

보 구조물에 대한 손상검출기법의 실험적 검증

조국래* (인하대 대학원 기계공학과), 이우식 (인하대 기계공학과 교수)

Experimental Verification of a Structural Damage Identification Method for Beam Structures

Kooklae Cho (Mechanical Eng. Dept. Inha Univ.), Usik Lee (Mechanical Eng. Dept. Inha Univ.)

ABSTRACT

This paper provides an experimental verification of an FRF-based structural damage identification method (SDIM) developed by the authors for beam structures. The FRF-based SDIM requires the following data : (1) natural frequencies and mode shapes measured at the intact state and (2) the FRF-data measured at the damaged state. Experiments are conducted for the cantilevered beam with one slot and three slots. It is shown that the FRF-based SDIM developed by the authors provide very successful damage identification results which agree well with true damage state.

Key Words : Structural Damage Identification (구조손상규명), Frequency Response Function (주파수응답함수)

1. 서론

구조물 내부의 구조적 미세손상은 진동응답, 고유진동수, 모드형상, 모드감쇠와 같은 구조물의 동특성에 영향을 미친다. 그러므로 구조물의 동특성 변화는 구조물 내부에 생성된 구조미세손상의 위치, 크기를 검출하는데 활용될 수 있다. 따라서 다양한 구조손상검출기법(SDIM)들이 문헌에 많이 나와 있다^[1-3]. 실험적 자료에 기초한 구조손상검출기법은 구조미세손상의 위치와 크기를 검출하기 위해서 모달파라미터, 변형에너지, 전달함수, 연성행렬, 잔존력, 파동특성, 기계적 임피던스, 주파수응답함수... 등의 변화를 포함하였지만 대개 FEM 모델에 기초한 고유치문제로부터 유도되었다. Banks 등^[4]에 의하면, 모드데이터에 기초한 구조손상검출기법은 몇가지 결점을 가지고 있다. 첫번째, 모드데이터는 간접적으로 측정된 실험데이터이기 때문에 측정오차 뿐만 아니라 모드추출시의 오차에 의한 영향을 받을 수 있다. 두번째, 대개 실제의 경우 많은 센서가 필요하기 때문에 완전한 모드데이터를 얻을 수 없다. 반면에 측정된 주파수응답함수는 모드데이터를 사용하는 것보다 몇가지 장점이 있다. 첫째, 주파수응답함수는 구조물로부터 직접 측정이 되므로 오차의 영향을 덜 받는다. 두번째, 주파수응답함수는 공진주파수 부근의 제한된 주파수응답함수 데이터로부터 추출된 모드데이터보다 원하는 주파수범위에서 훨씬 더 많은 정보를 제공한다^[5]. 따라서 주파수응답함수 데이터는 유용하게 사용될 수 있으며 구조손상검출에 대한 전망을 밝

게 한다.

구조손상검출 알고리즘에서는 손상이 없는 상태의 고유진동수와 모드형상, 손상이 있는 상태의 주파수응답함수가 필요하다. 실험대상은 알루미늄 합금의 보를 고정단-자유단(외팔보)으로 구성하였다. 그리고 손상검출오차(DIE)를 정의하여 참값에 대한 예측결과의 정확도를 수치적으로 검토하였다.

본 논문의 목적은 구조손상검출이론^[6]을 실험적으로 검증한다. 구조손상검출 알고리즘에서 필요한 데이터를 실험으로 구하고 알고리즘에 대입하여 손상의 위치와 크기를 예측한다.

