

# 중량 바닥충격음 예측을 위한 진동 전달률 산정 연구

## Assessment of Vibration Transmissibility for Prediction of Heavy Floor Impact Sound

김 하 근† · 김 명 준\*\* · 오 양 기\*\*\*

Ha Geun Kim, Myung Jun Kim and Yang Ki OH

(2002년 10월 18일 접수 : 2003년 5월 9일 심사완료)

**Key Words** : Heavy Floor Impact Sound(중량바닥충격음), Impedance Method(임피던스법), Transmissibility(전달률)

### ABSTRACT

In an apartment buildings, the floor 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 suggest the supplementary formula(equation) and constant  $k$  considering vibration transmissibility in order to predict more precisely heavy floor impact sound by Impedance Method that have been briskly studied in Japan from comparing the measured values with the predicted values. The analyzed results had showed that if the damping material was glass wool or rubber,  $k=5$  was proper and if the damping material was polystyrene foam,  $k > 5$  was desirable.

### 1. 서 론

최근 공동주택의 윗층에서의 소음문제로 아래층의 입주자에게 피해를 주는 경우가 많이 발생하고 있어 주택 건설회사에서는 바닥충격음을 저감하기 위해 여러 가지 방안을 강구하고 있는 실정이다. 이러한 문제를 개선하고 환경분쟁의 소지를 줄이기 위해 최근에는 공동주택의 최대 바닥충격음레벨을 제한하기 위한 법적 규제가 마련되고 있기도 하다. 따라서 향후 바닥충격음을 효과적으로 제어하기 위해서는 설계단계에서부터 바닥충격음 레벨을 예측할 수 있는 보다

정확한 방법이 제시되어야 할 필요가 있다.

본 연구에서는 바닥충격음을 예측하기 위한 기존 예측 방법의 이론을 검토하고, 예측의 정확성을 제고하기 위한 예측 보완 방법을 실험에 의해 제안하고자 한다. 개선된 임피던스법에 의하여 바닥충격음 레벨의 더욱 정확한 예측이 가능하며, 이를 통하여 시공 전 성능평가 및 성능개선에 유용한 자료로 활용될 수 있음이 밝혀졌다.

### 2. 기존 예측 이론 및 진동 전달률

#### 2.1 기존 예측 이론의 개요

임피던스법에 의한 바닥 충격음 예측방법은 국내에서 1993년에 김재수<sup>(4)</sup>에 의해 소개되었으며, 이는 일본 건축학회의 建物の遮音設計資料(1988.8) 자료를 기초로 아래 순서에 의해 바닥 충격음 레벨을 예측하였다. 이 식은 JIS에 규정된 중량충격원에 의해 콘크리트 슬래브를 가진하였을 경우 아래층 수음실에서

† 책임저자, 정회원, 대한주택공사 주택도시연구원 수석연구원  
E-mail : hgkim1@knhc.co.kr

Tel : (031) 738-4738, Fax : (031) 738-4748

\* 정회원, 서울시립대학교 건축도시조경학부

\*\* 정회원, 목포대학교 건축공학과 교수

측정되는 바닥 충격음 레벨을 예측하기 위한 식으로 가진력의 산출, 바닥 슬래브의 기본 임피던스 레벨 산출, 슬래브 가진점별 임피던스특성 산출, 바닥 슬래브의 유효방사면적 산정 등의 순서에 의해 중량 바닥 충격음 레벨을 예측하고 있다. 대표적인 계산식은 다음과 같다.

$$L_{H,F} = 20 * \log F_{rms} - L_{ZT} + 10 * \log S_{eff} + 10 * \log k - 10 * \log A + \Delta C + 152 \quad (1)$$

- $F_{rms}$  : 중량충격원의 충격력 실효치(N)
- $L_{ZT}$  :  $L_Z + \Delta L_Z + Z_T$
- $L_Z$  : 기본 임피던스레벨
- $\Delta L_Z$  : 가진점별 임피던스 레벨 상승량
- $Z_T$  : 공진에 의한 임피던스 레벨 보정량
- $S_{eff}$  : 슬랩의 유효방사면적(m<sup>2</sup>)
- $k$  : 음향방사계수
- $A$  : 수음실의 흡음력(m<sup>3</sup>)
- $\Delta C$  : 소음계의 동특성보정치(dB)

상기 식에서 바닥충격음 레벨은 기본 임피던스 레벨에 의하여 결정되는 데 기본 임피던스 레벨  $L_Z$ 는 다음 식에 의해 구해진다.

