# 파동전파특성에 기초한 구조 건전도 모니터링

Structural Health Monitoring Based on Wave Propagation Characteristics

## 김승준\*·박준홍†

Seung Joon Kim, Junhong Park

Key Words: Beam Transfer Function Method (보전달함수법), Wave Propagation Characteristics (파동전파특성), Health Monitoring (건전도 모니터링)

#### ABSTRACT

The experimental method of measuring dynamic properties of structures was presented. The method is based on the flexural wave propagation characteristics. Using the method, change in structural dynamic properties due to damage is measured. The crack has much more significant impact on the strain energy than the inertial effects. From this, the sensitivity of the dynamic stiffness on the crack location is estimated by calculating the strain energy. When the wave propagates, the strain and kinetic energies shows cyclic changed over space. The crack that occurred at locations where the wave energy is in the form of the potential energy affected most significantly the wave propagation characteristics. The effects of crack location on the wave propagation were used to determine the crack location.

## 1. 서 론

구조물이 점점 대형화되고 정교해짐에 떠라 자 연스레 그 구조물의 건전도를 모니터링 할 수 있 는 기술의 필요성이 대두되었고, 그 중에서도 특 히 비파괴적 건전도 모니터링 기술들의 필요성과 연구 당위성이 지속적으로 제기되었다. 그리하여 현재 많은 비파괴적 모니터링 기술들의 연구가 진 행되고 있으며 이미 상용화 되어 현장에서 사용되 고 있는 기술들도 있다. 그 중 가장 널리 쓰이고 있는 기술들은 방사선 투과검사, 초음파 탐상검사 등이다. 이러한 기술들은 무엇보다 검사 시간이 오래 걸리고 내재된 한계로 인해 전 시스템에 걸 쳐 직접 결함을 찾기 위한 기술이라기 보단 대략 적으로 확보된 결함의 위치에서 보다 정확한 결함 의 위치와 크기를 알아내는 기술로 보는 것이 더 욱 적합하다.

그래서 이러한 단점을 극복하고 전 구조물에 걸 쳐 결함을 찾기 위한 기술들이 제안되고 있으며 그 중 주목할만한 기술은 파동전파특성을 이용한 건전도 모니터링 기술이다. 그 중 고유진동수 변 화 특성을 이용한 기술은<sup>(1)</sup> 주변 환경에 영향을 받기 쉽고, 모드형상을 이용하는 방법은<sup>(2)</sup> 많은 수의 센서와 측정 횟수를 필요로 한다. 또한 구조 물의 임피던스를 측정하는 방법은<sup>(3)</sup> 고유 진동수 만을 이용 하였을 때와 비슷한 문제점이 발생한다. 본 연구에서는 위와 같은 영향이 적으며 구조물 의 파동전파특성을 높은 신뢰성 하에 분석할 수 있는 Park<sup>(4)</sup>에 의해 제안된 보전달함수법을 이용 하여 구조물의 파동전파특성을 측정·분석한다. 그리고 구조물에 파동이 전파될 때 총 시스템의 에너지는 변하지 않고 내부에 남아 있으며, 그 형 태는 보존에너지, 운동 에너지와 비슷하다는 경향 과, 전파되는 파동 에너지가 보존에너지로 저장되 는 장소에 결함이 발생하였을 때 파동의 정상파 형태에 커다란 영향을 미치게 되는 경향을 이용해 본 연구에서 제안한 동적 강성 민감도를 도입하여 손상척도를 구한 후 결함의 구체적인 위치와 그 크기를 구한다. 그리고 그 결과를 실험을 통해 실 제 결함의 위치·크기와 비교한다.

## 2. 결함의 검출

구조물에서 단면에 수직한 방향으로 결함이 발 생할 때 결함이 구조물에 걸린 부하 전파능력을 감소시키나 구조물의 운동에너지에는 영향을 미치 지 못한다. 그러므로 구조물에 저장된 총 보존에 너지의 감소를 초래한다. 그리고 구조물에 저장된 총 보존에너지는 모드형상 및 고유주파수에 의해 결정되므로 결함이 구조물의 보존에너지가 큰 위 치에 발생 하였을 때 이러한 감소현상은 더욱 크 게 발생하며, 구조물 전체에 걸쳐 등가화된 동적 강성과 파동수의 감소에 기인한다.

