착하기 전 마감재와 골조사이 결합구조의 특성에 따라 소음 방사 특성과는 무관한 공진 등이 발생할 수 있는 요소를 제거한 맨 슬라브 상태의 진동을 측정하고, 완충재와 제진재를 시공한 후 경량기포콘크리트, 마감몰타르를 타설하여 충분한 양생기간을 거쳐 다시 한번 진동을 측정하였다.

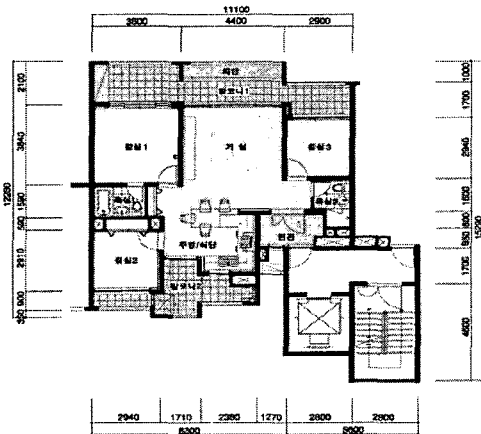


Fig. 6 Apartment for floor impact sound test

Table 5 Properties of polypropylene

Polymer	Polypropylene	
Color	Lack of color	
Cell size	Width : 4 mm, Length : 8 mm	
Thickness	6 mm ~ 28 mm	
Length	2400 mm -0+20 mm	
Width	1200 mm -0+20 mm	

측정은 KS규격(KS F 2810-1/2) 기준에 따라 가진 및 수음점을 위치시켰으며, 중량충격원에 의한 진동측정은 중앙부 가진 및 응답으로 진행하였다.

진동레벨은 일반적인 임펄스 가진의 경우, 매우 짧은 시간 내 정확한 데이터를 확보해야 하는 어려움이 있으며 이 중량충격원의 경우 수백 msec 내 다수의 데이터를 측정, 분석해야 한다. 따라서 이 실험에서는 중량충격원에 의해 바닥이 진동하는 시점을 기준으로 하기 위해 가진 바닥에 가속도계를 장착하여 기준신호(reference signal)로 인식하여 이 신호가 정해진 레벨 이상의 값을 가지는 순간 측정 대상물에 대한 진동 측정이 시작되도록 설정하였다. 이에 대한 방법은 Fig. 8에 나타내었다.

소음은 음압레벨(SPL)을 측정하였다.

이 실험에 사용된 장비 및 센서는 다음과 같다.

- Bang machine (FI-02, Rion)
- FFT analyzer (4-Ch. Pulse, B&K)
- Microphone (Type 4165, B&K)
- Accelerometer (PCB)
- Notebook computer

4.2 거실의 진동측정 결과

Table 6은 맨 슬라브 위에서 Table 7은 마감몰타르 위에서 측정 분석한 결과이며, 각 구조에 따른 고유진동수 및 가속도, 진동레벨의 영향을 나타낸 것이다.

바닥에서의 피크 주파수는 바닥 구조의 고유 특성을 반영해 주는 것으로 고유주파수(natural frequency)로 판단된다. 또한, 다소 복잡하고 다양한 피크가 발생하였는데, 이는 가진 면에서 발생된 진동이 벽과 주변 구조를 통해 전달되면서 동특성이 일부 반영되어 나타난 것으로 분석된다.

먼저 맨 슬라브 상태에서 측정된 결과, 공진주파수는

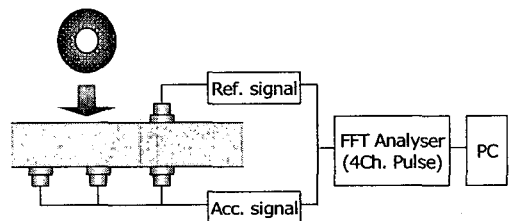


Fig. 7 Vibration measurement with triggering

17~27 Hz에서 나타났으며, 각 구조의 평형에 따른 진동가속도레벨은 유사한 값(91~93 dB)을 나타내었으나, 완충재(A구조) 및 제진재(B, C, D구조)를 삽입하고 온돌구조를 시공한 후, 측정된 세대에서는 공진주파수가 20~33 Hz로 나타났다.(부록 Fig. 2참조)

특히 각 구조의 고유진동수 변화와 함께 진동레벨의 변화를 보면, 제진재를 시공한 B, C, D구조는 피크 성분을 보이는 공진주파수의 증가와 함께 진동가속도레벨이 13~20 dB정도 저감되는 결과를 나타내었으나, 완충재를 시공한 A구조는 공진주파수의 변화 없이 진동가속도레벨이 4 dB의 저감효과를 나타내었다.