$$L_Z = 20 \log Z_b \quad (2)$$

$$Z_b = 8\sqrt{Bm} \approx 2.31 \rho^{1/2} E^{1/2} h^2 \quad (3)$$

- $B$  : 바닥 슬래브 휨강성(N/m<sup>2</sup>)
- $m$  : 바닥 슬래브 면밀도(kg/m<sup>2</sup>)
- $\rho$  : 바닥 슬래브 밀도(등가밀도)(kg/m<sup>3</sup>)
- $h$  : 바닥 슬래브 두께(등가두께)(m)
- $Z_b$  : 바닥 슬래브 기본 임피던스(kg/s)

상기 식으로부터 슬래브의 두께가 두배가 될 경우 바닥충격음레벨(중량충격음)은 12 dB 감소됨을 알 수 있다. 위 식은 단순한 슬래브 면적, 두께 등을 독립 변수로 하여 예측한 식으로서 앞서 언급한 바와 같이 국내외의 많은 논문에 의해 그 신뢰도가 검증되었다. 그러나 완충층 사용이 일반화되어 가고 있는 국내 바닥구조에 대한 예측 이론의 정립을 위해서는 뜬바닥 구조에 의한 진동전달특성을 고려할 필요가 있다고 사료된다.

## 2.2 뜬바닥 구조의 바닥 충격음 예측을 위한 진동 전달률

뜬바닥층의 충격시 뜬바닥층의 강제 변위폭, 즉 충격주파수( $f_n, b = 1/2 \Delta t$ ,  $\Delta t$ 는 충격시간)에서의 곡면 파 파장은 바닥 슬래브의 파장에 비하여 짧게 되므로, 뜬바닥을 통한 슬래브에의 가진 상태를 Fig. 1과 같은 점가진에 의한 집중 정수 단진동계로 생각할 수 있다.

이 계의 운동방정식은 식 (4)와 같으며,

$$F_T = kx + c\dot{x} \quad (4)$$

이는 위상을 고려하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_T = kX' \sin(\omega t - \Psi) + c\omega X' \cos(\omega t - \Psi) \quad (5)$$

식 (5)의 우변 두 항은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 이때 투과된 전달력의 위상  $\Psi'$ 은 식 (7)과 같다.

$$F_T = X' \sqrt{k^2 + (c\omega)^2} \sin(\omega t - \Psi') \quad (6)$$

$$\Psi' = \Psi + \tan^{-1}(-\frac{c\omega}{k}) \quad (7)$$

그러므로 전달력의 최대 진폭 또는 최대값은 다음과 같다.

$$(F_T)_{max} = X' \sqrt{k^2 + (c\omega)^2},$$

$$\text{또는 } (F_T)_{max} = \frac{X_0 \sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (8)$$

여기서  $r = f/f_n$ ,  $\zeta$ : 감쇠계수

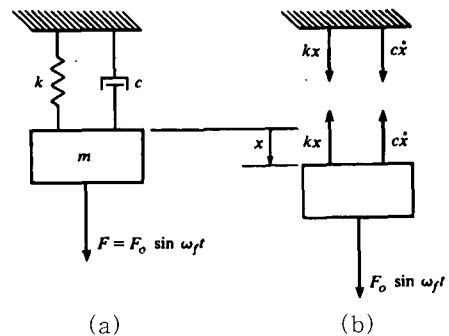


Fig. 1 Free-body diagram of a damped spring-mass system

진동 전달률  $T$ 는 강제 가진력에 대한 최대 전달력의 비로 나타내므로 위 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{(F_T)_{\max}}{(F_0)} = \frac{\frac{1}{k}\sqrt{k^2 + (c\omega_f)^2}}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (9)$$

$X_0 = F_0/k$ 를 식 (9)에 대입하면, 진동 전달률은 진동수비와 감쇠비에 의해 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{\sqrt{1 + (2\xi r)^2}}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}} \quad (10)$$

### 2.3 진동 전달률 적용 조건의 설정

튼바닥층의 바닥 충격음 저감량 예측시 마감모르티층에 외력이 제거된 후 부족 감쇠에 의한 자유진동을 한다고 가정한 식 (10)<sup>1)</sup>을 이용하고 있으나, 본 연구에서는 국내에서 많이 사용되는 온돌 마감층(완충재 위에 질량으로 작용)이 주변 구속 및 무게로 인해 내부손실계수에 변화가 생길 것으로 추정하여 식 (11)과 같이 수정된 식을 제시하였다.

