

FRF를 이용한 평판 구조물의 구조손상 규명기법

Identification of Structural Damages in a Plate Structure: An FRF-Based Method

김남인*, 이우식**, 권오양**

Namin Kim*, Usik Lee** and Oh-Yang Kwon**

초 록 주파수 응답함수 (FRF)를 이용하여 평판 구조물에 존재하는 손상을 규명하기 위한 새로운 구조손상 규명기법을 소개하였다. 본 연구의 구조손상 규명기법은 손상된 평판의 운동방정식으로부터 유도되었으며 손상 분포함수를 이용하여 손상의 특성을 나타내었다. 본 연구의 구조손상 규명기법의 주요 특징은 다음과 같다. 첫째, 손상된 구조물에 대한 모드 데이터를 요구하지 않으며, 둘째, 가진주파수와 측정점을 적절히 다수 선택함으로써 손상규명에 요구되는 관계식을 확보하는데 보다 유리하다. 몇몇 수치모의실험을 통하여 본 연구에서 제안한 구조손상 규명기법의 적용가능성을 검증하였다.

주요용어: 구조손상, 손상규명, 평판, 진동, 주파수응답함수

Abstract In this study, an FRF-based structural damage identification method (SDIM) is proposed for plate structures. The present SDIM is derived from the partial differential equation of motion of the damaged plate, in which damages are characterized by using a damage distribution function. The appealing features of the present SDIM include the followings. First, the modal data of the damaged structure are not required. Secondly, a sufficient number of information can be generated from the measured FRFs by simply varying excitation frequencies and response measurement points. The feasibility of the present SDIM is verified through some numerically simulated damage identification tests.

Keywords: structural damage, damage identification, plates, vibration, frequency response function

1. 서론

구조물에 손상이 발생하면 구조물의 진동응답, 고유진동수, 모드형상, 모드감쇠 등을 포함한 구조물의 동특성이 변화한다. 이러한 동특성 변화를 역으로 이용하여 구조물에 발생한 손상을 검출하고 규명하기 위한 연구가 지난 반세기 동안 꾸준히 이루어져 왔으며, 그 결과 다양한 SDIM (구조손상 규명기법)이 참고문헌에 소개되고 있다 [1].

SDIM의 하나로서 유한요소모델 갱신기법 (FEM-update method)은 과도한 자유도를 축소하거나 제한적으로만 확보되는 모드변수(modal parameters)를 확장해야 하는 노

력이 요구되는 단점을 갖고 있다. 따라서, 구조해석모델 대신에 실험 데이터로부터 직접적으로 손상을 규명하는 실험데이터 활용기법(experimental-data-based method)이 문헌에 많이 소개되고 있다. 이 기법은 사용되는 실험 데이터의 종류에 따라서 다양하게 세분화 할 수 있다. 즉, 모드변수[2-4], 변형에너지[5], 전달함수[6], 유연행렬[7], 잉여력(residual force)[8], 임피던스[9], FRF (주파수 응답함수)[10] 등을 이용하는 SDIM으로 구분할 수 있다. 실험 데이터 활용기법에 사용되고 있는 손상규명 알고리즘은 대부분 유한요소모델의 고유치 문제로부터 유도되었다.

모드변수의 변화를 이용하여 손상규명을 수행하는 모

드변수기법(modal-data-based method)의 경우, 모드변수의 측정 및 분석과정에서 상당한 오차가 발생할 뿐만 아니라 충분한 수의 모드변수를 측정하기 위해서 동시에 많은 수의 센서가 요구되는 단점이 있다 [11]. 모드변수와는 달리, FRF는 구조물로부터 직접 측정될 뿐만 아니라 고차모드 특성을 자체에 포함하고 있다. 따라서, 손상된 구조물로부터 직접 측정된 FRF를 구조손상 규명에 사용함으로써 보다 신뢰성 있는 손상규명 결과를 얻을 수 있을 것이다 [10]

따라서, 본 연구에서는 평판 구조물을 대상으로 하여 측정된 FRF를 이용하는 새로운 SDIM을 소개하였다. 손상규명 알고리즘은 손상된 평판의 운동방정식으로부터 유도하였으며, 구조손상의 특성은 손상분포함수를 이용하여 나타내었다. 본 연구에서 제안된 SDIM의 타당성을 검증하기 위하여 손상규명 수치모의시험을 수행하였다. 실제 상황에서 발생하는 실측 데이터의 오차를 고려하여 해석적으로 구한 FRF에 랜덤오차(random error)를 반영한 오염된 FRF를 구조손상 규명에 사용하였다.

