

내재민감도 함수를 이용한 단열타일의 손상 탐지 기법

Structural Damage Detection for Metal Panel Using Embedded Sensitivity Functions

양 철 호† · 더글러스 아담스*

Chulho Yang and Douglas E. Adams

(2005년 2월 25일 접수 ; 2005년 5월 16일 심사완료)

Key Words : Embedded Sensitivity Function(내재민감도 함수), Structural Health Monitoring(구조물 안전도 감시), Damage Detection(손상 탐지)

ABSTRACT

Vibration-based damage identification method using embedded sensitivity functions is discussed. The theory of embedded sensitivity functions is reviewed and applied to identify damage in a three degree-of-freedom system and a metallic panel. Embedded sensitivity functions are algebraic combinations of measured frequency response functions that reflect changes in the response of mechanical systems when mass, damping or stiffness parameters are changed. By comparing the embedded sensitivity functions with finite difference functions using undamaged and damaged frequency response functions, damage is shown to be properly detected, located and quantified in theory and practice assuming that structures of interest are only damaged in one location. Simulated and experimental results indicate that the technique is most effective when changes to frequency response functions are small to avoid distortions in the estimated perturbations due to variations in the sensitivity functions.

기 호 설 명

C_{mn} : 질량요소 m 과 n 을 연결하는 감쇠계수
 $H_{jk}(\omega)$: 주파수 응답함수(FRF)
 K_{mn} : 질량요소 m 과 n 을 연결하는 탄성계수
 M_{mo} : 질량요소 m
 ω : 주파수
 $T_{mk,k}$: 진동전달률(transmissibility)

1. 서 론

구조물 안전도 감시 기법(structural health monitoring, SHM)이란, 잠재적인 위험을 미리 방지하기 위해 구조물의 안전 상태를 지속적으로 감시하는 기법을 말한다. 이 기법은 구조물의 부식이나, 균열, 결합부의 헐거워짐 또는 다른 형태의 파손을 조기에 파악하는데 목적을 두고 있다. 우주 왕복선의 단열타일에 대한 손상 탐지 기법으로는 적외선을 이용한 열상법(ultrared thermography), 초음파 검사, 방사선 검사 등이 이루어져 왔으며, 이러한 기법들은 시스템이 운행 중일 때는 적용이 불가능 하며 엄청난 양의 장비와 준비시간, 잘 훈련된 전문가가 필요하고 실제 구조물의 상태와 상관없이 주기적으로 이루어져야 하는 단점이 있다. 반면에 구조물 안전도 감시 기법은 운행

† Corresponding Author : Member, ArvinMeritor, Inc.
E-mail : chulho.yang@arvinmeritor.com

Tel : (1-812) 341-2354, Fax : (1-812) 341-2350

* Purdue University

중에 있는 시스템의 동적 응답 측정 데이터를 기반으로 구조물의 건강 상태를 실시간 감시하게 된다. 이 논문에서 소개된 바와 같이 진동 신호에 기초한 구조물 진단 기법들로는 고유진동수나 모드의 변화, 모드형상 곡률, 강성이나 질량 행렬, 진동전달률, 비선형 특성, 신경망 회로 등을 이용한 방법 등이 있다. Doebeling 등은 진동신호에 기초한 기법들, 즉 고유 진동수, 모드형상, 모드곡률 기법들에 대해 많이 연구하고 정리해 놓았다⁽¹⁾. Afolabi는 반공진(anti-resonance) 주파수가 시스템 변수의 변화에 민감하여 손상의 감지나 위치 추적에 더 유리함을 입증하였으며⁽²⁾, Schulz와 Zhang 등은 진동전달률 함수(transmissibility)를 복합재 보(composite beam)에 대한 손상 탐지에 적용하였다^(3,4). Johnson 과 Adams는 진동 전달률 함수를 이용한 평균요소 파손 분석 기법을 개발하였다⁽⁵⁾. Adams와 Farrar는 주파수 영역에서 AR-ARX 모델을 선형/비선형 구조물 손상 분석에 응용한 기법을 개발하였다⁽⁶⁾. Meneghetti와 Maggiore 등이 민감도 분석과 고유 진동수를 이용하여 외팔보의 균열을 감지하는 기법을 개발하였다⁽⁷⁾. Wang과 Zhang은 민감도 분석을 이용하여 모드 변수들이 구조물 변수의 변화에 그리 민감하지 않으나, 특정 주파수 영역에서는 반공진, 전달함수, 주파수 응답함수 등이 그 변화에 민감함을 입증 하였다⁽⁸⁾. 백용진 등은 다양한 조건하에 측정된 데이터에 대한 다변량 통계기법을 이용하여 발파상수와 감쇠지수 산정을 위한 모델을 생성하고 손상 분석에 적용하였다⁽⁹⁾. 제한된 측정 데이터를 이용한 민감도 분석 기법이 Lin과 Lim에 의해 개발되었으며, 이들의 연구는 Vanhonaker, Belle, Liu, Lim, and Liew의 이전 연구에 기초를 두고 있다^(10,13). 내재민감도(embedded sensitivity)라 명명된 민감도 식이 본 저자들에 의해 새로운 유도 과정을 거쳐 일반식으로 표현되었으며, 시스템 레벨의 진동 소음 문제와 비선형 시스템 분석, 구조물 안전 진단 기법 등에 응용 되었다^(14,16).

