

스펙트럴요소 모델을 이용한 구조손상규명 Structural Damage Identification by Using Spectral Element Model

민승규* 김정수* 이우식**
Seunggyu Min Jungsoo Kim Usik Lee

ABSTRACT

This paper introduces a frequency-domain method of structural damage identification. It is formulated in a general form to include the nonlinearity of damage magnitudes from the dynamic stiffness equation of motion for a beam structure. The appealing features of the present damage identification method are: (1) it requires only the frequency response functions measured from damaged structure as the input data, and (2) it can locate and quantify many local damages at the same time. The feasibility of the present damage identification method is tested through some numerically simulated damage identification analyses for a cantilevered beam with three piece-wise uniform damages.

1. 서 론

구조물 내부에 미세한 손상이 생기게 되면 구조물의 동적특성이 달라지게 된다. 즉 고유진동수(natural frequency), 모우드 형상(mode shape), 모우드 감쇠(mode damping), 동적응답(dynamic response) 등이 변화하게 되는데 이러한 사실을 이용하여 손상의 위치와 크기를 탐지할 수 있다. 따라서 이와 관련되어 많은 구조손상 검출기법(SDIM) 등이 문헌에 소개되고 있다.

현재의 구조손상검출기법들은 사용하는 데이터에 의해 고유진동수(natural frequency),⁽¹⁾ 모우드 형상(mode shape),⁽²⁾ 감쇠비(damping ratios)⁽³⁾ 와 같은 모우드 변수, 탄성변형 에너지(strain energy),⁽⁴⁾ 전달함수 매개변수(transfer function parameters),⁽⁵⁾ 유연도 행렬(flexibility matrix),⁽⁶⁾ 잉여 힘(residual force),⁽⁷⁾ 파형특성(wave characteristics),⁽⁸⁾ 기계적 임피던스(mechanical impedances),⁽⁹⁾ 그리고 주파수응답 데이터(FRF data)⁽¹⁰⁾ 등으로 분류된다.

Banks 등⁽¹¹⁾에 의하면 모우드 데이터를 근간으로 하는 구조손상 검출기법은 모우드 데이터가 간접적으로 측정된 것이고 측정 오차와 모우드 적출 오차에 의해 영향을 받는 단점이 있다. 또한, 유한요소법(FEM)을 근간으로 하는 고유치문제를 이용한 구조손상 검출기법이 있는데 고주파 영역에서 만족할만한 동적해를 얻기 위해서는 매우 미세한 요소로 구조물을 분할해야 하는 결점이 있다.

모우드 데이터와 유한요소모델은 각각 FRF 데이터와 스펙트럴요소모델(spectral element model)로 대체할 수 있다. FRF 데이터는 구조로부터 직접 측정되어 모우드 적출 오차가 없기 때문에 모우드 데이터 보다 신뢰성이 높다. 또한 모우드 데이터는 공진 주위에 매우 한정된 FRF 데이터로부터 추출한 것이므로 FRF 데이터가 모우드 데이터 보다 원하는 주파수 영역에서 더 많은 손상정보를 제공하는 것이다.⁽¹²⁾ 일반 유한요소법(FEM)과 비교하여 스펙트럴요소법(SEM)은 매우 정확한 동적해를 제공하기 때문에 엄밀한 해석기법에 해당한다.^{(13),(14)} 스펙트럴요소법에서 사용하는 스펙트럴요소행렬은 지배방정식과 경계조건을 모두 만족하는 형상함수를 사용하여 엄격하게 유도된 주파수의 함수인 동적요소강성행렬(dynamic element stiffness matrix)이다. 동적요소강성행렬은 전체 구조물에 대한 동적강성행렬(dynamic stiffness matrix)을 유도하기 위하여 일반 FEM에서 사용하는 조립(assembly)기법에 따라 조립할 수 있다. 기존의 연구⁽¹⁵⁾에서는 손상의 크기가 작다는 가정하에 손상의 크기에 대한 고차항을 무시하여 선형화된 구조손상 알고리즘을 사용하였다. 이로 인하여 유효 균일손상크기의 오차가

* 인하대학교 기계공학과 석사과정

** 정회원, 인하대학교 기계공학과 교수

발생하였다. 따라서, 본 논문에서는 손상의 크기에 대한 고차 비선형항을 무시하지 않고 반영하여 새로운 구조손상규명 알고리즘을 유도하고, 이를 보 구조물에 적용하여 성능을 평가하였다.

