

# 공동주택 층간 중량충격소음의 효율적 저감을 위한 바닥구조 감쇠층 두께 선정에 관한 연구

## A Study on Determination of Damping Layer Thickness to Reduce Heavy Impact Noise in Apartment Building Floors

남 대 호† · 신 윤 호\* · 김 광 준\* · 김 민 배\*\*

Dae-Ho Nam, Yun-Ho Shin, Kwang-Joon Kim and Min-Bae Kim

**Key Words :** Sandwich Plate(샌드위치 평판), Damping Layer(감쇠층), RKU Equation(RKU 방정식), Modal Loss Factor(모드 손실인자)

### ABSTRACT

Apartment building floor with a damping layer can be modeled as a sandwich plate. In order to reduce low frequency noise more efficiently due to heavy impact on such a floor, thickness of the damping layer needs to be optimized at the design stage. Modal loss factors are determined in this paper by RKU equation which is popular in sandwich plate theories. Optimum damping layer thickness determined at each mode is weighted so that several modes in the frequency range of interest can be included in a more systematic way. Furthermore, to reflect frequency-dependent characteristics of complex stiffness of the damping layer, an iteration method is proposed in finding modal frequencies.

## 1. 서 론

공동주택에서 발생하는 층간 충격소음은 거주자들의 안락한 생활을 저해하는 요인으로서 이의 저감을 위한 관련 기술 연구가 진행되고 있다. 그러나, 층간 충격소음 저감을 위해 실험적으로 탄성 차음재 삽입<sup>(1)</sup>과 슬라브 두께 증가<sup>(2)</sup>와 같은 방법을 제시하고 있어 효과적인 진동 저감을 기대하기 어렵다. 즉, 전자는 진동 감쇠에 대한 이해 부족에 따른 잘못된 시도이고, 후자는 건축물 높이 증가 즉, 건축비용을 증가시키는 비경제적인 방법이다.

본 연구에서는 공동주택 바닥구조물에 탄성 차음재 대신 감쇠재를 삽입한 구조를 적층평판으로 모형화하여 층간 충격소음 그 중에서도 중량충격을 효과적으로 저감하는 방법을 제안하고자 한다. 감쇠재가 삽입된 바닥구조물은 탄성층 사이에 점탄성 재료가 삽입된 샌드위치 평판과 구조가 동일하여 샌드위치 평판 이론 적용이 가능하다.

샌드위치 평판 이론에서는 감쇠 성능을 나타내는 지표 중의 하나인 손실인자를 제시하고 있으며 이는 각각의 모드에서 정의되므로 모드 손실인자

(Modal loss factor)라고 한다. 샌드위치 평판의 모드 손실인자는 감쇠층 두께 증가에 따라 단순 증가하지 않고 최대점을 지나 감소하게 된다. 샌드위치 평판 이론을 공동주택 바닥구조물에 적용하면 모드 손실인자가 최대가 되는 감쇠층 두께를 결정할 수 있고, 따라서 효율적인 층간 충격소음 저감을 기대할 수 있다.

그러나, 감쇠층의 주파수 의존성 등 샌드위치 평판 이론 적용에 앞서 선결해야 할 문제들이 있다. 본 연구에서는 감쇠층 물성치의 주파수 의존성 반영 방법에 대하여 기술하고 모드 손실인자에 영향을 미치는 여러 인자 중 중요 인자에 대해 검토하려고 한다. 이것을 바탕으로 바닥구조물에 샌드위치 평판 이론식을 적용하여 바닥구조물의 감쇠 성능이 최대가 되는 감쇠층 두께의 선정 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 공동주택 바닥구조물의 진동 특성

### 2.1 중량충격력에 대한 주파수 특성 분석을 통한 유효 입력 주파수 구간 선정

샌드위치 평판의 모드 손실인자는 고유진동수에 서 정의되므로 각 모드마다 모드 손실인자가 최대가 되는 감쇠재의 두께가 결정된다. 따라서 관심 모드 개수 선정이 필요하며, 관심 모드 개수 선정을 위해 중량충격을 측정시 가진원의 유효 입력

† 책임저자, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : coolnam77@kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3064, Fax : (042) 869-8220

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* (주)AVT 기술연구소장

주파수 구간 파악이 필요하다. 중량충격음 측정시 사용되는 표준 중량충격력은 KS F 2810-2<sup>(3)</sup>에서 Fig.1 과 같이 제시하고 있다.

