

보 전달함수법을 이용한 콘크리트 구조물의 동특성 측정

Measurement of Dynamic Properties of Concrete Structures Using Beam Transfer Function Methods

김승준*·박준홍†·유승엽**·정 영***·진진용**
Seung Joon Kim, Junhong Park, Seung Yup Yoo, Yeong Jeong, Jin Yong Jun

Key Words : Beam Transfer Function Method(보 전달함수법), Wave Propagation Characteristics(파동전파특성)

ABSTRACT

The floor impact noise of concrete structures in apartments buildings is affected from the flexural wave propagation characteristics. Accordingly, the measurement of wave propagation characteristics is required for suggestion of efficient method to reduce the impact noise. The purpose of this article is to propose an experimental technique to measure dynamic properties of concrete structures. The method was proposed using the flexural wave propagation characteristics. Wave speeds, bending stiffness and their loss factors are estimated from which the vibration dissipation capabilities are investigated. Several different concrete beam structures were custom-built for measurement. The damping treatments using viscoelastic materials for reducing noise generation are also tested. The beam transfer function of the damped beam is predicted using the compressional damping model from which the mechanism of the vibration energy dissipation is investigated.

1. 서론

아파트와 같은 공동주택에서 발생하는 층간소음의 절감이나 내·외부로부터의 방음성능은 날이 갈수록 그 중요성이 증대되고 있다. 특히 공동주택의 층간 소음은 콘크리트 슬래브에 가해지는 충격에 의해 발생하므로 그 전달 메커니즘과 모달 특성을 이해해야 관련 연구를 진행할 수 있다. 따라서 먼저 콘크리트 구조물의 동특성, 특히 파동전파특성을 측정하는 것이 필요하다.

어떤 물질의 동특성을 측정할 수 있는 방법에는 여러 가지가 있다. 그러나 콘크리트 구조물의 동특성을 특히 높은 주파수에서 비교적 손쉽게 측정할 수 있는 방법은 표준화 되어 있지 않다. 그래서 Junhong Park⁽¹⁾은 현실적인 조건들을 지닌 콘크리트 구조물의 동특성을 계측할 수 있는 방법을 소개했다. 전달함수를 사용한 이 방법은 횡방향 진동의 파동전파특성을 이용하기 때문에 종래의 종방향 진동에서의 계측방법보다 낮은 주파수 범위에서의 파동전파특성의 계측이 가능하다. 때문에 가청 주파수 범위 내에서 콘크리트 구조물의 동특성을 얻어내기 위해 적합하고 실험 오차에 대한 민감도 또한 낮다.

본 연구에서는 여러가지 콘크리트 보를 준비하여 이들의 횡 방향 진동으로부터 파동전파특성을 측정하였다. 그리고 양단 자유 경계조건하에 임팩트 해머를 사용해 진동을 유발하여 빔의 서로 다른 지점의 전달함수를 얻었다. 이렇게 얻은 전달함수를 통해 파동전파특성과 동적강성, 손실계수를 주파수 영역에서 계산해 내었다. 콘크리트, 보 는 종 방향 진동에서 보다 횡 방향 진동에서의 고유 진동수가 더 낮기 때문에 가청 주파수 범위에서 동특성을 얻는 것이 가능하다. 또한 감쇠 처리된 콘크리트 보를 사용하여 측정된 손실계수로부터 공동 주택의 층간소음 저감 방안에 대한 접근도 시도한다. 또한 전단감쇠모델 보다 좀더 두꺼운 감쇠층과 구속층을 가진 샌드위치 보의 동적응답을 예측할 수 있는 압축감쇠모델의⁽²⁾ 전달함수와 실험에서 얻은 전달함수를 비교한다.

