

PZT에 의해 굽힘 가진을 받는 보의 구조건전도 모니터링

Structural Health Monitoring Methods using PZT-Actuated Flexural Vibration of Beams

김승준*·박준홍†
Seung Joon Kim, Junhong Park

Key Words : Beam Transfer Function Method (보전달함수법), Wave Propagation Characteristics (파동전달특성), Health Monitoring (건전도 모니터링), Piezoelectric Patch (압전소자)

ABSTRACT

This paper describes the experimental method to monitor the structural integrity. The crack on structures changes the wave propagation characteristics of structures. To monitor this change, frequency dependent variation of dynamic stiffness of beam structures is obtained by using beam transfer function method, and its trends are compared to undamaged one for identifying the location and size of the crack. Piezoelectric actuators were used to generate flexural vibrations. It eliminated various restrictions of continuously measuring wave propagation characteristics and monitoring structural integrity. The structural integrity was identified with minimal number of measurements and smart structures employing PZT actuations.

1. 서론

구조물의 건전도를 모니터링 할 수 있는 기술들은 현재 여러 가지가 개발되었고 계속 제안되고 있다. 그 중 널리 사용되고 있는 방사선 투과검사, 초음파 탐상검사등은 검사 시간이 오래 걸리고 내재된 한계로 인해 전 시스템에 걸쳐 직접 결함을 찾기 위한 기술이라기 보다는 대략적으로 확보된 결함의 위치에서 보다 정확한 결함의 위치와 크기를 알아내는 기술로 보는 것이 적합하다.

이러한 단점들을 극복하고 전 구조물에 걸쳐 결함을 찾기 위한 기술들이 제안되고 있으며 그 중 주목할만한 기술은 파동전달특성을 이용한 건전도 모니터링 기술이다. 그 중 고유진동수 변화 특성을 이용한 기술은⁽¹⁾ 주변 환경에 영향을 받기 쉽고, 모드형상을 이용하는 방법⁽²⁾ 많은 수의 센서와 측정 횟수를 필요로 한다. 또한 구조물의 임피던스를 측정하는 방법⁽³⁾ 제안되기도 하였다.

본 연구에서는 구조물의 파동전달특성을 높은 신뢰성 하에 분석할 수 있는 보전달함수법을 이용하여 구조물의 파동전달특성을 측정·분석한다. 구조물의 가진을 위해 지능구조물을 사용하였다. 이는 다른 진동유발수단(임팩트 해머, 웨이커등)이 가질 수 있는 단점을 제거한다. 압전소자를 활용한 시스템의 파동전달특성을 분석하며 구조물에 파동이 전파될 때 총 시스템의 에너지는 변하지

않고 내부에 남아 있으며, 그 형태는 보존에너지, 운동 에너지로 저장된다. 전파되는 파동 에너지가 보존에너지로 저장되는 장소에 결함이 발생하였을 때 파동의 정상과 형태에 커다란 영향을 미치게 되는 경향을 이용해 본 연구에서 제안한 동적 강성 민감도를 도입하여 손상척도를 구한다. 결함의 구체적인 위치와 그 크기를 구하여 실험을 통해 실제 결함의 위치·크기와 비교한다.

2. 파동전달특성의 분석

결함이 있는 구조물의 파동전달특성을 분석하기 위하여 실험 구조물의 정확한 경계조건의 파악과 이를 고려한 보 방정식의 확보 및 파동전달특성을 파악할 수 있는 측정방법이 필요하다. 그래서 본 연구에서는 압전소자를 사용한 보 구조물의 진동유발에 대한 해석을 수행 하였고 이를 바탕으로 보 방정식을 구성하였다. 또한 Park⁽⁴⁾에 의해 제안된 보전달함수법으로 보 구조물의 파동전달특성을 해석하였다.

2.1. 경계조건의 확립

일반적으로 구조물의 굽힘 가진을 위해 압전소자를 사용할 때는 그림 1에 나타난 바와 같이 bimorph 형태로 압전소자를 부착하여 이 두 압전소자가 서로 반대의 변형률이 발생하도록 입력 전압을 가해 $x=0$ 인 지점에서 굽힘 모멘트가 발생하도록 한다.⁽⁵⁻⁷⁾ 이렇게 발생된 굽힘 모멘트는 압전소자의 d_{31} (압전상수)의 크기와 인가된 전압에 비례하며, 압전소자가 부착되어 있는 구조물의 재료 물성과 그 형상에 의해 정확한 굽힘 모멘트