#### 4.3 방의 진동측정 결과

맨 슬라브에서 측정된 결과를 분석한 결과, 공진주파수는 30~39 Hz에서 나타나고 있으며, 각 구조의 평형에 따른 진동가속도레벨은 큰 차이가 없는 유사한 값(94~96 dB)을 나타내었으나, 완충재와 제진재를 설치하고 온돌층을 시공한 경우, 공진주파수는 36~46 Hz로 나타나고 있다.(Table 8, 9참조)

그러나 완충재를 시공한 A구조는 공진주파수가 낮은 대역으로 내려가는 결과를 나타내었다. 각 구조의 고유진동수 변화와 함께 진동가속도레벨의 변화를 보면, 제진재를 시공한 B, C, D구조는 고유진

Table 6 Resonant frequency and acceleration on the bare slab(living room)

	Resonant frequency	Acceleration	Acceleration level
	[Hz]	[m/s <sup>2</sup> ]	[dB]
A	21	0.45	93
B	17	0.34	91
C	27	0.46	93
D	18	0.35	91

Table 7 Resonant frequency and acceleration on the mortar (living room)

	Resonant frequency	Acceleration	Acceleration level
	[Hz]	[m/s <sup>2</sup> ]	[dB]
A	20	0.29	89
B	32	0.04	71
C	33	0.10	80
D	24	0.08	78

동수의 증가와 함께 진동가속도레벨이 25~30 dB 저감되었으나, 완충재를 시공한 A구조는 4 dB 저감되는 결과를 나타내었다.(부록 Fig. 2참조)

각 구조의 변화에 따른 파워 스펙트럼과 시간 영역신호에서도 제진재를 적용한 B, C, D구조는 완충재를 적용한 A구조와 비교하여 진동가속도 응답과장이 짧아지며, 가속도 값도 감소함을 알 수 있었다.(부록 Fig. 3참조)

#### 4.4 고유진동수에서의 감쇠비 비교

제진재 삽입구조에서의 고유진동수의 이동과 진동가속도 응답과장, 가속도 값의 변화와 더불어 각 모드에서의 감쇠비를 Table 10에서 비교하였다. 제진재 삽입시 높은 감쇠비를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4.5 중량충격음 소음레벨 측정 및 분석

Table 11, Fig. 8는 각 구조별 중량충격음 차단성능에 대한 결과를 나타낸 것이다. 역 A특성별 평가

Table 8 Resonant frequency and acceleration on the bare slab (room)

	Resonant frequency	Acceleration	Acceleration level
	[Hz]	[m/s <sup>2</sup> ]	[dB]
A	39	0.56	95
B	30	0.60	96
C	39	0.67	96
D	31	0.53	94

Table 9 Resonant frequency and Acceleration on the mortar (room)

	Resonant frequency	Acceleration	Acceleration level
	[Hz]	[m/s <sup>2</sup> ]	[dB]
A	36	0.38	92
B	42	0.068	77
C	46	0.063	76
D	42	0.028	69

Table 10 Damping ratio

Mode	Bare slab	Damping material
1st	0.015	0.079
2nd	0.01	0.018
3rd	0.013	0.029
4th	0.009	0.027