이 연구에서는 주파수 응답함수의 질량, 감쇠, 탄성 계수에 대한 편미분 함수, 즉 내재 민감도(embedded sensitivity) 함수를 이용한 구조물 진단 기법을 개발 하였다. 내재민감도 함수의 장점은 실험데이터 만을 이용해서 계산할 수 있다는 것과 계산된 민감도 값이 물리적 의미를 가짐으로써 직접적으로 탄성이나 감쇠, 질량 변화에 대한 예측 값을 제공할 수 있다는데

있다. 손상 분석에 이용되는 대부분의 기법들이 신호량에 기초한 것으로 구조의 상태변화량을 예측하기 위해서는 이들 신호량을 보정해야 하는 것과는 대조적이다. 이러한 장점으로 인해 측정된 데이터로부터 직접 구조물의 상태에 대한 정보를 얻어냄으로써 최소한의 데이터 측정 및 처리량을 요하므로 이상적으로 구조물 손상 기법에 이용될 수 있다. 또한 기존의 기법들로는 감지하기 어려웠던 매우 적은량의 손상을 정확히 감지할 수 있으므로 구조물의 손상 초기의 진단에 매우 유리하다. 이 기법을 이용함으로써 구조물의 손상에 기인한 질량이나 탄성계수의 변화를 비교적 빠르고 정확하게 파악할 수 있음이 입증되었다. 이 기법의 단점으로는 구조물의 손상이 오직 한 곳에 집중이 되어있어야 한다는 것이며, 이 문제에 대한 연구는 향후 계속될 예정이다.

2. 내재민감도 함수

2.1 내재민감도 식의 유도

내재민감도 식은 시스템 수준의 진동 특성에 대한 부분 시스템 또는 구성요소 변화의 영향도를 분석하기 위하여 유도 및 적용되었다⁽¹⁴⁾. 이 민감도 식은 시스템 변수, 즉 질량, 감쇠, 탄성계수에 대한 주파수 응답 함수의 편미분 식으로부터 유도된 것이다. 다자유도의 집중질량 시스템에 대한 일반적인 내재민감도 함수는 식 (1)과 같이 표현되며 본 논문에서 탄성, 감쇠, 질량의 변화로 묘사되는 구조물 손상의 감지에 이용된다.

$$\frac{\partial H_{jk}(\omega)}{\partial K_{mn}} = -[H_{jm}(\omega) - H_{jn}(\omega)][H_{km}(\omega) - H_{kn}(\omega)] \quad (1a)$$

$$\frac{\partial H_{jk}(\omega)}{\partial C_{mn}} = j\omega \frac{\partial H_{jk}(\omega)}{\partial K_{mn}} \quad (1b)$$

$$\frac{\partial H_{jk}(\omega)}{\partial M_{m0}} = (j\omega)^2 \frac{\partial H_{jk}(\omega)}{\partial K_{m0}} \quad (1c)$$

여기서,

$$H_{j0}(\omega) = 0 \quad (1d)$$

식 (1b)와 (1c)는 식 (1a)에 단순히 주파수 항 $j\omega$ 또는 $(j\omega)^2$ 을 곱함으로써 얻어질 수 있으므로 여기서는 식 (1a)에 대해서만 구체적으로 설명하겠다. 식

(1a)의 좌측항은 주파수 응답함수 $H_{jk}(\omega)$ 의 편미분 식이며, 각 주파수에 대해서 k 점의 입력하중에 의한 j 점에서의 응답특성을 보여주는 주파수 응답함수 $H_{jk}(\omega)$ 가 m 과 n 번째 질량요소를 연결하는 탄성요소 K_{mn} 의 변화에 어떠한 영향을 받는지 나타내준다. 이 식의 우측항은 주파수 응답 함수만으로 구성되어 있으며, 각 주파수 응답함수는 각각 입출력 점과 탄성, 감쇠, 질량 요소 j, k, m, n 에 대한 함수이다.

위의 식 (1a-c)에 나열된 간단한 공식의 중요성은 이들 식이 주파수 응답 함수로부터 바로 계산될 수 있다는데 있으며, 이는 시스템 변수(시스템을 이루는 질량, 감쇠, 탄성계수 등)에 대한 구체적인 사전 정보가 없이도 바로 측정된 데이터로부터 민감도 식을 구할 수 있음을 의미한다. 대부분의 구조물 안전 진단 응용 분야에서, 주어진 구조물에 대한 구체적이고 정확한 모델 또는 정보의 확보가 어려운 경우가 많다. 따라서 측정된 주파수 응답함수의 형태로 얻어지는 실험 데이터 만을 이용해야 하는 경우가 많다. 식 (1)은 시스템 응답함수 데이터 만이 유용한 경우에 이용될 수 있도록, 식 (2)와 같이 측정된 진동전달률 (transmissibility) 함수에 대한 식으로 변형하여 표현될 수도 있다.

$$\frac{\partial H_{jk}(\omega)}{\partial K_{mn}} = -[T_{mk,k}(\omega) - T_{nk,k}(\omega)]^2 H_{kk}(\omega) H_{jk}(\omega) \approx -[T_{mk,k}(\omega) - T_{nk,k}(\omega)]^2 \quad (2)$$