2. 손상검출이론

구조손상검출에 대한 알고리즘은 다음 식 (1)에서 유도된다[1].

$$[X_{ij}] \{D_j\} = \{Y_i\} \quad (i, j = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

$$X_{ij} = -\omega_q^2 \left\{ \frac{W_m(x_p)}{\Omega_m^2 - \omega_q^2} \right\}^T \left[k_{mn}^j \right] \left\{ \frac{W_n(x_F)}{\Omega_n^2 - \omega_q^2} \right\}$$

$$Y_i = A(x_p; \omega_q) + \omega_q^2 \sum_m \frac{W_m(x_p) W_m(x_F)}{\Omega_m^2 - \omega_q^2}$$

$$k_{mn}^j = EI \int_{x_{D_j} - \bar{x}_j}^{x_{D_j} + \bar{x}_j} W_m^* W_n^* dx$$

$$i = p + (q-1)P \quad (p=1, 2, \dots, P; q=1, 2, \dots, Q; P, Q \in \mathbb{N})$$

여기에서

W_m : m 번째 모드형상

Ω_m : m 번째 고유진동수

$A(x; \omega)$: 주파수 응답함수(inertance FRF)

D_j : j 번째 요소의 손상크기

식(1)에서 손상이 없는 보의 모드형상(W_m)과 고유진동수(Ω_m)는 모드시험에서 제공되기 때문에 알려진 값이다. 또한 inertance, $A(x; \omega)$ 도 손상된 보에서 직접 측정되기 때문에 알려진 값이다. 그러나, 손상크기 D_j 는 결정되어야 할 미지수이다.

식(1)에서 주파수 응답함수의 측정점 x 와 가진 주파수 ω 는 임의로 선택될 수 있다. 식(1)에서 N 개의 미지수 D_j 를 위하여 가진주파수와 측정점으로 조합된 N 개의 선형대수방정식을 만들 수 있다.

여기에서 x_p ($p=1, 2, \dots, P$)는 응답측정점을 가리키고 ω_q ($q=1, 2, \dots, Q$)는 가진주파수를 가리킨다. N 개의 미지수 D_j 에 대하여 식(1)을 계산하는 것은 한번에 손상의 위치와 크기를 내포한다. 그리하여 식(1)은 FRF-based SDIM에 대한 새로운 알고리즘을 제공한다. 현재의 FRF-based SDIM은 단지 다음 세가지 데이터를 필요로 한다:

- (1) 손상이 없는 보의 고유진동수. 즉, Ω_m ;
- (2) 손상이 없는 보의 모드형상. 즉, W_m ;
- (3) 손상된 보의 주파수 응답함수. 즉, $A(x_p; \omega_q)$

손상검출문제는 역해석문제(inverse problem)의 한 종류이다. 그러므로 만약 필요한 방정식의 수가 결정되어야 할 미지수의 수와 같지 않다면 최적해 기법이 필요하다. 그리하여 잘 제기된 손상검출문제를 구성하는 방법은 손상검출과제에서 중요한 연구 논점이다. 이 논점에 대처하기 위해서 다음과 같은 방법이 소개된다.

필요한 만큼 많은 가진주파수와 응답측정점을 선택함으로써 식(1)로부터 충분한 수의 방정식을 얻는 것이다. 주파수 응답함수의 사용이 이 전략을 실현하도록 도와줄 것이다. 임의의 수 이상 측정점의 수를 증가하는 것이 항상 쉽고 실제적이 아니기 때문에 먼저 측정점 수를 고정하고 충분한 수의 방정식이 도출될 때까지 가진주파수를 변화해 가는 것이 더욱 간단하고 쉽게 보인다.

요약하면, FRF-based SDIM는 식(1)의 손상검출 알고리즘의 기본으로 소개된다. 현재의 구조손상검출기법은 손상된 보로부터 실험적으로 측정된 주파

수 응답함수를 사용하여 동시에 여러 개 손상의 위치와 크기를 구할 수 있으며, 다음과 같은 특징을 포함할 수 있다. : (1) 손상된 보의 모달 파라미터는 해석에서 필요하지 않다. (2) 잘 제기된 손상검출문제를 구성하기 위해서는 필요한 만큼 많은 방정식이 측정점 뿐만 아니라 가진주파수를 변화하면서 측정된 주파수 응답함수로부터 생성될 수 있다.