2. Beam Transfer Function Method

(보 전달함수법)

건축물 바닥에서 발생하는 중량 충격음은 바닥의 구조적, 기하학적 변수들에 따라 다르긴 하지만 대개 10 Hz 정도에서 수백 Hz 정도까지이다. 소음 발생특성분석을 위해 먼저 복잡한 구조물의 굽힘에 대한 파동전파특성을 이해해야만 한다. 이러한 이해를 위해 J.Park⁽³⁾은 복잡한 구조물의 동특성 측정을 위한 전달함수법을 개발하였다. 구조물의 진동소산을 모델링 하기 위해 다음과 같은 복소강성 값을 사용 한다.

† 한양대학교 기계공학부 음향진동연구실(교신저자)
 E-mail parkj@hanyang.ac.kr
 Tel : (02) 2220-0424

* 한양대학교 기계공학부

** 한양대학교 대학원 건축환경공학과

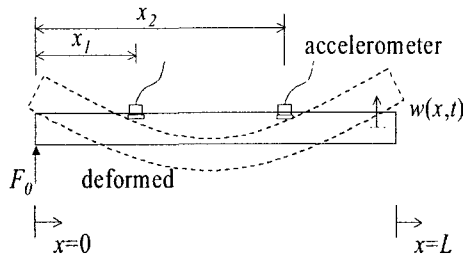


그림 1. 자유-자유 경계조건 보의 가속도계를 이용한 진동측정

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

여기서 \$D\$는 굽힘 강성이며 \$\eta_D\$는 손실계수이다. 굽힘 변형에 대해 전단변형과 회전 관성이 무시 할만 하다고 할 때 굽힘 강성은 아래 식(2)와 같은 classical 보 이론을 적용한 4계 편미분 방정식을 이용하여 모델링 할 수 있다.

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

식(2)를 만족시키는 보 방정식은 식(3)과 같다.

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

여기서 \$\hat{k}_b\$는 식 \$\hat{k}_b = (\omega^2 M_b / D)^{0.25}\$에서 얻을 수 있는 각주파수와 관련된 복소 파수이다. 그리고 그림 1에 표시된 바와 같이 양단 자유의 경계조건을 나타내는 다음 식과 같다.

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

이러한 경계조건을 적용함으로써 자유-자유 경계조건 보 전달함수를 구할 수 있다.⁽⁴⁾ 또한 이 전달함수로 Newton-Raphson 법을 사용해 복소 파수를 얻을 수 있고 식(5)와 같은 복소 굽힘 강성을 구할 수 있다.

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

3. 측정결과 및 고찰

3.1. 콘크리트 보의 동특성 측정.

실험에 사용된 콘크리트 보의 제원은 표 1에 나타내었고, 보의 진동 응답 측정에는 가속도계 (Endevco model 2250-A)를 사용하였다.

Beam No	\$M_b\$ (kg/m)	Width (cm)	Thickness (cm)	Length (cm)
1	17.6	10	10	40
2	18.05	10	10	40
3	18.9	10	10	40
4	16.55	10	10	40
5	18.2	10	10	40
6	18.15	10	10	40
7	18.7	10	10	40
8	19.1	10	10	40
		Radius (cm)		
9	18	5		40
10	18.4	5		40
11	18.15	5		40
12	18.1	5		60
13	18.4	5		60
14	18.17	5		60

표 1. 콘크리트 보의 제원

그림 2에서 보는 와 같이 길이 40 cm 사각단면 보는 1300 Hz 부근에서 첫번째 고유진동수가 관측되었고, 이를 바탕으로 복소 굽힘 강성과 손실계수의 유효 값들은 대략 600- 700 Hz 부터 측정될 것으로 예상되었다.

그림 3을 보면 단면이 원형인 40 cm 길이의 보는 1300 Hz 부근, 60 cm 보는 600 Hz 부근에서 첫번째 고유진동수가 관측되었고, 복소 굽힘 강성과 손실계수의 유효 값은 40 cm 보의 경우 600-700 Hz 부근, 60 cm의 보는 300- 400 Hz 부근에서부터 측정될 것으로 예상되었다.

