

제진층의 두께변화에 따른 CLD 구조의 진동응답 측정

Measurements of the vibration responses of CLD structures varied in thickness of the damping layer

이신영[†] · 유승엽^{*} · 전진용^{**} · 김승준^{***} · 박준홍^{***}

Sin Young Lee, Seung Yup Yoo, Jin Yong Jeon, Seung Joon Kim and Junhong Park

Key Words : Damping material(제진재) Beam Transfer Function Method(보 전달함수법) Wave Propagation Characteristics(파동진과특성)

ABSTRACT

Visco-elastic damping material for reducing heavy-weight floor impact noise and vibration in reinforced concrete structures was tested according to its thickness in the damping layer. The effect of damping material was compared with 20, 15, 10 and 5mm thickness. The wave propagation characteristics was measured for suggestion of an efficient method to reduce the floor impact noise. The method was proposed using the flexural wave propagation characteristics. The result showed that reduction of the thickness of damping layer made a slight difference; the natural frequency moved to higher frequency and the amplitude increased at low frequencies with 5mm thickness of damping material.

1. 서론

층간 소음은 공동주택의 바닥판에 가해지는 충격에 의해 발생하는 고체전달음(structure-borne sound)으로 그 저감을 위해서는 바닥판의 진동전달 메커니즘에 대한 이해가 필수적이다. 특히 바닥판을 구성하는 콘크리트와 몰탈 그리고 바닥충격을 저감재료 등의 동특성, 특히 파동진과특성을 측정하는 것이 중요하다.⁽¹⁾

일반적으로 바닥충격을 저감을 위해 완충재가 이용되며, 이때 완충재가 삽입된 바닥판의 공진주파수는 저주파 대역으로 이동하는 경향을 보이게 된다. 그러나 완충재를 바닥판에 삽입할 경우, 63Hz 대역 이하의 공진주파수가 저주파 대역으로 이동하면서 가속도 레벨의 크기(amplitude)가 증가하는 것으로 나타났다.⁽²⁾

따라서 최근에서는 완충재의 저주파 대역에서의 진동 및 소음 저감효과를 보완하기 위해 진동 저감에 탁월한 감쇠성을 가지고 있는 제진재를 바닥충격음 재료로 사용하기 위한 연구가 진행되었다. 정영 등의 연구에서는 제진재를 바

닥판에 삽입할 경우, 바닥판의 공진주파수는 증가하지만 63Hz 이하의 저주파 대역에서의 진동 및 소음레벨은 감소하는 것으로 나타났다.⁽²⁾ 남대호 등⁽³⁾은 RKU 방정식을 이용하여 제진재의 적정두께를 산정하고 이를 바닥구조의 각 모드에 대한 기여도에 대응하여 최적두께를 산출하였다. 그러나 바닥판을 구성하는 주요 재료인 콘크리트의 동특성이 반영되지 않았으며, 이론적인 방법에 의한 예측에 의존하여 실험결과와의 비교 검증이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 보 전달함수법을 적용하여 콘크리트와 제진재가 삽입된 복합층의 동특성을 측정하였다. 보 전달함수법은 굽힘 진동의 파동진과특성을 이용하기 때문에 종래의 종방향 진동에서의 계측방법보다 낮은 주파수 범위에서의 파동진과특성의 계측이 가능하다.⁽⁴⁾ 제진재 두께에 따른 진동저감 효과를 살펴보기 위해 제진층의 두께를 20, 15, 10 그리고 5mm의 두께로 조정하였으며, 두 개의 보 사이에 제진재를 삽입하여 보 구조물의 진동응답과 파동진과 특성을 분석하였다.