3. 손상검출실험

3.1 실험대상

보의 주파수 응답함수를 구하기 위한 실험 대상으로는 폭 20 mm, 높이 5 mm의 직사각 단면을 갖는 길이 700 mm의 알루미늄 합금을 사용한다. Fig. 1과 같이 보의 한쪽 끝은 T 홈 정반 위에 강철 지그를 사용하여 고정하였다. 고정 부분은 외팔보의 길이에 상당하는 300 mm가 2 개의 지그 사이에 물린 상태에서 T 홈 정반에 10 개의 볼트로 고정되었다.

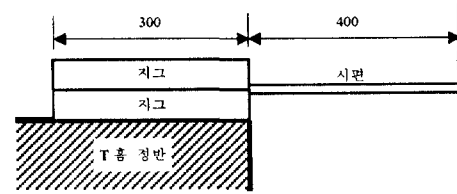


Fig. 1 Setup of cantilevered beam specimen (units : mm)

Fig. 2는 실험에 사용된 시편을 보여주며, 손상의 위치와 형상을 나타내었다. 손상이 1 개인 경우는 SLOT B 에만 손상을 주었고, 손상이 3 개인 경우는 SLOT A, B, C 모두에 손상을 주었다.

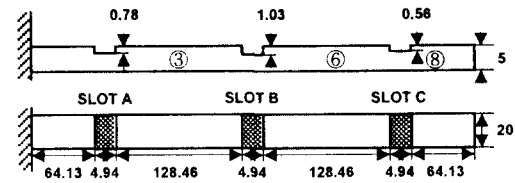


Fig. 2 Geometry of a cantilevered beam specimen with three slots (units : mm)

3.2 실험측정장치의 배열

실험측정장치는 Fig. 3과 같이 신호발생기(FFT 내장)에서 발생한 임펄스 신호를 파워증폭기(B&K 2706)로 증폭하여 가진기(B&K 4810)에서 보를 가진한다. 힘변환기(PCB 208B02)는 가진기 헤드에 직접 연결하고 팁을 끝에 달아서 가진 장치를 구성한다. 가진 장치는 실험 조건에 따라 가진기 대신 임팩트 해머(PCB)를 사용한다.

출력신호는 센서의 영향을 최소화하기 위하여 초소형 초경량의 가속도계(B&K 4374)에서 전하증폭기(B&K 2635)를 거쳐 신호분석기(HP 35670A)에 전달하여 신호처리를 한다.

입력신호(힘)와 출력신호(가속도)는 신호분석기(HP 35670A)에서 주파수응답함수로 처리되고 PC에서 STAR System을 이용하여 모드형상을 구한다.

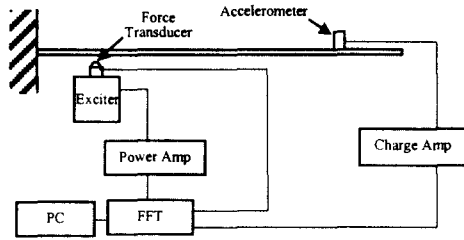


Fig. 3 Schematic diagram of experiments

3.3 실험내용

손상이 있는 상태와 없는 상태에서 주파수응답함수를 측정한다. 14 차 모드를 구하기 위해서는 12.8 kHz까지 측정하여야 하므로, 실험의 특성상 주파수범위를 4 구간으로 나누었다. 즉, 1 구간은 0 ~ 0.8 kHz, 2 구간은 0 ~ 6.4 kHz, 3 구간은 6.4 kHz ~ 9.6 kHz, 4 구간은 9.6 kHz ~ 12.8 kHz로 각각 구분하였다. 1 차 고유진동수는 대략 25 Hz로서 전체 12.8 kHz에 비해 상당히 작은 편이므로 주파수 분해능을 고려하여 1 구간의 주파수 범위를 작게 하여 측정하였다.

