



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2010-0067986
(43) 공개일자 2010년06월22일

(51) Int. Cl.

G01M 7/02 (2006.01) G01H 11/00 (2006.01)

G01B 7/00 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2008-0126618

(22) 출원일자 2008년12월12일

심사청구일자 없음

(71) 출원인

세종대학교산학협력단

서울 광진구 군자동 98 세종대학교

(72) 발명자

황호연

서울특별시 송파구 방이2동 효성올림픽카운티 701호

(74) 대리인

권오식, 박창희, 김종관

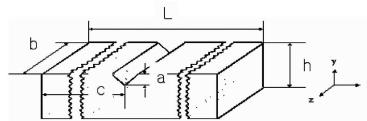
전체 청구항 수 : 총 3 항

(54) 고유진동수 기반 구조물 손상탐지 방법

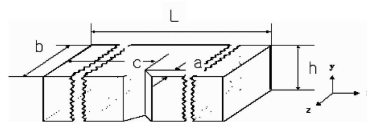
(57) 요약

본 발명은 고유진동수비 측정에 기초한 구조물 손상탐지 방법에 관한 것으로, 구조물의 손상 전 고유진동수를 계산하는 단계, 구조물의 손상 후 손상 위치와 크기 변화에 따른 고유진동수를 계산하는 단계, 구조물의 고유진동수비를 해석하는 단계, 주파수 응답함수를 이용한 강성변화를 계산하는 단계, 손상 부위를 검출하는 단계로 이루어지는 것을 특징으로 한다.

대표도 - 도1



(A)



(B)

특허청구의 범위

청구항 1

구조물의 손상 전 고유진동수와 손상 후 손상 위치와 크기 변화에 따른 고유진동수 비를 사용하여 구조물의 손상 위치와 크기 및 방향을 탐지하는 것을 특징으로 하는 것을 특징으로 하는 고유진동수 기반 구조물 손상탐지 방법.

청구항 2

제 1항에 있어서,

주파수 응답함수를 이용한 강성변화를 산출하는 것을 특징으로 하는 고유진동수 기반 구조물 손상탐지 방법.

청구항 3

제 2항에 있어서,

하기의 수학식으로 강성변화를 산출하는 것을 특징으로 하는 고유진동수 기반 구조물 손상탐지 방법.

$$EI = B(x, i) / A(x, i)$$

명세서

발명의 상세한 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 고유진동수비 측정에 기초한 구조물의 손상탐지 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 최근 산업체에서 항공기, 회전기계, 교량, 해양구조물 등과 같은 구조물의 손상을 탐지하고, 위치를 확인하며 그 성격을 규정하는 기술을 개발하는데 관심이 커지고 있다. 피로 하중이나 기타 반복적인 하중을 받는 항공기, 선박, 발전소 터빈 등의 구조물과 여러 기계부품은 운영 중 발생하는 피로(fatigue), 층간분리(delamination), 균열(crack), 부식 등이나 제조 시의 결함으로 인해 손상이 발생하게 된다.

[0003] 구조물의 수명에 이러한 위험이 내재하기 때문에 손상을 조기에 탐지하고 위치를 확인하는 많은 연구가 최근 진행되어 왔다. 종래에는 항공기를 비롯하여 구조물을 시각적으로 손상 검사하는 방법이 통상적으로 사용되어 왔으며 이 방법은 시스템을 중단하고 해체하는 작업이 요구된다. 그러나 이러한 해체 작업을 통한 검사가 어려운 원자력 발전소, 항공기 구조물, 다리 같은 경우, 특히 예를 들면 강풍을 막는 철 구조물과 강화 콘크리트(prestressed concrete) 구조물로 된 다리의 경우 쉽게 분해할 수 없는 봉합된 요소로 되어 있다.

[0004] 따라서 이러한 경우 검사 과정을 정기적으로 데이터를 측정하고 분석하여 비정상적인 작동이나 손상을 초기에 알려주는 건전성 모니터링 시스템(health monitoring system)으로 대체하는 것이 요구되고 있다.

발명의 내용

해결 하고자하는 과제

[0005] 본 발명의 목적은 종래 기술의 문제점을 극복하기 위하여, 구조물과 기계의 외부 표면에서 측정한 진동실험 값만으로 구조물의 손상탐지와 기계의 작동상태를 판단하는 방법을 제공하는데 있다.

[0006] 본 발명은, 고유진동수와 모드 형상을 사용하는 모드 해석(Modal Analysis)을 이용하게 때문에, 모드변수들이 구조물의 특성에만 관련이 있고 외부에서 가해진 가진(excitation)과 관련이 없으며 한 곳에서 측정한 값들만으

로 구조물의 특성을 표현할 수 있다는 점에서 다른 방법들에 비해 장점을 가지고 있다.

