

진동 인텐시티 측량 방법을 이용한 무한보의 손상감지에 관한 기초 연구

A Feasibility Study on the Damage Detection of Infinite Beams Using the Structural Intensity Measurement Technique

허영철†·이종원*·김재관**·길현권***

Young-Cheol Huh, Jong-Won Lee, Jae-Kwan Kim and Hyun-Gwon Kil

Key Words : Structural intensity(진동 인텐시티), Cross spectral density method(상호스펙트럼 밀도법), Open Crack(열린 균열), Damage detection(손상 감지)

ABSTRACT

The structural intensities have been applied to understand a source point and the path of vibrational energy flows in interested structures by many researchers. In this paper, a feasibility study was carried out to investigate the characteristics of a damaged beam with a inflicted open crack using the structural intensities. The damaged beam was taken as a continuous system with equivalent bending stiffness and the flexural vibrations were only considered in numerical simulation and experiments. A four(4)-transducer array was used to measure the flexural vibrations of the beam and the structural intensities were estimated by means of cross spectral density method. As a result, the magnitude changes of the structural intensities could be observed in the vicinity of the damage location and a damage index was newly proposed to identify the damage zone. It has been confirmed that the measurement of the structural intensities was simple and effective method to find out the damage zone.

1. 서론

진동 인텐시티는 구조물 내의 단위 폭 또는 단위 깊이 당 전달된 파워의 흐름을 나타내는 물리량으로써 그 크기와 방향에 대한 공간적 분포를 알면 외부 기진원에 의해 공급된 에너지가 구조물 내부로 어떻게 전파되는지에 대한 정보를 얻을 수 있다. 구조물의 설계 단계에서 진동 및 소음원의 주된 전파 경로를 규명함으로써 구조 변경이나 감쇠 기구의 설치를 통해 전파 경로를 변경시키거나 소멸시키는 등의 효과적인 방진방음 대책을 수립할 수 있다. 다른 한편으로는 진동 인텐시티의 측정을 통해 진동이나 소음의 주된 발생원을 찾을 수도 있으며 구조물의 경계나 손상부위와 같은 특이점에서의 파워 흐름 특성을 파악하여 효과

적인 재설계의 수단으로 활용할 수도 있다.

실험적으로 진동 인텐시티를 측정할 수 있는 기본 이론은 Noiseux⁽¹⁾에 의해 처음 제안되어 평판에 대한 회전 및 수직방향의 가속도를 측정하여 자유장 조건에서의 진동 인텐시티를 측정할 수 있음을 보였고, 이 후 Pavic⁽²⁾, Verheij⁽³⁾, Linjama⁽⁴⁾ 등이 보 및 평판에 대한 가속도계의 선형배열과 유한차분법을 이용하여 근접장을 고려한 진동 인텐시티를 측정하였다. 국내에서는 이 덕영 등^(5,6)이 평판 및 반무한보에 대한 진동 인텐시티 측정에 대한 연구를 수행하였고, 길 현권, 홍 석윤^(7,8,9,10) 등은 연성 보 및 연성 평판에 대한 진동 인텐시티 측정을 수행하였다.

해석적인 방법에 의한 진동 인텐시티의 계산은 홍진숙⁽¹¹⁾이 상용 유한요소해석 프로그램인 MSC/NASTRAN을 활용하여 구조전달 소음 해석 및 감소 설계에 적용할 수 있음을 보였고, 조 대승⁽¹²⁾ 등은 유한요소해석법을 이용하여 선체 구조요소의 진동 인텐시티를 계산하고 그 특성을 분석하였다. 길 현권, 홍 석윤^(13,14,15) 등은 파워흐름 해석법을 이용하여 다양한 평판 구조물에 대한 진동 파워의 흐름을 계산하였다.