<sup>↑</sup> 한양대학교 기계공학부 음향진동연구실(교신저자) E-mail parkj@hanyang.ac.kr Tel:(02)2220-0424

<sup>\*</sup> 한양대학교 기계공학부



그림 1. 외팔보의 가속도계를 이용한 진동측정

### 2.1. 보전달함수법

보전달함수법은 구조물의 굽힘 강성과 진동소산 특성을 측정할 수 있는 방법이다. 구조물의 진동 소산을 모델링 하기 위해 다음과 같은 복소 강성 값을 사용 한다.

$$D(\omega) = D(\omega) \left[ 1 + i\eta_D(\omega) \right]$$
(1)

여기서 D는 굽힘 강성이며  $\eta_D$ 는 손실계수이 다. 굽힘 변형에 대해 전단변형과 회전 관성이 무 시 할만 하다고 할 때 굽힘 강성은 아래 식(2) 와 같은 classical 보 이론을 적용한 4 계 편미분 방 정식을 이용하여 모델링 할 수 있다.

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

식(2)를 만족시키는 보 방정식은 식 (3)과 같다.

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

여기서  $\hat{k_b} \leftarrow 4$   $\hat{k_b} = (\omega^2 M_b / \hat{D})^{0.25}$ 에서 얻을 수 있는 각주파주와 관련된 복소 파동수이다. 그리고 그림 1 에 표시된 바와 같이 고정-자유의 경계조 건을 나타내는 다음 식과 같다.

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

이러한 경계조건을 적용함으로써 고정-자유 경 계조건 보 전달함수를 구할 수 있다.<sup>(5)</sup> 또한 이 전달함수로 Newton-Raphson 법을 사용해 복소 파 동수를 얻을 수 있고 식(5)와 같은 복소 굽힘 강 성을 구할 수 있다.

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

#### 2.2. 결함 위치에 따른 민감도

보통 정상파는 구조물에서 파동이 전파될 때 그 경계에서 여러 반사가 일어나며 발생한다. 그래서 이러한 정상파나 모드응답에 의해 구조물에 저장 되는 보존 에너지의 크기가 주파수에 대해 각기 다르게 변하며, 특히 구조손실계수가 작은 경우 이러한 현상은 심해진다. 구조물에 결함이 생기 는 것은 구조물의 보존에너지 감소를 야기하고 이 는 공진 주파수의 감소를 초래한다. 그리고 구조 물에 저장되어있는 평균 보존에너지는 아래 식 (6)으로 구해진다.

$$V_a = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{1}{2} D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)^2 dx$$
 (6)

이러한 평균 보존에너지는 공진 주파수에서 최 대, 반공진 주파수에서 최소가 되며, 굽힘이 일어 난 구조물의 곡률반경( $\partial^2 w/\partial x^2$ )이 최대인 지점에 결함이 생길 때 이러한 감소는 더욱 크게 나타난 다. 그러므로 본 연구를 위해 제안된 동적 강성 민감도(*s*)는 결함이 생긴 위치에 저장된 평균 보 존에너지의 양에 따라 그 크기가 결정된다.

$$S(x,\omega) = \frac{D}{2V_a} \left( D \frac{\partial^2 w(x,\omega)}{\partial x^2} \right)^2$$
(7)

식(7)에서 요구되는 동적 강성(D)은 보전달함 수법을 통해 얻어지며, 큰 민감도는 구조물의 위 치, x 위치에 결함이 발생하였을 때 특정 주파수,  $\omega$ 에서 얻어진 동적 강성에 큰 변화가 있다는 것 을 의미한다. 그리고 이러한 동적 강성의 변화  $(\Delta D(\omega_k))$ 를 관측하는 것에 의해 결함의 위치, x를 계산 가능하게 해주는 결함추측척도(DI)는 다음과 같은 식(8)로 제안한다.

$$DI(x) = \sum_{k=1}^{n} \Delta D(\omega_k) S(x, \omega_k)$$
(8)

이 결함추측척도는 x = 0 부터 L 까지의 길이를 300 등분하여 계산하며 이 범위에서 최대 결함 추 측인자로 결정되는 값이 계산된다. 그리고 그 척 도들 중의 극대값과 DI의 절대값은 결함이 있는 구조물과 그렇지 않은 구조물의 값들과 비교하여 결함의 위치를 추측할 수 있도록 정보를 제공한다.