2. 손상된 평판의 동역학

본 연구에서는 두께가 얇은 등방성 직사각형 평판을 예제로 다루었다. 대부분의 실제 상황에서는 구조물에 발생한 손상의 위치와 크기 및 손상의 형태를 사진에 알 수 없기 때문에 손상된 구조부위를 구체적으로 명시하여 상세하게 모델링하기가 실제적으로 어렵다. 따라서, 대부분의 연구에서 구조손상의 존재를 탄성계수의 등가적 감소로써 간단하게 표현하고 구조손상에 의한 질량의 변화는 일반적으로 무시하고 있다 [3, 12].

본 연구에서는 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이, 구조손상이 평판의 두께 방향으로 균일하게 분포하는 경우로 가정한다. 따라서, 손상된 구조물의 등가적 탄성계수는 손

상분포함수 $D(x, y)$ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_D(x, y) = E [1 - D(x, y)] \tag{1}$$

여기서, E 는 손상되기 전의 탄성계수이고 E_D 는 손상된 후의 등가적 탄성계수이다. $D = 0$ 은 손상이 없는 상태, 그리고 $D = 1$ 은 손상된 부위가 재료적으로 완전히 파손된 상태를 의미한다.

평판의 한 점 (x_F, y_F) 에 식 (2)와 같이 크기가 F_0 인 절점력(point force)을 가진하는 경우를 생각한다.

$$f(x, y, t) = F_0 \delta(x - x_F) \delta(y - y_F) e^{i\omega t} \tag{2}$$

여기서 ω 는 가진주파수이며 $\delta(\cdot)$ 는 Dirac delta 함수이다. 식 (2)의 절점력에 의해 발생하는 손상된 평판의 진동응답은 측정점 (x, y) 에서 다음과 같이 유도된다 [13].

$$w(x, y, t) = \left[\sum_{\alpha} \frac{W_{\alpha}(x, y) W_{\alpha}(x_F, y_F)}{\Omega_{\alpha}^2 - \omega^2} + \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda_{\alpha\beta} \frac{W_{\alpha}(x, y)}{\Omega_{\alpha}^2 - \omega^2} \frac{W_{\beta}(x_F, y_F)}{\Omega_{\beta}^2 - \omega^2} \right] F_0 e^{i\omega t} \tag{3}$$

윗 식에서 W_{α} (또는 W_{lm})와 Ω_{α} (or Ω_{lm})는 손상이 없는 평판의 정규모드와 고유진동수이다. 해석과정에서 중첩되는 정규모드의 수에 따른 해의 엄밀성은 문헌[13]에서 검토되었다. 식 (3)의 우변에서 두 번째 항은 전적으로 손상의 영향을 나타내며 다음의 손상영향행렬 $\lambda_{\alpha\beta}$ 에 의해 좌우된다.

$$\lambda_{\alpha\beta} = \sum_{j=1}^N k_{\alpha\beta}^j D_j \tag{4}$$

여기서

$$k_{\alpha\beta}^j = \int_{y_{Dj}-\bar{y}_j}^{y_{Dj}+\bar{y}_j} \int_{x_{Dj}-\bar{x}_j}^{x_{Dj}+\bar{x}_j} \Phi_{\alpha\beta}(x, y) dx dy \tag{5}$$

$$\Phi_{\alpha\beta} = K \left[\left(\frac{\partial^2 W_{\alpha}}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W_{\alpha}}{\partial y^2} \right) \frac{\partial^2 W_{\beta}}{\partial x^2} + 2(1-\nu) \frac{\partial^2 W_{\alpha}}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 W_{\beta}}{\partial x \partial y} + \left(\nu \frac{\partial^2 W_{\alpha}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_{\alpha}}{\partial y^2} \right) \frac{\partial^2 W_{\beta}}{\partial y^2} \right] \tag{6}$$

손상영향행렬 $\lambda_{\alpha\beta}$ 는 대칭행렬이며 off-diagonal 성분은 모드좌표(modal coordinates) 사이에 연성을 유발한다 [13].

식 (4)에서 N 은 직사각형 평판에 존재하는 구조손상의

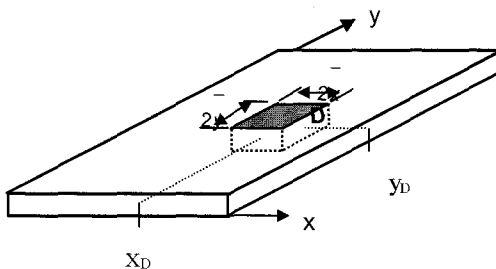


Fig. 1 A piece-wise uniform thickness-through damage

수를 나타낸다. Fig. 1에 보인 임의의 구조손상과 같이, 식 (4)와 (5)의 D_j 는 j -번째 손상검출영역에서의 등가적 손상의 크기를 나타내며 (x_{D_j}, y_{D_j}) 는 손상의 위치, 그리고 $2\bar{x}_j$ 와 $2\bar{y}_j$ 는 각각 x 와 y 방향의 손상의 치수를 나타낸다. 식 (6)에서 K 는 손상이 없는 평판의 굽힘강성이며 ν 는 포아송비(Poissons ratio)이다.