그러나, 손상 구조물에 대해 진동 인텐시티를 적용한 사례는 많지 않다. Li^(16,17) 등은 전달 행렬법을 이용하여 균

† 정회원, 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부
E-mail : ychuh@kimm.re.kr
Tel : (042) 858-7468, Fax : (042) 868-7418
* 정회원, 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부
** 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학과
*** 정회원, 수원대학교 기계공학과

열이 있는 원형 평판 및 보 구조물에 대한 진동 파워 흐름 해석을 수행하였다. Lee⁽¹⁸⁾ 등은 유한요소 해석법을 이용하여 균열이 있는 단순 평판에 대한 진동 인텐시티 계산을 수행하고 균열 주변에서의 그 흐름 특성을 분석하였다.

진동 인텐시티의 측정에서 감쇠가 작은 구조물의 경우 고유 진동수에서 존재하는 정상파에 의한 잔향 효과로 인해 작은 위상오차에 의해서도 큰 바이어스 오차를 유발하게 되므로^(4,9) 본 논문에서는 손상 주변의 진동 인텐시티 특성 분석을 위한 기초 연구로써 실험 모델은 반사파에 의한 간섭을 줄일 수 있도록 양 끝단이 모래 경계조건으로 갖는 감쇠 단 보를 택하였다. 2m 길이를 갖는 알루미늄 보를 대상으로 중앙 위치에 가진기를 설치하고 가진기로부터 좌측으로 0.34m 떨어진 위치에 5mm 크기의 인위적 손상을 주었다. 해석 및 측정을 통해 손상 전후 보에 대한 진동 인텐시티의 공간 분포를 살펴보고, 측정된 진동 인텐시티와 가진점에서 입력되는 입력 파워와 의 비교를 통해 손상 영역에서의 진동 인텐시티 특성 변화에 대해 고찰하였다.

2. 보의 진동 인텐시티 계산

2.1 에너지 방법에 의한 보의 손상 모델

입력의 위치 c 에서 손상 깊이가 a 인 보의 등가굽힘 강성 EI_c 는 손상 보의 변형 에너지 관계식에 의해서 다음 식으로 표현할 수 있다⁽¹⁹⁾. 이 때, 응력 확대계수(stress intensity factor) K_I 는 폭이 b 이고 높이가 h 인 사각단면 보에서 I의 파괴모드만이 존재한다는 가정 하에 정의된 값이다.

$$EI_c = \frac{EI}{1 + EI \cdot R(a, c) / [1 + ((x - c) / \{k(a)a\})^2]} \quad (1)$$

여기서,

$$R(a, c) = \frac{2D(a)}{k(a)a[\operatorname{atan}((L - c) / \{k(a)a\}) + \operatorname{atan}(c / \{k(a)a\})]} \\ D(a) = \frac{18\pi [F(a)]^2 a^2}{Ebh^4}, \quad k(a) = \frac{3\pi [F(a)]^2 (h - a)^3 a}{[h^3 - (h - a)^3]h} \quad (2)$$

2.2 유한요소법에 의한 진동 인텐시티 계산

단순 보에서 회전 관성과 전단 변형을 무시하는 가정 하에 굽힘 진동만 고려할 때 진동 인텐시티는

$$\langle I_x \rangle = EI \left(\frac{\partial^3 u(x, t)}{\partial x^3} \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} - \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x \partial t} \right) \quad (3)$$

여기서, EI : 보의 굽힘강성, $u(x, t)$: 수직방향의 변위
 $\langle \cdot \rangle$: 시간 평균

와 같이 표현할 수 있다. 식 (3)의 우측 첫 번째 항은 전단력 성분에 의한 것이며 두 번째 항은 모멘트 성분에 의한 것이다. 한편, 입력 가진력 $F(t)$ 에 의해 공급되는 입력 파워 P_{in} 는 가진점의 속도를 $v(t)$ 라 할 때

$$\langle P_{in} \rangle = \langle F(t) \cdot v(t) \rangle \quad (4)$$

와 같이 표현할 수 있다.