## 3. 측정결과 및 고찰

제안된 모니터링 방법의 증명을 위해 길이 0.77 m, 폭 0.02 m, 두께 0.02 m 의 Plexiglass 보를 사 용하여 고정-자유 경계조건하에 실험을 수행하였 으며, 진동을 유발하기 위해 자유단에 임팩트 해 머로 가진 하였다. 그 응답은 *x*=0 m (고정단)에 서부터 *x*=0.62 m, *x*=0.77 m (자유단) 떨어진 두 지점에서 가속도계(Endevco model 2250-A)를 사 용하여 측정하였다.

## 3.1. 결함의 위치와 주파수에 따른 민감도의 변화

L/2, 2L/3 위치에 결함이 있다고 가정하여 식(7) 에 의해 그 부분에서의 주파수에 따른 동적 강성 민감도를 계산하였고 그 결과를 그림 2 에 나타내 었다. 이 값들은 주파수에 따라 증가·감소하기를 반복하며 그 계산 위치가 자유단에 가까워 질수록 극대, 극소값이 더 많이 나타난다. 이 값들의 주 파수에 따른 경향은 보에 실제 결함이 계산에 사 용된 위치에 있을 때의 동적 강성의 변화와 비슷 하게 나타나며 3.2 절에서 비교한다.

### 3.2. 결함의 예측과 측정결과

그림 3 은 보에 인위적으로 결함을 만들어 측 정된 전달함수를 나타낸다. 이 전달함수는 이론적 으로 예측된(점선) 전달함수와 매우 비슷한 경향 을 보이며 결함이 커짐에 따라 공진·반공진 주파 수가 점점 감소하는 것으로 측정 되었다. 또한 결 함의 위치에 따라 변하는 전달함수의 경향도 다르 다. 이러한 결과를 이용하여 건전도 모니터링을 할 경우 단순히 고유 진동수 만을 이용한 것의 경 우보다 더욱 효과적인 예측결과를 가져다 줄 것이 다. 그러나 이러한 결과는 모드응답에 의해 영향 을 받으므로 직접 결함에 관한 정보를 얻을 수 없 을 뿐 아니라 실제 측정 결과에서 보면 결함이 6 mm(단면적의 30%)정도로 커질 때까지 그 변화가 거의 보이지 않는다. 그래서 이러한 모드응답에 의한 건전도 모니터링 대신 보전달함수법에 의해 서 주파수에 따른 동적 강성을 결함의 크기에 따 라 얻었다. (그림 4) 그 결과를 보면 그림 2 에서 예측된 동적 강성 민감도와 유사한 변화의 단계를 보이며, 결함의 크기가 커질수록 그 위치에서 보 존에너지가 감소하여 그 변화폭도 커진다.

우선 결함의 위치를 개략적으로 찾아내기 위해 서는 측정된 동적 강성의 주파수에 따른 경향(그 림 4)을 식 (7)에 의한 동적 강성 민감도(그림 2) 와 비교하는 것으로 가능하다. 그리고 이에 더해 결함에 관한 정확한 정보를 얻기 위해서는 식 (8) 에 의한 결함추측척도(그림 5)를 구하는 것으로 가능하다. 이 결함추측척도는 이론적으론 0 이 되 어야 하나 실험 오차로 인해 수렴하지 않으며, 결 함이 없을 땐 아주 작은 값을 보이고 결함의 크기 가 커질수록 증가한다.