2. 손상검출 알고리즘

손상이 없는 구조물의 동역학은 다음과 같이 표현할 수 있다⁽¹⁴⁾.

$$[\mathbf{S}(\omega)]\{\mathbf{U}(\omega)\} = \{\mathbf{P}(\omega)\} \quad (1)$$

여기서 $[\mathbf{S}]$ 는 손상이 없는 구조물의 동적강성행렬이고 주파수의 함수이다. $\{\mathbf{U}\}$ 는 손상이 없는 구조물의 절점자유도(modal DOFs) 벡터의 스펙트럴 성분이고, 벡터 $\{\mathbf{P}\}$ 는 외부에서 가해지는 절점력(modal forces) 벡터의 스펙트럴 성분이다.

동일한 구조물에 손상이 있고, 식(1)에서와 같은 절점력이 작용한다고 가정할 때 손상된 구조물의 동역학은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$[\bar{\mathbf{S}}(\omega)]\{\bar{\mathbf{U}}(\omega)\} = \{\mathbf{P}(\omega)\} \quad (2)$$

여기서 $[\bar{\mathbf{S}}]$ 는 손상된 구조물의 동적강성행렬이고 $\{\bar{\mathbf{U}}\}$ 는 손상된 구조물의 절점자유도 벡터이다.

손상이 없는 구조물의 구조모델을 나타내는 $[\mathbf{S}]$ 는 실험으로 측정된 진동 데이터와 해석적으로 구한 진동데이터가 일치하도록 이미 개선되었다고 가정하면 식(1)의 행렬 $[\mathbf{S}]$ 는 이미 알고 있는 값에 해당한다. 또한 절점자유도 벡터 $\{\bar{\mathbf{U}}\}$ 도 손상된 구조물로부터 직접 측정하였기 때문에 알고 있는 값이다. 그러나 손상 상태의 동적강성행렬 $[\bar{\mathbf{S}}]$ 는 현재의 손상 상태에 따라 결정되기 때문에 모르는 값에 해당한다. 행렬 $[\bar{\mathbf{S}}]$ 는 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$[\bar{\mathbf{S}}(\omega)] = [\mathbf{S}(\omega)] + [\Delta\mathbf{S}(\omega)] \quad (3)$$

여기서 $[\Delta\mathbf{S}]$ 는 손상에 의해 발생된 섭동 동적강성행렬이다. 식(3)을 식(2)에 대입하면 다음과 같다.

$$\{\mathbf{P}(\omega)\} - [\mathbf{S}(\omega)]\{\bar{\mathbf{U}}(\omega)\} = [\Delta\mathbf{S}(\omega)]\{\bar{\mathbf{U}}(\omega)\} \quad (4)$$

절점력 벡터 $\{\mathbf{P}\}$ 는 다음과 같이 부벡터로 표현할 수 있다.

$$\{\mathbf{P}(\omega)\} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_m(\omega) \\ \mathbf{P}_s(\omega) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{F}(\omega) \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서 $\{\mathbf{0}\}$ 은 영벡터이다. 식(5)와 같은 방법으로 벡터 $\{\bar{\mathbf{U}}\}$ 는 계속 존속하는 주절점자유도(master nodal DOFs) $\{\bar{\mathbf{U}}_m\}$ 와 절점자유도의 수를 축소하기 위해 제거되는 부절점자유도(slave nodal DOFs) $\{\bar{\mathbf{U}}_s\}$ 로 분리하여 표현할 수 있다.

$$\{\bar{\mathbf{U}}(\omega)\} = \begin{Bmatrix} \bar{\mathbf{U}}_m(\omega) \\ \bar{\mathbf{U}}_s(\omega) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