양 끝단이 모래에 의한 경계조건으로 적용된 알루미늄 보를 대상으로 유한요소법을 적용하여 식 (3),(4)에 의한 진동 인텐시티와 입력 파워를 계산하였다. 보의 주요 재료는 길이가 2m, 단면의 폭×높이는 0.03m×0.01m이며 재료의 영률 $E = 70GPa$, 밀도 $\rho = 2710kg/m^3$ 와 같다. 모래의 경우 양 끝단에서 보가 묻힌 영역까지 스프링-감쇠 요소로 모델링 하였는데 그 특성 값은 비손상된 실험모델의 1차 고유진동수(17.8Hz)와 측정된 가속도 값에 맞추어 적절하게 선정되었다. 외력이 작용하는 중앙 위치로부터 좌측으로 0.34m 떨어진 위치에 5mm 깊이의 손상이 있다는 가정 하에 식 (1)을 이용하여 강성 저하가 예측되는 보요소의 단면 2차 모멘트 값을 조절하였다.

400Hz, 1.2kHz의 정현파로 가진한 후 손상 전후 보에 대한 진동 인텐시티(=전달 파워)의 공간 분포를 계산하고 입력 파워에 대한 비율로써 그 결과를 Fig.1에 도시하였다. 가진 주파수는 가급적 보의 공진주파수를 피하고 해당 주파수에서의 파장수(wave number)에 영향을 받을 수 있는 실험의 오차조건을 고려하여 결정되었다. 한편, 전달 파워 및 입력 파워는 식 (3),(4)를 이용하여 시간영역에서 평균값을 취하는 직접법을 사용하여 계산하였다.

비손상 보의 경우 전달 파워의 공간 분포는 입력파워와 동일한 크기를 갖고 일정한 값을 유지하고 있었으며 손상 보의 경우 손상 위치 주변에서 그 크기가 증가함을 알 수 있었다. 수치 계산 결과 손상 위치의 주변에서 나타나는 전달 파워의 크기 특성 변화를 통해 손상 영역을 찾을 수 있음을 확인할 수 있었다.

3. 실험 및 고찰

3.1 진동 인텐시티의 측정 이론

식 (3)에서 정의된 진동 인텐시티의 시간 평균값은 측정 점을 x_0 라고 하고 근거리장의 영향을 고려할 때 일직선상의 4개의 가속도 배열(4점법)을 이용한 유한차분법에 의해 다음과 같이 근사화 할 수 있다⁽²⁾.

$$\langle I_x \rangle_{4pt} \simeq \frac{EI}{\Delta^3} \langle \bar{w}_2(4w_3 - w_4) - \bar{w}_1 w_3 \rangle \quad (5)$$

여기서, 첨자 1~4: 가속도 배열 순서

Δ : 가속도계의 간격

시간영역에서의 평균값인 식 (5)는 상호스펙트럼 밀도를 이용하여 주파수 영역에서 등가의 값으로 표현할 수 있다.

$$I_{x,4pt}(\omega) = \frac{EI}{\omega^3 \Delta^3} \text{Im}\{4G_{23} - G_{13} - G_{24}\} \quad (6)$$

여기서, ω : 가진주파수

$\text{Im}\{G_{ij}\}$: i 번째 가속도와 j 번째 가속도의 상호스펙트럼 밀도의 허수부

동일한 방법으로 주파수 영역에서의 입력파워는

$$P(\omega)_m = \text{Re}\left\{ \frac{1}{i\omega} G_{Fd} \right\} \quad (7)$$

로 표현할 수 있고, 진동 인텐시티의 측정을 위한 가속도 배열을 Fig.2에 보였다. 한편, 근거리장의 영향을 무시할 수 있는 영역에서는 2개의 가속도 배열(2점법)만으로도 진동 인텐시티를 측정할 수 있는데 이 경우 측정 식은

$$I_{x,2pt}(\omega) = \frac{2\sqrt{EI \cdot m}}{\omega^2 \Delta} \text{Im}\{G_{12}\} \quad (8)$$

와 같다.