3. 손상규명기법의 유도

구조물의 진동응답으로부터 다양한 종류의 FRF를 구할 수 있다 [15]. 본 연구에서는 이너턴스(inertia) FRF를 사용하고자 한다. 이너턴스 FRF는 측정된 가속도를 가진력으로 나눈 값으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(\omega; x, y) = -\omega^2 \frac{w(x, y, t)}{f(x, y, t)} \quad (7)$$

여기서 f 는 평판의 한 점 (x_F, y_F) 에 가진되는 절점력이며 w 는 측정점 (x, y) 에서의 진동응답이다. 식(2)와 (3)을 식 (7)에 대입하면 (이너턴스) FRF는 다음과 같이 표현된다.

$$A(\omega; x, y) = -\omega^2 \left[\sum_{\alpha} \frac{W_{\alpha}(x, y) W_{\alpha}(x_F, y_F)}{\Omega_{\alpha}^2 - \omega^2} + \sum_j \left(\sum_{\alpha} \sum_{\beta} k_{\alpha\beta}^j \frac{W_{\alpha}(x, y)}{\Omega_{\alpha}^2 - \omega^2} \frac{W_{\beta}(x_F, y_F)}{\Omega_{\beta}^2 - \omega^2} \right) D_j \right] \quad (8)$$

식 (8)의 좌변은 손상의 영향이 반영된 손상된 평판의 FRF이고, 우변은 손상의 크기, 위치 및 치수와 같은 미지의 손상정보를 포함하는 항들로 이루어져 있음을 알 수 있다. 이와 같이 식 (8)은 미지의 손상정보와 실측된 FRF와의 관계를 나타내고 있기 때문에 손상규명 알고리즘을 유도하는데 사용될 수 있다.

대부분의 모드변수기법에서는 충분한 모드변수를 필요로 하지만 실제로 확보 가능한 모드변수는 매우 제한적이다. 이 경우, 확보 가능한 방정식의 수보다 미지수의 수가 더 많기 때문에 최적화 해법이 필수적으로 요구된다. 따라서, 효율적이고 보다 엄밀한 손상규명 해석을 위해서는 미지수의 수에 상응하는 관계식(방정식)을 확보하는 것이 매우 중요하다. 식 (8)은 FRF 측정점 (x, y) 와 가진 주파수 값의 선택에 따라서 D_j 를 미지수로 하는 방정식을 제공한다. 이는 다수의 가진주파수와 측정점을 적절히 배합하여 선택함으로써 미지수의 수에 상응하는 충분한 수의 연립방정식을 얻을 수 있음을 의미한다.

진동시험 과정에서 FRF측정점의 위치를 빈번히 변경하는 것보다 가진주파수를 변경하는 것이 보다 용이하기 때문에, 적당한 수의 FRF 측정점을 미리 선택하여 정한 후 가진주파수를 변화시키면서 진동응답을 측정하는 것이 보다 용이할 것이다. 예를 들어, P 개의 FRF측정점을 정하고 Q 개의 가진주파수를 선택한다면 식 (8)로부터 ($P \times Q$)개의 연립방정식을 다음식과 같이 얻을 수 있다.

$$\{X_j\} \{D_j\} = \{Y_j\} \quad (9)$$

여기서

$$X_j = -\omega_q^2 \{ \Psi_{\alpha}^T [k_{\alpha\beta}^j] \{ \bar{\Psi}_{\beta} \} \quad (10)$$

$$Y_i = A(\omega_q; x_p, y_p) + \omega_q^2 \sum_{\alpha} \frac{W_{\alpha}(x_p, y_p) W_{\alpha}(x_F, y_F)}{\Omega_{\alpha}^2 - \omega_q^2} \quad (11)$$

$$\{ \Psi_{\alpha}(x_p, y_p) \} = \left\{ \frac{W_{\alpha}(x_p, y_p)}{\Omega_{\alpha}^2 - \omega_q^2} \right\} \quad (12)$$

$$\{ \bar{\Psi}_{\beta}(x_F, y_F) \} = \left\{ \frac{W_{\beta}(x_F, y_F)}{\Omega_{\beta}^2 - \omega_q^2} \right\} \quad (13)$$

$$k_{\alpha\beta}^j = \int_{y_{D_j} - \bar{y}_j}^{y_{D_j} + \bar{y}_j} \int_{x_{D_j} - \bar{x}_j}^{x_{D_j} + \bar{x}_j} \Phi_{\alpha\beta}(x, y) dx dy \quad (14)$$

$$i = p + (q-1)P \quad (p=1, \dots, P; q=1, \dots, Q) \\ j = 1, 2, \dots, N \quad (15)$$

윗 식에서 (x_p, y_p) 는 p 번째 FRF측정점을 나타내며 ω_q 는 q 번째 가진주파수를 나타낸다. 식 (9)에서 밀첨자 j 는 j 번째 손상검출영역(damage detection zone)을 나타내며, 는 j 번째 손상검출영역에 존재하는 손상의 평균적 크기를 나타낸다. 따라서, 식 (9)의 해 D_j 를 구하는 것은 곧 구조손상의 위치와 크기를 동시에 규명하는 것을 의미한다. 따라서, 식 (9)가 본 연구에서 제안하는 새로운 손상규명 알고리즘에 해당한다.