이 식에서 $T_{mk,k}(\omega)$ 는 단일 입력 하중이 k 에 적용되었을 때 k 와 m 간의 진동전달률을 나타낸다. 식 (2)가 이 논문에는 응용이 되지 않았으나, 입력 하중의 측정이 불가능한 경우에도 여기에 소개된 기법이 적용이 가능함을 보이기 위해 간단히 설명되었다. 이 식의 중요성은 실험적 내재민감도 식이 입력 하중에 대한 측정이 불가능한 경우에도 구조물의 상대적 탄성계수의 변경량 예측에 이용될 수 있다는데 있다. ‘ \approx ’ 기호는 내재민감도 식의 원래 표현식이 진동전달률만의 함수와 비슷한 특성을 가짐을 나타낸다. 결과적으로, 진동전달률 함수가 구조물의 감쇠나 질량, 탄성계수의 변화에 대한 감지, 위치 파악 등에 이용될 수 있다. 그러나 이 식을 이용하는 경우의 단점은 파손량의 정량적인 계산이 불가능하다는데 있으며, 앞에 언급된 바와 같이 단지 상대적인 구조물 파손량의

변경 예측에 적용될 수 있다. 적용 방법은 내재민감도 식을 이용하는 것과 동일하다.

2.2 구조물 안전 감시 기법에의 적용을 위한 내재민감도 함수의 고찰

구조물 손상 탐지 기법에 내재민감도 함수를 적절하게 적용할 수 있음을 검증하기 위하여, 우선 선형 집중질량 시스템의 주파수 응답함수를 검토해 보았다. 식 (1)에 나타난 바와 같이 내재민감도 함수는 물리적 변수에 대한 주파수 응답함수의 편미분 값을 가진다. 시스템 변수의 변화는 이 미분값에 따라 그 시스템의 주파수 응답함수의 변화를 일으키게 된다. 일반적인 진동 소음 문제와 마찬가지로, 구조물의 손상 또한 종종 질량이나 감쇠, 탄성계수의 변화로 모델링 된다. 구조물의 파손에 기인한 주파수 응답함수의 변화를 파손이 없는 구조물로부터 구해진 내재민감도 함수와 비교검토함으로써 어떤 변수의 변화가 시스템의 응답 특성을 변경시켰는지 파악할 수 있다. 그러나 모든 역방향 문제(inverse problems)의 특성상 손상 탐지의 문제에서도 그 해가 유일하게 존재하지 않는다. 매우 간단한 저 자유도 문제의 경우에도, 주파수 응답함수 만이 주어진 경우에는 구조물의 손상에 의한 선형/비선형 민감도의 특성을 정확하게 구분하기는 쉬운 일이 아니다. 합리적인 결론을 이끌어 내기 위해서는 파손 정도나 유형에 대한 적절한 가정이 필요하다. 많은 경우에, 가장 쉽고 적절한 접근을 위하여 구조물의 파손이 단지 한군데에 존재한다고 가정하기도 한다. 추가적으로 그 파손이 탄성계수의 변화로 표현될 수 있다고 가정하면 그 문제는 유일해를 가지는 문제로 단순화 될 수 있다.

주파수 영역에서 응답함수 변경량의 그래프와 그의, 민감도 패턴을 비교하여 보면, 손상을 입은 변수에 대한 민감도 곡선이 손상 전후에 얻어진 시스템의 주파수 응답함수 차이를 나타내는 곡선에 어떤 특정 상수 값을 곱한 그래프와 같아야 한다. 여기에서 주파수 응답함수의 변경량 그래프와 가장 일치하는 민감도 함수 그래프를 통하여 구조물의 손상 위치를 파악할 수 있게 된다. 주파수 응답함수의 변화량과 그에 상응하는 민감도 함수의 비를 구함으로써 구조물의 파손량을 절대적인 값(탄성계수 : N/m, 감쇠계수 : Ns/m)으로 정확히 계산할 수 있다. 구조물의 실제 파손 정도를 정량적으로 비교적 정확하게 계산할 수

있음이 이 논문에서 제안된 기법의 주요 장점이기도 하다. 그러나 이러한 정확도는 탄성이나 감쇠, 질량의 변화량이 미세하여 유한 차분법에 의한 민감도 계산이 정확히 이루어질 때 얻어질 수 있음에 주의해야 한다. 미세한 정도의 주파수 응답함수 변화에 의한 탄성 계수의 변화량은 다음 식 (3)과 같이 나타내어진다.

$$\Delta K_{mn} = \frac{\Delta H_{jk}(\omega)}{-[H_{jm}(\omega) - H_{jn}(\omega)][H_{km}(\omega) - H_{kn}(\omega)]} \quad (3a)$$

여기서,

$$\Delta H_{jk}(\omega) = H_{jk}(\omega) \Big|_{\text{damaged}} - H_{jk}(\omega) \Big|_{\text{undamaged}} \quad (3b)$$

위의 식 (3)은 손상된 구조물의 주파수 응답함수에 대한 테일러 시리즈(taylor series)의 식 (4)를 변형하여 유도한 것이다.

$$H_{jk}(\omega)_{\text{damaged}} = H_{jk}(\omega)_{\text{Undamaged}} + \frac{\partial H_{jk}(\omega)}{\partial K_{mn}} \Delta K_{mn} \quad (4)$$

만일 구조물의 손상이 감쇠나 질량의 변화로 모델링 될 수 있다면 식 (1b)와 식 (1c)가 감쇠나 질량의 변화량을 계산하는데 비슷한 방식으로 적용될 수 있다.