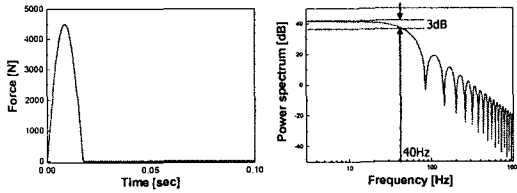


Fig.1 Input force profile and power spectrum of standard heavy impact source

본 연구에서는 Fig.1 에서 에너지 스펙트럼의 충격력 시작점에서 3dB 감소하는 40Hz 까지를 유효 입력 주파수 구간으로 선정하였다.

## 2.2 공동주택 바닥구조물에 대한 모드 시험

공동주택 바닥구조물의 진동 특성 파악을 위해 실제 공동주택 구조물을 대상으로 모드 실험을 수행하였다. 실험은 34 평 거실에서 슬라브(150mm)만으로 이루어진 구조와 마감물타르(40mm), 경량기포콘크리트(40mm), 감쇠재(3mm), 슬라브(150mm)로 이루어진 구조에 대하여 수행하였으며, 가진원은 표준 중량충격원과 충격망치(PCB108C50, 최대 하중 22kN)를 사용하였고 실험 결과는 각각 Fig.2, Fig3 과 같다.

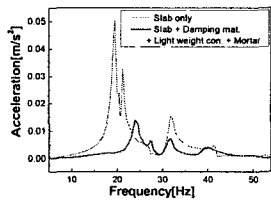


Fig.2 Response to standard heavy impact source

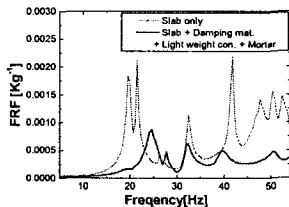


Fig.3 Frequency response function

바닥구조물의 넓이에 따라서 40Hz 내에 존재하

는 모드 개수가 변할 수 있지만, 일반적인 공동주택이 20~50 평임을 감안한다면 34 평은 그 평균 넓이로 생각할 수 있으므로 관심 모드 개수를 4 개로 정하였다. 그리고, 표준 중량충격원으로 가진시 얻은 응답 스펙트럼과 주파수응답함수의 비교를 통해 살펴보면, 40Hz 이상에 존재하는 모드가 가진 되지 않음을 관찰할 수 있다.

공동주택 바닥구조물의 모드 형상 관찰을 위해 0.5m 간격으로 63(9x7)개 지점에서 주파수응답함수를 측정하였다. Fig.4 에서 볼 수 있듯이, 바닥구조물의 진동은 평판의 굽힘 진동과 유사한 모드 형상을 가짐을 알 수 있다. Fig.4 의 짧은 변은 내력벽으로, 고정단과 단순지지단의 복합적인 경계조건을 나타내고 있으며, 긴 변은 내력벽이 아닌 경계조건으로, 자유단과 유사한 경계조건을 보인다(내력벽 위치: Fig.15 참조).

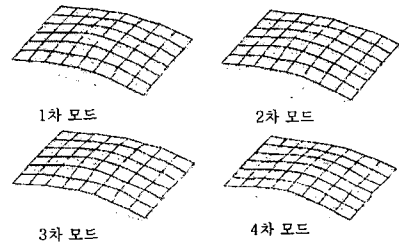


Fig.4 Mode shapes of living room

## 3. 감쇠재가 삽입된 바닥구조에 대한

### 진동 특성 분석법

Table 1 에 의하면 콘크리트의 손실인자는 감쇠재에 비하여 1/30 배 이하로 작고, 탄성계수의 경우 감쇠재에 비해 5000 배 이상 크다. 이러한 바닥구조는 샌드위치 평판의 구조와 동일하므로 샌드위치 평판 이론 적용이 가능하다.

Table 1 Material property

Material	Loss factor	Storage Modulus [Mpa]
Damping material	1.40~2.20	1~5
Concrete	0.02~0.06	25000~30000

샌드위치 평판에 대한 이론은 반세기에 걸쳐 연구되어 많은 이론식이 유도되었다. 본 연구에서는 간단하면서도 널리 사용되는 RKU 방정식을 적용하여 모드 손실인자가 최대가 되는 감쇠재 두께를 결정하고자 한다. 우선 RKU 방정식에 대해 기술하고 기존의 샌드위치 보/평판 이론식에서 다루지 못하였던, 점탄성 재료 동탄성계수의 주파수 의존성 반영 필요성 및 반영 방법을 기술하고자 한다.