[0007] 또한 본 발명에 의하면 거의 실시간으로 측정이 가능한 진동의 특성값인 손상 전후의 고유진동수비를 사용하여 구조물의 손상 위치와 크기 및 방향을 탐지할 수 있다.

과제 해결수단

[0008] 상기한 바와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명의 고유진동수 기반 구조물 손상탐지 방법은, 구조물의 손상 전 고유진동수와 손상 후 손상 위치와 크기 변화에 따른 고유진동수 비를 사용하여 구조물의 손상 위치와 크기 및 방향을 탐지하는 것을 특징으로 하는 것을 특징으로 한다.

[0009] 이 때, 주파수 응답함수를 이용한 강성변화를 산출하는 것이 바람직하다. 이 때, 하기의 수학식으로 강성변화를 산출하는 것이 더욱 바람직하다.

[0010]
$$EI = B(x, i) / A(x, i)$$

효 과

[0011] 본 발명은 손상 전후의 고유진동수비를 사용하여 구조물의 손상 위치를 찾아내고 구조물이 손상된 정도를 확인 하는 방법을 제공해줄을 목적으로 고안된 것으로서, 구조물을 시각적으로 손상 검사하는 방법이 통상적으로 사용하는 시스템을 중단하고 해체하는 작업 없이, 거의 실시간으로 구조물의 손상 위치와 크기 및 방향을 탐지할 수 있는 장점이 있다.

발명의 실시를 위한 구체적인 내용

[0012] 이하, 상기한 바와 같은 구성을 가지는 본 발명에 의한 고유진동수 기반 구조물 손상탐지 방법을 첨부된 도면을 참고하여 상세하게 설명한다.

[0013] 구조물의 손상은 도 1에 도시된 바와 같이 구조물의 높이 방향 손상(도 1(A))과 구조물의 폭 방향 손상(도 1(B)) 두 가지로 분류할 수 있다. 손상을 이렇게 두 가지로 분류하는 이유는, 손상이 높이 방향으로 존재하는 경우 일반적으로 고유진동수가 손상 전에 비해 감소하고 폭 방향의 경우, 손상 후 오히려 몇 개의 고유진동수가 증가하기 때문이다.

[0014] 구조물은 다수의 보를 요소로 모델링할 수 있으므로, 전체 유한요소 행렬을 중첩하여 전체 질량행렬과 강성행렬을 구하여 모달 해석을 통하여 고유진동수를 계산할 수 있다. 한편, 각 요소의 높이 방향과 폭 방향의 손상을 가정하고, 각각에 대해 같은 방법으로 손상 후의 고유진동수 값들을 계산할 수 있다. 이로부터 고유진동수비의 변화에 따른 고유진동수비 곡선을 생성하게 되면, 고유진동수비와 손상의 관계를 통해 손상의 위치와 손상의 크기는 고유진동수비와 관련이 있다는 것을 알 수 있으며 그래프에는 손상의 위치와 크기 정보가 포함된다.

[0015] 일례로, 도 2는 외팔보에 높이방향으로 1개의 손상을 보 길이를 따라 위치변화를 주며 계산한 고유진동수를 이용하여 각 모드별 2차원 곡선에 손상의 깊이를 변화시켜 3차원 형태로 나타낸 고유진동수비의 그래프이다. 도 3은 외팔보에 폭 방향으로 1개의 손상을 보 길이를 따라 위치 변화를 주며 계산한 고유진동수비의 변화를 나타내고 있다.

[0016] 도 2 및 도 3에서, 손상 크기가 커질수록, 손상위치가 고정단에 가까울수록 손상전후 고유진동수가 크게 변함을 알 수 있으며, 각각 2차 및 3차 모드의 고유진동수비 변화로 손상 크기가 커질수록 고유진동수가 크게 변화되고 손상 위치에 따라 고유진동수비 증감이 반복됨을 알 수 있다. 따라서 손상의 깊이와 손상의 위치에 따른 고유진동수비 곡선을 통해 손상 위치와 깊이를 검출 할 수 있다.

[0017] 손상이 단일 부위에 존재하는 경우, 이전의 방법으로는 손상의 위치를 파악하기 힘들므로 주파수 응답함수를 병행 사용하여 손상의 위치와 강성변화를 계산할 필요가 있다. 이후 고유진동수비 그래프를 사용하여 손상의 위치

를 재확인하며 손상의 방향을 탐지할 수 있다.

