

수직방향의 가속도 측정을 이용한 slit이 있는 박판의 파워흐름 Characteristics of Power flow estimated from measured accelerations of a thin plate having a slit

허영철*·정태영**·김재관†

Young-Cheol Huh, Tae-Young Chung and Jae-Kwan Kim

1. 서 론

사회 기반시설물의 급작스런 붕괴는 인명피해는 물론 복구를 위해 커다란 경제적 비용이 소요되므로 이러한 사회적 손실을 사전에 예방하기 위해 구조물 건전성 감시(SHM: Structural Health Monitoring)에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다. 이 중에서도 구조물의 손상을 진단하고 그 정도를 평가하는 부분은 SHM 시스템 구축을 위한 핵심요소 중의 하나로서 가능한 초기 단계의 미세한 손상을 찾기 위해 다양한 센서의 활용이 시도되었고 아울러 적합한 신호처리 기법들이 함께 개발되어 왔다.

전통적인 가속도계를 이용한 손상탐지 기법은 주로 진동신호를 기반으로 구조물의 고유진동수 또는 고유모드 등의 모달특성 변화로부터 손상의 위치 및 정도를 규명할 수 있는 많은 알고리즘들이 제안되어 왔다. 진동기반의 손상탐지 기법은 제한된 수의 가속도계 배치만으로도 구조물 전 영역의 건전성을 감시할 수 있고 이미 상용화된 수많은 분석 장비와 잘 정립된 신호처리 기법을 활용할 수 있다는 장점 때문에 실구조물의 SHM 시스템 구축에는 전통적인 가속도계의 설치가 기본적으로 포함되고 있다. 최근에도 이를 활용한 실구조물의 손상탐지에 관한 연구가 계속 시도되고 있다. 그러나 진동기반의 손상탐지 기법에 적용되는 알고리즘의 효율성은 해석 모델, 실험 데이터 등에 의한 시스템 규명 결과에 크게 의존하고 대부분 3차 이하의 저차 고유모드 특성을 이용하므로 손상에 대한 민감도가 그리 크지 않은 것이 단점으로 지적되어 왔다.

2000년대 이후 단순 평판 및 보 구조물의 손상 추정을 위하여 진동 파워 특성을 적용하려는 연구가 새롭게 시도되고 있다. 진동 파워란 진동하고 있는 구조물에서 임의의

단면을 통과하는 진동 에너지의 흐름을 나타내는 벡터로서 그 크기와 방향에 대한 공간적인 분포를 알면 외부 기진원에 의해 공급된 진동 에너지가 구조물에 전파되는 경로를 파악할 수 있다. 구조물의 설계 단계에서 진동 파워를 이용하여 진동 및 소음원의 주된 전파 경로를 규명함으로써 효율적인 방진방음 대책을 수립할 수 있고 다른 한편으로 전파 경로의 변화로부터 구조물의 물리적인 변화를 유추해 볼 수도 있다.

Li 등은 전달 행렬법을 이용하여 균열이 있는 원형 평판 및 보 구조물에 대한 진동 파워의 수치적인 계산 결과를 보여주었다. Lee 등은 상용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 균열이 있는 평판에 대한 진동 파워를 계산하고 균열 주변에서 기진원의 위치에 따른 파워흐름의 특성 변화를 비교 검토하였다. Wong 등은 진동 파워의 허수 성분 즉, 리액티브(reactive) 파워를 이용하여 평판의 손상을 규명할 수 있는 수치해석 기법을 제안하였다. 허영철 등은 진동 파워의 실수 성분 즉, 액티브(active) 파워를 이용하여 단순한 보와 평판의 손상을 규명할 수 있는 기법을 제안하고 수치해석 및 실험을 통해 이를 검증하였다. 또한 레이저 속도계를 활용한 손상된 보의 실험을 통해 제안한 기법이 비교적 고주파 영역에서 작은 크기의 손상까지 탐지할 수 있다는 것을 보였다.

본 논문에서는 측정 가속도의 주파수 응답함수를 이용하여 slit 형태의 손상이 있는 박판에서 손상을 탐지하고 그 방향을 규명할 수 있는 기법을 제안한다. 대상 모델은 네 변의 길이가 1.2m인 정사각형 박판이며 판의 중앙으로부터 일정한 위치에 6cm 길이의 인위적 손상을 가한다. 손상은 박판의 수평축에 대해 수직과 경사 방향의 2가지 경우를 고려한다. 박판의 중앙에 가진기를 설치하여 랜덤하중을 가하고 일정한 간격으로 배치한 가속도계로부터 손상 주변에서 가속도 응답을 측정한다. 측정된 가속도 응답으로부터 주파수 응답 함수를 구하고 이로부터 진동 파워를 추정한다. 동일한 제원의 손상이 없는 박판에서 추정된 진동 파워를 기준으로 손상이 있는 박판에서 추정된 진동 파워의 변화를 살펴보고 손상을 식별할 수 있는 적절한 지수를 제안한다. 아울러 수평 및 수직 성분의 진동 파워 변화를 이용하여 손상 방향을 추정할 수 있는 기법을 제안한다. 수치해

* 정희원, 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부
E-mail : ychuh@kimm.re.kr
Tel : (042) 868-7468, Fax : (042) 868-7418

** 정희원, 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

† 정희원, 서울대학교 건설환경공학부
E-mail : jkwankim@snu.ac.kr
Tel : (02) 880-9214, Fax : (02) 884-3976

석 및 실험을 통해 본 논문에서 제안하는 손상탐지 기법의 유효성을 검증한다.