유사하게 행렬 $[\mathbf{S}]$ 와 $[\bar{\mathbf{S}}]$ 도 부행렬로 표현할 수 있다. 식(5)와 식(6)을 식(2)에 대입하면 벡터 $\{\bar{\mathbf{U}}\}$ 와 벡터 $\{\bar{\mathbf{U}}_m\}$ 사이의 관계를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\{\bar{\mathbf{U}}(\omega)\} = [\bar{\mathbf{T}}(\omega)]\{\bar{\mathbf{U}}_m(\omega)\} \quad (7)$$

여기서

$$[\bar{\mathbf{T}}(\omega)] = [\mathbf{T}(\omega)] + [\Delta\mathbf{T}(\omega)] \quad (8)$$

$$[\Delta \mathbf{T}(\omega)] = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \Delta t(\omega) \end{bmatrix} \quad (9)$$

식(7)을 식(4)에 대입하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\{\mathbf{F}(\omega)\} - [\mathbf{X}(\omega)]\{\bar{\mathbf{U}}_m(\omega)\} = [\mathbf{Y}(\omega)]\{\bar{\mathbf{U}}_m(\omega)\} \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} [\mathbf{X}(\omega)] &= [\mathbf{S}_{mm}] - [\mathbf{S}_{ms}][\mathbf{S}_{ss}]^{-1}[\mathbf{S}_{sm}] \\ [\mathbf{Y}(\omega)] &= ([\mathbf{S}_{ms}] + [\Delta \mathbf{S}_{ms}])\{[\mathbf{S}_{ss}]^{-1}[\Delta \mathbf{S}_{ss}]\}([\mathbf{S}_{ss}] + [\Delta \mathbf{S}_{ss}])^{-1}([\mathbf{S}_{sm}] + [\Delta \mathbf{S}_{sm}]) \\ &\quad - ([\mathbf{S}_{ms}] + [\Delta \mathbf{S}_{ms}])[\mathbf{S}_{ss}]^{-1}[\Delta \mathbf{S}_{sm}] + [\Delta \mathbf{S}_{mm}] - [\Delta \mathbf{S}_{ms}][\mathbf{S}_{ss}]^{-1}[\mathbf{S}_{sm}] \end{aligned} \quad (11)$$

선행되어진 연구⁽¹⁵⁾에서는 식(11)의 섭동 동적강성행렬에 들어가는 유효 균일손상크기가 작기 때문에 고차항을 무시하여

$$[\mathbf{Y}(\omega)] \cong [\mathbf{T}]^T [\Delta \mathbf{S}] [\mathbf{T}] \quad (12)$$

형태로 정리 하였으며, 이를 가지고 구조손상 알고리즘을 유도하였다.

손상의 효과는 섭동 동적강성행렬 $[\Delta \mathbf{S}]$ 에 의해 식(10)의 오른쪽 항에서 나타나고 식(10)을 이너턴스(inertia) FRF $\{\mathbf{A}_m\}$ 로 표현하면 다음과 같다.

$$\{\delta\} + \frac{1}{\omega^2} [\mathbf{X}(\omega)]\{\mathbf{A}_m(\omega)\} = -\frac{1}{\omega^2} ([\mathbf{Y}(\omega)]_{\text{approx}} + [\mathbf{H}(\omega)])\{\mathbf{A}_m(\omega)\} \quad (13)$$

여기서

$$\begin{aligned} [\mathbf{Y}(\omega)]_{\text{approx}} &= [\mathbf{S}_{ms}][\mathbf{S}_{ss}]^{-1}[\Delta \mathbf{S}_{ss}][\mathbf{S}_{ss}]^{-1}[\mathbf{S}_{sm}] - [\mathbf{S}_{ms}][\mathbf{S}_{ss}]^{-1}[\Delta \mathbf{S}_{sm}] \\ &\quad + [\Delta \mathbf{S}_{mm}] - [\Delta \mathbf{S}_{ms}][\mathbf{S}_{ss}]^{-1}[\mathbf{S}_{sm}] \end{aligned} \quad (14)$$

$$[\mathbf{H}(\omega)] = [\mathbf{Y}(\omega)] - [\mathbf{Y}(\omega)]_{\text{approx}}$$

$\{\delta\}$ 는 절점력 위치벡터이고 절점력이 작용하는 요소에서만 1의 값을 갖는다.