식 (9)에 바탕을 둔 본 연구의 SDIM에서 구조손상규명을 위하여 요구하는 기본 데이터는 다음과 같다

- (1) 손상이 없는 평판의 고유진동수 (Ω_{α})
- (2) 손상이 없는 평판의 모드형상 (W_{α})
- (3) 손상이 있는 평판의 FRF (A)

손상이 없는 평판의 고유진동수와 모드형상은 진동실험으로 도출하거나 진동실험 데이터와 부합되도록 엄밀하

게 개선된 구조모델을 이용하여 해석적으로 예측할 수 있으며, FRF는 손상된 평판으로부터 직접 측정되어 제공된다.

구조손상규명 연구분야에서 아직까지 중요한 논제로서 남아있는 것이 구조손상규명 결과의 신뢰성에 관한 것이다. 구조손상 규명결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 우선적으로 신뢰성 있는 데이터가 충분히 확보되어야 한다. 제한적으로 확보 되는 소수의 저차 모드변수만을 사용할 수 밖에 없는 대부분의 모드변수 기법에서는 고차 모드변수의 누락으로 인한 오차가 불가피하다. 그러나, 식 (9)에 기초한 SDIM은 고차 모드변수의 영향이 내포되어 있는 실측된 FRF를 손상규명에 사용하기 때문에 보다 신뢰성 있는 결과를 기대할 수 있다. 또한, 식 (9)에 기초한 SDIM에서는 다수의 가진주파수와 FRF 측정점을 적절히 잘 선택함으로써[17] 구조손상규명에서 요구되는 충분한 연립방정식을 식 (9)의 형태로 유도할 수 있다.

손상된 구조물에서 직접 측정된 이너티스 FRF를 활용하여 구조손상규명을 수행하는 본 SDIM의 주요특징을 요약하면 다음과 같다. (1) 손상된 구조물의 모드변수를 전혀 필요로 하지 않는다. (2) 다수의 FRF 측정점과 가진주파수를 적절히 선택함으로써 구조손상규명에 필요한 연립방정식을 충분히 유도하는데 매우 유리하다.

4. 수치모의실험의 결과

본 연구에서 제안한 SDIM의 타당성을 검증하기 위하여 구조손상규명 수치모의실험(numerically simulated tests)을 수행하였다. 구조손상규명 수치모의실험은 먼저 소정의 구조손상이 평판에 존재하는 것으로 가정한 후 본 연구에서 제안한 SDIM을 이용하여 이들을 역으로 검출하여 규명함으로써 이루어졌다.

수치모의실험의 편의를 위하여, 식 (9)에서 요구되는 손상이 없는 평판의 고유진동수와 모드형상은 진동실험 데이터와 부합되도록 충분히 개선된 구조모델을 이용하여 해석적으로 엄밀하게 예측할 수 있다고 가정하여 본 수치모의실험에서는 이들 데이터의 오차는 무시하고, FRF데이터에만 오차가 존재한다고 가정하였다. FRF데이터는 실제 상황에서는 손상된 평판으로부터 직접 실측되지만 여기에서는 미리 가정한 손상조건을 적용하여 식 (3)과 (7)로부터 이론적으로 구하여 사용하였다. 이론적으로 구한 FRF는 당연히 이상적인 값으로써 실측과정과 신호처리과정에서 여러가지 요인에 의해 불가피하게 오염되는 FRF와는 차이가 있다. 따라서, 이러한 현실적인

상황을 감안한 수치모의실험을 수행하기 위하여 식(16)에 나타난 Thyagarajan 등[16]이 사용한 방법을 이용하여 이론적으로 구한 FRF에 랜덤오차를 반영하였다.

$$\bar{A}(x_p; \omega_q) = A(x_p; \omega_q) \left(1 + \frac{e}{100n} \sum_{k=1}^n randn_k \right) \tag{16}$$

식 (16)에서 A 는 이론적으로 구한 이상적인 FRF이고 \bar{A} 는 e %의 랜덤오차를 고려한 FRF이다. randn은 랜덤 데이터를 제공하는 MATLAB® 내부 함수이다. 본 수치모의실험에서는 랜덤오차는 통계적으로 균일하게 분포된 것으로 (즉, 평균 = 0, 편차 = 1) 가정하였다.