Table 11 Heavy-weight impact sound level of floor structures

	$L_{i,Fmax,AW}$ [dB]	
	Living room	Room
A	51	50
B	45	45
C	46	48
D	45	44

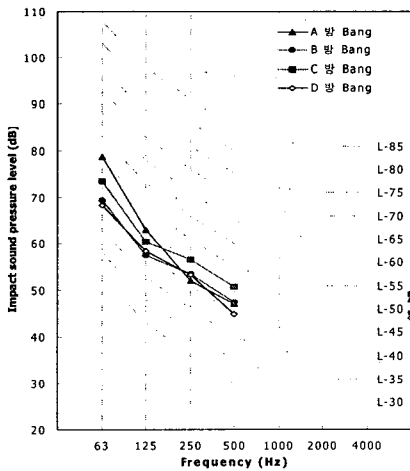
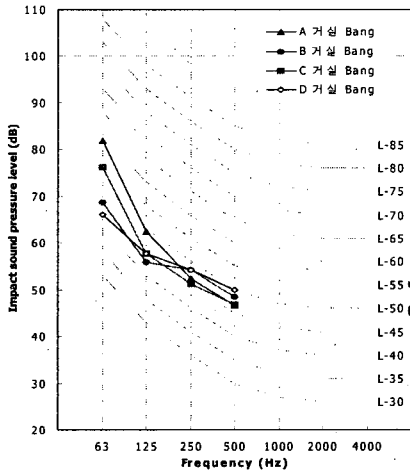


Fig. 8 Impact sound pressure level

결과를 보면 완충재를 사용한 구조(A구조)와 비교하여 제진재를 사용한 구조는 거실과 방 모두 50 dB이하의 성능을 확보하였다. 특히 중량충격원의 에너지 스펙트럼 특성에서 충격에너지가 집중되어 있는 63 Hz 대역 아래에서 완충재를 적용한 구조와 비교하여 제진재를 적용한 B, C, D구조는 음압레벨이 현저히 저감되는 결과를 나타내었다. 이는 진동 측정결과에서

언급한 바와 같이 제진재를 적용한 구조에서 공진주파수의 증가와 더불어 주파수 및 가속도 값이 감소하여 진동 가속도레벨을 감소시키는 결과를 가져왔으며, 음압레벨 또한 감소된 것으로 사료된다.

오픈 셀로 이루어진 폴리프로필렌의 하니컴 구조는 제진재 시공시 상부에 타설하게 되는 경량기포콘크리트와의 일체성 및 강성의 증가에 대한 효과를 증대시키기 위한 시공방법으로 제진재의 두께가 15 mm(B구조)에서 3 mm(C, D구조)로 줄어들더라도 하니컴 구조에 의해 상부구조와 일체화될 경우, 공진주파수와 진동레벨의 저감에 있어 더 유리함을 확인하였으며, 제진재의 현장시공에 있어 상하 구속된 경우, 제진재의 두께가 최소화되더라도 제진성능이 발휘되는 것으로 분석되었다. 방에서의 측정결과는 거실에서의 경계조건과 달리 4면이 구속된 지지조건에 의해 제진재의 감쇠 특성이 다르게 나타난 것으로 사료된다.

### 5. 결 론

이 실험에서 적용한 제진재의 물성실험을 통해 온도에 따른 거동특성을 유추해 볼 수 있었으며, 주파수에 따른 거동도 일반적인 점탄성 재료의 거동과 일치함을 보였다. 또한 제진재의 손실계수는 1.5 ~ 2.3 사이로 고무에 비해 2배 이상의 진동저감효과를 가지고 있었다.

축소 평판시험체에 삽입된 제진층이 상하부면의 바닥 모르타르 및 바닥콘크리트 슬라브와의 접촉 여부에 따라 나타난 진동특성은 제진층이 접촉된 경우, 더 높은 손실계수 값을 보임으로써 더 효과적인 감쇠성능이 나타남을 알 수 있었다.

현장시험 시공결과, 거실과 방에서 제진재를 시공한 구조는 완충재를 시공한 구조와 비교하여 공진주파수가 증가하고 진동가속도레벨이 감소되었으며, 음압레벨의 측정결과, 완충재를 적용한 구조와 비교하여 음압레벨이 현저히 저감되는 결과를 나타내었다. 따라서 제진재를 공동주택에 적용하였을 경우, 충격음을 보다 효율적으로 저감하는 하나의 방안이 될 수 있을 것으로 사료된다.

### 후 기

이 연구는 환경부 “차세대 핵심환경기술개발사

업” (과제번호 : 03-1-11-2-2002)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Ministry of Construction and Transportation, 2001, “Repairing and Reinforcing Techniques for Reducing Floor Impact Sound in Existing Building” .
- (2) Mead, D.J. and Markus, S., 1969, “The Forced Vibration of a Three-layer, Damped Sandwich Beam with Arbitrary Boundary Conditions” ,

Journal of Sound and Vibration, pp. 163~175.