$$T = \frac{\sqrt{1 + (2*k*\xi*r)^2}}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2*k*\xi*r)^2}} \quad (11)$$

이는 감쇠가 있는 자유진동의 경우 부족 감쇠비와 변위<sup>2)</sup>를 살펴보면 아래 그림과 같은 관계가 있으며, 일반적으로 완충층으로 많이 사용되는 고무 계통과, 스티로폼 계통, 글래스울 계통 등이 주변 구속 및 내부 손실계수에 따라 다르게 될 것이라 추정하여 재료별 특성에 따라 전달률에 차등을 줄 수 있는 방법으로 상수  $k$ 값을 적용하여, 식 (10)과 같은 기존 식을 식 (11)과 같이 수정 보완하였다.

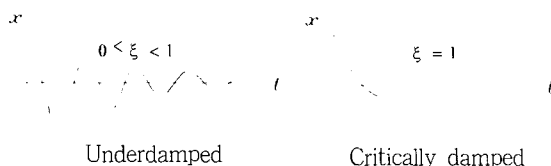


Fig. 2 Damping ratio and displacement

- 1) 정일록 : 소음진동 이론과 실무, 신광문화사, p. 135
- 2) 정일록 : 소음진동 이론과 실무, 신광문화사, p. 142

식 (11)은 식 (10)과 비교할 경우 완충재의 손실 계수  $\xi$  대신  $k*\xi$ 을 대입하였으며, 본 연구에서는  $k$ 값이 1, 2, 3, 5, 10 등으로 변화할 때, 바닥충격음 레벨 예측치를 구하여 이를 실험실에서 실험한 각종 바닥 구조의 충격음 레벨 실측치와 비교하였으며, 가장 오차가 작은  $k$ 값을 제시하고자 한다.

## 3. 예측식의 검증을 위한 실험실 실험

### 3.1 실험개요

국내에서 일반적으로 많이 사용되는 단면구조의 바닥충격음레벨을 예측하고, 특히 튼바닥층의 전달 특성을 파악하고자 시험을 실시하였다. 실험실은 주로 완충재를 사용한 튼바닥층의 바닥충격음 전달 특성을 파악하기 위해 완충재의 두께 및 재질변화를 제외한 기타 모든 측정조건(대상 구조체 조건, 대상바닥의 면적, 수음실의 음장조건, 주변 구속조건 등)을 동일하게 설정하였다.

Table 3 The outline of measurement chamber

▶ Size	3,000 mm(W)×3,900 mm(D)×3,000 mm(H)
▶ Volume	31.2 m <sup>3</sup>
▶ Structure	Wall slab
▶ Thick of slab	150 mm
▶ Thick of wall	200 mm
▶ Door	Sound proofing door
▶ Reverberation time at 500 Hz	0.33 sec
※ Size of specimen :	2,760 mm(W)×3,510 m(D)×100 mm(H)

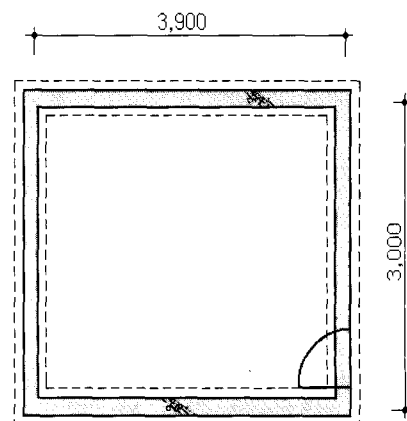


Fig. 3 Shape of measurement chamber(plan)

따라서 본 연구에서는 측정대상 완충재의 충격음 저감효과를 실측하고 이를 예측치와 비교하기 위해 Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 실패(實大) 모델실험실을 축조하여 실험을 실시하였다.

본 측정실은 상부 슬래브 및 벽체의 두께가 각각 150 mm, 200 mm인 철근콘크리트구조로 축조되었으

며, 용적은 약 31.2 m<sup>3</sup>이다. 또한 측정대상 완충재 상부에 설치하는 기본 시편은 100 mm 두께의 철근콘크리트로 이루어져 있으며 시편의 설치 및 제거는 별도로 설치한 hoist crane(용량 5톤)을 이용하였다.

본 연구 대상이 되는 완충층은 국내에서 가장 일반적으로 사용되는 발포 폴리스틸렌류와 무기섬유류, 가교 발포 폴리에틸렌류 등을 사용하였으며, 시험대상 완충재의 종류 및 특성은 Table 4에서 나타난 것과 같다.