3.2 실험 모델 및 진동 인텐시티의 측정

4개의 가속도 배열을 이용한 진동 인텐시티 측정을 위한 실험 모델 및 장비의 구성은 Fig.3에 보였다. 보의 중앙에는 가진기(B&K 4809)와 입력 파워의 측정을 위한 임피던스 헤드(B&K 8001)를 설치하였으며 가속도 측정을 위해 경량의 가속도계(PCB 352C22)를 사용하였다. 진행파의 반사를 줄이기 위해 모래를 채운 상자에 보의 양 끝단이 묻히도록 하였으며, 반사계수를 측정하여 그 결과를 Fig.4에 보였다. 주파수 400Hz에서는 반사계수 0.4~0.6 범위의 값을 보여주며 1kHz~3kHz에서는 0.2~0.3 범위의 값을 보여주고 있음을 알 수 있었다. 1.8kHz 근처에서 나타난 이상 피크의 원인은 단순한 측정오차 정도로만 추측될 뿐 재실험을 통해 확인할 필요가 있다.

식 (5)의 4점법에 의한 진동 인텐시티 측정결과의 유효성을 확인하였다. 이를 위해 비손상 보에 대해 랜덤 가진에 의한 측정결과로서 식 (5)와 (8)을 적용한 진동 인텐시티와 식 (7)을 적용한 입력 파워와의 비교하였다. 이 때 가속도계 간격은 $\Delta = 20 \text{ mm}$ 로 정하였고 가진주파수는 12.8kHz, 주파수 분석을 위한 평균은 200회로 하였다. 랜덤 가진에 의한 측정 결과는 Fig.5에 보였다.

본 실험에서는 보다 정밀한 측정을 위해 비손상 보 및 손상보에 대해 정현파 가진에 의한 진동 인텐시티 측정을 수행하였다. 정현파의 가진주파수는 각각 400Hz, 1200Hz로 택하였고 해당 주파수에서 파장에 대한 가속도계 간격의 비 Δ/λ 를 적절히 고려하였다. 측정 위치는 40mm 간격으로써 손상 주변의 10곳을 택하여 진동 인텐시티의 공간 분포 특성을 살펴보았다. 이 때, 4점법으로 측정된 진동 인텐시티(전달 파워)는 입력 파워에 대한 비율로 나타내었으며, 그 결과를 Fig.6 에 보였다. 한편, 손상 보의 경우 손상 영역

주변의 굽힘 강성 값 EF_c 의 분포를 미리 알 수 없음을 고려하여 단위 EF 에 대한 값으로 나타내었다.

3.3 실험 결과 및 고찰

비손상 보에 대한 랜덤 가진 결과인 Fig.5를 살펴보면 2점법 및 4점법에 의한 측정결과는 서로 잘 일치하나, 식 (7)에 의한 입력 파워 측정결과보다는 최대 1dB 정도 큰 값을 보이고 있다. 이는 여타의 다른 논문의 결과^(6,8,9)에서도 동일한 경향을 보이는 것으로 본 측정시스템이 근본적으로 안고 있는 위상 오차 및 유한차분법에 의한 오차 등으로 추정된다. 근거리장에 대한 영향을 고려해야할 것으로 예상되는 손상 보의 경우 4점법에 의한 측정 방법은 유효한 것으로 판단된다.

비손상 보의 경우 Fig.6을 살펴보면 전달 파워의 공간 분포가 비교적 일정하게 분포되고 있는 반면 손상 보의 경우 손상 위치인 $x=-0.34$ 근처에서 그 값의 변화를 확인할 수 있었다. 이는 직관적으로 볼 때 손상 위치에서의 단면적 감소가 전단력 성분에 의한 전달 파워의 변화를 유발했을 것으로 판단되고 이러한 변화는 손상 위치에서 진행파의 반사 효과⁽¹⁶⁾로 인한 것으로 추측된다. 그러나, 이의 확증을 위해서는 응력센서 및 반사파 측정 등을 통해 그 원인을 확인할 필요가 있다.

측정 결과 손상 주변에서 전달 파워 값의 크기 변화가 관찰되었지만 이는 손상에 의한 것이 아닐 수도 있다. 하지만, 비손상 보에 대한 전달 파워의 공간 분포와 비교해서 그 크기의 변화가 관찰되었다면 그 영역은 손상 영역으로 판단해도 큰 무리는 없을 것으로 판단한다.