구조손상규명 결과의 정확도를 평가하기 위하여 수치모의실험으로 예측한 손상치와 실제의 손상치를 비교하여 손상예측 오차의 분포를 구한 후, 전체 영역에 대한 rms (root mean square) 값을 산출하였고 그 값을 본 연구에서 손상규명오차 (DIE, damage identification error)로 정의하였다.

$$DIE = \sqrt{\frac{1}{L^2} \sum_j^N 4\bar{x}_j \bar{y}_j [D_j^{Pred} - D_j^{True}]^2} \tag{17}$$

식 (17)에서 L은 정사각형 평판의 한변의 길이이고 윗첨자 'True'와 'Pred'는 실제 손상의 크기와 예측된 손상의 크기를 나타낸다. 밑첨자 j는 j-번째 손상을 나타낸다. DIE값이 영의 값에 가까울수록 예측된 손상분포가 실제의 손상분포에 가깝다는 것을 의미한다.

수치모의실험의 대상으로 선정된 평판은 네 변이 모두 단순지지된 정사각형 평판으로서 질량 $\rho = 2800 \text{ kg/m}^3$, 두께 3 mm, 한 변의 길이가 32 cm이다. 평판의 두 위치 (7cm, 25cm)와 (25cm, 7cm)에 크기가 각각 D = 0.5와 D = 0.4인 손상이 존재한다고 가정하였다. 손상된 평판의 FRF를 구하기 위하여 중심점 (16cm, 16cm)을 가진하였다.

본 수치모의실험에서는 가진주파수를 하나로 고정하고 FRF 측정점을 다수로 하는 SFMP법 (single-excitation frequency multi-measurement points method)과 가진주파수와 FRF 측정점을 모두 다수로 하는 MFMP법 (multi-excitation frequencies multi-measurement points method)을 테스트하고 그 결과를 비교하였다.

Fig. 2는 SFMP법을 이용하여 평판을 4, 16, 64, 256개로 분할하여 손상검출영역의 수를 4, 16, 64, 256개로 증

가시키면서 예측한 손상분포를 도기한 것이다. 모든 손상 검출영역의 중심점에서 측정된 FRF값이 사용되었다. 손상검출영역 수를 증가시켜감에 따라 손상이 존재하지 않

는 곳에서는 예측 손상치가 점차 감소해가는 반면에, 실제로 손상이 존재하는 위치에서의 예측 손상치는 초기에 가정했던 손상치로 정확히 수렴해가는 것을 알 수 있다.

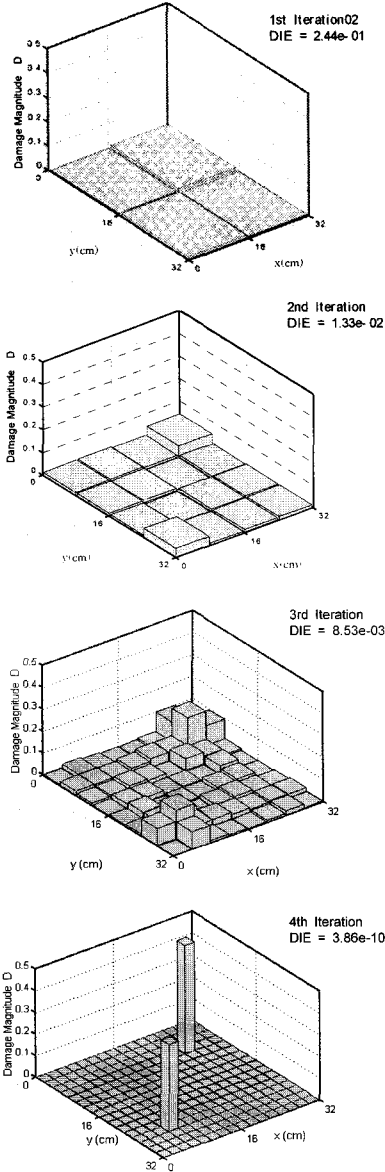


Fig. 2 Damage identification results for the simply supported plate with two local damages obtained by the single-excitation frequency multi-measurement points (SFMP) method, without noises in FRF