2. 보 전달함수법을 이용한 동특성 측정

복잡한 구조물의 굽힘에 대한 파동 전달 특성과 동특성을 측정하기 위해 제안된 전달함수법을 이용하여 구조물의 동특성을 분석하였다.⁽⁵⁾

구조물의 진동소산을 모델링하기 위해 다음과 같은 복소

[†] 교신저자 ; 한양대학교 건축환경공학과

E-mail : 2sin0@hanyang.ac.kr

Tel : (02) 2220-1795

* 한양대학교 건축환경공학과

** 한양대학교 건축대학 부교수

*** 한양대학교 기계공학과

강성 값을 사용한다.

$$\hat{D}(w) = D(w)[1 + i\eta_D(w)] \quad (1)$$

여기서 D 는 굽힘 강성이며 η_D 는 손실계수이다. 굽힘 변형에 대해 전달변형과 회전 관성이 무시할 만하다고 할 때 굽힘 강성은 아래 식(2)와 같은 오일러 보 이론을 적용한 4계 편미분 방정식을 이용하여 모델링 할 수 있다.

$$D \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + M_b \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

식(2)를 만족시키는 보 방정식은 식 (3)과 같다. 여기서 \hat{k}_b 는 복소(complex) 파수이다.

$$\hat{w}(x) = \hat{A}_1 \sin \hat{k}_b x + \hat{A}_2 \cos \hat{k}_b x + \hat{A}_3 e^{\hat{k}_b(x-L)} + \hat{A}_4 e^{-\hat{k}_b x} \quad (3)$$

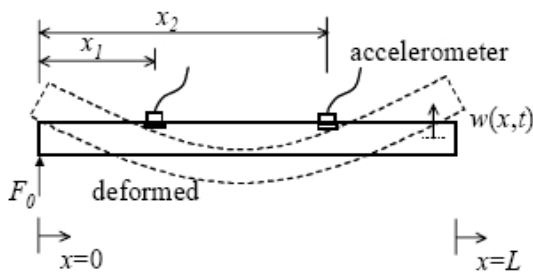


Fig 1. 자유-자유 경계조건 보의 진동측정

그리고 Fig 1.에 표시된 바와 같이 양단 자유의 경계조건을 나타내는 다음 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{D} \frac{\partial^3 \hat{w}(L)}{\partial^3 x} = F, \quad \frac{\partial^2 \hat{w}(0)}{\partial^2 x} = 0, \\ \frac{\partial^2 \hat{w}(L)}{\partial^2 x} = 0, \quad \frac{\partial^3 \hat{w}(0)}{\partial^3 x} = 0 \end{aligned} \quad (4a-d)$$

이러한 경계조건을 적용함으로써 자유-자유 경계조건하에서 보 전달함수를 구할 수 있다.⁽⁶⁾ 또한 이 전달함수로 Newton-Raphson 법을 사용해 복소 파수를 얻을 수 있고 식 (5)와 같은 복소 굽힘 강성을 구할 수 있다.

$$\hat{D} = \frac{\omega^2 M_b}{\hat{k}_b^4} \quad (5)$$

2.1 단일 콘크리트 보

본 실험에서는 일반적인 공동주철의 복합구조에 많이 사용되는 종류의 콘크리트 보 4개를 사용하였으며 각 콘크리트 보의 제원은 Table 1.과 같다. 단일 콘크리트 보의 진동 응답 측정을 위해 Fig 2.와 같이 임팩트해머(B&K, Type 8206)로 콘크리트 보의 끝단을 가진하고 가속도계(Endevco, 2250-A) 3개를 임팩트해머로 가진하는 반대면의 끝단에서 각각 18.8mm의 등간격으로 배치하여 진동 가속도 응답을 측정하였다.

Table 1. 콘크리트 보의 제원

Beam No.	M _b (kg/m)	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)
1	4.04	940	40	40
2	4.10	940	40	40
3	3.97	940	40	40
4	4.08	940	40	40

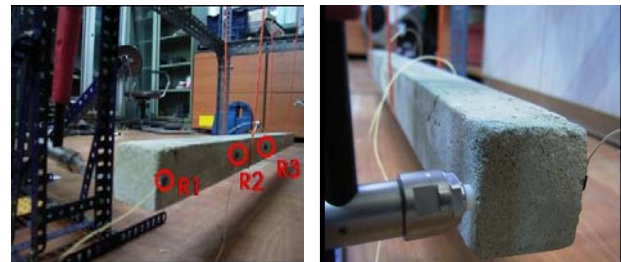


Fig 2. 단일 콘크리트 보 측정 세팅

2.2 제진재가 삽입된 샌드위치 콘크리트 보

샌드위치 콘크리트 보를 구성하기 위해 제작된 빔들 가운데 밀도가 비슷한 2, 4번 보를 선택하였으며, 두개의 보 사이에 제진재를 삽입하여 CLD(constrained layered damping) 형태의 샌드위치 콘크리트 빔을 Fig 3.과 같이 구성하였다.