- (3) AHID D Nashif, 1985, “Vibration Damping”
- (4) Norton, M. P., 1989, “Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers” , Cambridge University Press, Cambridge.
- (5) Kim, J. S., Jang, G. S. and Kim, S. W., 1992, “An Experimental Study or the Prediction Method of Floor Impact Sound Insulation Performance in Apartment House Using Impedance Method (II)” , Transactions of the Korean Society of Noise and Vibration Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 21~31.

부 록

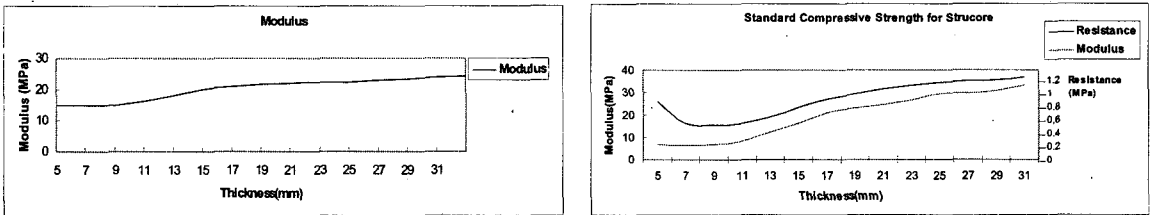


Fig. 1 Properties of polypropylene

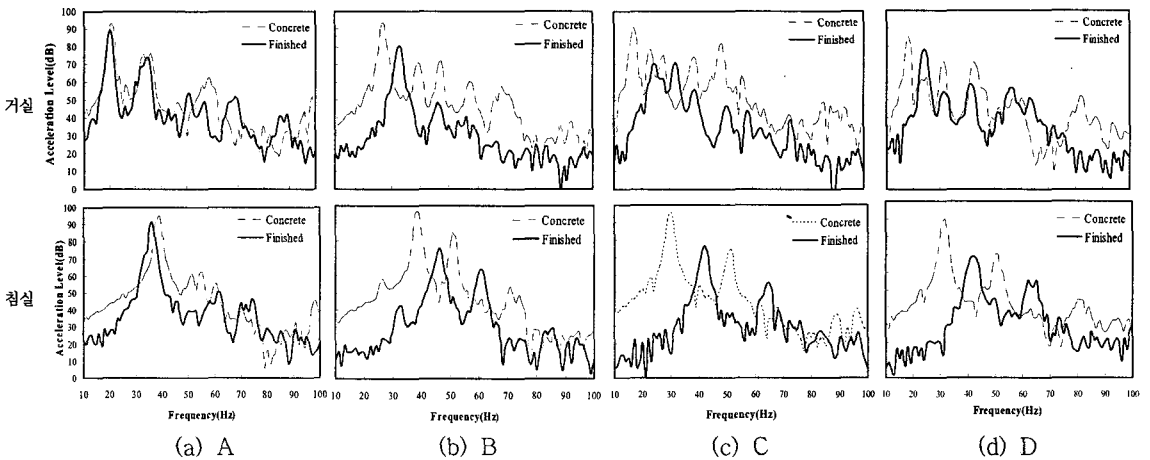


Fig. 2 Response frequency comparison by heavy impact source in households with resilient isolator and damping material installed

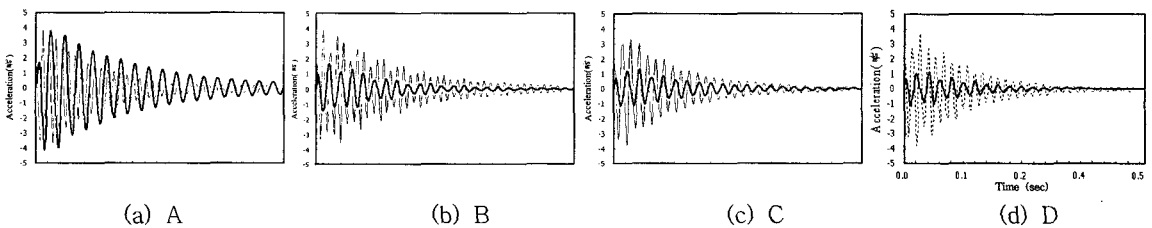


Fig. 3 Time response spectrum (room)