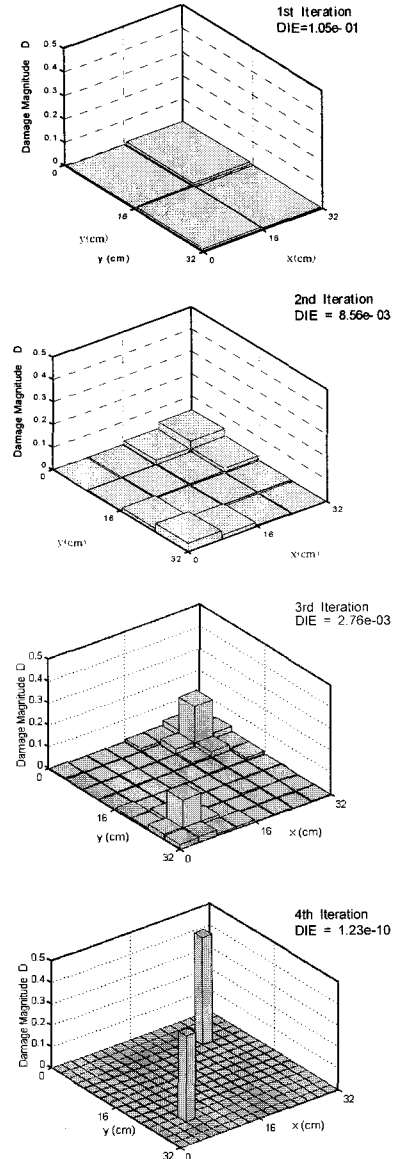


Fig. 3 Damage identification results for the simply supported plate with two local damages obtained by the multi-excitation frequencies multi-measurement points (MFMP) method, without noises in FRF

Fig. 3은 4개의 FRF 측정점을 초기 4개의 손상검출영역의 중심점으로 정하고 손상검출영역의 수를 16, 64, 256개로 증가시키며 따라 가진주파수를 4, 16, 64개로 단계적으로 증가시키는 MFMP법을 이용하여 예측한 손상 분포를 나타낸다. SFMP법을 사용한 결과(Fig. 2)와 비교할 때 동일한 손상검출영역 수에 대하여 손상규명오차(DIE)가 상대적으로 적음을 알 수 있다. 이와 유사한 수치모의실험을 다수 수행해본 결과 MFMP법이 SFMP법에 비하여 일반적으로 보다 정확한 손상규명 결과를 제공하는 것을 확인할 수 있었다. 진동 측정점의 위치를 원하는 개수 만큼 임의로 선택하는 것이 현실적으로 어려운 반면에, 몇몇 선정된 위치에서 측정된 FRF 데이터로부터 주파수 스펙트럼 성분을 원하는 개수 만큼 얻는 것은 상대적으로 용이하다. 이는 단일 주파수 스펙트럼을 사용하는 대신에 엄청난 수의 위치에서 FRF를 측정해야 하는 SFMP법에 비하여, FRF 측정점의 개수는 최소한으로 줄이면서 오히려 다수의 가진주파수 스펙트럼 값을 사용하는 MFMP법을 사용하여 구조손상규명을 하는 것이 보다 유리하다는 것을 의미한다.

Fig. 2 와 Fig. 3은 오염되지 않은 이상적인 FRF 데이터를 사용한 구조손상규명 결과이다. 따라서, 잡음 등으로 오염된 실측 FRF 데이터를 사용하는 경우 FRF 데이터의 오차가 구조손상규명 결과에 미치는 영향을 관찰할 필요가 있다.

Table 1은 FRF 데이터의 잡음(오차)이 0 %, 3 %, 5 %, 7 %인 경우에 대하여 SFMP법과 MFMP법으로 예측한 구조손상규명 결과를 보여주고 있다. FRF 데이터의 잡음이 증가함에 따라 두 방법의 구조손상규명오차(DIE)도

커짐을 알 수 있다. 잡음 등으로 오염된 FRF 데이터를 구조손상규명에 사용하는 경우에도 MFMP법이 SFMP법

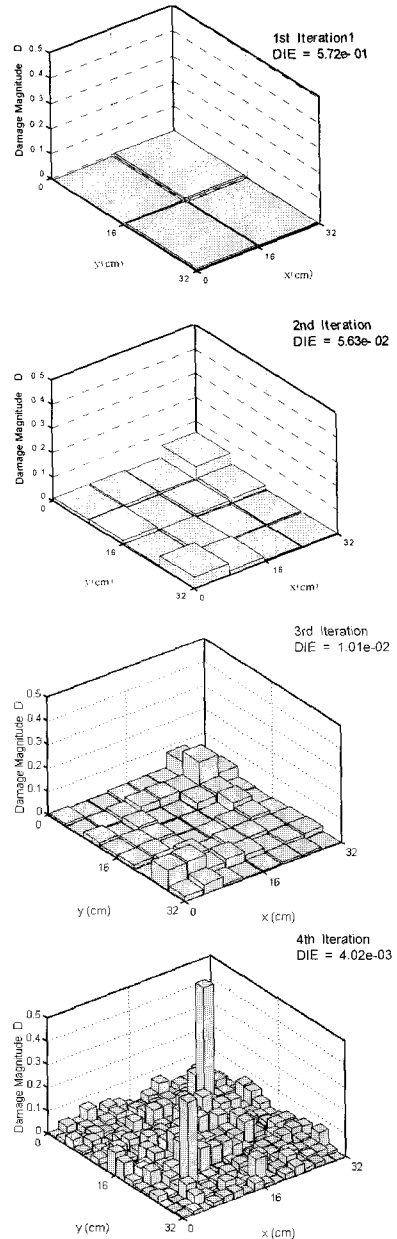


Table 1 Damage Identification Errors for the Simply-Supported Square Plate with Two Local Damages