### 3.1 공동주축 바닥구조물에 대한 RKU 방정식의 적용

RKU 방정식<sup>(4,5)</sup>은 Fig.5 에 나타난 샌드위치 보를 등가의 물성치를 갖는 단일 보로 간주하고 단순 지지 경계조건에 대하여 등가 굽힘강성을 얻어서 모드 손실인자(Modal loss factor), 고유진동수(Natural frequency)를 결정한다.

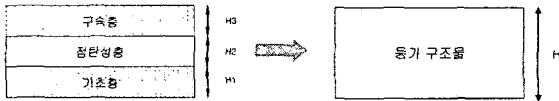
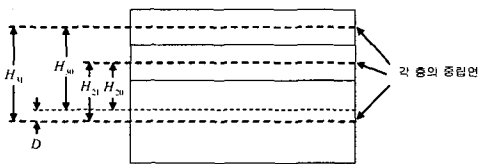


Fig.5 Beam having equivalent material property of sandwich beam

RKU 방정식에서는 Fig.5 의 구속층, 점탄성층, 기초층으로 이루어진 각 층 간에 미끄러짐이 없음을 가정하였고, 구속층과 기초층은 탄성층으로 가정하여 굽힘 진동에 의해 압축·인장변형이 발생하며, 두 층이 수직 방향에 대해 이루는 굽힘 각은 같다고 가정하였다. 또한, 기초층과 구속층 사이에 삽입된 점탄성층은 굽힘 진동에 의한 압축·인장변형과 전단변형이 같이 일어난다고 가정하였다.

RKU 방정식에서 결정되는 등가 굽힘강성은 식 (1) 과 같고 Fig.6 에 각 변수들의 의미를 나타내었다.

$$B^* = E_1 \frac{H_1^3}{12} + E_2 \frac{H_2^3}{12} + E_3 \frac{H_3^3}{12} - E_2 \frac{H_2^2}{12} \left( \frac{H_{31} - D}{1+g} \right) + E_1 H_1 D^2 + E_2 H_2 (H_{31} - D)^2 + E_3 H_3 (H_{31} - D)^2 - \left[ \frac{E_2 H_2}{2} (H_{31} - D) + E_3 H_3 (H_{31} - D) \right] \left( \frac{H_{31} - D}{1+g} \right) \quad (1)$$



$B^*$  : 샌드위치 보/평판의 등가 굽힘강성  
 $E_1, E_2$  : 샌드위치 보/평판 탄성층의 탄성계수  
 $E_3$  : 샌드위치 보/평판 점탄성층의 동탄성계수

$$g = \frac{G_2}{E_3 H_3 p^2}$$

$G_2$  : 점탄성층의 복소전단계수  
 $p$  : 샌드위치 보/평판의 특이해

Fig.6 Element of sandwich beam/plate

샌드위치 보의 모드 손실인자( $\eta_n$ )와 고유진동수( $\omega_n$ )는 등가 굽힘강성을 이용하여 다음과 같이 결정된다.  $p, \rho$  와  $H$  는 각각 샌드위치 보의 특이해 밀도와 두께를 나타낸다.

$$\eta_n = \frac{\text{Im}(B^*)}{\text{Re}(B^*)} \quad (2)$$

$$\omega_n = p^2 \sqrt{\frac{\text{Re}(B^*)}{\rho H}} \quad (3)$$

$p$  는 등가 굽힘강성을 얻는 과정에서, 샌드위치 보를 단일 보로 간주하고, 단일 보의 운동방정식에 단순지지 경계조건을 적용하여 얻어진 특성방정식의 해이다. 따라서, 단순지지 외의 경계조건에서 얻어진 단일보의 특성방정식의 해,  $p$  를 샌드위치 보의 등가 굽힘강성에 적용하여 근사적으로 단순지지 외의 경계조건에 대하여 모드 손실인자와 고유진동수를 결정할 수 있다.