4. 결론

본 논문에서는 양단에서 감쇠 단을 갖는 보의 굽힘 진동에 대한 진동 인텐시티를 측정하고 손상 보에 대해 손상 감지 방법의 하나로 활용될 수 있는 가능성에 대해 알아보았다. 측정 방법으로는 근거리장의 영향을 고려할 수 있는 4개의 가속도계 배열에 의한 상호스펙트럼 밀도법을 활용하였으며, 비교적 큰 인위적 손상을 가한 보에 대해 손상 전후의 진동 인텐시티(전달파워)의 공간 분포를 비교하였다. 비교 결과 비손상 보의 경우 공간 분포가 일정한 값을 갖는데 비해 손상 보에서는 손상 위치의 주변에서 그 크기가 증가하고 있음을 확인할 수 있었고, 손상 위치에서 어느 정도 떨어진 영역에서는 다시 일정한 값을 갖는다는 사실을 알 수 있었다. 물론 실구조물에 적용하기 위해서는 경계조건이나 가진방법에 대한 문제가 해결되어야 하겠으나, 본 기초 연구를 통해 진동 인텐시티 측정기법이 손상 감지 방법의 하나로 유효하게 활용될 수 있는 가능성을 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원의 기본사업인 “선박 생존성 향상을 위한 설계기술 개발”의 일환으로 수행되었다.

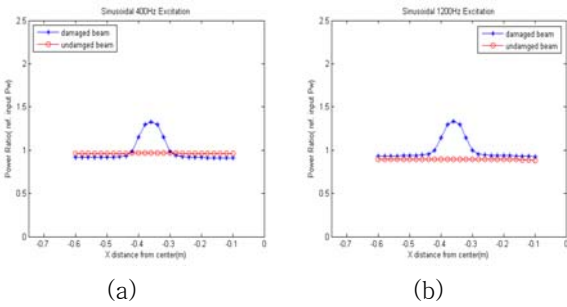


Fig.1 Spatial distribution analysis of transmitted power for the undamaged and damaged beam (a) sine 400 Hz excitation (b) sine 1.2kHz excitation

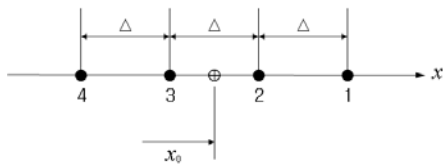


Fig.2 Transducer array for the measurement of one-dimensional structural intensity



Fig.3 Overview of experimental set up

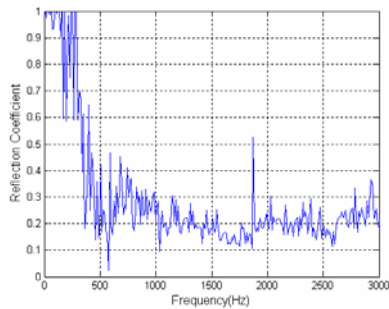


Fig.4 Reflection coefficient of bending wave in a undamaged beam

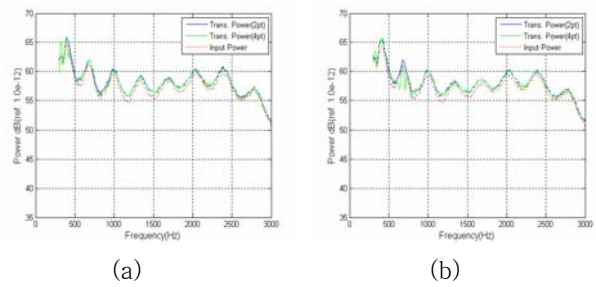


Fig.5 Comparison of the input power with the transmitted power (a) $x=-0.49\text{m}$ from center (b) $x=-0.37\text{m}$ from center

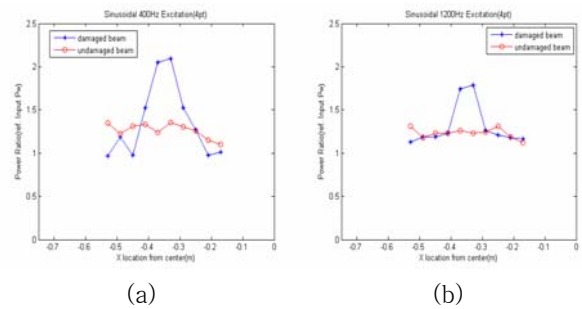


Fig.6 Spatial distribution measurement of the transmitted power ratio for the undamaged and damaged beam (a) sine 400Hz excitation (b) sine 1.2kHz excitation