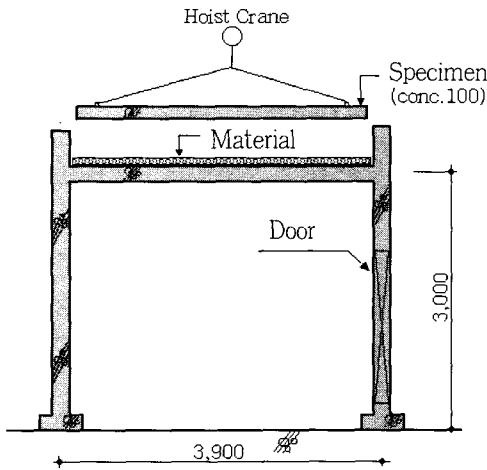


Fig. 4 Shape of measurement chamber(section)

### 3.2 측정방법 및 측정기기

#### (1) 측정방법

바닥충격음레벨의 측정은 KS F 2810 「건축물 현장에 있어서의 바닥충격음 측정방법」을 기준으로 실시하였다. 측정점의 위치는 음원실과 수음실에 대해 대각선 중앙점과 벽체로부터 0.5~1m 정도 떨어진 대각선상의 4점을 포함하여 모두 5점을 각각 선정하여 충격점과 수음점으로 하였다.

측정 및 분석은 바닥면으로부터 1.2m 높이에 설치한 마이크로폰을 통하여 입력된 신호를 2ch Real Time Frequency Analyzer(B&K, 2144)의 자체 memory에 저장한 후 최종적으로 컴퓨터로 분석하였다.

중량충격음 측정은 trigger 기능을 이용하여 매 측정점마다 3회 타격한 충격음레벨을 측정할 수 있도록 측정은 2ch Real Time Frequency Analyzer(B&K 2144)을 사용하였으며, 중량충격음의 경우 setting한 시간조건에 따라 fast 특성으로 0.04초마다 리얼타임으로 각 주파수 값을 동시에 측정/저장하는 trigger 기능을 이용하였다.

Table 4 Resilient materials for measurements

Group	Symbol	Type	Thick (mm)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Damping ratio
Mineral wool(W)	W1	Panel of G.W	15	350	0.3
	W2	G.W	25	100	0.25
Organic wool(PW)	PW1	PE wool	25	80	0.22
	PW2	PE wool	25	100	0.22
Polystyrene (S)	S1	KS1	20	30	0.17
	S2	KS2	20	25	0.18
	S3	KS3	20	20	0.19
	S4	KS4	20	15	0.2
	S5	KS2	40	25	0.19
	S6	KS2+KS2	40	25	0.19
	S7	KS2+KS2	60	25	0.2
PE Foam(E)	E1	Expanded 30 times	10	33	0.2
	E2	Expanded 30 times	20	33	0.21
	E3	Expanded 30 times	30	33	0.22
Composite panel(C)	C1	KS3 20+PE10	30	-	0.22
	C2	Rubberchip +Cork	10	-	0.15

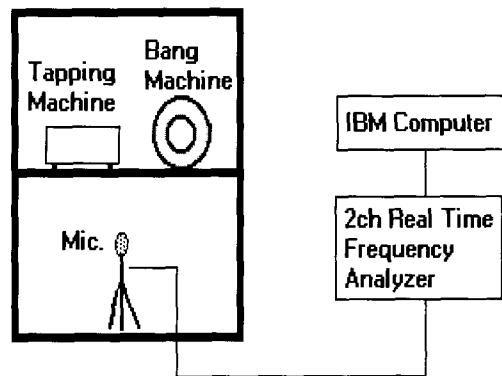


Fig. 5 Measurement system arrangement

1개 trigger 계측 파일은 매 0.04초마다 총 10초 동안 측정된 250개 스펙트럼이 저장되며, 전(全) 측정 주파수대역의 overall 값을 기준으로 시간축상에서 피크치를 나타내는 스펙트럼에서 각 주파수별 측정값을 도출/분석하였다. 이 때 시간축상에서 피크치를 나타내는 스펙트럼은 통상 3개 이상이 포함되게 되며, 피크치를 나타내는 스펙트럼에서 1/1옥타브밴드별 바닥충격음레벨을 읽어 최종적으로 3회 타격시의 평균치로 평가하였다. Fig. 5는 측정에 사용된 측정기기의 구성을 나타낸 것이다.