3. 구조물의 손상 탐지에의 적용

3.1 탐지 절차

내재민감도 함수를 이용한 구조물의 손상 분석 기법은 다음과 같은 5항의 기본 절차에 따라 이루어진다. 여기에서 실제적인 데이터의 측정이나 처리, 센서 등에 대한 자세한 설명은 생략되었다.

(1) 주파수 응답함수 또는 진동전달률의 측정 및 계산 측정되는 데이터는 반드시 관심 요소를 포함하고 있어야 한다. 예를 들면, 탄성 변수 K_{12} 가 파손이 발생할 것으로 예상되는 관심 요소라면 1과 2점에서의 데이터가 반드시 측정되어야 한다.

(2) 손상되지 않은 초기 구조물에 대한 민감도 식을 입력치의 측정 여부에 따라 식 (1) 또는 (2)에 의해 계산한다.

(3) 주파수 응답함수를 연속적으로 또는 시간 간

격을 두고 측정하여 초기의 구조물 응답함수와의 차이에 대한 절대 변화량을 계산한다.

(4) 구해진 주파수 응답함수의 변화량과 초기 구조물의 내재민감도 함수를 비교 분석한다. 파손이 한 위치에서 발생한다고 가정하면, 주파수 응답함수의 변화와 가장 근접하게 일치하는 민감도 함수를 가지는 시스템 변수가 손상이 발생한 위치로 판단이 된다.

(5) 주파수 응답함수의 변화를 지속적으로 측정하고 민감도 함수를 수정해 나가므로써 구조물의 변화를 감지하고 분석해 나간다.

위에 열거한 과정을 3 자유도계의 해석 모델과 단일 타일에 적용함으로써 그 효율성과 타당성을 검증하였다.

3.2.3 자유도 해석 모델에의 적용

Fig.1에 나타낸 바와 같이 3 자유도를 갖는 집중 질량 모델에 대한 해석을 통하여 내재민감도 식을 이용한 구조물 손상 분석 기법의 기본 개념을 설명하였다. 이 모델의 질량, 탄성, 감쇠계수 값과 고유진동수 값들을 Table 1에 나타내었다.

자유물체도와 뉴턴의 제 2법칙을 이용하여 다음 식 (5)와 같이 운동방정식을 유도하였다.

Table 1 Parameters and values in three-story structural model simulation.

Parameters	Value
M_1, M_2, M_3	1e4, 1e4, 1e4 kg
C_1, C_2, C_3	7.7e3, 7.7e3, 1.0e3 Ns/m
K_1, K_2, K_3	7.7e5, 7.7e5, 1.0e5 N/m
$\omega_{1n}, \omega_{2n}, \omega_{3n}$	0.43, 0.99, 2.28 Hz

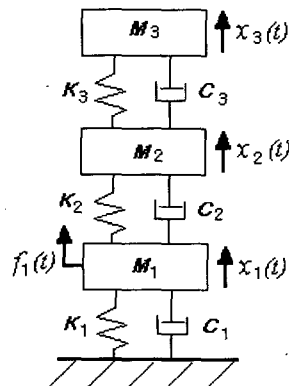


Fig. 1 Schematic of three-story structure model

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1+C_2 & -C_2 & 0 \\ -C_2 & C_2+C_3 & -C_3 \\ 0 & -C_3 & C_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1+K_2 & -K_2 & 0 \\ -K_2 & K_2+K_3 & -K_3 \\ 0 & -K_3 & K_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $[\ddot{x}_1 \ \ddot{x}_2 \ \ddot{x}_3]^T$, $[\dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ \dot{x}_3]^T$, $[x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ 은 가속도, 속도, 변위 벡터들이다. 이 모델을 이용하여 입력하중 $f_1(t)$ 에 대한 주파수 응답함수가 계산되었다.

구조물 진단 기법의 과정을 설명하기 위하여 우선 Table 1에 나열한 변수값을 이용하여 초기 상태의 구조물에 대한 주파수 응답함수를 계산하고 구조물의 손상을 모사하기 위해 탄성계수 $K_2(7e5 \text{ N/m})$ 의 값을 5%(3.85e4 N/m) 감소시켜 다시 한번 주파수 응답함수를 계산 하였다. 손상 전후 주파수 응답함수의 변화는 Fig. 2와 같다.

주파수 응답함수의 변화량 곡선과 초기 구조물에 대한 민감도 함수가 Fig. 3에서 비교되었다. 각각의 민감도 함수 그래프가 서로 다른 형태의 곡선을 보임을 관찰할 수 있다. 더욱 중요한 사실은, K_2 에 대한 민감도 함수 그래프인 굵은 점선 그래프가 유일하게 주파수 응답함수 차이 $H_{11}(\omega)$ 그래프와 유사한 형태를 갖는다는 것이다. 따라서, 구조물 손상이 오직 한 군데에 존재한다고 가정할 때, K_2 에 해당하는 요소가 손상을 입었다는 결론을 얻을 수 있다.