Fig 3. 제진재가 삽입된 샌드위치 콘크리트 보

제진재의 두께별 샌드위치 콘크리트 보의 진동저감효과를 알아보기 위해 Table 2.와 같이 제진재 층의 두께를 달리하여 측정을 진행하였다. 제진재의 두께는 약한 열을 제진재 층에 가하여 제진재 층의 연성을 증가시키고 보 양쪽에 압력을 가하여 두께를 점차 줄이는 방법으로 조절되었다. 측정은 단

일 콘크리트 보 실험과 동일하게 이루어졌다.

Table 2. 샌드위치 콘크리트 보의 제원

제진재 두께 (mm)	M _b (kg/m)	Length (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)
20	8.58	940	40	100
15	8.48	940	40	95
10	8.38	940	40	90
5	8.28	940	40	85

3. 측정결과

단일 콘크리트 보 4개와 제진재가 삽입된 샌드위치 콘크리트 보의 동특성 측정은 B&K Pulse(Type 4165) 장비를 통해 이루어졌으며, 각 시료별로 40번의 주파수 응답 값을 평균하여 분석하였다. 주파수 대역은 1~1,600Hz까지 살펴 보았으며, 각 신호의 Auto Spectrum과 Cross Spectrum을 이용하여 전달함수를 계산, 분석하였다.

3.1 단일 콘크리트 보의 동특성

단일 콘크리트 보의 측정결과, Fig 5.에서와 같이 각 보의 1차, 2차 그리고 3차 고유주파수의 크기(Magnitude)와 위상(Phase)은 유사하게 나타났다. 각 보간의 경미한 차이는 각 보의 콘크리트 밀도에 의한 것으로 사료된다. 첫 번째 고유진동수의 경우 100Hz 부근에서 관측되었으며, 이를 바탕으로 복소 곱힘 강성과 손실계수의 유효 값들은 대략 50Hz부터 측정될 것으로 예상되었다.

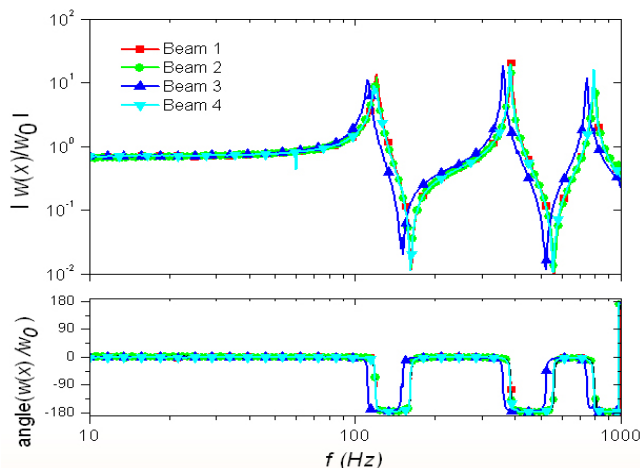


Fig 5. 단일 콘크리트 보의 전달함수

Fig 6.은 전달함수법으로 계산한 단일 콘크리트 보 4개의 복소 곱힘 강성과 손실계수이며 예상했던 바와 같이 50Hz 이상의 주파수 대역에서부터 유효 값을 보였다. 곱힘 강성

은 이전의 연구결과에서와 같이 $8 \times 10^3 \text{ Nm}^2$ 수준으로 나타났으며 손실계수도 0.01 수준으로 나타났다. 이전 연구에서 몰탈층의 손실계수는 0.01 수준으로 나타나⁽¹⁾ 댐핑처리를 할 경우, 우수한 제진효과를 기대할 수 있음을 기대할 수 있었다.