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

* 한양대학교 대학원 기계공학과

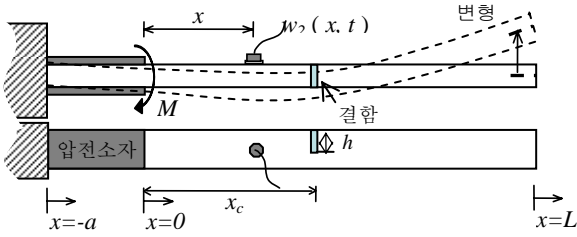


그림 1. 압전소자를 이용한 진동의 유발과 측정

의 크기가 결정된다.

$$\hat{D} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + M_b \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

이때 보의 지배방정식을 식(1)과 같이 4 계 편미분 방정식 형태로 나타낼 수 있다. 그림 1 과 같이 지능구조물에 의해 가진되는 보의 경계조건은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{w}_1(-a) = 0, \quad \frac{\partial \hat{w}_1(-a)}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial^2 \hat{w}_2(L)}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 \hat{w}_2(L)}{\partial x^3} = 0, \\ \hat{w}_1(0) - \hat{w}_2(0) = 0, \quad \frac{\partial \hat{w}_1(0)}{\partial x} - \frac{\partial \hat{w}_2(0)}{\partial x} = 0, \\ \hat{D} \hat{k}_b^2 \left(\frac{\partial^2 \hat{w}_2(0)}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \hat{w}_1(0)}{\partial x^2} \right) = M, \\ \frac{\partial^3 \hat{w}_2(0)}{\partial x^3} - \frac{\partial^3 \hat{w}_1(0)}{\partial x^3} = 0 \end{aligned} \quad (2a-h)$$

굽힘 모멘트 M 은 식(3) (7) 과 같으며 구조물과 압전소자 결합 모델 중 uniform strain bending, perfectly bonded 모델로부터 얻는다.

$$M = \left(\frac{4E_b I_a}{t_b} \right) \left(\frac{6(1+T)}{6 + E_b/E_p T + 12T + 8T^2} \right) \frac{d_{31} V_0}{t_p} \quad (3)$$

여기서 아래첨자 b 는 단일 보, p 는 압전소자, a 는 압전소자가 부착된 합성 보이며, $T = t_p/t_b$, d_{31} 은 압전상수, V_0 는 인가 전압이다.

2.2. 보전달함수법

보전달함수법은 구조물의 굽힘 강성과 진동소산 특성을 측정할 수 있는 방법이다. 구조물의 진동소산을 모델링 하기 위해 다음과 같은 복소 강성값을 사용 한다.

$$\hat{D}(\omega) = D(\omega) [1 + i\eta_D(\omega)] \quad (4)$$

여기서 D 는 굽힘 강성이며 η_D 는 손실계수이다. 굽힘 변형에 대해 전단변형과 회전 관성이 무시할만 하다고 할 때 굽힘 강성은 식(1)과 같은 classical 보 이론을 적용한 4 계 편미분 방정식을 이용하여 모델링 할 수 있다.

식(1)을 만족시키는 보 방정식은 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{w}_{(1,2)}(x) = \hat{A}_{1(1,2)} \sin \hat{k}_b x + \hat{A}_{2(1,2)} \cos \hat{k}_b x \\ + \hat{A}_{3(1,2)} e^{\hat{k}_b(x-a,L)} + \hat{A}_{4(1,2)} e^{-\hat{k}_b x} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 \hat{k}_b 는 식 $\hat{k}_b = (\omega^2 M_b / \hat{D})^{0.25}$ 에서 얻을 수 있는 각주파수와 관련된 복소 파동수이다. 여기에 식(2)의 경계조건을 대입하여 완벽한 보 방정식을 얻은 후 식(6)과 같은 전달함수를 얻는다.

$$T.F = \frac{-\omega^2 w_2(x) M}{M V_0} \quad (6)$$

또한 이 전달함수로 Newton-Raphson 법을 사용해 복소 파동수를 얻을 수 있고 식(7)와 같은 복소 굽힘 강성을 구할 수 있다.

$$\hat{D} = \frac{\omega^2 M_b}{k_b^4} \quad (7)$$

3. 결합의 검출

구조물에 결합이 발생할 경우 그 결합이 구조물에 걸린 부하전과 능력을 감소시키나 구조물의 운동에너지에는 영향을 미치지 못한다. 그러나 결과적으로 구조물에 저장된 총 보존에너지의 감소를 초래하게 된다. 구조물의 보존에너지가 큰 위치에 결합이 발생 하였을 때 이러한 감소현상은 더욱 커지며, 이는 구조물 전체에 걸쳐 등가화된 동적 강성과 파동수의 국소적 감소로 나타난다.