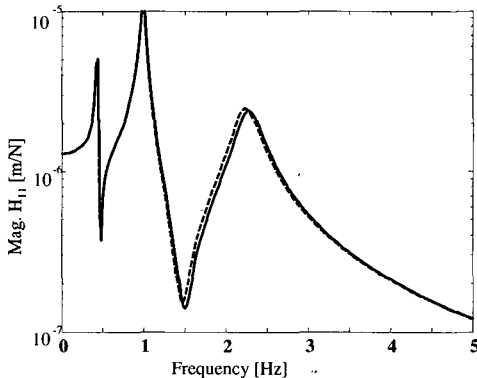


Fig. 2 Magnitude of driving point FRF, $H_{11}(\omega)$, from three DOFs model before(—) and after(---) damage due to a 5% reduction in stiffness K_2

손상 전후의 주파수 응답함수에 대한 그래프가 K_2 에 대한 민감도 함수와 함께 Fig. 4(a)에서 다시 한번 비교되었으며, 5% 감소한 탄성계수 K_2 에 대한 민감도 그래프는 명백히 손상 전후 주파수 응답함수의 차이 그래프와 특정 상수의 곱으로 나타나는 동일 패턴의 그래프임을 확인할 수 있다. 두 그래프 간의 비례상수 곡선이 Fig. 4(b)에 보여졌으며, 식 (3a)에 묘사된 바와 같이 이 비례상수 값이 바로 K_2 값의 감소량에 대한 근사치임을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)로부터

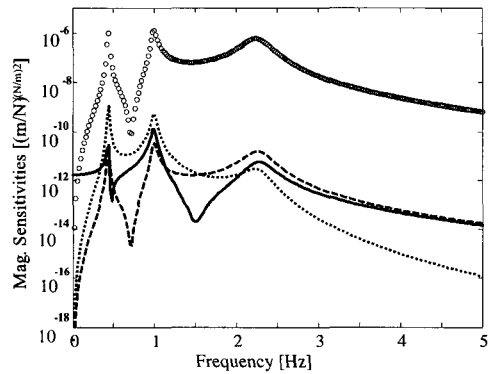


Fig. 3 Baseline embedded sensitivities for changes to three different stiffness elements (—) K_1 , (---) K_2 , and (....) K_3 and magnitude of the finite difference change in FRF, $H_{11}(\omega)$ (ooo)

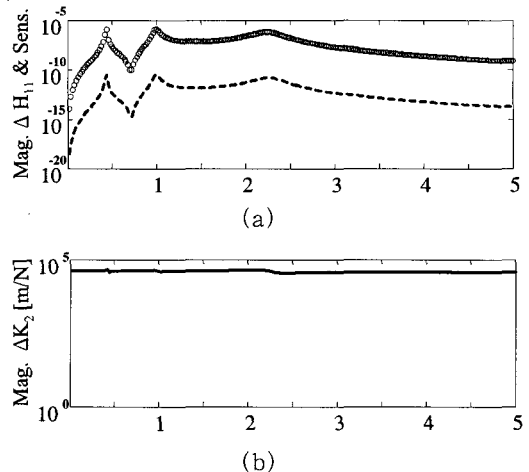
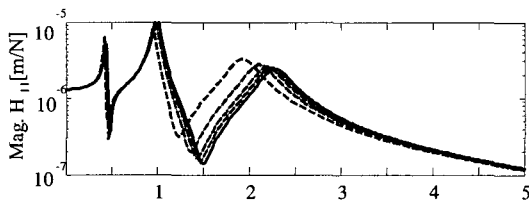


Fig. 4 (a) Baseline embedded sensitivity for change to K_2 (---) and finite difference change in the $H_{11}(\omega)$ (ooo), (b) The ratio of the two functions which is approximately equal to the 5% reduction in stiffness K_2 , 3.85e4 N/m

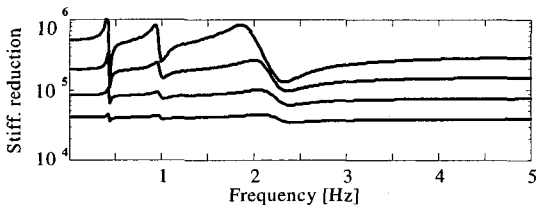
이 비례상수 곡선은 K_2 의 감소량이 $3.85e4$ N/m 임을 나타냄을 알 수 있다.

내재민감도 함수가 탄성 계수의 감소에 대한 감지, 위치파악, 감소량 계산에 이용될 수 있음이 Fig. 4를 통해서 검증되었지만, 여러 가지 경우에 있어 그림 4(b)와 같이 그 비례상수가 정확히 일정한 값을 가지지는 않을 수 있다. 실제로 Fig. 4(a)에 보여진 두 곡선간의 비례상수 값은 K_2 가 매우 작을 때 만이 정확하게 구해질 수 있다.

Fig. 5와 같이 탄성값의 변경량이 클 경우에 비례상수의 곡선이 왜곡되어 나타나는데, 이러한 현상은 Fig. 5(a)처럼 민감도 계산에 이용되는 주파수 응답 함수가 초기 구조물에 비해 많이 변형됨으로써 발생하는 문제이다. 그러나, 그 곡선들이 탄성계수 변경값의 근처에서 변형되며, 그 평균값이 탄성계수의 변화량에 비례하여 증가 한다. 따라서 탄성계수의 변화량이 많을 경우라도 적절한 주파수 영역을 선택하여 그 평균값을 취하면 그 변화량이 적은 경우에 비해서 정확도는 어느 정도 떨어질지라도 비교적 근사한 값을 구할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5 (a) $H_{11}(\omega)$ for three DOF structure as a function of stiffness, K_{12} , $7.7e5$ N/m baseline (---) and five cases (—) with 5%, 10%, 20% and 40% reduction in stiffness: (b) Ratios of two functions showing skewed estimate of perturbation for increase in stiffness reduction

4. 단열타일에 대한 내재민감도 기법의 실험적 적용 및 검증

4.1 타일표면 부식에 인한 질량 변화량의 감지

내재민감도 기법의 적용 가능성을 검토하기 위하여 Fig. 6에 보여진 바와 같은 단열 타일의 안전 진단에 적용하였다. 이 단열 타일은 외관과 강성확보를 위한 허니콤재, 단열층으로 구성되어 있으며, 4개의 모서리 부분에 본체와의 일정 간격을 두고 조립될 수 있도록 지지대를 통하여 본체에 장착된다.