그림 4와 그림 5는 보 전달함수법으로 계산된 복소 굽힘 강성과 손실계수이며 모두 예상했던 주파수범위에서부터 유효 값을 보이기 시작했다. 그러나 각각 특정 주파수 이상의 고 주파수 영역에서는 주파수가 증가함에 따라 측정된 굽힘 강성 값이 감소하였다. 그 이유는 콘크리트 보의 전단 변형 때문이며, 이러한 문제점을 해결하고, 고 주파수 영역에서 보다 정확한 계측하려면 전단변형이 고려된 Timoshenko 보 이론을 사용하여야 한다.⁽³⁾

그림 6은 파동전파특성을 나타내주는 파동속력과 손실계수를 나타낸 것이다. 600 Hz 부근에서부터 유효 값들이 얻어지며, 주파수가 증가함에 따라 부드럽게 증가하는 모습을 보이나 측정 범위 이상의 고 주파수 영역에서는 그 증가세가 전단변형의 영향으로 더욱더 둔화될 것이다.⁽³⁾

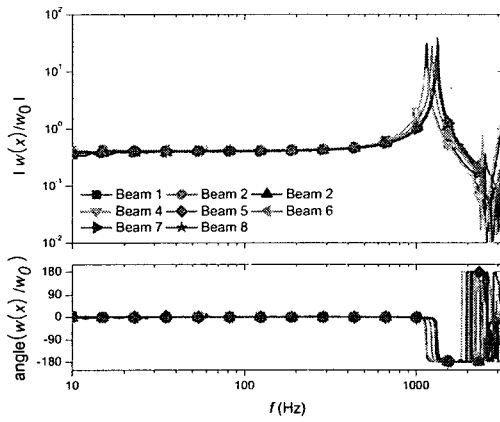


그림 2. 길이 40 cm 사각단면 보의 전달함수

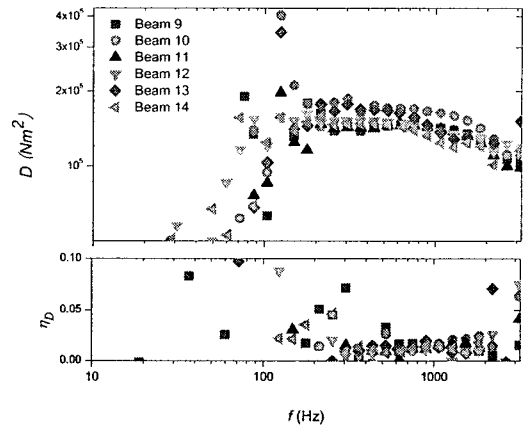


그림 5. 길이 40, 60 cm 원형단면 보의 굽힘강성과 손실계수