적절한 정규모드형상을 얻기 위해서는 고차모드로 갈수록 많은 측정점을 요구하므로 본 실험에서는 400 mm의 보를 40 등분하여 측정하였다. 1 구간의 1 차 ~ 3 차 모드형상은 임팩트 해머를 이용하여 구하였고, 2 ~ 4 구간의 모드형상은 가진기를 이용하여 구하였다. 그리고 가진점이 구하고자 하는 모드의 노드점과 일치할 경우 모드형상에 왜곡이 발생하므로 구간에 따라 노드점을 피할 수 있는 가진점을 선택하도록 하였다.

이상과 같이 측정된 주파수응답함수로부터 고유진동수와 정규모드형상은 STAR System을 이용하여 구할 수 있다.

3.4 실험결과 및 검토

외팔보에서 손상이 없는 경우와 손상이 있는 경우의 고유진동수는 Table 1에 정리하였고, 변화율은 손상이 없는 경우에 대한 손상이 있는 경우의 주파수 변화율로써 Fig. 4에 다시 정리하였다. 홀수 번째 모드에서 작아지는 것은 손상의 위치와 노드점이 일치하기 때문이다. 그리고 주파수변화율은 고차모드로 갈수록 작아지면서 수렴한다는 것을 알 수 있다. 고유진동수와 측정된 밀도(2748.9 kg/m)를

이용하면 알루미늄 합금의 Young's modulus가 68.2 GPa이라는 것을 구할 수 있다.

Table 1 Experimentally measured natural frequencies

No.	Intact Ω_m	One damage		Three damages	
		Ω_m	변화율	Ω_m	변화율
#1	25.75	25.35	1.56	25.01	2.87
#2	156.9	154.4	1.59	154.2	1.72
#3	438.6	437.3	0.29	435.8	0.62
#4	859.3	846.1	1.54	838.4	2.43
#5	1419.5	1414.2	0.38	1397.4	1.56
#6	2116.5	2083.5	1.56	2066.1	2.39
#7	2949.1	2936.8	0.41	2931.9	0.58
#8	3915.4	3858.2	1.46	3860.3	1.41
#9	5011.0	4988.4	0.45	4972.5	0.77
#10	6235.8	6152.2	1.34	6105.3	2.09

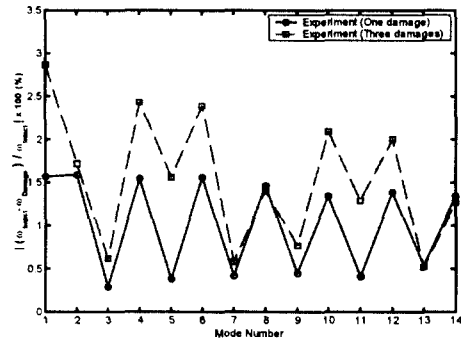


Fig. 4 The changes in natural frequencies due to damages

Fig. 5는 손상이 없는 상태에서의 정규모드형상을 1 차에서 10 차 모드까지 중첩하여 나타내었다. 정규모드형상은 가능한 한 많은 차수의 함수를 구하여 손상검출 알고리즘에 적용하는 것이 더욱 정확한 손상검출을 가능하게 한다.

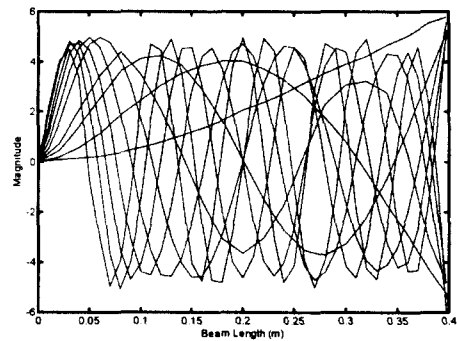


Fig. 5 Experimentally measured the first ten mode shapes

Fig. 6은 손상이 없는 경우와 손상이 있는 경우의 주파수응답함수이며 가진점과 응답점은 Fig. 2에서 위치 ③이다.