손상이 없는 구조물 전체에 대한 동적강성행렬은 다음과 같이 동적요소강성행렬을 조합하여 구성할 수 있다.

$$[\mathbf{S}(\omega)] = \sum_{k=1}^N [\mathbf{L}_k]^T [\mathbf{s}_k(\omega)] [\mathbf{L}_k] \quad (15)$$

여기서 N 은 유한요소의 갯수이고 $[\mathbf{s}_k]$ 는 k 번째 요소의 동적요소강성행렬이다. 행렬 $[\mathbf{L}_k]$ 는 조합할 때에 $[\mathbf{s}_k]$ 의 요소를 $[\mathbf{S}]$ 에 위치시켜주는 행렬이다. 이와 마찬가지로 섭동 동적강성행렬 $[\Delta \mathbf{S}]$ 도 식(14)와 같은 형태로 조합하여 구할 수 있다.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 비 균일한 손상을 내재한 작은 유한구조요소는 균일한 손상을 갖고 있는 유효(effective) 유한구조요소로 표현할 수 있다. 그리고 섭동 행렬 $[\Delta \mathbf{s}_k]$ 은 다음과 같이 $[\mathbf{s}_k]$ 와 연관 지어 근사화 할 수 있다.

$$[\Delta \mathbf{s}_k(\omega)] \cong D_k [\mathbf{s}_k(\omega = 0)] = -D_k [\mathbf{k}_k] \quad (16)$$

여기서 D_k 는 k 번째 요소에 균일하게 분포된 유효손상크기이고, $[\mathbf{k}_k]$ 는 k 번째 요소에서 일반 FEM에서의 강성행렬이다.

식(11b), 식(14) 및 식(16)을 이용하여, 식(13)의 오른쪽 항은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$-\frac{1}{\omega^2}([\mathbf{Y}(\omega)] + [\mathbf{H}(\omega)])\{\mathbf{A}_m(\omega)\} = [\Phi(\omega)]\{\mathbf{D}\} + \{\mathbf{R}(\omega)\} \quad (17)$$

여기서

$$\begin{aligned} [\Phi(\omega)] &= [\varphi_1(\omega) \quad \varphi_2(\omega) \quad \dots \quad \varphi_N(\omega)] \\ \{\mathbf{D}\} &= \{\mathbf{D}_1 \quad \mathbf{D}_2 \quad \dots \quad \mathbf{D}_N\}^T \\ \{\mathbf{R}(\omega)\} &= -\frac{1}{\omega^2}[\mathbf{H}(\omega)]\{\mathbf{A}_m\} \\ \{\varphi_k(\omega)\} &= -\frac{1}{\omega^2}([\mathbf{L}_k][\mathbf{T}(\omega)])^T[\mathbf{k}_k(\omega)]([\mathbf{L}_k][\mathbf{T}(\omega)])\{\mathbf{A}_m(\omega)\} \end{aligned} \quad (18)$$

식(13)과 식(17)을 통하여, 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$[\Phi(\omega)]\{\mathbf{D}\} = \{\mathbf{B}(\omega)\} - \{\mathbf{R}(\omega)\} \quad (19)$$

여기서

$$\{\mathbf{B}(\omega)\} = \{\delta\} + \frac{1}{\omega^2}[\mathbf{X}(\omega)]\{\mathbf{A}_m(\omega)\} \quad (20)$$

$\{\mathbf{R}\}$ 는 주파수의 함수임과 동시에 우리가 구하고자 하는 $\{\mathbf{D}\}$ 의 함수이다. 따라서 식(19)는 $\{\mathbf{D}\}$ 에 대한 비선형식이다. 위식을 풀기 위해서 일종의 직접 반복법(direct iteration method)을 사용하였는데 $\{\mathbf{R}\}$ 에 선형식에서 구한 $\{\mathbf{D}\}$ 를 초기값으로 주고 선형식처럼 해를 반복하여 구하였다.