참 고 문 헌

- (1) Noiseux D. U., 1970, "Measurement of Power Flow in Uniform Beam and Plates", Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 47, pp. 238~247.
- (2) Pavic G., 1976, "Measurement of Structure Borne Wave Intensity, Part I : Formulation of the Methods", Journal of Sound and Vibration, Vol. 49, pp. 221~230.
- (3) Verheij J. W., 1980, "Cross Spectral Density Methods for Measuring Structure Borne Power Flow on Beams and Pipes", Journal of Sound and Vibration, Vol. 70, pp. 133~139.
- (4) Linjama J. and Lahti T., 1992, "Estimation of Bending Wave Intensity in Beams Using the Frequency Response Technique", Journal of Sound and Vibration, Vol. 153, pp. 21~36.
- (5) 이덕영, 박성태, 1997, "2차원 구조물의 진동 인텐시티 계측에 대한 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제 7권, 제 3호, pp. 477~488.
- (6) 이덕영, 박성태, 1997, "반무한보의 진동 인텐시티 계측에 대한 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제 7권, 제 3호, pp. 477~488.

1호, pp. 43~53.

(7) 박도현, 홍석윤, 길현권, 1998, “동일 평면상에서 연성된 직사각형 평판의 진동파워흐름 해석”, 한국소음진동공학회논문집 제 8권, 제 6호, pp. 1053~1061.

(8) 이효행, 김창열, 길현권, 이용현, 홍석윤, 2005, “연성보의 진동 인텐시티 측정”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 728~731.

(9) 김창열, 길현권, 홍석윤, 2005, “감쇠단을 갖는 보의 면내 진동인텐시티 측정에 관한 연구”, 한국음향학회지 제 24권, 제 7호, pp. 371~378.

(10) 전진숙, 길현권, 이병철, 김창열, 홍석윤, 2003, “연성평판의 면의 진동인텐시티 측정”, 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp.831~835.

(11) 홍진숙, 2001, “MSC/NASTRAN 및 PCL을 이용한 구조물 내의 진동 파워 흐름 해석 기법”, 한국소음진동공학회논문집, 제 11권, 제 8호, pp. 303~313.

(12) 조대승, 김사수, 이동환, 최태목, 2000, “선체 구조 요소의 진동인텐시티 해석”, 한국소음진동공학회 창립10주년 기념 학술대회논문집, pp. 881~887.

(13) 박도현, 홍석윤, 길현권, 1998, “동일 평면상에서 연성된 직사각형 평판의 진동파워흐름해석”, 한국소음진동공학회논문집, 제 8권, 제 6호, pp. 1053~1061.

(14) 최재성, 길현권, 홍석윤, 2001, “임의의 방향 점가진력에 의한 연성 평판 진동의 파워흐름해석”, 한국소음진동공학회논문집, 제 11권, 제 6호, pp. 181~192.

(15) 박도현, 김일환, 홍석윤, 길현권, 2002, “셀 구조물의 중고주파 진동 파워흐름해석”, 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1177~1184.

(16) Li T. Y., Liu J. X. and Zhang T., 2004, “Vibrational Power Flow Characteristics of Circular Plate Structure with Peripheral Surface Crack”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 276, pp. 1081~1091.

(17) Li T. Y., Zhang W. H. and Liu T. G., 2001, “Vibrational Power Flow Analysis of Damaged Beam Structures”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 242, pp. 59~68.

(18) Lee H. P., Lim S. P. and Khun M. S., 2006, “Diversion of Energy Flow Near Crack Tips of a Vibrating Plate Using the Structural Intensity Technique”, Journal of Sound and Vibration, Vol. 296, pp. 602~622.

(19) 허영철, 김재관, 박성환, 2007, “보의 폭 전체에서 발생된 열린 균열을 갖는 외팔보의 손상모델에 관한 연구”, 한국소음진동공학회논문집, 제 17권, 제 10호, pp. 936~945.