Random noises In FRF	Damage Identification Error (DIE)	
	SFMP Method	MFMP Method
0 %	3.86e-10	1.23e-10
5 %	2.95e-03	1.82e-03
10 %	8.54e-03	5.03e-03
15 %	7.06e-02	1.01e-02
20 %	1.25e-01	6.82e-02
25 %	1.74e-01	1.43e-01
30 %	2.37e-01	1.92e-01

Fig. 4 Damage identification results for the simply supported plate with two local damages obtained by the single-excitation frequency multi-measurement points (SFMP) method, with 7 % noises in FRF

에 비하여 보다 정확한 결과를 제공함을 Table 1로부터 알 수 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 FRF 데이터에 7%의 잡음이 존재

하는 경우 SFMP법과 MFMP법을 사용하여 구한 손상구명 결과를 보여주고 있다. 이상적인 FRF 데이터를 사용한 경우의 구조손상 예측결과 (Fig. 2와 Fig. 3)와 비교할

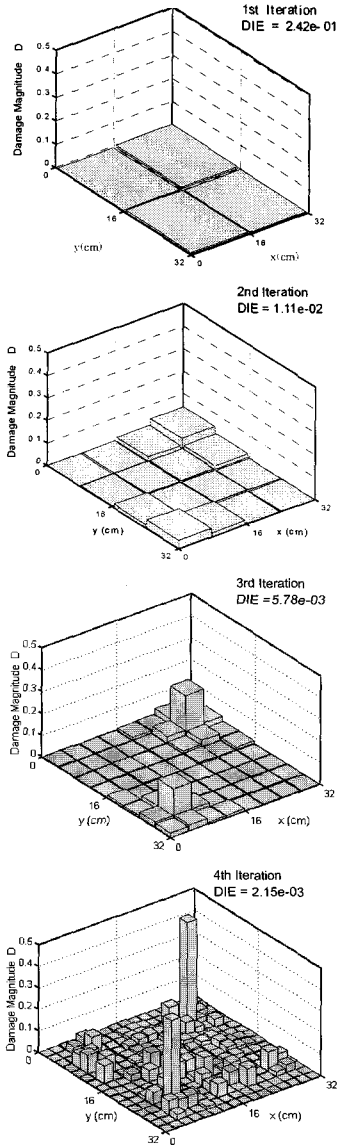


Fig. 5 Damage identification results for the simply supported plate with two local damages obtained by the multi-excitation frequency multi-measurement points (MFMP) method, with 7% noises in FRF

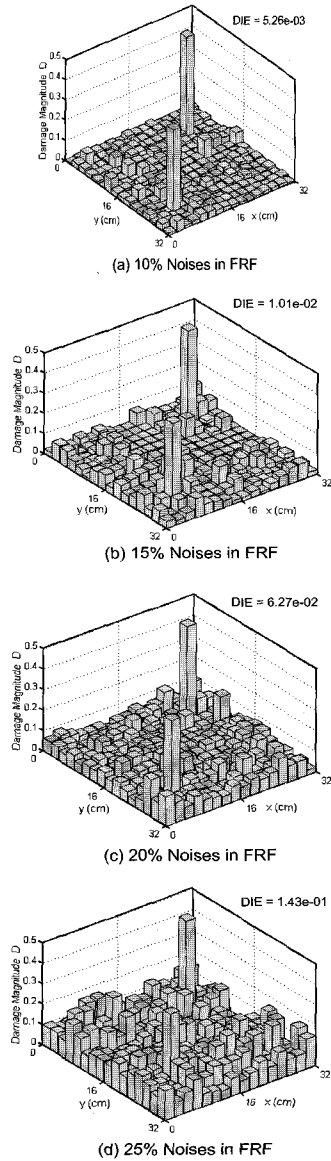


Fig. 6 Damage identification results for the simply supported plate with two local damages obtained by the multi-excitation frequency multi-measurement points (MFMP) method, with various % noises in FRF