3. 보구조물에 적용

3.1. 유효손상크기

Fig. 1(a)에서 보듯이 국부손상이 유한 요소소에 내재되어 있다고 가정한다. 대부분의 실제적인 경우에는 손상의 위치, 기하학적 형상, 그리고 크기를 사전에 모르기 때문에 손상영역의 강성을 명확하게 표현할 수 없다. 그래서 Fig. 1(b)에서 보듯 간단하면서도 합리적인 방법의 하나로서 손상의 존재를 다음과 같이 영률(Young's modulus)의 감소로서 표현할 수 있다.

$$\bar{E} = E(1-D) \quad (21)$$

여기서 E 와 \bar{E} 는 각각 손상이 없는 상태와 손상된 상태의 영률이고, D 는 요소 전체에 균일하게 분포된 유효손상크기이다. D 가 0인 경우는 손상이 없는 상태를 의미하고, D 가 1인 경우는 손상에 의한 재료의 완전파괴를 의미한다.

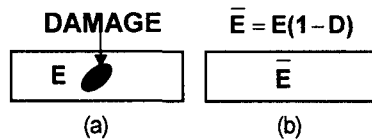


Fig. 1 A finite structure element with damage: (a) true damage state, and (b) its equivalent representation

3.2. 동적요소강성행렬

손상이 없는 유한 베루누이-오일러 보요소의 동적요소강성행렬은 다음과 같다.⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾

$$[\mathbf{s}(\omega)] = \frac{\kappa EI}{\mathbf{Ch} \cdot \mathbf{c} - 1} \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1 & \mathbf{s}_2 \\ \mathbf{s}_2^T & \mathbf{s}_3 \end{bmatrix} \quad (22)$$

또한

$$\begin{aligned} [\mathbf{s}_1] &= \begin{bmatrix} -\kappa^2(\mathbf{Ch} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{Sh} \cdot \mathbf{c}) & -\kappa \cdot \mathbf{Sh} \cdot \mathbf{s} \\ -\kappa \cdot \mathbf{Sh} \cdot \mathbf{s} & -(\mathbf{Ch} \cdot \mathbf{s} - \mathbf{Sh} \cdot \mathbf{c}) \end{bmatrix} \\ [\mathbf{s}_2] &= \begin{bmatrix} \kappa^2(\mathbf{Sh} + \mathbf{s}) & -\kappa(\mathbf{Ch} - \mathbf{c}) \\ \kappa(\mathbf{Ch} - \mathbf{c}) & -(\mathbf{Sh} - \mathbf{s}) \end{bmatrix} \\ [\mathbf{s}_3] &= \begin{bmatrix} -\kappa^2(\mathbf{Ch} \cdot \mathbf{s} + \mathbf{Sh} \cdot \mathbf{c}) & \kappa \cdot \mathbf{Sh} \cdot \mathbf{s} \\ \kappa \cdot \mathbf{Sh} \cdot \mathbf{s} & -(\mathbf{Ch} \cdot \mathbf{s} - \mathbf{Sh} \cdot \mathbf{c}) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 EI 보의 굽힘강성(bending stiffness)이고 κ 는 파수이다. 손상된 베루누이-오일러 보요소의 동적요소 강성행렬은 식(21)의 E를 $\bar{E}=E(1-D)$ 로 교체하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\bar{\mathbf{s}}(\omega; \mathbf{D})] = [\mathbf{s}(\omega)]_{\mathbf{E}=\bar{\mathbf{E}}} \quad (24)$$

$[\bar{\mathbf{s}}]$ 로부터 $[\mathbf{s}]$ 를 매면 엄밀한 섭동 동적요소강성행렬을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\Delta \mathbf{s}(\omega)]_{\text{exact}} = [\bar{\mathbf{s}}(\omega)] - [\mathbf{s}(\omega)] \quad (25)$$

$[\Delta \mathbf{s}]_{\text{exact}}$ 를 D에 관하여 테일러급수(Taylor series)로 전개하고 고차항을 소거하면 근사화된 섭동 동적요소 강성행렬을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$[\Delta \mathbf{s}(\omega)]_{\text{approx}} \cong \mathbf{D} [\mathbf{s}(\omega = 0)] = -\mathbf{D} [\mathbf{k}] \quad (26)$$

여기서 $[\mathbf{k}]$ 는 베루누이-오일러 보에 대한 일반 유한요소강성행렬을 나타낸다.