RKU 방정식은 샌드위치 보에 대한 이론식이므로 바닥구조물에 적용하기 위해서 RKU 방정식을 평판으로 확장하였고, 앞서 언급한 방법을 적용하여 근사적으로 단순지지 외의 경계조건을 적용하였다. RKU 방정식을 바닥구조물에 적용하여 감쇠재 두께 변화에 따른 하나의 모드에 대하여 손실인자의 변화를 살펴보았다. 모드 손실인자는 감쇠재의 두께 증가에 따라 Fig.9 와 같이 최대점을 지나 감소하게 된다. 샌드위치 평판의 감쇠는 가운데 삽입된 점탄성층의 전단변형에 의해 발생한다는 점을 상기해 볼 때, 감쇠층의 두께가 얇은 경우, 전단 변형 자체가 일어나기 어렵고, 두께가 두꺼운 경우, 전단 변형률이 작아지게 된다. 따라서 두 경우 모두 감쇠효과가 작아지게 되며 그 중간에 최대값이 존재한다.

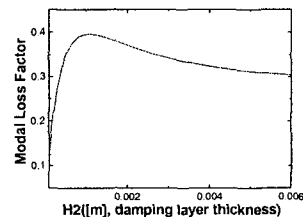


Fig.9 Modal loss factor with regard to increase in damping layer thickness

### 3.2 점탄성재료 동탄성계수의 주파수 의존성을 반영한 샌드위치 보/평판 이론식

샌드위치 보/평판 가운데 삽입되는 점탄성 재료

의 동탄성계수는 주파수 의존성을 가진다. 그러나, 기존의 샌드위치 보/평판 이론식은 이를 반영하지 못하여 차선책으로 관심 주파수 구간 내에서 점탄성 재료 동탄성계수의 평균값을 사용하고 있다. 그러나, 주파수 의존성을 무시할 수 없는 Fig.10 과 같은 경우, 관심 주파수 구간 내에서 평균값을 사용하는 것은 부적절하다. Fig.11 에 나타나 있듯이 모드 손실인자가 최대가 되는 점탄성층의 두께가 관심 주파수 구간 평균값을 기준으로 양 끝값은 최대 75% 차이를 보이고 있어 점탄성재료의 주파수 의존성 반영이 필요함을 관찰할 수 있다.

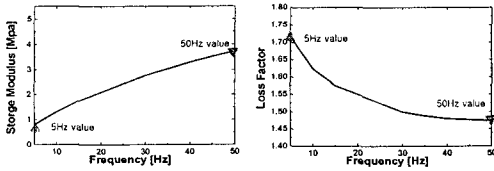


Fig.10 Material property of viscoelastic material

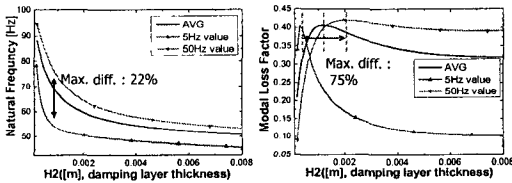


Fig.11 Damping layer thickness which make modal loss factor maximum by using average value and both end value of frequency of interest

본 연구에서는 반복법(Iteration)을 통해 점탄성 재료의 주파수 의존성을 반영하고자 한다. 우선 점탄성 재료의 주파수에 따른 동탄성계수를 곡선 보정(Curve fitting)을 통해 식(4)과 같이 나타내었다.

$$E_2'(\omega_n) = (z1 + z2 \times \omega_n + z3 \times (\omega_n)^2) + j(z4 + z5 \times \omega_n + z6 \times (\omega_n)^2) \quad (4)$$

샌드위치 보/평판 이론식에 주파수 의존성을 반영하는 것은 고유진동수와 고유진동수 계산을 위해 사용된 점탄성 재료 동탄성계수의 주파수가 고유진동수와 같아지는 것이다. 따라서, RKU 방정식에 주파수 의존성을 반영하기 위해 오차 함수(Error function)를 식(5)와 같이 선정하고, Fig.12 에 나타난 반복법을 통해 주파수 의존성을 반영하고자 한다.

$$Err(\omega_n) = RKU(\omega_n) - \omega_n \quad (5)$$

점탄성 재료의 동탄성계수의 주파수 의존성을 반영한 결과와 평균값을 적용한 결과를 Fig.13 에 나타내었는데, 모드 손실인자가 최대가 되는 감쇠층 두께 결정에 있어서 점탄성 재료 동탄성계수의

주파수 의존성 반영이 필요하다고 사료된다.