2. 본 론

2.1 측정 가속도를 이용한 박판의 진동 파워

박판이론에 의해 정의되는 내력(또는 우력)과 수직 변위(또는 각변위)와의 관계식에 의해 x 방향의 시간평균 진동 파워는 다음 식과 같이 정의한다.

$$\langle p_x(t) \rangle_t = D \left\langle \frac{\partial(\nabla^2 w)}{\partial x} w - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \frac{\partial \dot{w}}{\partial x} - (1-\nu) \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \frac{\partial \dot{w}}{\partial y} \right\rangle_t \quad (1)$$

식 (1)의 우변에 있는 변위의 도함수는 Fig. 1의 가속도 배열을 이용한 유한차분법에 의해 근사화할 수 있다. 한편, 측정된 신호의 통계적 특성이 stationary하다는 가정 하에 식 (1)에 의한 진동 파워는 유한차분법과 상호 스펙트럼 밀도함수를 이용하면 주파수 영역에서 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$p_x(\omega) = \frac{D}{4\omega^3 \Delta^3} \text{Im} - 8(3+\nu)G_{36} + 4G_{16} + 4G_{38} \\ + (1-\nu)(2G_{23} - G_{25} + G_{27} - G_{34} + G_{45} - G_{47} - 2G_{56} + 2G_{67}) \\ + 2(1+\nu)(G_{35} + G_{37} + G_{26} + G_{46}) \quad (2)$$

여기서, D 는 굽힘강성, Δ 는 가속도계의 간격 그리고 G_{ij} 는 i 번째와 j 번째 가속도 사이의 상호스펙트럼 밀도함수이다.

y축 방향의 진동 파워는 Fig.1의 가속도 배열을 반시계 방향으로 90° 회전시킨 후 식 (2)에 의해 구할 수 있다.

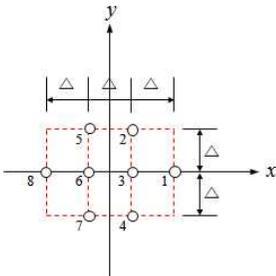


Fig. 1 변위도함수의 유한차분 근사화를 위한 가속도배열

2.2 손상 및 비손상 모델의 진동파워

수치해석 및 실험을 위한 모델은 네 변의 길이가 1.2m인 알루미늄 재질의 박판이다. 재료의 탄성계수는 70GPa, 밀도는 2.710kg/m³이다. 박판의 네 변은 반사파에 의한 간섭을 줄이기 위해 경계 변으로부터 각각 30cm 정도의 위치까지 모래를 채운 공간 내에 묻히도록 하였다.

박판의 중앙점에 2~6.4 kHz 주파수 범위의 랜덤하중을

가하고 손상위치 주변에서 일정한 간격으로 수직방향의 가속도 응답을 구했다. 손상은 중앙점으로부터 약 -12cm 떨어진 x축 상에 위치하고 그 길이는 6cm에 해당한다. 손상의 방향은 x축에 대해 수직인 경우와 45° 경사인 경우를 선정하였다.

수치해석 및 실험을 통해 얻은 가속도의 주파수 응답 함수로부터 손상 주변의 진동 파워를 추정하였다. 손상이 없는 평판의 진동 파워를 기준으로 손상이 있는 평판의 진동 파워의 변화를 손상 지수로 정의하고 그 결과를 도시하였다. 도시된 손상지수의 결과를 살펴보면 손상에 가장 가까운 위치에서 그 값이 최대이며 그 이외의 위치에서는 두드러진 변화를 관찰할 수 없었다. 한편, 손상 지수가 최대 값을 갖는 위치에서 x와 y방향의 진동 파워 성분에 의한 손상 지수를 분리하고 최대 손상지수에 대한 그 비율을 각도의 크기로 나타내었다. 수직 방향 손상의 경우 각도에 대한 실험 및 수치해석 결과는 각각 13.9°, 15.2°였고 45° 경사 방향의 경우 각각 39.7°, 40.5°로 추정되었다. 수직 방향의 손상은 진동 파워 흐름과 normal하게 위치하므로 주로 x축 방향의 진동 파워가 지배적임을 알 수 있었으며, 45° 경사 방향의 경우 x와 y축 방향의 진동 파워 모두 고른 변화를 보여준다. 이러한 진동 파워의 성분에 대한 분석을 통해 손상의 방향을 추정할 수 있음을 확인하였다.

3. 결 론

네 변이 모래에 의한 경계조건을 갖고 길이가 1.2m인 정사각형 박판에 대해 6cm의 인위적 손상을 가한 후 수직방향 가속도의 주파수 응답함수를 이용하여 수치해석 및 실험적 방법으로 진동 파워를 추정하였다. 손상이 없는 모델과 손상이 있는 모델에 대해 추정된 진동 파워의 추정 결과를 바탕으로 손상지수를 도출하고 손상 주변에서 그 값을 살펴 보았다. 그 결과 손상에서 가장 가까운 위치의 손상지수 값이 최대이고 주변의 손상지수에 비해 그 크기가 두드러짐을 확인할 수 있었다. 또한, 손상지수가 최대인 위치에서 x와 y축 방향의 진동 파워 성분에 대한 분석을 통해 손상의 방향을 추정할 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업기술연구회의 지원으로 수행된 한국기계연구원 연구의 주요사업인 “환경 통합 생존성 설계해석 기술개발”의 결과이며 관련 지원에 감사드립니다.