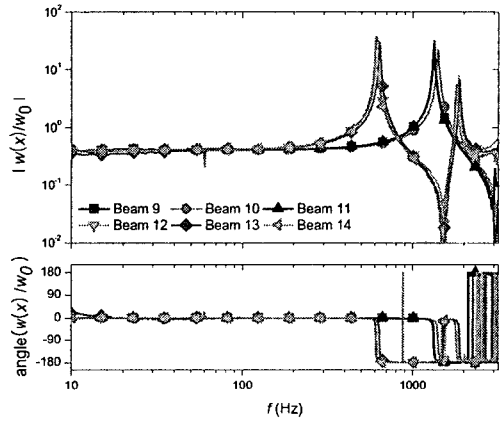


그림 3. 길이 40, 60 cm 원형단면 보의 전달함수

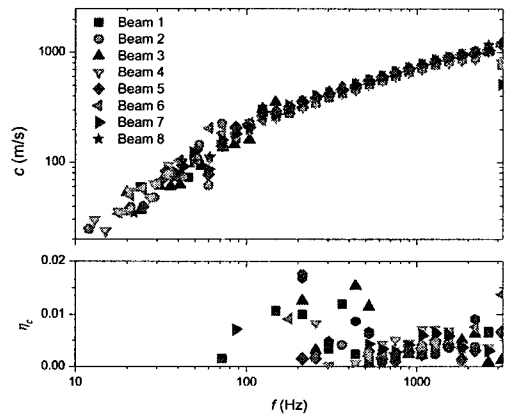


그림 6. 길이 40 cm 사각단면 보의 파동속력과 손실계수

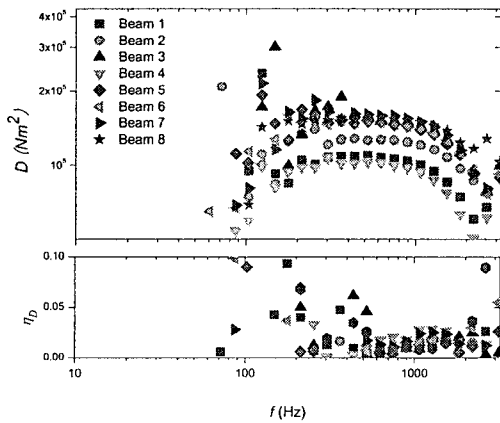


그림 4. 길이 40 cm 사각단면 보의 굽힘강성과 손실계수

3.2. 감쇠 처리된 콘크리트 보의 동특성 계측

비감쇠 처리된 보는 단일 보, 감쇠 처리된 보의 샌드위치 보(그림 7)이다. 보의 단위길이당 질량 M_b 는 22.5 kg/m이며 점탄성층의 M_b 는 0.777 kg/m이다.

그림 8 에는 두 보의 전달함수를, 그림 9. 에는 굽힘 강성과 손실계수를 나타내었다. 여기에서 주목할 점은 감쇠 처리된 보는 진동 에너지 저감의 척도인 손실계수가 증가되었으며 이를 보 전달함수법으로 측정할 수 있다는 것이다. 이는 점탄성 감쇠층을 사용해 콘크리트 구조물의 진동과 충격 소음을 줄이는 연구에 매우 유익한 도움이 될 것이다.

그림 10 은 압축감쇠모델과 감쇠 처리된 콘크리트 보의 전달함수를 비교한 것이다.