(2) 측정기기

- Bang Machine(RION, FI-02)
- 2ch Real Time Frequency Analyzer (B&K, 2144)
- 2ch Real Time Frequency Analyzer Program(B&K, BZ5048)
- Preamplifier(B&K, 2639)
- Condenser Microphone(RION, UC-30)
- Pistonphone (RION, NC-72)

4. 측정결과 및 분석

완충층 종류에 따른 바닥충격음레벨을  $k$ 값이 1, 2, 3, 5, 10으로 각각 변화할 때 상기에 기술된 실험실에서의 바닥충격음 예측 레벨과 실측치를 Fig. 6부터 Fig. 21까지에 나타내었다.

본 연구에서는 적절한  $k$ 값을 제시하고자 발포폴리스티렌을 사용한 완충층과 기타 다른 재료를 사용한 완충층으로 대별하여 각종 완충층을 사용하였을 경우 바닥충격음레벨 실측치와 예측치의 차이에 절대값을 구한 후 오차 평균을 구하였다. 분석결과에 따르면,

중량 바닥충격음레벨에 가장 크게 영향을 미치는 63 Hz에서 발포폴리스티렌을 사용한 완충층의 경우  $k=1$ 일 경우, 오차평균이 7.8 dB,  $k=2$ 일 경우 6.7 dB,  $k=3$ 일 경우 6.0 dB,  $k=5$ 일 경우 5.0 dB,  $k=10$ 일 경우 4.2 dB로 나타났다. 이로부터 현행 온돌구조는  $k$ 값이 크게 되어 내부 손실계수값이 크게 될 경우 실측치와 예측치의 차이가 작게 나타났다.

한편 발포폴리스티렌을 제외한 기타 다른 완충재를 사용하였을 때  $k$ 값별 실측치와 예측치의 오차평균을 63 Hz에 대해 살펴보면,  $k=1$ 일 경우 4.7 dB,  $k=2$ 일 경우 3.3 dB,  $k=3$ 일 경우 2.6 dB,  $k=5$ 일 경우 2.3 dB,  $k=10$ 일 경우 2.5 dB로 나타나  $k=5$ 일 경우에 가장 오차가 작게 나타났다.

따라서 본 연구의 결과로부터 어느 정도 탄성이 있는 완충재의 경우는  $k=5$ 가 바람직하다고 판단되며, 발포폴리스티렌처럼 탄성이 작은 재료는  $k=5$  이상이 바람직하다고 판단된다. 본 연구에서 사용된 완충재는 일반적으로 국내에서 가장 많이 사용되는 재료이며, 감쇠계수가 거의 0.15에서 0.3정도 사이에 있음