본 논문에서는 Fig. 2 의 ③, ⑥, ⑧ 세 지점에서 주파수응답함수를 측정한 후, 식(1)의 방정식을 만족하는 수만큼 주파수를 선택하여 손상검출 알고리즘에 적용하였다. 예를 들어 보의 요소 수를 81 개로 했을 경우 81 개의 선형대수방정식이 필요하다. 따라서 3 지점의 주파수응답함수에서 27 개의 주파수에 해당하는 Inertance FRF 를 취하면 된다.

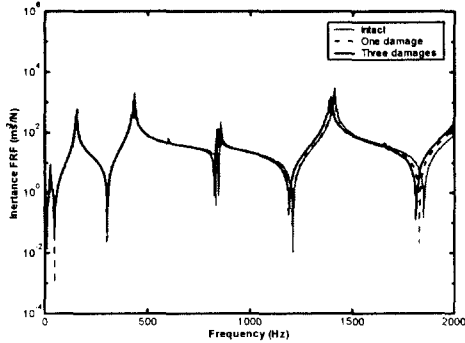


Fig. 6 Experimentally measured frequency response functions for the intact and damaged beams.

손상이 없는 보에서의 고유진동수, 모드형상함수와 손상이 있는 보에서의 주파수응답함수를 이용하여 손상검출 알고리즘에 적용하면 손상의 위치와 크기를 예측할 수 있다. Fig. 7 과 Fig. 8 은 각각 손상이 1 개인 경우와 손상이 3 개인 경우에 대한 손상검출 결과이며 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

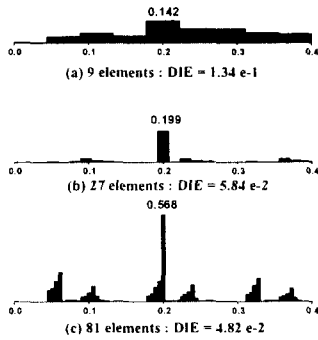


Fig. 7 Damage identification results for the beam with one damage

손상 예측 결과가 참값에 대한 정확도를 수치적으로 검토하기 위해서 평균제곱근인 손상검출오차(DIE)를 식(2)와 같이 정의하였다.

$$DIE = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L [d^{Pred}(\nu) - d^{True}(\nu)]^2 dx} = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{j=1}^N 2x_j [D_j^{Pred} - D_j^{True}]^2} \quad (2)$$

여기에서 L 은 보의 길이이고, 윗첨자 'True'와 'Pred'는 각각 실제의 손상상태와 예측된 손상상태를 의미한다.

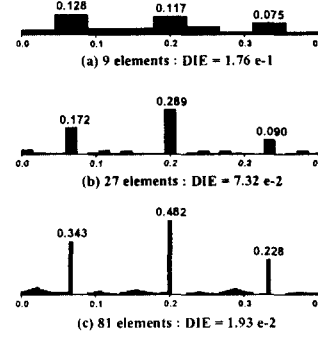


Fig. 8 Damage identification results for the beam with three damages

4. 결론

손상검출이론의 실험적 검증을 하였다. 손상이 없는 상태에서의 고유진동수, 모드형상함수와 손상이 각각 1 개인 경우와 3 개인 경우에서의 주파수응답함수를 이용하여 손상의 위치와 크기가 비교적 잘 검출되고 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. Doebling SW, Farrar CR, and Prime MB. "A summary review of vibration-based damage identification method." The Shock and Vibration Digest 1998; 30(2): 91-105.
2. Salawu OS. "Detection of structural damage through changes in frequency: a review." Engineering Structure 1997; 19(9): 718-723.
3. Zou Y, Tong L, Steven GP. "Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composites structures-a review." Journal of Sound and Vibration 2000; 230(2): 357-378
4. Banks HT, Inman DJ, Leo DJ, Wang Y. "An experimentally validated damage detection theory in smart structures." Journal of Sound and Vibration, 1996; 191(5): 859-880.
5. Wang Z, Lin RM, Lim MK. "Structural damage detection using measured FRF data." Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 1997; 147: 187-197.
6. U. Lee and J. Shin. "An FRF-based structural damage identification method" Computers & Structures, 2001.