4. 수치해석검증

구조손상검출 알고리즘의 타당성을 수치해석 기법을 이용하여 검증하였다. 이를 위해 손상을 보에 미리 한정했고, 본 구조손상 검출기법에 의해 역해석하였다. Fig. 2는 타당성 검사를 위해 외팔보에 고려한 세계의 구분된 균일손상의 위치 및 크기를 보여준다. 빔의 길이 L은 0.4m로서 동일한 81개의 요소로 나누었고, 14번째 41번째 그리고 68번째 요소에 각각 0.4, 0.5, 0.3의 유효 균일손상크기를 주었다. 보의 굽힘강성 EI는 $14.6N \cdot m^2$ 이며, 길이 당 질량밀도 ρA 는 $0.275kg/m$ 이다. 수치해석 손상검출은 해석적으로 구한 이너턴스 FRF를 사용하였다.

Table 1은 손상이 없는 보와 손상이 포함되어있는 보의 고유진동수를 나타내 준다. 유한요소행렬을 사용하는 대신 엄밀한 동적해를 주는 스펙트럴요소를 사용하였기에 정확한 고유진동수를 제공한다. 일반적으로 손상이 있는 경우 영률이 감소되므로 손상이 생기게 되면 고유진동수가 떨어지는 경향이 있다.

Fig. 3 은 구조손상검출 알고리즘의 순서도를 나타낸다. 일종의 직접반복법인 본 알고리즘은 비선형식에서 초기값의 중요성을 고려하여 선형식의 형태에서 손상의 위치와 크기를 구해주고 이를 초기값으로 하여 비선형식을 풀게 하였다. 여기서 먼저 나온 값과 비교하여 그 크기가 일정 값보다 클 경우 다시 보정식에 돌려보내 위의 과정을 반복하게 한다. 이때 수렴도는 다음과 같이 제곱평균제곱근(RMS, root mean square)으로 정의한 ε 값으로 판단한다.

$$\varepsilon \equiv \sqrt{\frac{1}{N} \sum_k^N (D_k^{i+1} - D_k^i)^2} \quad (27)$$

여기서 N은 총요소 수이고 D_k 는 k 번째 보 요소의 유효손상크기이며, 첫 첨자 i+1 과 i는 반복법에 의해 해당 요소에서 구한 유효손상크기의 전후 값이다. ε 이 작을수록 반복법의 결과가 발산하지 않고 수렴해감을 나타낸다. 본 논문에서는 ε 값이 10^5 보다 작을 경우 수렴한 것으로 판단하여 반복과정을 마치고라고 정하였다.

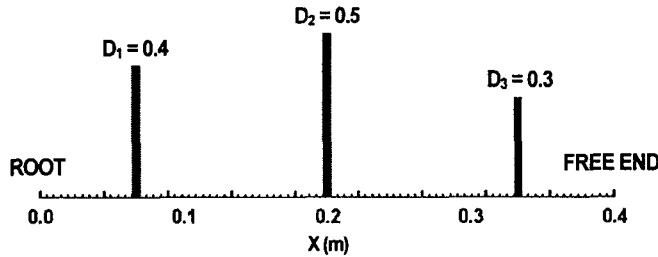


Fig. 2 A cantilevered beam with three piece-wise uniform damages considered for numerically simulated damage identification tests

Fig. 4는 첫번째 고유진동수 근처의 값인 25 Hz로 주파수를 선정했을 경우, 반복법을 실행시킬 때 마다 세개의 구분된 균일 손상의 유효손상크기를 나타내 준다. 유효손상크기가 작을수록 수렴속도가 빠르며 진동하면서 발산하지 않고 수렴해간다.

Fig. 5는 반복시킬 때마다의 ε 을 나타내 주며, 값이 발산하거나 진동하지 않고 점차 안정적으로 수렴해간다.