3.1. 결합 위치에 따른 민감도

정상파나 모드응답에 의해 구조물에 저장되는 보존 에너지의 크기는 주파수에 대해 각기 다르게 변한다. 구조물에 결합이 생기는 것은 구조물의 보존에너지 감소를 야기하고 이는 공진 주파수의 감소를 초래한다. 구조물에 저장되어있는 평균 보존에너지는 아래 식(8)로 구해진다.

$$V_a = \frac{1}{L} \int_0^L \frac{1}{2} \hat{D} \left(\frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial x^2} \right)^2 dx \quad (8)$$

이러한 평균 보존에너지는 굽힘이 일어난 구조물의 곡률반경 ($\partial^2 w / \partial x^2$) 이 최대인 지점에 결합이

생길 때 크게 감소하게 된다. 그러므로 본 연구를 위해 제안된 동적 강성 민감도(s)는 결함이 생긴 위치에 저장된 평균 보존에너지의 양에 따라 그 크기가 결정된다.

$$\hat{S}(x, \omega) = \frac{\hat{D}}{2V_a} \left(\frac{\partial^2 \hat{w}(x, \omega)}{\partial x^2} \right)^2 \quad (9)$$

큰 민감도는 구조물의 위치, x 위치에 결함이 발생하였을 때 특정 주파수, ω 에서 얻어진 동적 강성에 큰 변화가 있다는 것을 의미한다. 그리고 이러한 동적 강성의 변화($\Delta D(\omega_k)$)를 관측하는 것에 의해 결함의 위치, x 를 계산 가능하게 해주는 결함추측척도(DI)는 다음과 같은 식(10)로 제안한다.

$$DI(x) = \sum_{k=1}^n \Delta D(\omega_k) S(x, \omega_k) \quad (10)$$

식(10)에서 요구되는 동적 강성 변화량($\Delta D(\omega_k)$)은 보전달함수법을 통해 얻어지며, 이 결함추측척도는 $x=0$ 부터 L 까지의 길이를 300 등분하여 계산하며 이 범위에서 최대 결함 추측인자로 결정되는 값이 계산된다. 그리고 그 척도들 중의 극대값과 DI 의 절대값은 결함이 있는 구조물과 그렇지 않은 구조물의 값들과 비교하여 결함의 위치를 추측할 수 있도록 정보를 제공한다.

4. 측정결과 및 고찰

제안된 모니터링 방법의 증명을 위해 길이 0.77 m, 폭 0.025 m, 두께 0.002 m의 알루미늄 보를 사용하여 고정-자유 경계조건하에 실험을 수행하였으며, 진동을 유발하기 위해 piezo systems의 PSI-5A4E 압전소자 ($t=0.000267$ m, $w=0.025$ m, $L=0.0724$ m)를 사용하였다. 그 응답은 $x=0$ m에서부터 $x=0.07$ m, 떨어진 지점에서 가속도계(Endevco model 2250-A)를 사용하여 측정하였다.

4.1. 결함의 위치와 주파수에 따른 민감도의 변화

$L/2$, $2L/3$ 위치에 결함이 있다고 가정하여 식(9)에 의해 그 부분에서의 주파수에 따른 동적 강성 민감도를 계산하였고 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 이 값들은 주파수에 따라 증가·감소하기를 반복한다. 이 값들의 주파수에 따른 경향은 보에 실제 결함이 계산에 사용된 위치에 있을 때의 동적 강성의 변화와 비슷하게 나타나며 4.2 절에서

비교한다.

4.2. 결함의 예측과 측정결과

그림 3은 보에 인위적으로 결함을 만들어 측정된 전달함수를 나타내며 결함이 커짐에 따라 공진·반공진 주파수가 국소적으로 점점 감소하는 것으로 측정되었다. 또한 결함의 위치에 따라 변하는 전달함수의 경향도 다르다. 또 이 전달함수를 사용해 보전달함수법으로 주파수에 따른 동적 강성을 결함의 크기에 따라 얻었다. (그림 4) 그 결과를 보면 그림 2에서 예측된 동적 강성 민감도와 유사한 변화의 단계를 보이며, 결함의 크기가 커질수록 그 위치에서 보존에너지가 감소하여 그 변화폭도 커진다.