[0018] N개의 자유도와 감쇠계수를 가지고 조화입력을 받는 구조물의 진동에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

수학식 1

[0019]
$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\}$$

[0020] 여기서 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 질량, 감쇠, 강성을 나타내고 $\{x(t)\}$ 는 각각의 자유도에서 시간에 대한 변위를 나타낸다. 조화입력을 받는다고 가정하면 $f(t) = \{F(\omega)\}e^{j\omega t}$ 이고, 변위는 $x(t) = \{X(\omega)\}e^{j\omega t}$ 이다. 운동방정식에 대입하여 정리하면

수학식 2

[0021]
$$\{X(\omega)\} = \frac{\{F(\omega)\}}{(-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])}$$

[0022] 여기서 $H(\omega) = (-\omega^2[M] + j\omega[C] + [K])^{-1}$ 는 주파수 응답함수가 된다. 만약 구조물에 감쇠가 없다고 가정하고 주파수 응답함수를 이론적인 해석값과 실험값에서 구한 값으로 각각 나타내면

수학식 3

[0023]
$$H_A(\omega) = ([K]_A - \omega^2[M]_A)^{-1}$$

수학식 4

[0024]
$$H_T(\omega) = ([K]_T - \omega^2[M]_T)^{-1}$$

[0025] 여기서 $[K]_A$ 와 $[K]_T$ 는 유한요소 해석과 진동실험값으로부터 생성된 강성행렬이다.

[0026] 손상 전후의 질량변화를 무시할 수 있고 손상 전에는 해석값과 실험값이 같다고 가정하고 손상 후에는 실험값으로 주파수 응답함수를 구한다고 가정한다. 해석과 실험의 주파수 응답 함수식에서 다음과 같이 강성값의 변화를 찾을 수 있다.

[0027] 수학식 3과 수학식 4의 양변의 역행렬을 취하면

수학식 5

[0028]
$$[H_A(\omega)]^{-1} = [K]_A - \omega^2[M]_A \quad H_A(\omega) = ([K]_A - \omega^2[M]_A)^{-1}$$

수학식 6

[0029]
$$[H_T(\omega)]^{-1} = [K]_T - \omega^2[M]_T$$

[0030] 해석값에서 실험값을 빼주면 (이 때 $[M]_A = [M]_T$)

수학식 7

[0031]
$$[H_A(\omega)]^{-1} - [H_T(\omega)]^{-1} = [K]_A - [K]_T$$

[0032] 여기서 $[K]_A - [K]_T$ 는 손상이 발생하여 생긴 강성값의 변화로서, 이를 $\Delta[K]$ 로 정의하여 식을 정리하면 강성값의 변화량과 주파수 응답함수의 변화량과의 관계식은

수학식 8

[0033]
$$\Delta[K] = [K]_A - [K]_T = [H_A(\omega)]^{-1} - [H_T(\omega)]^{-1}$$

[0034] 수학식 8에서 양변에 주파수 응답함수의 실험값을 곱한 후 주파수응답함수의 정의를 이용하여 다시 정리하면

수학식 9

[0035]
$$[H_T(\omega)] \times \Delta[K] = [H_T(\omega)] \{ [K]_A - \omega^2 [M]_A \} - [I]$$

[0036] 여기서 $[H]_A$ 는 $[K]_A$ 와 $[M]$ 을 이용하여 항상 계산이 가능하며 특정 주파수에서 주파수 응답함수의 실험값 중 첫 번째 행을 모두 알고 있다고 가정하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

수학식 10

[0037]
$$[H_{T_{11}} H_{T_{12}} \dots H_{T_{1n}}]_T \begin{bmatrix} \Delta K_{11} & \Delta K_{12} & \dots & \Delta K_{1n} \\ \Delta K_{21} & \Delta K_{22} & \dots & \Delta K_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta K_{n1} & \Delta K_{n2} & \dots & \Delta K_{nn} \end{bmatrix}$$

$$= [H_{T_{11}} H_{T_{12}} \dots H_{T_{1n}}]_T \begin{bmatrix} H_{A_{11}} & H_{A_{12}} & \dots & H_{A_{1n}} \\ H_{A_{21}} & H_{A_{22}} & \dots & H_{A_{2n}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{A_{n1}} & H_{A_{n2}} & \dots & H_{A_{nn}} \end{bmatrix}^{-1} - [1 \ 0 \dots 0]$$

[0038] 구하고자 하는 변수의 개수를 줄이고 강성행렬의 물리적 의미를 유지하기 위해 EI 값만 따로 분리하면 다음과 같다.