Table 1 Natural frequencies of the damaged beam

Beams	Natural Frequencies (Hz)							
	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th
Intact	25.7038	161.0829	451.0370	883.8526	1461.0717	2182.5881	3048.4082	4058.5316
Damaged	25.3846	157.1781	449.5456	865.2243	1442.4510	2136.5882	3038.4482	4012.2098
%Decrease	1.24	2.42	0.33	2.10	1.27	2.10	0.32	1.14

본 연구에서 실제 손상값에 대한 예상된 손상값의 정확성은 다음과 같이 정의한 손상 검출오차(DIE, damage identification error)로써 평가한다.

$$DIE \equiv \sqrt{\frac{1}{L} \sum_j^N l_j (D_j^{Pred} - D_j^{True})^2} \quad (28)$$

여기서 L은 보의 총길이이고, D_j 는 길이가 l_j 인 보 요소의 유효손상크기이며 첫 첨자 'True'와 'Pred'는 각각 실제 손상과 예상 손상을 의미한다. 손상검출오차 DIE 값이 작을수록 예상된 손상이 실제 값에 가까워진다는 것을 나타낸다. Fig. 6은 반복시킬 때마다의 손상검출오차 DIE 를 나타내 주며, 그 값이 정확하게 수렴해감을 알 수 있다.

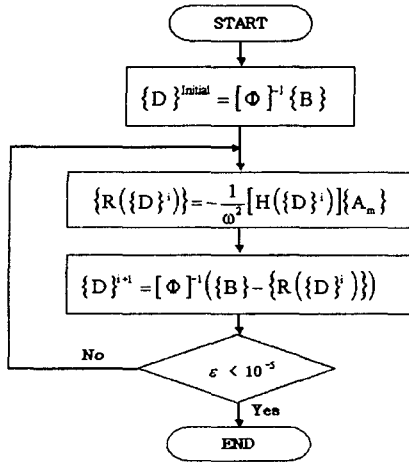


Fig. 3 Flowchart of the present SDIM

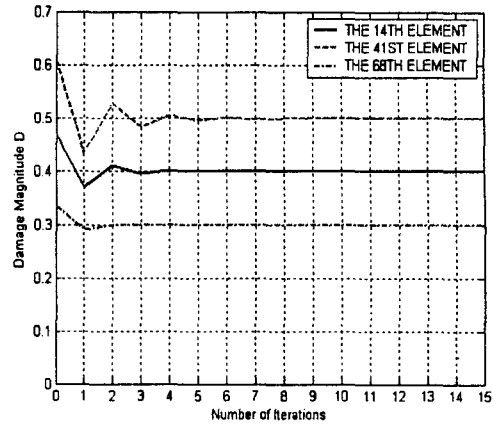


Fig. 4 Damage magnitudes of the 14th, 41st and, 68th elements

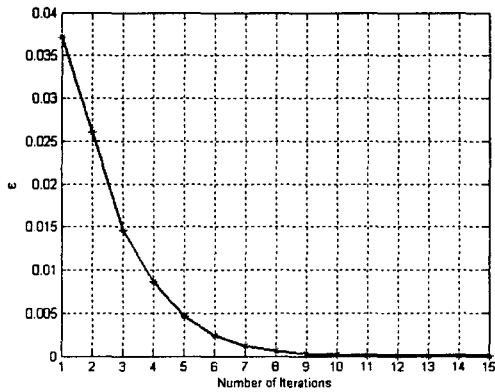


Fig. 5 Convergence of damage magnitudes vs. the number of iteration

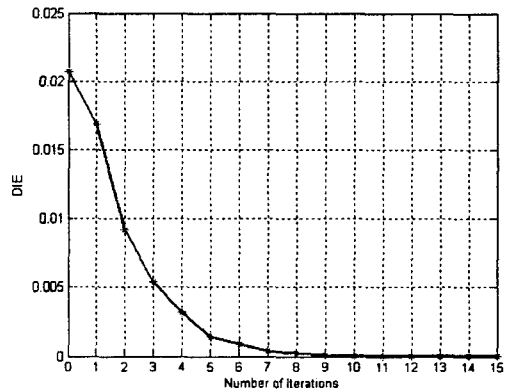


Fig. 6 Damage identification errors vs. the number of iteration

Table 2 에서는 유효 균일손상크기와 ϵ 그리고 손상검출오차 DIE 를 수치적으로 보여주고 있다. 반복법을 실행시키는 과정 중 ϵ 이 15 번째에서 5.31×10^{-6} 으로써 10^{-5} 보다 작아지므로 수렴한 것으로 판단하였음을 알 수 있다.