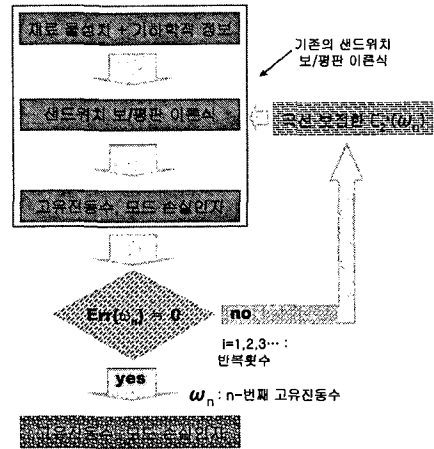


Fig.12 Procedure to reflect frequency dependency of dynamic stiffness of viscoelastic material

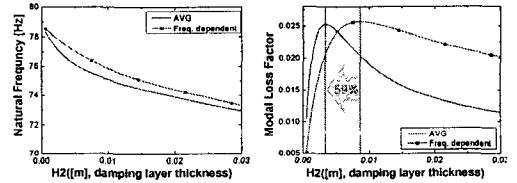


Fig.13 Damping layer thickness to maximize modal loss factor by reflecting frequency dependency and by average of dynamic stiffness of viscoelastic material

#### 4. 공동주택 바닥구조물 감쇠층의 최적 두께 선정

본 장에서는 공동주택 바닥구조물의 첫번째 모드 손실인자가 최대가 되는 감쇠층 두께를 결정하고 나머지 관심 모드에 대하여 결정된 감쇠층의 두께를 취합하여 바닥구조물의 감쇠층 두께를 결정하는 것은 4.2 절에서 기술하고자 한다.

4.1 첫번째 모드에 대한 감쇠층 최적 두께 선정 면적과 중횡비에 대해 살펴보면, Fig.14 에 보인 바와 같이 바닥 면적 2 배 증가에 따라 모드 손실인자가 최대가 되는 감쇠층 두께가 2 배 이상 증가하고, 1:1 의 중횡비에서 KS 규격 최대 중횡비인 1:1.5 까지 증가에 따라 감쇠층 두께가 35% 줄어들음을 알 수 있다. 따라서, 면적이 감쇠층 두께 결정시 중횡비에 비하여 중요한 설계변수임을 알 수 있으므로

중형비를 1:1 로 고정하고 면적의 영향만을 고려하고자 한다.

공동주택의 바닥구조물의 경계조건은 내력벽의 경우 단순지지와 고정단 두 경계조건에 대한 계산 결과의 평균값을, 내력벽으로 볼 수 없는 창문을 갖는 벽이나 베란다의 경우는 자유단으로 가정하였다. 이러한 거실 및 방의 경계조건은 Fig.15 와 같다.

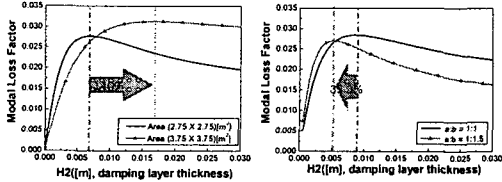


Fig.14 Damping layer thickness, making modal loss factor maximum, with respect to area and aspect ratio

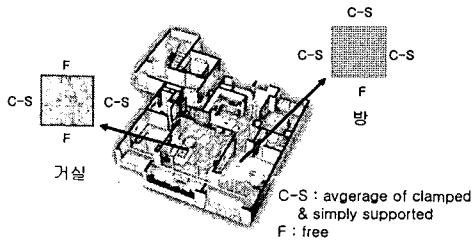


Fig.15 Boudary condition of living room and bedroom

Fig.16 은 앞서 결정한 중형비, 경계조건에 대하여 거실과 방의 면적을 증가시켜 가면서 첫 번째 모드 손실인자가 최대가 되는 감쇠층 두께를 1 차 함수로 곡선 보정(Curve fitting)하여 나타낸 것이다.