가속도계가 타일의 중앙부, 그리고 각각 두 개의 모서리와 지지대에 부착되었으며, 일정한 충격 하중 (0.8 V)을 가하기 위해 판넬의 중앙부에 자동식 임팩트 해머가 위치하였다. 우선 초기 타일에 대한 충격 하중 실험을 통하여 주파수 응답 함수를 구하였고, 타일의 부식에 의한 미세한 질량 변화를 표현하기 위하여 Fig. 7에 보여진 바와 같이 각각 15 cm, 45 cm 길이의 종이 테이프와 4.5 cm 길이의 철사가 종방향 및 횡방향으로 센서 1과 2 사이에 부착된 타일에 대해 다시 한번 충격하중 실험을 하였다.

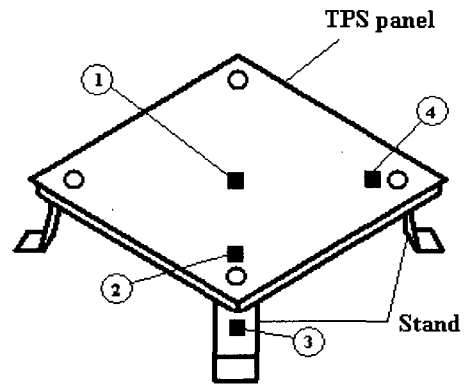
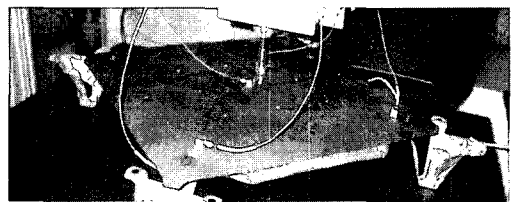


Fig. 6 Metallic panel setup with accelerometers and automatic impact hammer

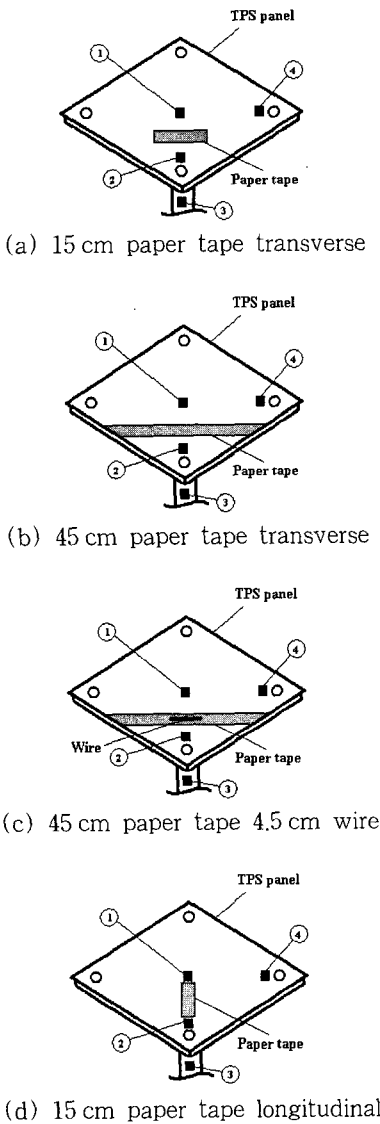


Fig. 7 Metallic panel with several different paper tapes for the simulation of change in mass

Fig. 8은 4개의 다른 길이와 방향으로 테잎이 부착된 타일에 대한 주파수 응답함수 $H_{11}(\omega)$ 을 관심 주파수 영역에 대해 확대하여 보여준다. 단일 타일은 고 강도의 구조이나 매우 가벼운 판넬이다. 따라서 종이테이프의 부착으로 그 탄성계수가 크게 영향을 받지 않으나, 질량의 변화로 인한 주파수 응답함수의 변화를 유발할 수 있다. 그러나 각 질량 간의 차이가 실제 타일의 총 질량 1.424 kg에 비해 약 0.1~0.3% 정도로 매우 적으므로 주파수 응답함수의 변화가 그리 크지 않음을 알 수 있다. 내재민감도 기법의 목적

은 이러한 미세한 차이의 질량 변화도 감지해 내는데 있다. 이를 위하여, Fig. 9에서 질량변화 전후의 주파수 응답함수 차이 $\Delta H_{11}(\omega)$ 와 각 질량요소에 대한 민감도 그래프가 비교되었다. 주파수 응답함수 차이 그래프와 질량 1 또는 2에 대한 민감도 그래프가 가장 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 질량의 변화가 질량요소, 즉 센서 부착위치 1과 2의 사이에 존재함으로 인해서 발생하는 현상이며, 비례상수 그래프를 통하여 질량 2에 대한 예측이 더 정확하게 나타나는 것으로 판단하여 이에 대한 질량 변화를 예측하였다.