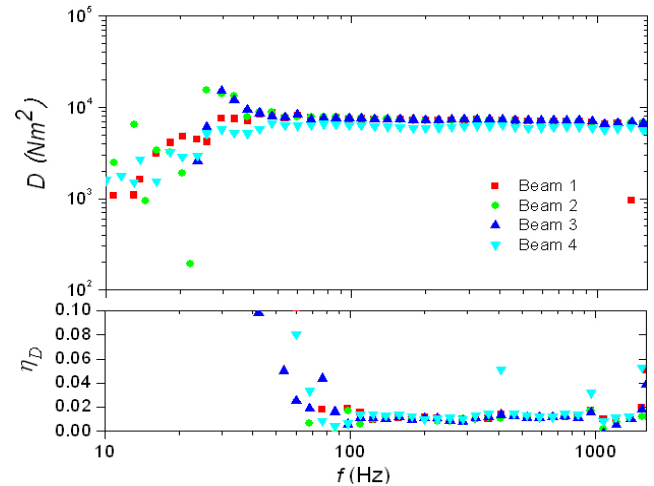


Fig 6. 단일 콘크리트 보의 곱힘강성과 손실계수

3.2 샌드위치 콘크리트 보의 동특성

제진재가 삽입된 샌드위치 콘크리트 보의 측정결과 Fig 7.과 같이 제진재 두께가 20~10mm인 경우 1차 고유주파수가 단일 콘크리트 보에 비해 조금 상승한 140Hz 부근에서 관측되었으나 제진재 5mm두께의 경우에는 다른 두께의 경우보다 1차 고유주파수가 30Hz정도 높은 170Hz 부근에서 관측되었다.

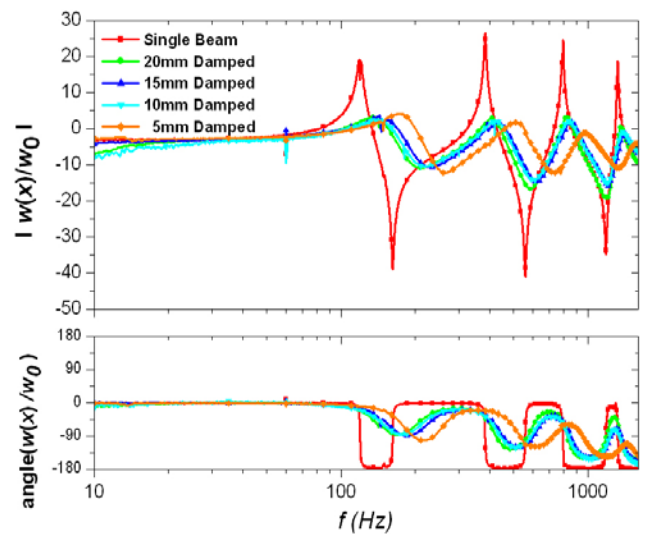


Fig 7. 샌드위치 콘크리트 보의 전달함수

Table 3.은 제진재 두께에 따른 저감효과 및 고유진동수의 변화를 나타낸 측정결과로 제진재를 삽입한 콘크리트 보가 단일 콘크리트 보에 비해 각 모드별 저감효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 3. 제진재 두께 변화에 따른 영향

제진재 두께		20mm	15mm	10mm	5mm
저감효과 (dB)	1차 고유주파수	16.1	15.5	16.4	15.0
	2차 고유주파수	23.3	24.5	23.9	24.4
	3차 고유주파수	20.8	22.2	22.1	23.1
	4차 고유주파수	17.8	19.8	17.6	22.5
고유 진동수 (Hz)	1차 고유주파수	136	143	146	174
	2차 고유주파수	409	432	423	512
	3차 고유주파수	822	854	839	977
	4차 고유주파수	1369	1403	1380	1573

제진재 두께가 10~20mm 일 경우 제진재의 삽입에 의한 진동저감 효과는 유사하게 나타났다. 그러나 두께가 5mm일 경우에는 저주파 대역인 1차 고유주파수에서의 저감량이 15dB로 다른 두께에 비해 상대적으로 적었으나 2차 고유주파수에서의 저감량은 24.4dB로 비슷하였으며 그 이상의 주파수에서는 1~3dB정도 저감량이 오히려 증가하였다. 제진재가 삽입된 콘크리트빔의 고유진동수는 콘크리트 빔의 고유진동수와 비교하였을 때 5~20mm 두께에서 모두 증가하는 것으로 나타났다.