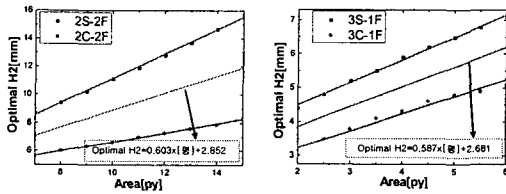


Fig.16 Optimal damping layer thickness of 1<sup>st</sup> mode with regard to area of living room and bedroom

#### 4.2 유효 입력 주파수 구간 내 모드에 대한 감쇠층의 최적 두께 선정

유효 입력 주파수 구간(0~40Hz)내에는 여러 개의 모드가 존재하며, 4.1 절에서 기술한 과정을 통해 각 모드에 대해 모드 손실인자가 최대가 되는 감쇠층의 두께를 결정할 수 있다. 각 모드에서 결정되는

서로 다른 감쇠층의 두께를 취합하여 하나의 대표적인 감쇠층 두께를 선정하기 위해, 본 연구는 주파수응답함수에서 모드별 기여도에 따라 가중치를 부여하고자 한다. 즉, 각 모드에서 결정된 감쇠층의 두께에 기여도에 따른 가중치를 부여하여 감쇠층 두께를 결정하고자 한다. Fig.17 은 2 장에서 언급한 바 있는 공동주택의 거실에 대해 중앙 지점을 포함한 5 지점의 주파수응답함수를 공간 평균한 결과이며, Table 2 는 각 모드에 최대역(Half-power bandwidth)내의 RMS 를 정규화하여 모드별 기여도를 정리한 내용이다. 바닥구조의 감쇠성능을 최대한으로 하는 감쇠층 두께( $H_2$ )는 식(6)처럼 모드별 기여도와 모드 손실인자가 최대가 되는 모드별 감쇠층의 두께를 곱한 후 더 함으로서 결정하였다. 여기서  $W_i$  는  $i$  번째 모드의 기여도를 나타내고,  $H_i^{opt}$  는  $i$  번째모드에서 결정된 감쇠층 두께를 나타낸다. 위의 과정을 바탕으로 거실과 방의 감쇠성능이 최대가 되는 감쇠층 두께를 결정하여 Fig.18 에 나타내었다

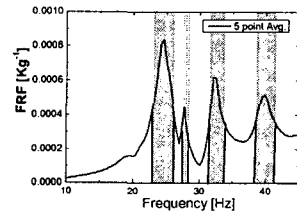


Fig.17 Five-point spatial average of FRF at living room floor

Table 2 Contribution of each mode

모드	기여도
1 <sup>st</sup>	0.49
2 <sup>nd</sup>	0.06
3 <sup>rd</sup>	0.22
4 <sup>th</sup>	0.23

$$H_2 = H_2^{1st} \times W_1 + H_2^{2nd} \times W_2 + H_2^{3rd} \times W_3 + H_2^{4th} \times W_4 \quad (6)$$

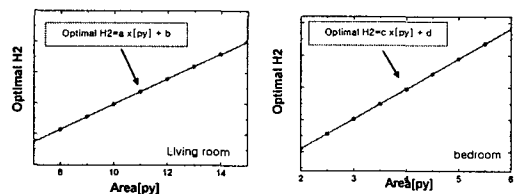


Fig.18 Optimal damping layer thickness for living room and bedroom

## 5. 결 론

본 연구에서는 층간 중량충격소음 저감을 위하여 감쇠층이 삽입된 공동주택 바닥구조에 샌드위치 평판 이론식을 적용하여 감쇠성능을 최대로 하는 감쇠층의 두께 선정 방법을 제시하였다.

샌드위치 평판 이론식 중 RKU 방정식에 점탄성 재료 동탄성계수의 주파수 의존성을 반영하여 각 모드 손실인자를 최대로 하는 감쇠제의 두께를 결정하였다. 모드 별 가중치를 부여하여 각 모드에서 결정된 감쇠제 두께를 취합하여 바닥구조의 감쇠층 두께 결정법을 제안하였다.

## 참고문헌

- (1) 김경우, 최경석, 최현중, 양관섭, 2004, “바닥충격음 저감방안에 따른 성능평가”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp.131~136.
- (2) 정갑철, 이성호, 2003, “바닥충격음 완화를 위한 저감기술”, 대한환경공학회 춘계학술연구발표회, pp.754~761.
- (3) 한국표준협회, 2001, KS F 2810-2 바닥충격음 차단 성능 현장측정방법 제 2 부 : 표준 중량충격원에 의한 방법.
- (4) Ahid D. Nashif, David I. G. Jones and John P. Henderson, 1985, “Vibration Damping”, A Wiley-Interscience publication.
- (5) D. Ross, Eric E. Ungar, E. M. Kerwin, ASME(1959), 49-88 “Damping of plate flexural vibrations by means of viscoelastic laminae”.