수학식 11

[0039]
$$[K] = EI \left(\frac{1}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{bmatrix} \right) = EI \cdot [K']$$

[0040] 이때 $[K']$ 은 유한요소 모델로부터 모두 알고 있는 값이므로 계산이 가능하다. 만약 식(10)의 우변으로부터 얻은 $1 \times n$ 의 행렬 중 i 번째 열에 값이 존재한다면, $[\Delta K]$ 의 i 번째 열에 해당하는 요소의 강성이 변화하였음을 의미하고 해당하는 요소의 $[K']$ 을 알고 있으므로 EI 값만 미지수가 된다. 즉

수학식 12

[0041]
$$([H]_T)_{xn} \times [\Delta K']_{(i,i)} \times EI =$$

$$([H]_T)_{xn} \times ([H]_A^{-1})_{(i,i)} - [I]_{(x,i)}$$

[0042] 이다. 여기서 $([H]_T)_{xn}$ 은 실험으로부터 얻은 주파수응답함수의 행렬 중 x번째 행, $[\Delta K']_{(i,i)} \times EI$ 는 $[\Delta K]$ 의 i 번째 열에 수학식 11을 적용한 행렬이고, $([H]_A^{-1})_{(i,i)} = ([K]_A - \omega^2 [M])_{(i,i)}^{-1}$ 이며 $[I]_{(x,i)}$ 는 단위행렬의 x번째 행의 i 번째 열의 값을 의미한다. 여기서 EI를 제외한 모든 값은 계산 가능하므로 수학식 12에서 EI를 제외한 좌변의 값을 $A(x, i)$, 우변의 값을 $B(x, i)$ 라 두면,

수학식 13

[0043]
$$EI = B(x, i) / A(x, i)$$

[0044] 가 된다.

[0045] 여기서 계산되는 EI 값으로 구조물의 손상에 의해 변화된 강성값을 구할 수 있다.

[0046] 본 발명은 상기한 실시예에 한정되지 아니하며, 적용범위가 다양함은 물론이고, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 본 발명이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 누구든지 다양한 변형 실

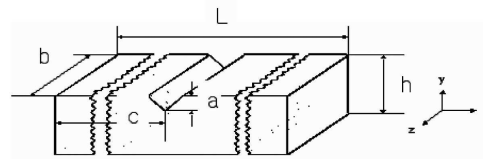
시가 가능한 것은 물론이다.

도면의 간단한 설명

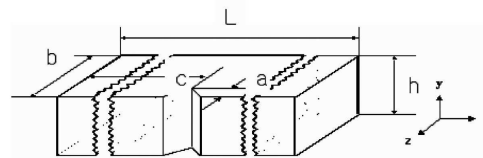
- [0047] 도 1은 구조물 손상 종류.
 [0048] 도 2는 높이 방향의 손상이 있는 보의 고유진동수비 그래프.
 [0049] 도 3은 폭 방향의 손상이 있는 보의 고유진동수비 그래프.

도면

도면1

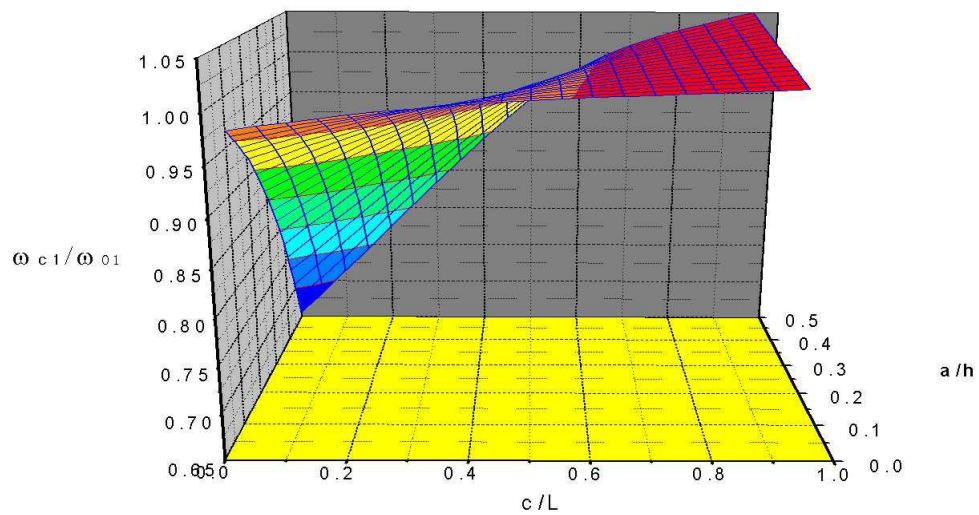


(A)



(B)

도면2



도면3