샌드위치 콘크리트 보의 복소 굽힘 강성과 손실계수 산정에 관한 연구는 현재 진행 중으로 향후 샌드위치 보에 삽입된 제진재만의 거동특성에 관해 연구 또한 진행될 예정이다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 제진재와 같은 점탄성 재료가 삽입된 구조의 물성 측정방법을 콘크리트 구조 내에서 적용 및 응용하여 적절한 두께를 산정할 수 있는 방법론을 제시하였고 측정결과를 분석하였다.

본 연구결과 콘크리트 구조체내에서의 제진재 두께에 따른 저감효과와 고유진동수의 차이는 20mm 두께에서 10mm 두께로 변화함에 따라 크지 않았다. 그러나 5mm 두께로 변화 시켰을 경우의 저감효과는 1차 고유주파수 대역에서 5mm이상 두께의 제진재에서의 저감효과보다 적었으나 고주파 대역인 3차 와 4차 고유주파수에서의 저감효과가 크게 나타났다. 그 이유는 제진재의 두께가 10mm이상일 경우 상, 하부층의 콘크리트 보 사이의 유동성을 가지는 제진재가 층을 분리시키는 댐핑효과에 의해서 나타난 것

으로 판단된다. 그러나 제진재의 두께가 5mm인 경우 그 두께가 얇아 상, 하부층의 콘크리트 보 사이에서 유동성을 가지지 않고 서로를 일체화 시켜 공진주파수가 상승하며 저주파에서의 진동응답에 대한 저감효과가 줄어들며 1,000Hz 이상의 주파수 대역에서는 저감효과가 크게 나타나는 것으로 사료된다.

본 실험결과를 통해 알 수 있었듯이 제진재의 경우 공진주파수를 상승시키지만 저주파 대역에서 소리의 크기가 저감되는 효과를 얻을 수 있었다. 따라서 바닥충격음 저감을 위한 바닥 재료의 선정도 중요하나 재료 두께에 따라 공진주파수 값의 변화나 소음의 크기가 달라지기 때문에 저감 재료의 두께에 대한 논의의 여지가 필요하다.

향후 전산해석적인 방법을 이용하여 제진층이 삽입된 구조에 대해 해석할 경우에도 본 실험의 결과가 유용하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 “표준화 기술개발사업” (과제 번호 : 10023489)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) 김승준, 박준홍, 유승엽, 정영, 전진용, 2007, “보 전달 함수법을 이용한 콘크리트 구조물의 동특성 측정”, 추계학술대회논문집, 한국소음진동공학회, CD-ROM
- (2) 정영, 전진용, 2006, “제진재가 삽입된 바닥구조의 진동 특성에 대한 실험연구”, 한국소음진동공학회논문집, 제16권 제10호 1036-1043
- (3) 남대호, 신윤호, 김광준, 김민배, 2005, “공동주택 층간 중량충격소음의 효율적 저감을 위한 바닥구조 감쇠층 두께 선정에 관한 연구”, 추계학술대회논문집, 한국소음진동공학회, 936-941
- (4) J. Park, Y. Jeong, P. J Lee, and J. Y. Jeon, "Wave propagation characteristics of concrete structures and its application to sound radiation analysis", Euronoise 2006, Tampere, Finland, May 30 - June 1, 2006.
- (5) J. Park, "Transfer function methods to measure dynamic mechanical properties of complex structures." J. Sound Vib. 288, 57-79 (2005)
- (6) T. Pritz, "Transfer function methods for investigating the complex modulus of acoustic materials: Rod-like specimen", J. Sound Vib. 81, 359-376 (1982)