전체적으로 측정된 전달함수와 동적 강성의 변화량이 크지 않아 이 두 가지 정보만을 가지고 결함의 위치와 크기를 짐작하기에는 부족하다. 따라서 결함에 관한 정확한 정보를 얻는 것은 식(10)에 의한 결함추측척도(그림 5)를 구하는 것으로 가능해진다. 이 결함추측척도는 이론적으로 0이 되어야 하나 실험 오차로 인해 수렴하지 않으며, 결함이 없을 때 아주 작은 값을 보이고 결함의 크기가 커질수록 증가한다. 이 증가량을 데이터 베이스화한다면 결함의 크기에 관한 정보를 얻을 수 있을 것이다.

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

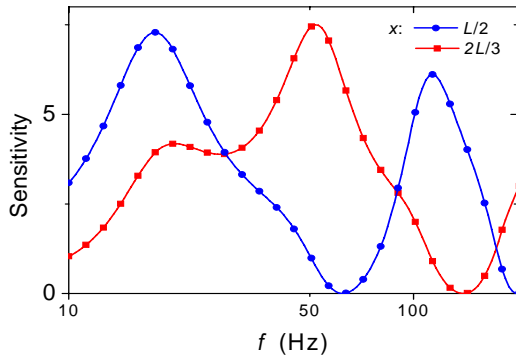
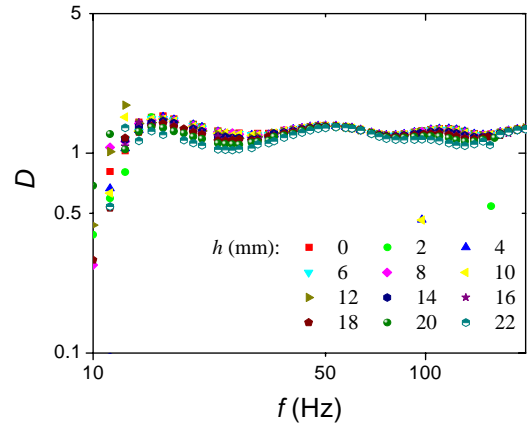
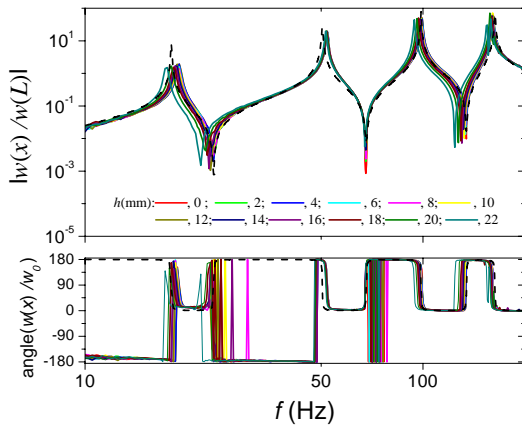