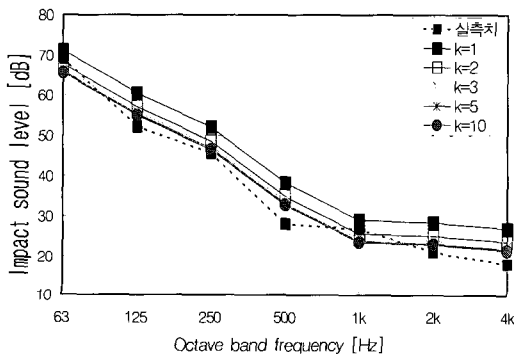


Fig. 6 Mineral fiber board 15 mm, 350 K

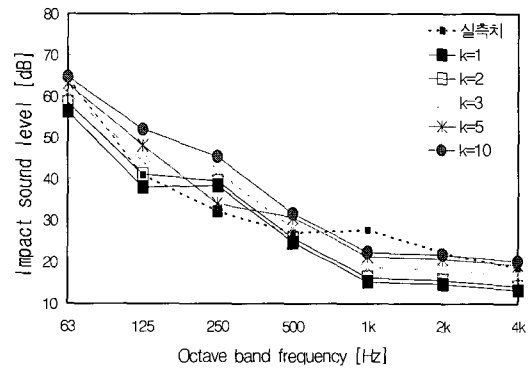


Fig. 7 Glass wool 25 mm, 100 K

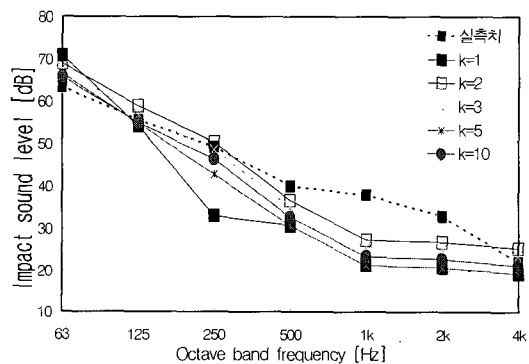


Fig. 8 Polyester 25 mm, 80 K

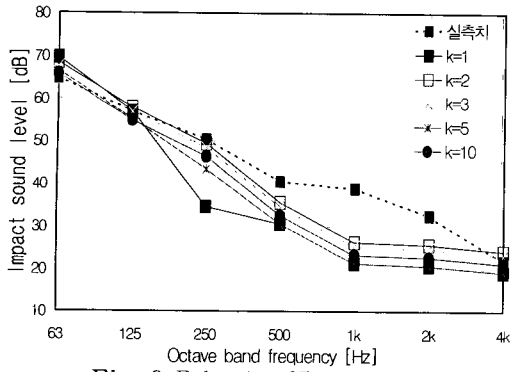


Fig. 9 Polyester 25 mm, 100 K

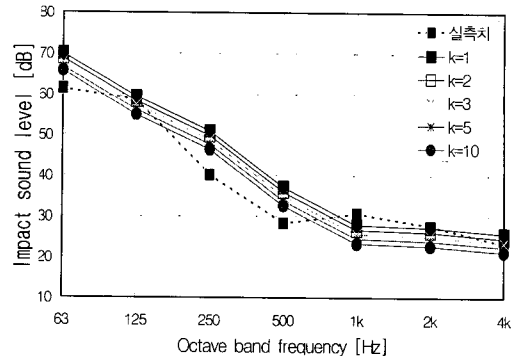


Fig. 13 Polystyren foam(KS4) 20 mm

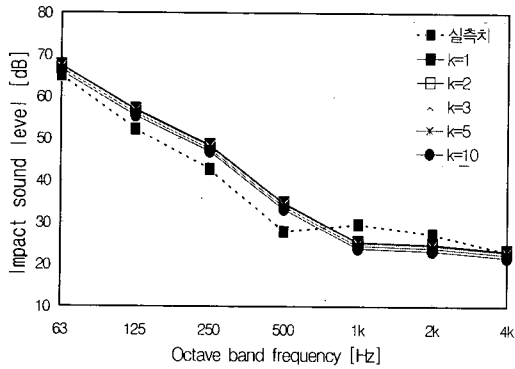


Fig. 10 Polystyren foam(KS1) 30 mm

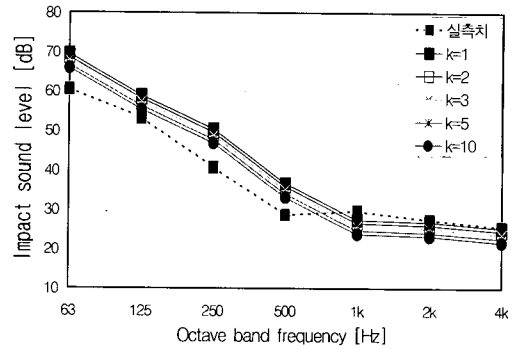


Fig. 14 Polystyren foam(KS2) 40 mm

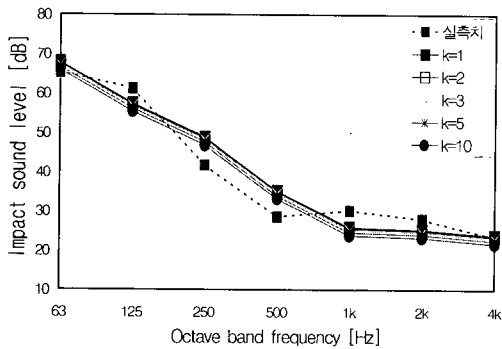