선형식에서 구한 유효 균일손상의 위치와 크기를 본 손상검출식에 초기치 형태로 주었을 경우 Fig. 7 과 같은 최종 결과를 얻게 된다.

Table 2 Damage identification results

Iteration	Identified Damage Magnitude			ϵ ($\times 10^3$)	DIE (DIE $\times 10^3$)
	D_1	D_2	D_3		
Initial	0.469	0.612	0.335	-	20.735
1st	0.371	0.435	0.293	37.106	16.958
2nd	0.410	0.530	0.300	26.035	9.144
3rd	0.396	0.485	0.300	14.516	5.402
7th	0.400	0.499	0.300	1.280	0.381
15th	0.400	0.500	0.300	0.00531	0.00169

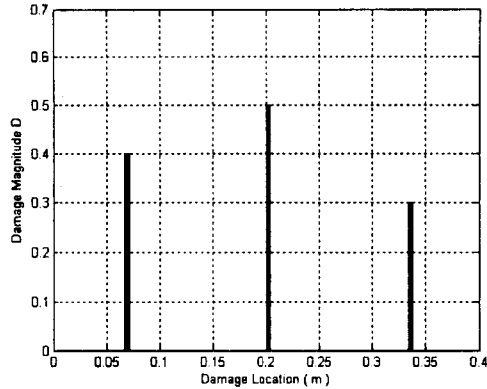


Fig. 7 Damage identification results after 15 iterations

6. 결 론

FRF와 엄밀한 동적강성행렬의 장점을 이용한 구조손상검출의 주파수 영역기법은 동적강성행렬식으로 표현된 구조물의 운동방정식으로부터 유도하였고, 이를 보구조물에 적용하였다. 본 손상검출기법의 타당성을 수치해석 손상검출을 통하여 검증하였다. 수치적으로 구한 FRF를 사용하여 손상의 위치와 크기가 정확히 검출되고 있음을 확인하였다.

참고 문헌

1. R. D. Adams, P. Cawley, C. J. Pye and B. J. Stone, "A Vibration Technique for Non-destructively Assessing The Integrity of Structures," *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 20, No. 2, 1978, pp. 93~100.
2. C. Cempel, H. G. Matkern, and A. Ziolkowski, "Application of Transformed Normal Modes for Damage Location in Structures," *Structural Integrity Assessment (Ed. P. Stanley)*, Oxford, Elsevier, 1992, pp. 246~255.
3. S. F. Griffin and C. T. Sun, "Health Monitoring of Dump And Smart Structures," *Proceeding of the 28th Annual Technical Meeting of SES*, 1991.
4. P. Cornwell, S. W. Doebling 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, 1999, pp. 359~374.
5. J. S. Lew, "Using Transfer Function Parameter Changes for Damage Detection of Structures," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 11, 1995, pp. 2189~2193.
6. 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, 1995, pp. 104~117.
7. 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, 1992, pp. 2310~2316.
8. K. T. Feroz and S. O. Oyadiji, "Damage Detection in Rods Using Wave Propagation And Regression Analysis," *Proceedings of the 1999 ASME Design Engineering Technical Conference*, 1999.
9. B. S. Wong, T. C. Guan and L. M. King, "Mechanical Impedance Inspection of Composite Structures," *British Journal of NDT* 35, 1993, pp. 3~9.
10. S. K. Thyagarajan, M. J. Schulz and P. F. Pai, "Detecting Structural Damage Using Frequency Response Functions," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 210, No. 1, 1998, pp. 162~170.
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, 1996, pp. 859~880.
12. 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, 1997, pp. 187~197.
13. J. F. Doyle, *Wave Propagation in Structures: Spectral Analysis Using Fast Discrete Fourier Transforms*, New York, 1997, p. 320.
14. U. Lee, J. Kim and A. Y. T. Leung, "The Spectral Element Method in Structural Dynamics," *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 32, No. 6, 2000, pp. 451~465.
15. U. Lee and J. Shin, "A Frequency-Domain Method of Structural Damage Identification Formulated from The Dynamic Stiffness Equation of Motion," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 257, No. 4, 2002, pp. 615~634.