때 손상이 존재하지 않는 영역에서 얼마간의 손상이 존재하는 것처럼 잘못 예측되고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 Fig. 6에 보인 바와 같이 FRF 데이터의 잡음이 커짐에 따라 보다 심화되지만 20%의 FRF오차까지도 미리 가정한 구조손상을 충분히 잘 구별해내고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 식(9)에서 요구되는 손상이 없는 평판의 고유진동수와 모드형상은 구조모델의 개선을 통하여 엄밀하게 구할 수 있다고 가정하였기 때문이다. 그러나, 실제상황에서는 손상이 없는 평판의 고유진동수와 모드형상을 엄밀하게 구할 수 없기 때문에 이들 데이터의 오차가 본 구조손상 규명기법의 유용성에 미치는 영향이 실험적으로 평가되어야 하며, 이에 대한 연구가 현재 본 연구진에 의해 진행되고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 실측 FRF데이터를 사용하여 구조손상 규명을 수행하기 위한 구조손상 규명기법 (SDIM)을 평판 구조물을 대상으로 소개하였다. 본 SDIM에서는 손상된 구조물에 대한 모드 데이터를 필요로 하지 않으며, FRF측정점과 가진주파수를 필요한 수만큼 적절히 선택함으로써 손상규명에 필요한 충분한 관측식을 보다 용이하게 유도할 수 있다. 본 SDIM의 유용성을 검증하기 위하여 수치모의실험을 수행하였으며, 실제상황을 감안하여 해석적으로 구한 FRF에 랜덤오차를 반영하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 손상검출영역의 수를 증가시키기에 따라 보다 엄밀한 손상규명 결과를 준다.
- (2) FRF측정점의 개수는 줄이면서 다수의 가진주파수를 사용하는 방법이 보다 유리하다.
- (3) FRF데이터의 오차의 증가로 손상규명 결과의 정확성이 저하되나, 본 연구에서 다룬 문제의 경우 20% FRF오차까지도 손상영역을 분명히 구별할 수 있는 정도의 신뢰성 있는 결과를 주었다.
- (4) 본 연구에서 제시한 SDIM의 응용 가능성을 이론 해석적으로 검증하였다. 본 연구결과의 실험적 검증을 위한 연구가 본 연구진에 의해 현재 진행되고 있다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-2-30400-004-3) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] S. W. Doebbling, C. R. Farrar, and M. B. Prime, A Summary Review of Vibration-based Damage Identification Method, *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 30, No. 2, pp. 91-105, (1998)
- [2] A. K. Pandey, M. Biswas, and M. M. Samman, Damage detection from Changes in Curvature Mode Shapes, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 145, No. 2, pp. 321-332, (1991)
- [3] H. Luo, and S. Hanagud, An Integral Equation for Changes in the Structural Dynamics Characteristics of Damaged Structures, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 34, No. 35/36, pp. 4557-4579, (1997)
- [4] S. Hassiotis, Identification of Damage Using Natural Frequencies and Markov Parameters, *Computers & Structures*, Vol. 74, pp. 365-373, (2000)
- [5] P. Cornwell, S. W. Doebbling, and C. R. Farrar, Application of the Strain Energy Damage Detection Method to Plate-like Structures, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 224, No. 2, pp. 359-374, (1999)
- [6] J. S. Lew, Using Transfer Function Parameter Changes for Damage Detection of Structures, *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 11, pp. 2189-2193, (1995)
- [7] A. K. Pandey, and M. Biswas, Damage Diagnosis of Truss Structures by Estimation of Flexibility Change, *International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis*, Vol. 10, No. 2, pp. 104-117, (1995)
- [8] J. M. Ricles, and J. B. Kosmatka, Damage Detection in Elastic Structures Using Vibratory Residual Forces and Weighted Sensitivity, *AIAA Journal*, Vol. 30, No. 9, pp. 2310-2316, (1992)
- [9] B. S. Wong, T. C. Guan, and L. M. King, Mechanical Impedance Inspection of Composite Structures, *British Journal of NDT*, Vol. 35, pp. 3-9, (1993)
- [10] Z. Wang, R. M. Lin, and M. K. Lim, Structural Damage Detection Using Measured FRF Data, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 147, pp. 187-197, (1997)
- [11] H. T. Banks, D. J. Inman, D. J. Leo, and Y. Wang,

- An Experimentally Validated Damage Detection Theory in Smart Structures, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 191, No. 5, pp. 859-880, (1996)
- [12] M. M. F. Yuen, A Numerical Study of the Eigenparameters of a Damaged Cantilever, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 103, pp. 301-310, (1985)
- [13] U. Lee, J. Chang, and N. Kim, Structural Micro-Damage Identification, AIAA pp. 2000-1503, (2000)
- [14] Y. Y. Yu, *Vibration of Elastic Plates*, Springer-Verlag, New York, (1996)
- [15] D. J. Ewin, *Modal Testing: Theory and Practice*, Research Studies Press Ltd., Hertfordshire, (1984)
- [16] S. K. Thyagarajan, M. J. Schulz, and P.,F. Pai, Detecting Structural Damage Using Frequency Response Functions, *Journal of Sound and Vibration* 1998; 210(1): 162-170.
- [17] U. Lee and N. Kim, Dynamics of Damaged Plates, AIAA Paper 2001-1391, (2001)