Fig. 11 Polystyren foam(KS2) 20 mm

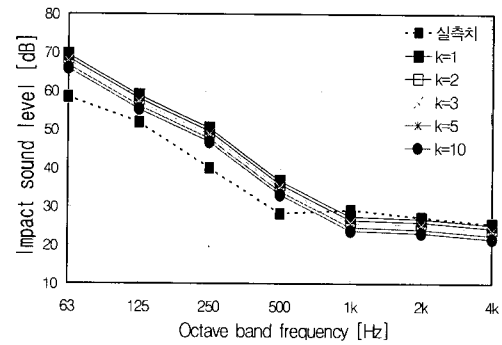


Fig. 15 Polystyren foam(KS2) 20 mm 2 layers

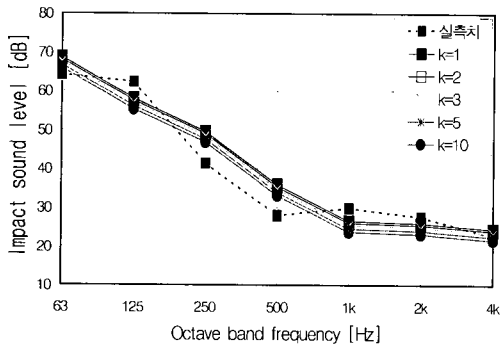


Fig. 12 Polystyren foam(KS3) 20 mm

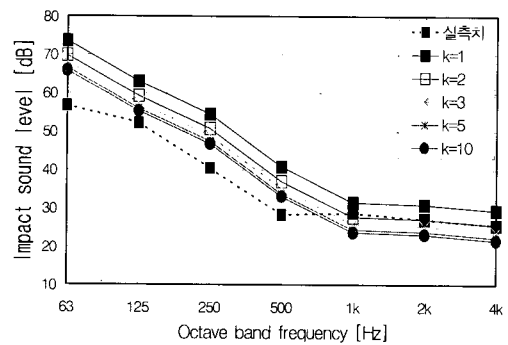


Fig. 16 Polystyren foam(KS2) 20 mm+40 mm

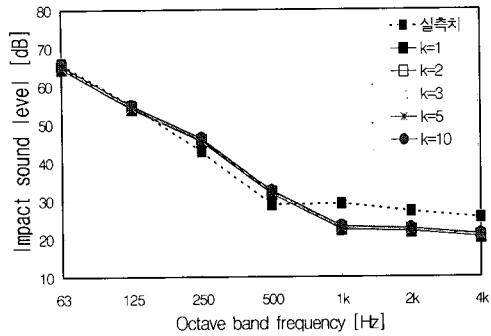


Fig. 17 Expanded polyethylene 10 mm

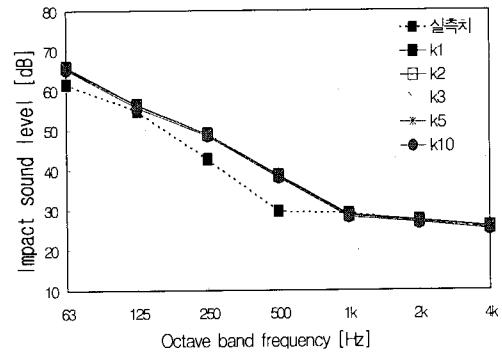


Fig. 21 Rubberchip+cork mixed, 10 mm

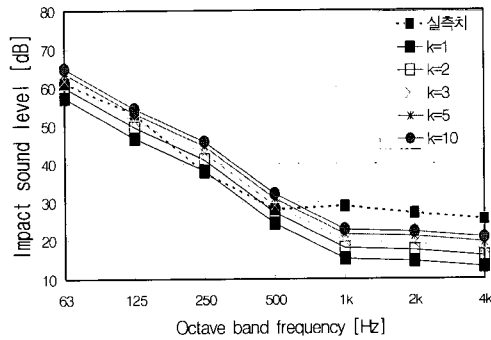


Fig. 18 Expanded polyethylene 30 mm

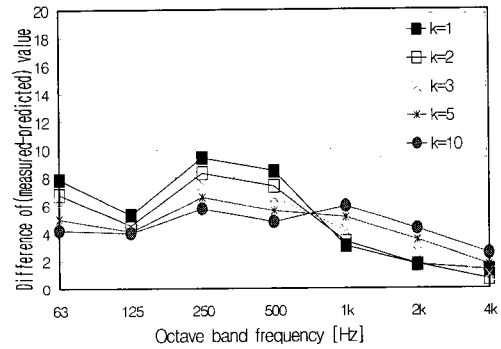


Fig. 22 Average error(polystyren foams)