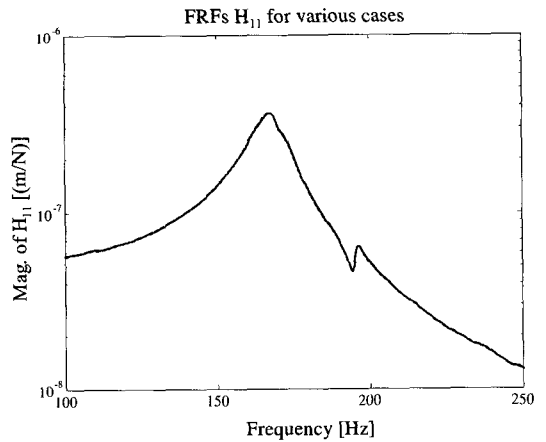


Fig. 8 Frequency response functions, $H_{11}(\omega)$ for various damage cases: cases (a) —, (b) ---, (c) -.-, (d)

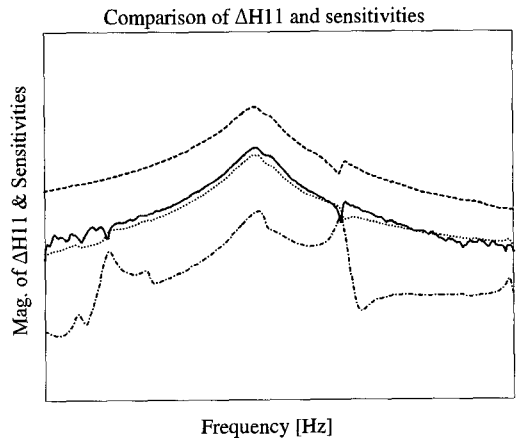


Fig. 9 Comparison of the difference in FRF (—) $\Delta H_{11}(\omega)$, and sensitivity functions to masses: (----) dH_{11}/dM_{01} , (....) dH_{11}/dM_{02} , and (-.-) dH_{11}/dM_{03}

각 경우에 대한 비례상수, 즉 질량변화에 대한 예측치 그래프를 Fig. 10에 나타내었다. 내재민감도 함수를 이용하여 질량 변화량을 정확히 구할 수 있는지 검토해보기 위해 두 그래프 간의 비례상수를 구함으로써 질량변화량을 계산하여 보았다. 부식에 의한 타일 외판의 질량 변화를 모사한 각 경우에 대한 실제 질량과 내재민감도 기법으로부터 구한 예측치를 Table 2에 비교하여 놓았다. 질량 변화량에 대한 예측치는 비례상수 그래프의 평균값을 140~180 Hz 구간에 대해서 구한 값이며, 이 구간은 센서 1과 2 사이의 상대 운동이 큰 주파수 응답함수의 한 정점 부근에서 정해졌으며, 내재민감도와 유한차분법에 의한 민감도 그래프가 잘 일치하는 구간으로서 두 함수간 비례곡선이 일정한 값을 가지는 구간이기도 하다. 임의의 위치에 대한 질량 변화를 모사하기 위하여 질량 변화에 해당하는 종이 테이프가 정확히 각 센서에 위치하지 않고 센서 1과 2 사이에 위치하였음을 주목하자.

경우 (a)와 (b)에서 오차율이 5% 이하 정도로 비교적 정확하게 질량 변화량을 예측하였음을 주목하자. 이 오차는 질량변화를 모사한 종이테이프가 2번 센서의 위치에 정확하게 부착되지 않고 센서 1과 2의 사이에 위치함으로써 생기는 문제이며, 질량 2에 대한 변화량 계산과 같은 방법으로 구한 질량 1의 변화량을 더하면 오차는 더욱 감소한다. 경우 3은 집중 질량이 센서 1과 2 사이에 추가적으로 존재함으로써 유효 질량이 센서 2에서 더 멀어지는 경우이고, 경우 4는 질량이 센서 1과 2번 사이에 길이 방향으로 놓여져 있으므로 질량분포가 더 분산된 경우에 해당되어 오차율이 더 높게 나타난다. 이는 물리적인 의미에서 볼 때 합리적인 특성으로 사료된다. 중요한 것은 질량변화의 추이는 정확하게 예측치에 반영이 된다는 것이다.

5. 결 론

내재민감도 함수는 측정된 주파수 응답함수만으로 직접 구할 수 있으며, 집중 질량 시스템 변수의 변경에 기인하는 주파수 응답함수의 변화를 예측할 수 있도록 해준다. 3 자유도 모델에 대한 해석으로부터 내재민감도 함수를 이용하여 구조물의 손상 감지, 위치 파악, 손상 정도의 계산을 정확히 해낼 수 있음이 입증되었다. 또한 단일 타일에 대한 실험을 통하여 이 기법이 실제의 문제에서도 높은 정확도를 가지고 적용될 수 있음이 입증되었다. 대부분의 구조물 안전 감시 문제에서 발생하는 바와 같이, 초기의 응답함수나 시스템 변수 (질량, 감쇠, 탄성계수 등)의 절대값이 알려지지 않은 경우에 대해서도 제안된 기법은 적용이 가능하며, 이는 파손 정도가 다른 두 응답함수의 변화에 대한 민감도를 분석함으로써 가능한 것이다.