그림 5 에서 결함추측척도는 2 개 이상의 극대값 을 가진다. 이중 첫 번째, 두 번째로 큰 값들 중 하나를 선택해 그림상에 원으로 표시 하였고 그 위치를 결함이 있는 곳으로 간주하고 실제의 위치 와 비교해 표 1 에 나타내었다. 이때 극대값들중 어느 것이 정확하게 결함의 위치를 나타내는지는 아직 명백하지 못하다. 여기서 만약 식(7)로부터 계산된 민감도가 동적 강성의 실제 감소와 직교성 이 있다면 극대값은 하나만 나타나지만, 그렇지 못하기 때문에 여러 극대값이 나타나게 된다. 오 차율은 대략 1-4%였으며 작은 결함(2 mm 이상) 에서도 매우 정확한 결과를 보여주었다.





그림 3. 결함의 위치와 크기에 따른 측정된 전달함수

결* 크기	함의 (mm)	2	4	6	8	10	12	14	16	18
x= L/2	1st Max	0.973	0.46 (4%)	0.513 (1.3%)	0.517 (1.6%)	0.52 (2%)	0.527 (2.7%)	0.517 (1.7%)	0.083	0.083
	2nd Max	0.45 (5%)	0.073	0.123	0.107	0.107	0.097	0.087	0.523 (2.3%)	0.533 (3.3%)
x= 2L/3	1st Max	0.137	0.99	0.673 (0.7%)	0.673 (0.7%)	0.673 (0.7%)	0.677 (1%)	0.68 (1.3%)	0.687 (2%)	0.69 (2.3)
	2nd Max	0.747 (8%)	0.677 (1%)	0.133	0.267	0.073	0.077	0.08	0.08	0.247

표 1. 다양한 결함의 위치와 크기에 따른 관측결과

## 4. 결론

본 연구에서는 파동전파특성을 이용한 새로운 건전도 모니터링 방법을 제안하였다. 그리고 보전 달함수법으로 결함이 있는 구조물의 동적 강성을 구하고 파동전파특성을 분석 하였으며, 그 동특성 의 경향을 파동의 전파와 보존에너지로부터 예측 하였다. 또한 이 민감도와 동적 강성으로부터 적 은 진동응답측정으로 작은 결함이라도 그 위치를 정확하게 관측하였으며, 온도등의 주변 환경변화 가 결함으로 인한 동적 강성의 변화 경향에 영향 을 미치지 못하므로 그러한 영향을 제거하여 더욱 정확한 결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서 제안된 방법은 주파수에 따른 동적 강성의 변화와 결함의 위치가 구조물의 보존에너지에 미치는 영향을 이 용하고 있다. 결과적으로 정상파의 노드에 결함이 발생하여도 사용가능하며, 계산 시간이 짧아 단시 간에 결함의 위치를 찾는 것이 가능해 지속적인 실시간 구조 건전도 모니터링 기술에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

(1) S.W. Doebling, C.R. Farrar, M.B. Prime, D.E. Shevitx, Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review, Los Alamos National Laboratory, LA-13070-MS, Los Alamos, NM, 1996.

(2) T.Y. Kam and T.Y. Lee, "Detection of Cracks in Structures Using Modal Test Data," Engineering Fracture Mechanics, 42, 381-387 (1992).

(3) G. Park, H. H. Cudney, and D. J. Inman, "An integrated health monitoring technique using structural impedance sensors," Journal of intelligent materials systems and structures, 11, 448-455 (2001).

(4) J. Park, "Transfer function methods to measure dynamic mechanical properties of complex structures," *J. Sound Vib.* 288, 57-79 (2005).

(5) T. Pritz, "Transfer function method for investigating the complex modulus of acoustic materials: Rod-like specimen," *J. Sound Vib.* **81**, 359-376 (1982).



(a) x<sub>c</sub> = L/2 의 결함위치



(b) x<sub>c</sub> = 2L/3 의 결함위치 그림 4. 결함의 위치와 크기에 따른 측정된 동적 강성



(a) x<sub>c</sub> = L/2 의 결함위치



(b) x<sub>e</sub> = 2L/3 의 결함위치 그림 5. 결함의 위치와 크기에 따른 계산된 결함추측척도