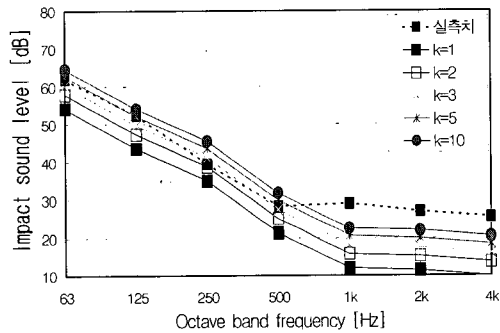


Fig. 19 Expanded polyethylene 20 mm

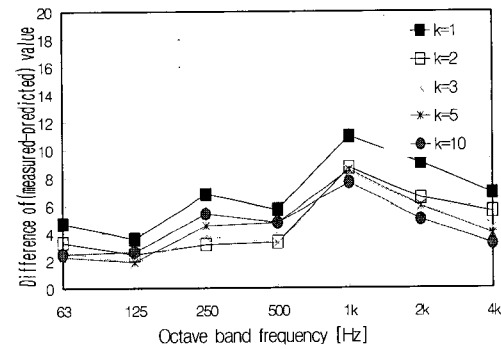


Fig. 23 Average error(fibers and rubber pads)

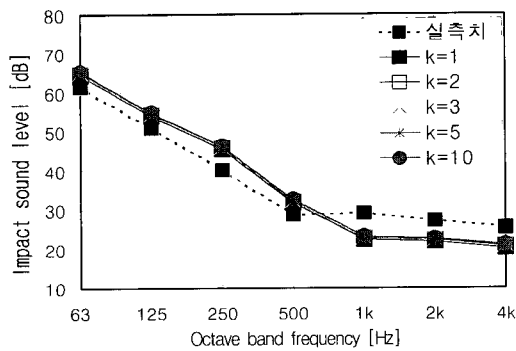


Fig. 20 Polystyren 20 mm+polyethylene 10 mm

을 감안할 때  $k=5$ 가 될 경우 감쇠계수를 포함한 상수는 0.75에서 1.5가 되어 임계감쇠 또는 초과감쇠의 양상을 보이고 있다.

## 5. 결론

바닥충격음을 예측하기 위해 바닥충격음에 영향을 미치는 여러 요인들을 기존 논문을 통하여 고찰한 후

일본을 중심으로 활발히 연구되고 있는 임피던스법에 의한 바닥 충격음 예측 기법을 보다 더 보완하고자 진동 전달률 계산식을 수정보완하였다.

보완식에 새로이 추가된 상수  $k$ 값의 변화에 따라 바닥충격음 레벨 실측치와 예측치의 오차가 다르게 나타났으며, 중량 바닥충격음레벨에 가장 크게 영향을 미치는 63 Hz에서 발포폴리스틸렌을 사용한 완충층의 경우  $k=1$ 일 경우, 오차평균이 7.8 dB,  $k=2$ 일 경우 6.7 dB,  $k=3$ 일 경우 6.0 dB,  $k=5$ 일 경우 5.0 dB,  $k=10$ 일 경우 4.2 dB로 나타났다.

발포폴리스틸렌을 제외한 기타 다른 완충재(유기, 무기섬유, 발포고무류 등)를 사용하였을 때  $k$ 값별 실측치와 예측치의 오차평균을 63 Hz에 대해 살펴보면,  $k=1$ 일 경우 4.7 dB,  $k=2$ 일 경우 3.3 dB,  $k=3$ 일 경우 2.6 dB,  $k=5$ 일 경우 2.3 dB,  $k=10$ 일 경우 2.5 dB로 나타나  $k=5$ 일 경우에 가장 오차가 작게 나타났다.

본 연구의 결과로부터 무기, 유기섬유 또는 고무류와 같은 완충재의 경우는  $k=5$ 가 바람직하다고 판단되며, 발포폴리스틸렌처럼 탄성이 적은 재료는  $k$ 가 5 이상이 바람직하다고 판단된다.

본 연구에서 검토된 완충재는 국내에서 일반적으로 많이 시공되고 있는 재료들에 대해 검토하였으며, 향후

보다 많은 샘플과 현장 등에서 지속적인 실험을 통해 데이터 축적이 이루어질 필요가 있다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

- (1) 木村 羽, 井上勝夫, 中澤眞司, 1990.1, "インピー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
- (2) 日本建築學會編, 1988. 8. 建物の遮音設計資料, 技報堂
- (3) 安岡正人, 1982. 騒音振動対策ハンドブック, 技報堂
- (4) 김재수, 1993, 공동주택 바닥 충격음 차음성능 예측을 위한 실험적 연구, 전남대학교 박사학위논문.
- (5) 정일록, 1995, 소음진동 이론과 실무, 신광문화사.
- (6) 대한주택공사, 2001, "공동주택 바닥충격음 차단성능 기준설정 연구".
- (7) 정갑철, 2002, 바닥충격음 해석에 관한 연구, 한국소음진동공학회 세미나 집, pp 11~24.