해석과 실험 결과 모두 구조물의 변화량 또는 손상 정도가 매우 작을 때 분석 결과가 정확하였으며, 이는 미세한 변화량에 대한 유한차분 민감도가 정확히 계산될 수 있기 때문에 발생 초기의 손상탐지에 매우 유리할 것으로 사료된다. 손상량의 증가할 경우에 손상 정도의 예측에는 정확도가 떨어질 수 있으나 그 평균값이 손상정도에 비례함을 보이므로 진척 정도에 대한 예측이 가능하다. 주파수 응답함수는 구조물 전체 요소의 어떠한 변화에도 민감하게 반응할 수 있으

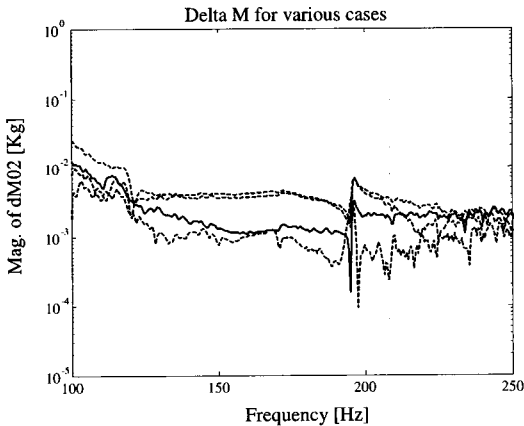


Fig. 10 The estimated parameter curves for various amount of change in mass: cases (a) —, (b) ---, (c) -.-, and (d)

Table 2 Comparison of real and estimated amount of change in mass.

Case	실제질량(g)	예측질량(g)	오차(%)
(a)	1.33	1.31	1.50
(b)	3.99	3.79	5.01
(c)	4.88	4.18	14.3
(d)	1.33	0.99	25.3

므로, 일부 특정 구조물의 안전 진단에 적용하기는 한계가 있을 수 있다. 본 연구는 단지 한 부위의 손상이 주파수 응답함수의 변화를 유발한다는 가정하에 이루어졌다. 복합적인 형태의 구조물 손상이 여러 개소에 존재하는 경우에 대한 구조물 안전 진단 기법이 계속하여 연구될 예정이다.

참 고 문 헌

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

(2) Afolabi, D., Apr. 1987, "An Anti-resonance Technique for Detecting Structural Damage," Proceedings of the 5th International Modal Analysis Conference, pp. 491~495.

(3) Schulz, M. J., Naser, A. S., Pai, P. F., Linville, M. S. and Chung, J., Feb. 1997, "Detecting Structural Damage Using Transmittance Functions," Proceedings of the 15th International Modal Analysis Conference, pp. 638~644.

(4) Zhang, H., Schulz, M. J., Naser, A., Ferguson, F. and Pai, P. F., 1999, "Structural Health Monitoring Using Transmittance Functions," Mechanical Systems and Signal Processing Vol. 13, No. 5, pp. 765~787.

(5) Johnson, T. J. and Adams, D. E., 2002, "Transmissibility as a Differential Indicator of Structural Damage," Journal of Vibration and Acoustics Vol. 124m No. 4, pg. 634~641.

(6) Adams, D. E. and Farrar, C. R., Mar. 2002, "Application of Frequency Domain ARX Features for Linear and Nonlinear Structural Damage Identification," Proceedings of SPIE, Smart Non-Destructive Evaluation for Health Monitoring of Structural and Biological Systems 4702, pp. 134~147.

(7) Meneghetti, U. and Maggiore, A., 1994, "Crack Detection by Sensitivity Analysis," Proceedings of the 12th International Modal Analysis Conference, pp. 1292~1298.

(8) Wang, W. and Zhang, A., 1987, "Sensitivity Analysis in Fault Vibration Diagnosis of Structures," Proceedings of the 5th International Modal Analysis Conference, pp. 496~501.

(9) 백용진, 최재성, 배동명, 김경진, 2003, "다변량 통계기법을 이용한 K 및 n 의 산정에 관한 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제 13 권, 제 8 호, pp. 583~590.

(10) Lin, R. M. and Lim, M.K., 1997, "Derivation of Structural Design Sensitivities from Vibration Test Data," Journal of Sound and Vibration 201, pp. 613~631.

(11) Vanhonacker, P., 1980, "Differential and Difference Sensitivities of Natural Frequencies and Mode Shapes of Mechanical Structures," American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal 18, pp. 1511~1514.

(12) Belle, H. V., 1982, "Higher Order Sensitivities in Structural Systems," American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal 20, pp. 286~288.

(13) Liu, A. Q., Lim, S. P. and Liew, K. M., 1993, "Sensitivity Analysis of Complex Dynamic System Modeling," JSME 36, pp. 209213.

(14) Yang, C., Adams, D. E., Yoo, S. and Kim, H., 2004, "An Embedded Sensitivity Approach for Diagnosing System level Vibration Problems," Journal of Sound and Vibration 269, pp. 1063~1081.

(15) Johnson, T., Yang, C., Adams, D. and Ciray, S., 2005, "Embedded Sensitivity Functions for Characterizing Structural Damage", Journal of Smart Materials and Structures, 14, pp. 155~169.

(16) Yang, C., 2004, Experimental Embedded Sensitivity Functions for Use in Mechanical System Identification, Ph.D. Dissertation, School of Mechanical Engineering, Purdue University.