압축감쇠모델에서 필요로 하는 점탄성층의 복소

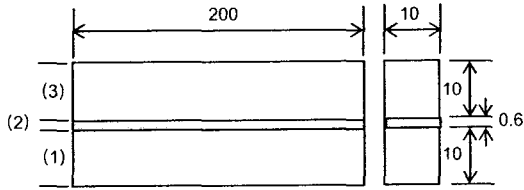


그림 7. 감쇠 처리된 보의 모델 (단위: cm)
 (1) 콘크리트층, (2) 점탄성층, (3) 콘크리트층

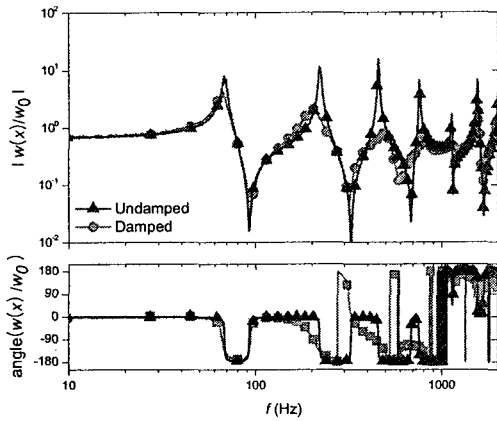


그림 8. 비감쇠, 감쇠 처리된 길이 2 m 사각단면 보의 전달함수

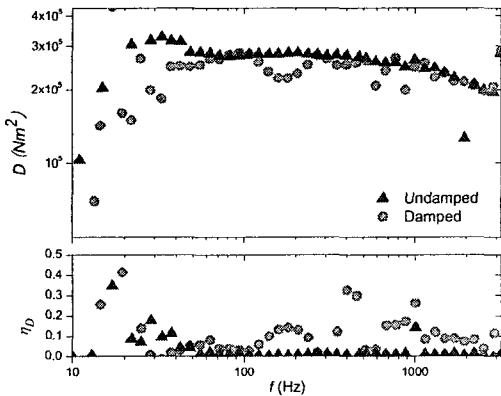


그림 9. 비감쇠, 감쇠 처리된 길이 2 m 사각단면 보의
 굽힘강성과 손실계수

영률 E_v 는 $0.48 f^{0.47} [1 + i(1.8 - 0.39 \log(f))]$ MN/m² 을 사용하였다. 대체적으로 600 Hz 이하의 저 주파수 영역에서는 두 전달함수간 특징이 유사한 것으로 보이나 그 이상의 영역에서는 정확히 일치하지는 않는다. 이는 압축감쇠모델이 감쇠 처리된 콘크리트 구조물의 고 주파수 영역에서의 동특성 예측에는 부적절하다는 것을 의미한다. 그러나 중량 충격음이 크게 영향을 미치는 주파수 영역에서 동특성 예측에는 압축감쇠모델이 큰 도움을 줄 것으로 보인다.

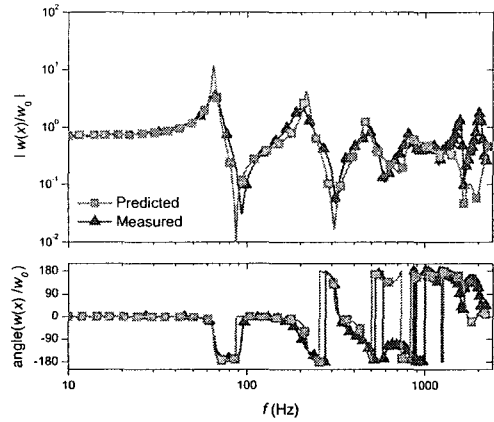


그림 10. 감쇠모델과 감쇠 처리된 길이 2 m 사각단면 보의 전달함수

4. 결론

보 전달함수법을 이용하여 콘크리트 구조물의 파동전파특성을 이용해 가청 주파수 내에서 콘크리트 구조물의 동특성을 측정하였다. 강성 실험에서 많이 사용되는 다양한 형태의 콘크리트 보를 사용하여 보 전달함수법으로 가청 주파수 영역에서 물성치를 측정하였다. 길이가 긴 보에 비해 제작이 간단하며 실험이 용이하나 비교적 높은, 제한된 주파수 영역에서 동특성이 관측되었다. 콘크리트 구조물의 진동 저감을 위한 한 방법으로 연구되고 있는 샌드위치 보 모델의 특성 측정을 위해 보 전달함수법을 적용하였다. 제진재로 처리된 샌드위치 보의 경우 중량충격음이 발생하는 영역에서 얻어진 손실계수가 크게 증가하는 것을 확인하였다. 추후 샌드위치 보의 진동 특성을 활용한 전달 함수법의 적용이 필요하다.

참고문헌

- (1) Junhong Park, Yeong Jeong, Pyong Jik Lee, and Jin Yong Jeon, "Wave propagation characteristics of concrete structures and its application to sound radiation analysis," *Euronoise 2006*, Tampere, Finland, May 30 - June 1, 2006.
- (2) B.E.Douglas and J.C.S.Yang, "Transverse compressional damping in vibrotory response of elastic-viscoelastic-elastic beams," *AIAA.J.* Vol. 16, No. 9, September, 1978
- (3) J. Park, "Transfer function methods to measure dynamic mechanical properties of complex structures," *J. Sound Vib.* 288, 57-79 (2005).
- (4) T. Pritz, "Transfer function method for investigating the complex modulus of acoustic materials: Rod-like specimen," *J. Sound Vib.* 81, 359-376 (1982).