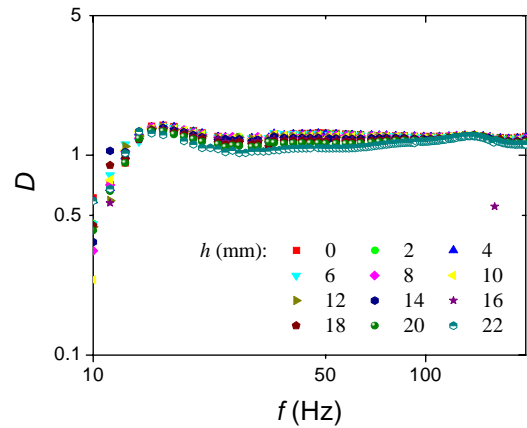
그림 2. 각 결함 위치에서의 동적 강성 민감도



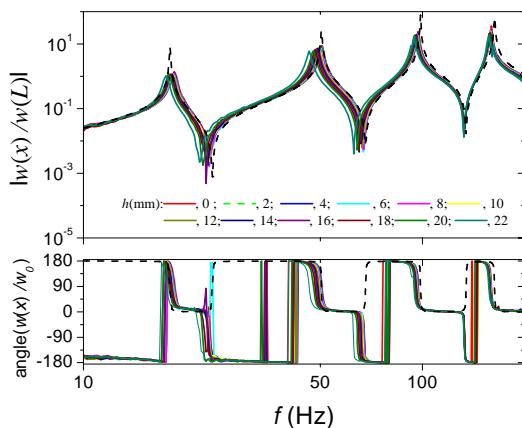
(a) $x_c = L/2$ 의 결함위치



(a) $x_c = L/2$ 의 결함위치



(b) $x_c = 2L/3$ 의 결함위치



(b) $x_c = 2L/3$ 의 결함위치

그림 3. 결함의 위치와 크기에 따른 측정된 전달함수

그림 4. 결함의 위치와 크기에 따른 측정된 동적 강성

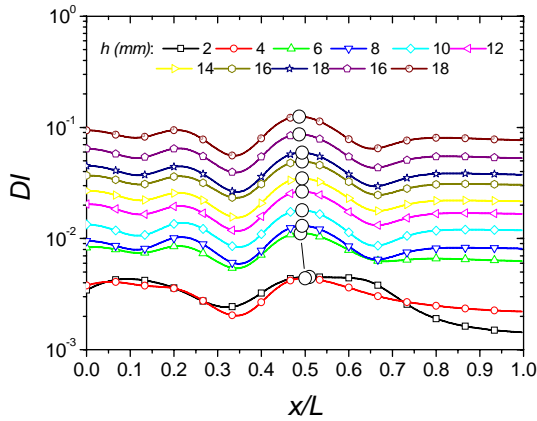
5. 결론

본 연구에서는 지능 구조물과 파동전파특성을 이용한 건진도 모니터링 방법을 제안하였다. 압전소자를 사용하여 구조물의 진동을 유발하였으며 모델링 하였다. 보전달함수법으로 결함이 있는 구조물의 동적 강성을 구하고 파동전파특성을 분석하였고 그로부터 측정된 동특성의 경향을 파동의 전달과 정상파 형태로부터 예측하였다. 또한 이로부터 얻어지는 민감도와 동적 강성으로부터 작은 결함이라도 그 위치를 정확하게 관측하였다. 온도등의 주변 환경변화가 결함으로 인한 동적 강성의 변화 경향에 의한 영향을 제거하여 더욱 정확한

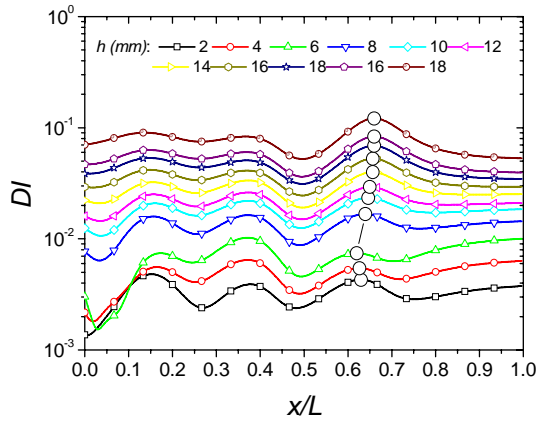
결함의 위치를 찾는 것이 가능해 지속적인 실시간 구조 건전도 모니터링 기술에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) S.W. Doebbling, C.R. Farrar, M.B. Prime, D.E. Shevitz, "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," *Journal of Sound and Vibration*, 288, 57-79 (2005).
- (5) E. F. Crawley and J. D. Luis, "Use of Piezoelectric Actuators as Elements of Intelligent Structures," *AIAA Journal*, 25 (10) (1987).
- (6) E. F. Crawley and E. H. Anderson, "Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams," in *Proceedings of the 30th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Mobile, AL, pp. 2000-2010 (1989).
- (7) M. J. Brennan, S. J. Elliott, and R. J. Pinnington, "The Dynamic Coupling between Piezoceramic Actuators and a Beam," *Journal Acoustical Society of America*, 102 (4) (1997).



(a) $x_c = L/2$ 의 결함위치



(b) $x_c = 2L/3$ 의 결함위치

그림 5. 결함의 위치와 크기에 따른 계산된 결함추측척도

결함의 크기(mm)		2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
$x=L/2$	위치 (오차%) (Max)	0.51 (1) (1st)	0.5 (0) (1st)	0.49 (1) (1st)	0.493 (0.6) (1st)	0.493 (0.6) (1st)	0.493 (0.6) (1st)	0.493 (0.6) (1st)	0.493 (0.6) (1st)	0.493 (0.6) (1st)	0.487 (1.3) (1st)	0.487 (1.3) (1st)
$x=2L/3$	위치 (오차%) (Max)	0.63 (3.6) (2nd)	0.627 (4) (2nd)	0.62 (4.6) (2nd)	0.64 (2.6) (1st)	0.647 (2) (1st)	0.65 (1.6) (1st)	0.657 (1) (1st)	0.657 (1) (1st)	0.66 (0.6) (1st)	0.66 (0.6) (1st)	0.66 (0.6) (1st)

표 1. 다양한 결함의 위치와 크기에 따른 관측결과

결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서 제안된 방법은 주파수에 따른 동적 강성의 변화와 결함의 위치가 구조물의 보존에너지에 미치는 영향을 이용하고 있다. 결과적으로 정상과의 노드에 결함이 발생하여도 사용가능하며, 계산 시간이 짧아 단시간에